

Modelagem de determinação da evapotranspiração real para o bioma.

Kleber Renato da Paixão Ataíde¹
Gustavo Macedo de Mello Baptista²

¹Instituto Nacional de Meteorologia - INMET
Caixa Postal 00242. CEP 70680-900 - Brasília - DF, Brasil
kleber.ataide@inmet.gov.br

²Universidade de Brasília - UnB
Caixa Postal 04465. CEP 70919-970 - Brasília - DF, Brasil
gmbaptista@unb.br

Abstract. This study presents the development of a nonlinear model to estimate actual evapotranspiration (ETR), using the normalized difference vegetation index (NDVI) and global solar radiation (RG), obtained by remote sensing for the Cerrado Brazil, using MODIS images with a spatial resolution of 500 meters, to estimate daily ETR in 32 meteorological stations and compared with ETR (obtained by the method of Thornthwaite and Mather (1955)) in each of the stations for four years (2007-2010). The model presented is sensitive to seasonal variation, with $R^2 = 0.8680$ and root mean squared error (MSE) equal to 0.00384.

Keywords: Evapotranspiration, vegetation index, global solar radiation, nonlinear models.

Palavras-chave: Evapotranspiração, índice de vegetação, Radiação solar global, modelos não lineares.

1. Introdução

O uso de água pelas plantas se faz necessário para que estas, por meio do processo metabólico, principalmente no processo de transpiração, reflitam em produtividade primária e que esse processo, que envolve grandes quantidades de água, seja possível devido ao aporte pelas chuvas ou pela irrigação, que no mundo representa cerca de 70% de consumo da água potável disponível e no Brasil, 46%.

A elevada exigência de água é intrínseca da planta que se sofrer estresse hídrico tem o seu crescimento e sua produtividade afetados. Para que seja possível conciliar dois desafios, uma maior produção agrícola e com economia dos recursos hídricos, é necessário que se tenha conhecimento da quantidade de água demandada pela planta para que haja um crescimento e produção satisfatórios consumindo o mínimo de água possível. A evapotranspiração (ET) está intimamente ligada aos estudos de ecossistemas e produtividade agrícola, sendo, portanto, uma informação útil para o planejamento de irrigação e estudos hidrológicos de bacias hidrográficas.

A evapotranspiração é a forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera no estado de vapor, tendo papel importantíssimo no ciclo hidrológico em termos globais, (CHEN, GAO, et al., 2005). Essencial para o entendimento dos processos físicos da superfície terrestre em climatologia, (ALLEN, 1986) como avaliação de seca agrícola.

A seca agrícola está relacionada à baixa disponibilidade de umidade no solo a qual torna o suprimento de água às culturas insuficiente para repor as perdas por evapotranspiração (OMM, 1975). Além de estar relacionada às fases críticas do desenvolvimento/crescimento dos vegetais, o início de uma seca agrícola pode se distanciar de uma seca meteorológica, pois depende quase que exclusivamente da água disponível na zona radicular das culturas no solo.

Uma seca agrícola nada mais é que um déficit de evapotranspiração. Entretanto, segundo PALMER (1968) tal deficiência, não deve ser calculada com base na evapotranspiração potencial (ETp), já que em estações climatologicamente secas, um valor de evapotranspiração real (ETR) inferior ao da evapotranspiração potencial não significa, necessariamente, a existência de uma anomalia climática.

Uma seca agrícola está relacionada ao déficit entre o valor da evapotranspiração real, estimada em um período e o valor climatologicamente esperado para o mesmo período em

questão. O estudo da seca agrícola exige ainda uma escala de tempo curta (menos que um mês) para que seu efeito seja corretamente avaliado (PALMER, 1968).

Diante do exposto, foi elaborado um modelo empírico não linear para estimar a evapotranspiração real (ETR) diária da superfície em condições normais de água disponível no solo para o bioma do Cerrado brasileiro, por técnica de sensoriamento remoto com dados de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Radiação Solar Global (RG) tendo em vista a possível aplicação na avaliação de seca agrícola, devido possibilidade de monitoramento de áreas extensas em escala diária.

