



## XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

### *O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros*

## **Estimativa de evapotranspiração utilizando o método do triângulo simplificado - estudo de caso município de Toledo- PR<sup>1</sup>**



*Daniela F. Silva-Fuzzo<sup>2</sup>; Jansle Vieira Rocha<sup>3</sup>; Angélica Praela-Pantano<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Trabalho apresentado no XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 23 ago. a 28 ago. 2015

<sup>2</sup> Geógrafa, Dra. em Sensoriamento Remoto pela Faculdade de Engenharia Agrícola- FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Fone: (19)3521-1113, Email: [silva.danielaf@gmail.com](mailto:silva.danielaf@gmail.com);

<sup>3</sup> Prof. Dr°. Adjunto pela Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Email: [jansle.rocha@agr.unicamp.br](mailto:jansle.rocha@agr.unicamp.br)

<sup>4</sup> Eng<sup>a</sup> Agr<sup>a</sup> Pesquisadora Científica, Instituto Agrônomo de Campinas, Email: [angelica@iac.sp.gov.br](mailto:angelica@iac.sp.gov.br)

**RESUMO:** Condição de umidade do solo é um dos principais parâmetros em modelagem ambiental e agrícola, o que influencia diretamente a troca de água e fluxos de energia entre atmosfera/superfície. O método do triângulo baseado em temperatura de superfície e índice de vegetação vem demonstrando ser uma ferramenta útil para estimativa de evapotranspiração. O objetivo deste artigo foi estimar a evapotranspiração, pelo método do triângulo simplificado, a nível municipal. Para tanto foram utilizados dados do sensor MODIS, referente aos produtos de índices de temperatura de superfície e de índice de vegetação NDVI, para o período compreendendo entre os anos safras de 2002/03- 2010/11, para o município de Toledo no estado do Paraná. A validação dos dados estimados com os dados observados se deu por meio de balanços hídricos climatológicos proposto por Thorntwaite e Matter (1955), e os resultados apresentaram valores de “d<sub>1</sub>” de Wilmott acima de 0,8, e os valores de R<sup>2</sup> aproximadamente entre 0,6 e 0,7, os erros foram baixos para todos os anos analisados indicando que os dados estimados estão muito próximos dos dados observados. Com base na validação estatística podemos afirmar que o método do triângulo é uma ferramenta consistente para a estimativa de evapotranspiração, pois utiliza somente imagens de sensoriamento remoto como variável, e pode servir de suporte ao monitoramento agroclimático em grande escala.

**PALAVRAS-CHAVE:** temperatura de superfície, índice de vegetação, umidade do solo.

### **Evapotranspiration estimated using the method of simplified triangle - case study county of Toledo- PR**

**ABSTRACT:** Soil moisture condition is one of the main parameters of environmental modeling and agriculture, which directly influence the exchange of water and energy fluxes between atmosphere/surface. The triangle method based on surface temperature and vegetation index is demonstrating to be a useful tool for estimating evapotranspiration. The aim of this paper was to estimate evapotranspiration, the simplified triangle method, the county level. For both MODIS data were used, referring to the surface temperature of index products and NDVI vegetation index for the period comprising between crop years 2002/03- 2010/11, for the county of Toledo in the state of Paraná. Data validation estimates with observed data was through climatological water balances proposed by Thorntwaite and Matter (1955), and the results showed values of "d<sub>1</sub>" of Wilmott above 0,8, and the R<sup>2</sup> values approximately 0,6 and 0,7, the errors were low for all the years analyzed indicating that the estimated data are very close to the observed data. Based on statistical validation can say that the triangle method in a useful tool for estimating evapotranspiration, because only uses remote sensing images as variable, and can provide support for the agro-climatic monitoring on a large scale.

**KEY-WORDS:** surface temperature, vegetation index, soil moisture

A evapotranspiração é a combinação de dois processos separados, por um lado à água perdida da superfície do solo por evaporação, e por outro lado à água perdida pela cultura através da transpiração. Esse processo ocorre simultaneamente e não tem como distinguir entre os dois processos, a disponibilidade de água na camada superficial do solo e a evaporação de um solo cultivado, ambos são principalmente determinados pela radiação solar que alcança a superfície, esta fração diminui à medida que a cultura cresce e desenvolve o dossel e sombreia cada vez mais a área de solo, quando a cultura é pequena a água é predominantemente perdida por evaporação do solo mas uma vez que a cultura se desenvolve e completa a cobertura do solo, a transpiração se torna o processo principal, no plantio quase 100% da ET vem da evaporação, quando o sombreamento da cultura se torna maior que 90% da ET vem da transpiração.