2. Metodologia de Trabalho

Para elaboração do modelo de evapotranspiração diária, foram utilizados os seguintes dados e métodos de análise: Os dados de entrada foram Índice de vegetação por diferença normalizada-NDVI, Radiação solar global, precipitação, temperatura, localização geográfica, tipo de solo, capacidade de armazenamento hídrico e evapotranspiração real (ETR) de cada estação meteorológica. Os métodos adotados foram a análise descritiva, o agrupamento e a regressão não linear por Newton Raphson e Máxima verossimilhança.

O modelo não linear foi obtido empiricamente com metade das observações (610 amostras) e a outra metade foi utilizada para validação com dados de 32 estações meteorológicas automáticas de superfície distribuídas no ambiente do bioma Cerrado brasileiro inserida na área delimitada pelo tile h13v10 dos produtos MODIS abrangendo grande parte do Centro-Oeste do Brasil (Goiás, Tocantins, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Distrito Federal). A ETR observada (estimada pelo balanço hídrico de Thornthwaite e Matter, 1955) durante o período de quatro anos representando as condições climáticas da região.

Foram coletados os dados horários de precipitação e temperatura do ar durante o período de cinco anos (2006 a 2010) nos períodos seco e úmido, a classificação de solos da região e suas respectivas capacidades de armazenamento de água, dos quais se elaborou balanço hídrico sequencial horário para cada estação da área de estudo, sendo que o modelo foi validado para os anos de 2007 a 2010 (Figura 1).

Os dados de Radiação Solar global (RG) foram coletados pelo piranômetro de modelo CM6B (VAISALA, 2001).

Para calibração dos modelos, foram utilizados os dados de radiação solar global (RG) em MJ/m² às 17h UTC (Universal Time Coordinate) e o Índice de Vegetação (NDVI) nos dias sem cobertura de nuvens, em cada estação meteorológica.

O balanço hídrico sequencial foi calculado adotando-se o método de Thornthwaite e Mather (1955) para uma capacidade de água disponível (CAD) específica para cada tipo de solo de cada estação meteorológica para uma profundidade de 50 cm (Tabela 1), com a evapotranspiração potencial (ETP) estimada pelo método de Thornthwaite (1948).

A estimativa do balanço hídrico foi elaborada de forma horária para que se obtivessem valores de evapotranspiração real (ETR) para o horário próximo ao qual o satélite obtém imagem da superfície. Possibilitando assim, a análise de valores obtidos quase simultaneamente, havendo uma diferença de 20 a 30 minutos entre as medições dos parâmetros ambientais.

Para o mesmo período foram selecionados produtos de refletância obtidas do para cálculo do índice de vegetação (NDVI) para cada estação meteorológica.

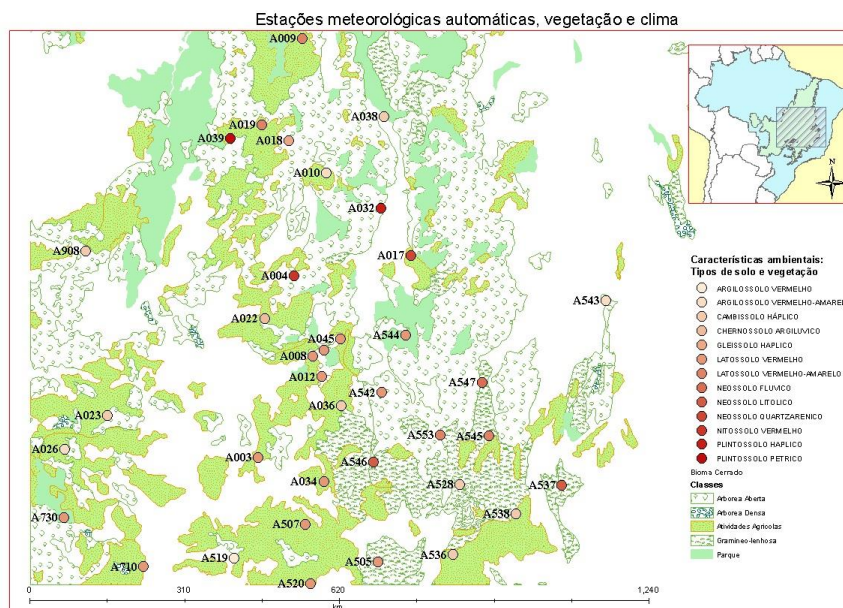


Figura 1. Área de estudo.

O NDVI foi obtido dos produtos diários MYD09GA (LP DAAC-TEAM, 2008) contendo sete bandas de refletância com resolução espacial de 500 metros do sensor MODIS a bordo do satélite Aqua devido o mesmo coletar imagens às 13h 30 local, horário em que ocorrem as maiores temperaturas (VIANELLO e ALVES, 1991) e ângulo zenital solar próximo ao máximo.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada foi proposta por (ROUSE, HAAS, et al., 1973), varia de -1 a +1 e é calculado pela seguinte equação:

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + \rho_v} \quad (1)$$

Foi realizado um processo de transformação de escala dos valores de NDVI, reescalando os valores de -1 a +1 para o intervalo de 0 a +1, por meio da equação utilizada em (OLIVEIRA e BAPTISTA, 2011), dada por:

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

Como ferramenta para monitoramento da vegetação, o NDVI foi utilizado para construir os perfis sazonal e temporal das atividades da vegetação, permitindo comparações interanuais desses perfis.

A Radiação Solar Global (RG) pode ser calculada utilizando a seguinte relação (Equação 3):

$$RG = S \cos Z d_r \tau_{sw} 3,6 \times 10^{-3} (\text{MJ/m}^2) \quad (3)$$

Em que (τ_{sw}) é a transmissividade atmosférica para um dia de céu claro, parametrizada em função da altitude do local, o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (d_r), o ângulo zenital solar (Z) e da constante solar (S) igual a 1367,5 W/m², conforme (ALLEN et al, 2002).

O fotoperíodo (N) representa o intervalo de tempo que transcorre entre o nascimento e o ocaso do Sol, ou seja, o tempo necessário para a Terra efetuar um arco de 2H° (Equação 4):

$$N = \frac{2}{15} * \text{arc. cos}(-\text{tg}\Phi \cdot \text{tg}\delta) \quad (4)$$

Onde Φ é a latitude do local em graus e δ é a declinação solar em graus, definida por:

$$\delta = 23,45 * \text{sen}\left[\left(\frac{360}{365}\right)(DOA - 81)\right] \quad (5)$$

Onde, DOA é o dia de ordem do ano, variando de 1 a 365 para o período de 1° de janeiro a 31 de dezembro.

2.1 Análise descritiva dos dados

Foram usados dados NDVI* e RG, como variáveis explicativas e ETR instantânea observada (estimada pelo balanço hídrico sequencial horário) como variável dependente.

Adotou-se o NDVI* como variável para representar a variação sazonal da vegetação e a RG como representante de fonte de energia para evapotranspiração.

Conforme (PASQUALI, 2011) e (MINGOTI, 2007), primeiramente fez-se a análise descritiva das variáveis envolvidas no processo de modelagem, adotando-se as seguintes escalas de medida: a RG em Mj/m^2 , NDVI* adimensional com valores variando entre 0 e 1 e a ETR instantânea em mm de água.

Tabela 1: Análise descritiva dos dados

Estatística	ETR	NDVI*	RG
Média	0,063	0,724	2,827
Mediana	0,024	0,716	2,771
Moda	0,0001	0,655	2,5420
Desvio-Padrão	0,083	0,077	0,36035
Coef. de Variação	130,73	10,69	12,748

O Método de Newton-Raphson, também conhecido como Método das Tangentes, propiciou a obtenção dos coeficientes por convergência não linear e aproximações sucessivas de máxima verossimilhança, (NETER et al., 1996).

Com esses modelos não lineares, foram calculados melhores coeficientes de determinação (R^2) em relação às tentativas anteriores.

A análise de variância permite que sejam apartadas as variâncias explicadas e não explicadas por meio da reta de regressão.

Para que essa análise se cumpra, é necessário que sejam calculadas somas de quadrados de especial interesse, os quais sejam, Soma de Quadrados Total (SQT, Equação 6), Soma de Quadrados da Regressão (SQR, Equação 7) e Soma de Quadrados dos Erros (SQE, Equação 8), formalizadas com base nos valores observados (Y_i), valores ajustados (\hat{Y}_i) média estimada para Y (\bar{Y}).

$$SQT = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (6)$$

$$SQR = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

$$SQE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (8)$$

Com o ímpeto de avaliar a magnitude de SQR (Máxima verossimilhança) em relação à SQT, é de especial interesse calcular o coeficiente de determinação R^2 (Equação 9), que mede a proporção da variabilidade total observada para Y que é explicada pela reta de regressão de Y sobre X, (KELLEY e MAXWELL, 2003), (DAVDSON e MACKINNON, 1993).