A abordagem do método do triângulo é baseada em uma interpretação contextual de um gráfico de dispersão derivado da relação entre temperatura de superfície e índice de vegetação, corroboram trabalhos de Gillies et al. (1995; 1997), Sun et al. (2005), Brunsell e Anderson (2011), que utilizaram diferentes conjuntos de dados espaciais para demonstrar que os limites da forma triangular pode ser usada para inferir as limitações físicas para a solução dos fluxos de energia de superfície e a disponibilidade da umidade do solo. O surgimento da forma triangular no espaço de características Ts/IV é o resultado da sensibilidade da Ts às variações de Mo em áreas vegetadas. Desta forma, o método do triângulo, caracteriza-se a partir de uma série de valores de pixels obtidas de imagens de Ts e IV (Gillies e Temesgen, 2000).

Variações ao longo da borda inferior (isto é, a “base”) do triângulo, assume-se que esta reflete os efeitos combinados de umidade do solo e variações topográficas entre as áreas de solo exposto, enquanto em seu topo (ápice) equivale ao estado da cobertura vegetal total (expressa pelo valor mais alto IV). Os pontos restantes no espaço triangular correspondem a pixels com diferentes coberturas vegetais, em algum lugar entre o solo descoberto e vegetação densa. Desta forma o objetivo desse trabalho foi estimar evapotranspiração por meio do método do triângulo simplificado, utilizando somente dados de imagens de satélite para sua estimativa.

## MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo foi o município de Toledo, localizado no estado do Paraná. Foram utilizadas as imagens do sensor MODIS, produto MOD13A2 e MOD11A2 do “Tile”, h13v11. Destes produtos, foram usadas as composições de imagens de 16 dias do índice de vegetação NDVI e imagens de 08 dias com o índice de temperatura de superfície, respectivamente, com resolução espacial de 1 km.

Essas imagens podem ser obtidas do site da NASA < <https://wist.echo.nasa.gov/api/>>. Essas foram processadas, a princípio, pela ferramenta MRTTool (Modis Reprojection Tool, < [https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis\\_reprojection\\_tool](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis_reprojection_tool)) e foram reprojetaadas para projeção WGS-84 e formato GeoTiff. Por serem imagens de composição de 16 e 8 dias, as datas das imagens NDVI e Ts, foram selecionadas de acordo com a data de passagem do satélite, uma vez que as datas das imagens NDVI coincidisse com as datas das imagens de Ts. Foram feitas as operações matemáticas alterando os valores digitais dos pixels das imagens, dos produtos MOD11A2 (Eq 1 e 2) e dos produtos MO13A2 (Eq. 3).

$$T(K) = MOD11A2 \times 0,002 \quad (1)$$

$$T(^{\circ}C) = TK - 273,15 \quad (2)$$

$$NDVI = MOD13A2 / 10.000 \quad (3)$$

***O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros***

Em seguida, foram realizadas as extrações dos valores de NDVIs e NDVIo das imagens de NDVI; e de Tmax e Tmin das imagens de Ts. Desta forma, foram escalonados os valores de NDVI para Fr e de temperatura de superfície para T\*, como mostra as seguintes equações 4 e 5.

$$T^* = \{(T_{ir} - T_{min}) / (T_{max} - T_{min})\} \quad (4)$$

$$Fr = \{(NDVI - NDVI_o) / (NDVI_s - NDVI_o)\}^2 \quad (5)$$

Os valores mais altos de NDVIs são obtidos a partir de pixels que apresentam 100% de cobertura vegetal e o NDVIo em pixels com solo exposto. Os valores de Tmax são obtidos em pixels com solo nu ou área urbana e Tmin em regiões com densa vegetação e solos bem úmidos. Segundo Carlson (2013), o método do triângulo pode ser calculado de maneira simples, puramente geométrico, de modo a melhorar a sua aplicação prática sem a utilização de modelos complexos, desta forma o denominamos como método do triângulo simplificado (Eq. 6 e 7).

$$Mo = 1 - T^* (\text{pixel}) / MF (\text{potencial}) \quad (6)$$

$$EF_{\text{total}} = EF_{\text{solo}} * (1 - Fr) + Fr (\text{pixel}) * EF_{\text{veg}} \quad (7)$$