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad (9)$$

Para avaliar se o modelo de regressão formulado para uma determinada análise ou estudo está adequado aos dados levados em consideração, adotou-se o conceito de resíduo, ou seja, diferença entre o valor observado e o estimado (Equação 10).

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (10)$$

O resíduo é o erro observável para o ajuste realizado pela função de regressão, considerando que os erros ε_i são independentes, normalmente distribuídos com variância constante (Figura 3 (a) e (b)).

3. Resultados e Discussão

A Figura 2 (a) e (b) apresenta a dispersão entre as variáveis explicativas e a variável dependente, nas quais se verificou maior concentração dos valores de ETR abaixo de 0,05 mm, resultantes do maior número de observações obtidas no período menos chuvoso, visto que as imagens de satélite foram predominantemente coletadas em dias de céu claro para cada estação meteorológica, verificando-se uma grande dispersão dos mesmos, o que causou dificuldade para obtenção de relações lineares entre a variável dependente e as variáveis explicativas.

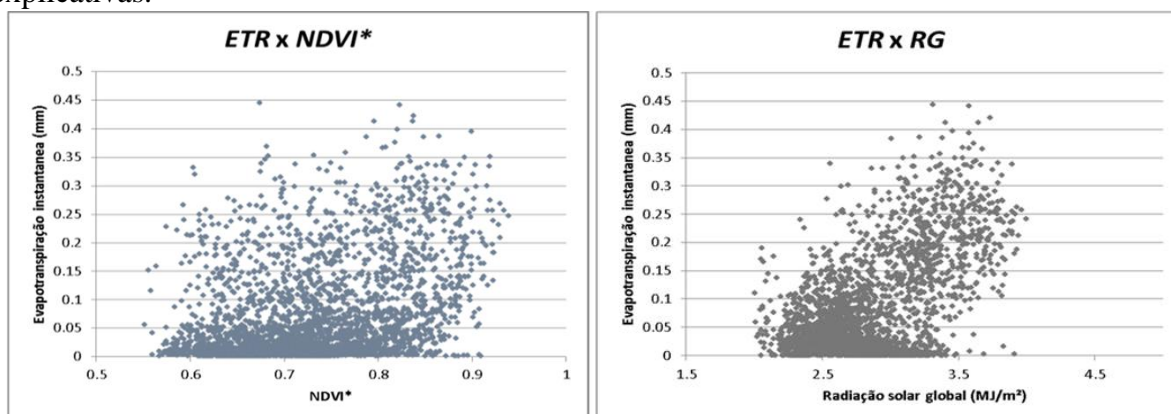


Figura 2 (a) e (b). Gráficos de dispersão entre evapotranspiração real (ETR) e índice de vegetação (NDVI*) e (ETR) e Radiação Solar Global (RG)

Identificaram-se padrões de comportamento das variáveis explicativas em função da variável resposta, quando essa se apresentava com valores abaixo e acima de 0,05 mm, devido principalmente ao fato da necessidade de que haja uma quantidade mínima de umidade no solo para que ocorra evapotranspiração e para que assim possa encontrar relações mais fortes a ETR e as demais variáveis investigadas, (LECHINOSKI et al, 2007).

Efetuarão-se transformações, como o logarítmico, exponencial, variáveis ao quadrado e ao cubo. Os dados foram separados e a partir dessa separação foi possível propor alguns modelos não lineares.

Tendo encontrado os modelos que melhor explicaram as variações de ETR instantânea em função das variáveis explicativas procurou-se estimar a evapotranspiração real diária multiplicando-se a ETR instantânea pelo número de horas de insolação (fotoperíodo) estimado a partir das informações de data (ano, mês, dia, dia juliano (DOA) e localização geográfica (longitude, latitude e altitude) de cada estação.

O modelo não linear contém como parâmetros de entrada apenas a RG e o NDVI*, calibrado para obter valores de ETR acima de 0,05 mm e apresenta erro médio quadrático (MSE) igual a 0,00384 e coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,8680, apresentado da seguinte forma:

$$ETR = e^{(-4,9001+0,7123.RG+1,0687.NDVI^*)} \times N \text{ (mm/dia)} \quad (11)$$

Onde os valores dos coeficientes $b_0=-4,9001$, $b_1=0,7123$ e $b_2 =1,0687$ foram obtidos com seis iterações.

Tabela 2. Coeficientes do Modelo Não Linear.

Parâmetros	Estimativa	Desvio Padrão aproximado	Aproximação 95% - Limites de confiança		Skewness
b ₀	-4,9001	0,1812	-5,2558	-4,5443	-0,0218
b ₁	0,7123	0,0364	0,6409	0,7837	0,0241
b ₂	1,0687	0,1890	0,6976	1,4397	0,0155

Na validação obteve-se MSPR=0,0018965 próximo do MSE=0,00384, o que indica que o modelo foi validado. A coluna Skewness apresentou-se menor que 0,1, logo, as estimativas não estão viesadas (Tabela 2).

O Modelo Não Linear obteve $R^2 = 15,9228/18,3440 = 0,8680$ (Tabela 3).

Tabela 3. Análise estatística

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Valor F	p-valor Pr > F
Dados	3	15,9228	5,3076	1381,05	<0,0001
Erro	630	2,4212	0,00384		
Total	633	18,3440			

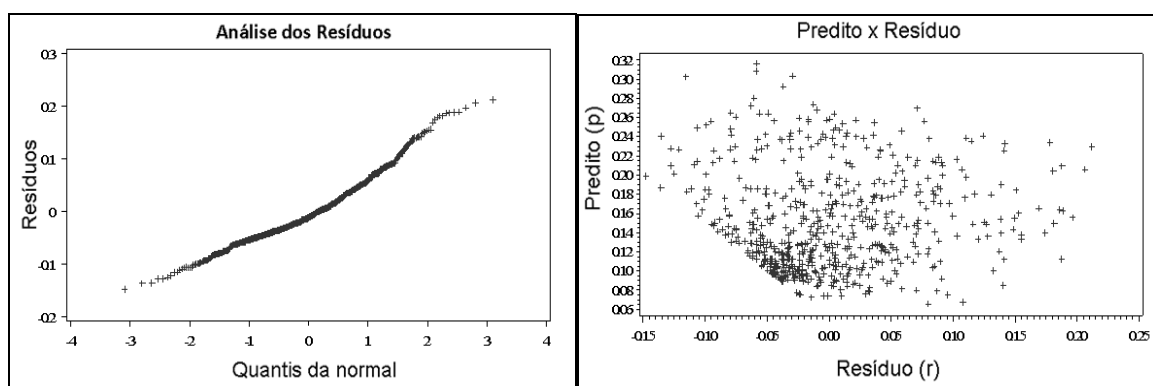


Figura 3 (a) e (b). Análise dos Resíduos, Resíduos versus Quantis da normal e Predito versus Resíduo do Modelo Não Linear.

As Figuras 4 e 5 demonstram o comportamento da variação sazonal da evapotranspiração diária estimada pelo modelo não linear (NDVI*, Rg, N) com a ETR (observada) para diversas estações meteorológicas distribuídas no bioma Cerrado.