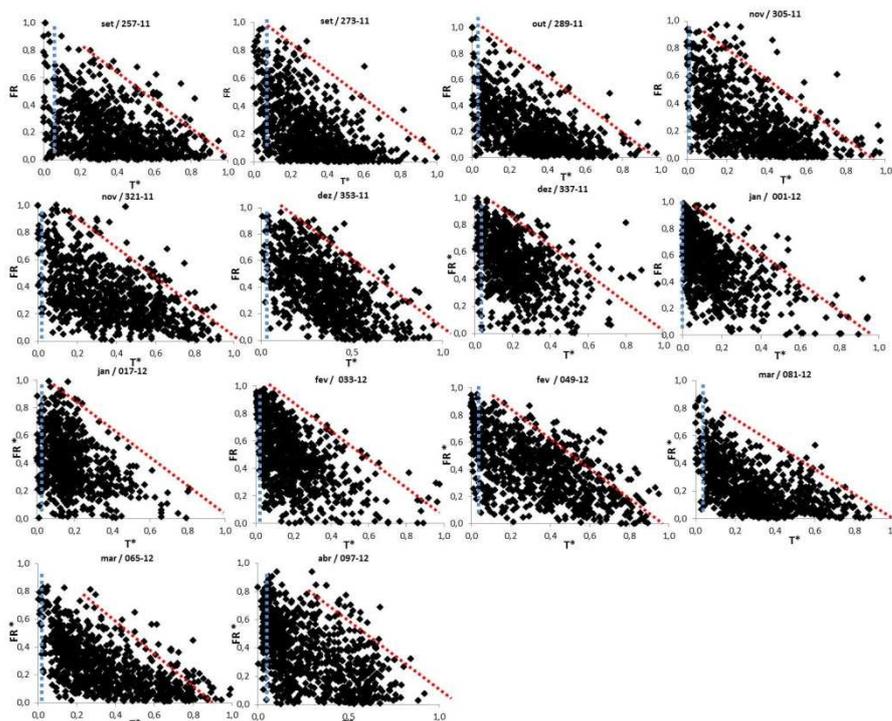
em que,  $MF$  = é a razão para transpiração potencial da planta igual a 1,0;  $EF_{\text{solo}} = Mo$  e  $EF_{\text{veg}} = MF (= 1)$ .

As análises estatísticas foram realizadas a partir dos dados de evapotranspiração estimados pelo método do triângulo, e com valores de ETr/ETp obtidos por meio do balanço hídrico climatológico de Thorntwaite e Matter (1955), a partir de dados de estação meteorológica de superfície do Instituto Tecnológico SIMEPAR, visando verificar a exatidão e a precisão dos dados, por meio dos coeficientes R<sup>2</sup>, o erro médio absoluto (EMA), Raiz do erro quadrático (RMSE), índice 'd' de Willmott modificado (d<sup>1</sup>).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A partir das imagens T\* e Fr foram obtidos os gráficos de dispersão para todo o período dos anos safras (2002/03 a 2010/11). Como exemplo na Figura 3, o ano safra de 2010/11 mostraram a dispersão dos pixels para cada imagem de satélite, representando o ciclo fenológico da cultura da soja para o município de Toledo.

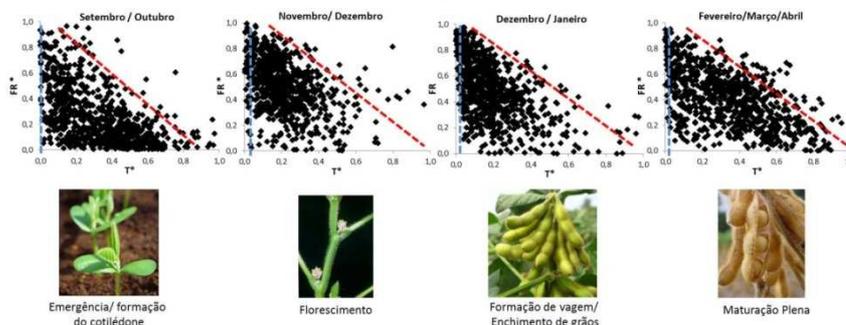
Na Figura 1, observamos nos gráficos de dispersão a linha tracejada em vermelho indicando a borda quente do triângulo, e a linha tracejada em azul, a borda fria. Extremidades frias e quentes, respectivamente, correspondem ao mais molhado e mais secos pixels.



**Figura 1.** Método do Triângulo, município de Toledo, Ano-Safra 2010-11.

Tian et al. (2013) realizaram estudos com o Método do Triângulo usando imagens do sensor MODIS para uma bacia do rio Heibe, localizada na região árida do nordeste da China, durante a estação de crescimento vegetativo do ano de 2009, os resultados mostraram que a diferenças das bordas seca e molhadas no espaço entre os índices de temperatura de superfície e vegetação conduziram diretamente para a estimativa de Evapotranspiração, com o coeficiente de correlação de Pearson variando de 0,94 a 1,0 para 10 dias de estimativas de ET. Também é muito importante analisar o vértice superior do triângulo, pois este apresenta uma observação importante da distribuição do pixel que, quanto maior o acumulado no topo do triângulo, maior é a concentração de vegetação para aquela imagem, ou seja, representando a época de maior desenvolvimento vegetal da cultura (Figura 2).