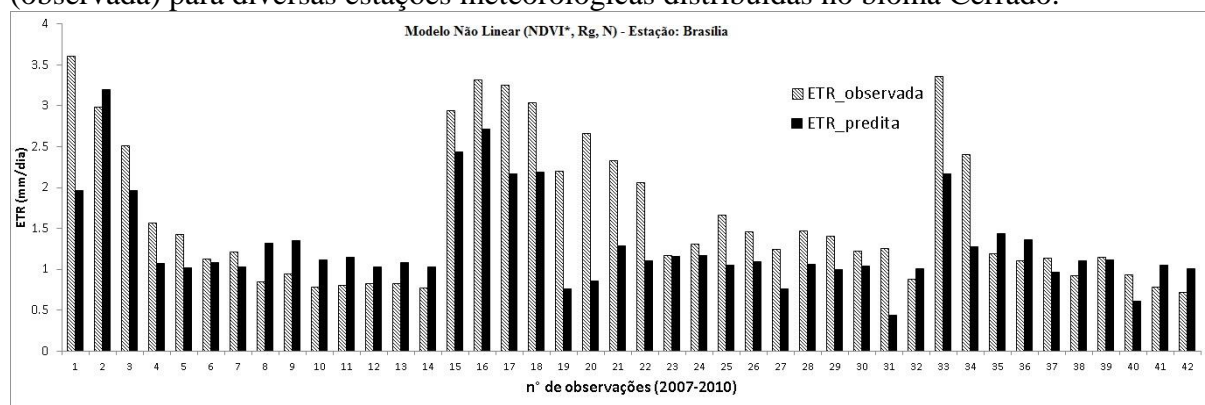


Figura 4. Variação sazonal da ETR observada e estimada pelo modelo não linear (NDVI*, Rg, N) para estação de Brasília-DF

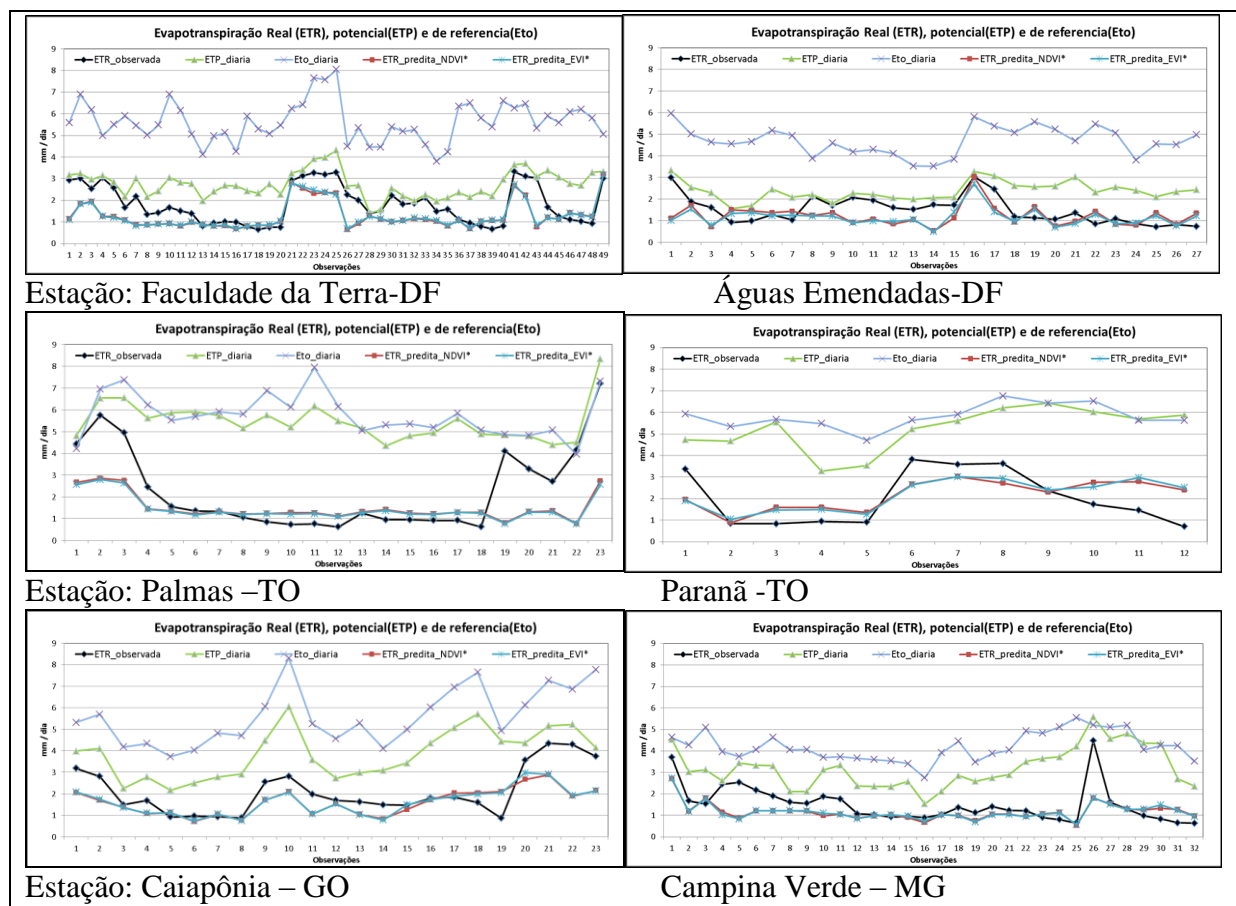


Figura 5. Variação sazonal da ETR observada e estimada pelo modelo não linear (NDVI*, Rg, N) para algumas estações na área do Cerrado.

5. Conclusões

O modelo não linear obteve coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,8680 acompanhou a tendência sazonal da evapotranspiração real (ETR) calculada pelo balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), sendo principalmente aplicada para monitorar a variação do armazenamento de água no solo pela chuva e seca agrícola. A equação gerada não é sensível à estimativa da demanda atmosférica, pois não foi validada com dados de evapotranspiração potencial (ETp), mas sim com a evapotranspiração real (ETR).

O modelo apresenta valores subestimados para áreas irrigadas no período seco, porém acompanham a sazonalidade anual, sendo úteis para monitoramento das condições reais da região em termos de disponibilidade de água no solo a ser evapotranspirada para atmosfera e não à suposta demanda caso houvesse água disponível para todo o período, como é o caso da ETp.

A tendência geral do modelo é uma subestimativa no período chuvoso e uma superestimativa no período seco, acompanhando a sazonalidade de cada estação envolvida no estudo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia e ao LP DAAC pela cessão dos dados meteorológicos horários e dos produtos do sensor MODIS utilizados nesse estudo, bem como ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília pelo suporte tecnológico para o seu desenvolvimento.

Referências Bibliográficas

- ALLEN, R. G. A Penman for all seasons. *Journal of irrigation and drainage*, v. 112, n. 4, p. 348-368, 1986.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL-Surface Energy Balance Algorithms for Land-Advanced Training and User's Manual - Idaho implementation, version 1.0. Advanced Training and User's Manual, Idaho, p. 98, Agosto 2002. Disponível em: <http://www.dca.ufcg.edu.br/DCA_download/ISR/UFPE/Final%20Sebal%20Manual.pdf>. Acesso em: 22.abr.2012.
- BASTIAANSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate. PhD. Dis., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, Netherlands, p. 272. 1995.
- CHEN, D. et al. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standart Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *CLIMATE RESEARCH*, v. 28, p. 123-132, Março 2005.
- HUETE, A. R. et al. Comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, v. 59, p. 440 - 451, 1997.
- LP DAAC-TEAM. MYD09GA-Daily LSG Global 1km and 500m- Surface Reflectance - MODIS Products Table-Products-LP DAAC: ASTER and MODIS Land Products and Services. USGS-LPDAAC, 2008. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/surface_reflectance/daily_l2g_global_1km_and_500m/myd09ga>. Acesso em: 17.mai.2012.
- NAGLER, P. L. et al. Evapotranspiration on western U.S. rives estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy correlation and Bowen ratio flux towers. *Remote Sensing of Environment*, v. 97, p. 337-351, 2005.
- OLIVEIRA, M. R. D.; BAPTISTA, G. M. D. M. Validação do Modelo Espectral de Estimativa de Evapotranspiração na Região de. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, 5.abr.2011. 5925-5932.
- OMM. Drought and agriculture, WMO Tech. Note 138. ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. Geneva, Switzerland, p. 127. 1975.
- PALMER, W. C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index. *Weatherwise*, v. 21, p. 156-161, 1968.
- ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI. V Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos; normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133 - 137, 1998.
- ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in te great plains with ERTS. In: _____ Earth Resources Technology Satellite-1 Simposium. Washington: [s.n.], v. 1, 1973. Cap. Sec A, p. 309-317.
- VAISALA. CM6B & CM11 Pyranometers. Vaisala. [S.l.], p. 2, <http://www.hobeco.net/pdf/CM6B&CM11.pdf>. 2001.
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia Básica e Aplicações. 1. ed. Viçosa: UFV - Universidade Federal de Viçosa, 1991.