Segundo Carlson (2013), o triângulo inclinado pode significar uma temperatura mais elevada no solo nu do que quando em áreas de maior vegetação. Notamos com os gráficos triangulares que uma maior inclinação é respectiva aos meses que apresentam maior quantidade de solo exposto, ou seja, os meses de semeadura (set/out) e os meses referentes à época da colheita (mar/abril).



**Figura 2.** Representação Esquemática do Método do Triângulo e ciclofenológico da cultura da soja

Observa-se na Tabela 1 que os valores dos erros foram baixos, ou seja, próximos de zero, para todos os anos do município, o RMSE, que informa sobre a acurácia do modelo, mostrou que, em média,

***O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros***

para todos os anos, houve um bom desempenho do modelo, ou seja, quanto menor essa medida, melhor é a habilidade do modelo em fazer previsões, os valores de  $R^2$  apresentaram valores satisfatórios acima de 0,7 para os anos de 2004/05, 2006/07 e 2008/09, os baixos valores foram de 0,35 e 0,36 para os anos de 2005/06 e 2010/11, respectivamente, isso se explica pelo fato de se tratar de dados medidos em escalas diferentes, (pontual x regional).

**Tabela 1.** Análise estatística dos valores de EF em relação a ETP/ETR (mm), obtidos a partir dos BHC das estações meteorológicas convencionais.

| Ano/Safra | Toledo |       |      |      |
|-----------|--------|-------|------|------|
|           | d1     | $R^2$ | EMA  | RMSE |
| 2002/03   | 0,83   | 0,64  | 0,04 | 0,04 |
| 2003/04   | 0,72   | 0,44  | 0,08 | 0,03 |
| 2004/05   | 0,80   | 0,71  | 0,03 | 0,04 |
| 2005/06   | 0,64   | 0,35  | 0,06 | 0,02 |
| 2006/07   | 0,88   | 0,77  | 0,03 | 0,05 |
| 2007/08   | 0,85   | 0,60  | 0,07 | 0,04 |
| 2008/09   | 0,85   | 0,76  | 0,07 | 0,04 |
| 2009/10   | 0,82   | 0,58  | 0,03 | 0,04 |
| 2010/11   | 0,68   | 0,36  | 0,06 | 0,02 |

O índice de concordância “d<sub>1</sub>” de Wilmott, modificado, o qual mediu a dispersão dos dados em relação à reta 1:1, ou seja, a exatidão dos valores estimados (EF) em relação aos obtidos por balanço hídrico climatológico, mostrou que, para os anos-safras estudados, os valores acima de 0,8 confirmando a relevância dos dados estimados em relação aos observados.

## CONCLUSÃO

A evapotranspiração foi estimada por meio do método do triângulo simplificado para o município de Toledo-PR, colocando-se como uma ferramenta útil e puramente geométrica, que leva em consideração somente imagens de satélites (NDVI e Ts) para sua estimativa, descartando qualquer tipo de variável de superfície para sua análise. As estatísticas apresentaram valores de “d<sub>1</sub>” de Willmot modificado acima de 0,8 confirmando a relevância dos dados estimados em relação aos observados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUNSELL, N.A.; ANDERSON, M.C. Characterizing the multi-scale spatial structure of remotely sensed evapotranspiration with information theory. **Biogeosciences**, v.8, n.8, p. 2269-2280, 2011.

CARLSON, T.N. Triangle Models and Misconceptions. **International Journal of Remote Sensing Applications**. v. 3, n. 3, p. 155-158, 2013.

GILLIES, R.R. and CARLSON, T.N. Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. **Journal of Applied Meteorology**. v. 34, p. 745–56, 1995.

GILLIES, R. R., CARLSON, T. N., CUI, J. KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. Verification of the ‘triangle’ method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements



## XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

### *O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros*



of the Normalized Difference Vegetation Index NDVI and surface radiant temperature. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, p.3145–66, 1997.

GILLIES, R.R. and TEMESGEN, B. **Coupling thermal infrared and visible satellite measurements to infer biophysical variables at the land surface**. In Quattrochi, D.A. and Luvall, J.C., editors, *Thermal remote sensing in land surface processes*, New York: CRC Press, p.160–83, 2000.

TIAN, J.; HONGBO, S.; XIAOMIN, S.; SHAOHUI, C.; HONGLIN, HE.; LINJUN, Z. Impact of the Spatial Domain Size on the performance of the Ts-VI triangle method in terrestrial evapotranspiration estimation. **Remote Sensing**, v. 5, p. 1998-2013, 2013.

SUN, Y.-J., WANG, J.-F., ZHANG, R.-H., GILLIES, R.R., XUE, Y. and BO, Y.-C. Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 80, p. 37–48, 2005.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K. M.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.