

Estimativa de Evapotranspiração em Área de Ocorrência do Sistema Aquífero Guarani desde Imagens Modis.

Juliano Schirmbeck¹
Lucimara Wolfarth Schirmbeck²
Raúl Rivas^{1,3}
Osmar Gustavo Wöll Coelho

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras, ³ Comisión de Invétigaciones Científicas de Buenos Ars
Pinto 399, B7000GHG, Tandil. Buenos Ars – Argentina
schirmbeck.j@gmail.com
rrivas@rec.unicen.edu.ar

² Universidade Luterana do Brasil – ULBRA – Engenharia Ambiental
Av. Farroupilha 8001. São José, Canoas – RS, Brasil
lucimaraws@gmail.com

⁴ Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS – PPGeo
Av. Unisinos 950. Cristo Rei, São Leopoldo – RS, Brasil
osmar@unisinos.br

Abstract. The correct estimations of evapotranspiration, on a regional scale, is of extreme interest for the planning of sustainable use of the Guarani Aquifero System. Evapotranspiration on a world wide scale is the main water exit for hidrological systemas. In this research we present a simplified methodology for the estimation of evapotranspiration based on surface temperature maps, obtained from thermal infrared imagery. The purpose of this work is to propose a parametrization for the evapotranspiration estimation model for the part of the Guarani Aquifero System located in Rio Grande do Sul, based on time series of meteorological data. The results show that in this area it is possible to estimate the evapotranspiration with the uso of average time series parameters.

Palavras-chave: Guarani Aquifero System, Evapotranspiration, Surface Temperature.

1 Introdução

Atualmente, devido a crescente demanda da produção de alimentos e do desenvolvimento social e econômico, conjugados com a escassez dos recursos hídricos superficiais e dos problemas de contaminação dos mesmos, é necessária a proteção ambiental e o planejamento de uso sustentável do Sistema Aquífero Guarani, uma das maiores reservas subterrâneas de água doce do mundo.

Tendo em vista que a evapotranspiração em escala global corresponde a 2/3 da precipitação total mundial, sua correta determinação é fundamental para o uso sustentável dos recursos hídricos.

As imagens obtidas por sensoriamento remoto nas distintas regiões do espectro eletromagnético nos permitem determinar uma série de parâmetros físicos da superfície como: índices de cobertura de vegetação, albedo, emissividade, temperatura de superfície, radiação líquida e balanço de energia, entre outros (Boegh et al. 2002, Friedl 2002, Sobrino et al. 2004, Kustas et al. 2004, Schirmbeck e Rivas 2007b, Timmermans et al. 2007, Sánchez et al. 2007), os quais nos possibilitam acompanhar o comportamento espaço temporal da evapotranspiração.

Em estudos regionais, como do SAG o sensoriamento remoto apresenta-se como uma ferramenta viável de baixo custo para avaliar o comportamento espacial e as mudanças do sistema de forma rápida e precisa.

A T_s é um parâmetro muito importante no controle do balanço de energia e da água, entre a atmosfera e a superfície terrestre. Sendo o SR no espectro do infravermelho termal a única alternativa para obter a temperatura de superfície de grandes áreas da superfície terrestre. (Coll et al., 2005).

Rivas (2004) propõem uma simplificação do modelo Penman-Monteith para SR. Com o qual é possível estimar a evapotranspiração de forma simplificada desde mapas de T_s e uma parametrização das condições climáticas nos primeiros metros da atmosfera a partir de dados climáticos históricos. Este modelo foi validado em mais de 60 estações meteorológicas localizadas em distintas regiões do mundo, sendo uma delas em Santa Maria – RS e a aplicação do mesmo na Bacia do Rio dos Sinos apresentou resultados satisfatórios (Schirmbeck, 2005).

O objetivo deste trabalho é propor uma parametrização para aplicação do modelo Penman-Monteith simplificado para SR em área de ocorrência do SAG no estado do Rio Grande do Sul.

O conhecimento da real distribuição espacial da evapotranspiração aporta informações de grande importância para o uso sustentável dos recursos hídricos da região, podendo apoiar instituições como Corsan (abastecimento público) e Secretaria de Irrigação (usos múltiplos da água) e em estudos como de riscos de desertificação.

2 Metodologia

A metodologia adotada para estimativa da evapotranspiração ET_{o_Ts} , em escala regional, consiste na aplicação de um modelo simplificado da equação Penman-Monteith ajustada para o sensoriamento remoto (Rivas e Caseles, 2004), o qual consiste na espacialização do fenômeno com a aplicação de uma equação linear que relaciona a evapotranspiração com mapas de temperatura de superfície T_s (equação 1).

$$ET_{o_Ts} = a \cdot T_s + b \quad (1)$$

onde: a (mm/dia*°C) e b (mm/dia) são parâmetros específicos da área de estudo os quais podem ser obtidos a partir de dados meteorológicos convencionais (temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar) com a aplicação das equações 2 e 3 (Rivas e Caselles, 2004).

O parâmetro a representa a emissão média da superfície de referência (cultivo de referência Allen et al. 1998) para determinadas condições atmosféricas.

$$a = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \right) \cdot \left(\frac{-c \cdot \epsilon_s \cdot \sigma}{\lambda} \right) \quad (2)$$

E o parâmetro b representa os efeitos aerodinâmicos sobre a superfície de referência, a qual recebe certa quantidade de radiação solar.

$$b = \left(\frac{1}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \right) \cdot$$

$$\frac{1}{\lambda} \left[(\Delta) \cdot \left((1 - \alpha) \cdot R_s + \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_a \cdot T_a^4 - d) - G \right) + \rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{e_a - e_d}{r_a} \right) \right]$$

(3)

onde: λ é o calor latente de evaporação da água (MJ), R_s é a radiação solar (MJ/m²dia), G é o fluxo de calor do solo (MJ/m²dia), ρ é a densidade do ar (kg/m³), c_p é o calor específico do ar úmido a uma pressão constante (MJ/kg°C), e_a é a pressão de vapor do ar (kPa), e_d é a pressão de saturação de vapor (kPa), r_c é a resistência do cultivo (dia/m), r_a é a resistência aerodinâmica (dia/m), Δ é a declividade da curva de pressão de vapor (kPa/°C), γ é a constante psicrométrica (kPa/°C), α é o albedo do cultivo de referência, ε_s é a emissividade de superfície, ε_a é a emissividade de atmosfera, T_a é a temperatura do ar (K), σ é a constante de Stefan Boltzmann (4,9 10⁻⁹ MJ/m² K⁴ d), c e d são respectivamente os coeficientes angular e linear da relação entre a quarta potência da T_s e a própria T_s .

3 Estimativa da temperatura de superfície (Ts)

Os mapas de temperatura de superfície foram obtidos a partir de dados captados pelo sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua com a aplicação da equação Split Windows proposta Niclòs et al. 2007 (equação 4).

As imagens captadas por este sensor possuem 32 bandas distribuídas em distintas faixas do espectro eletromagnético, com distintas resoluções espaciais em nadir, sendo que as bandas 1 e 2 250m x 250m, as bandas 3 a 7 500m x 500m e as bandas 8 a 32 1000m x 1000m. Para a obtenção dos mapas de T_s são utilizadas as bandas termais (b31 e b32) e as bandas de vermelho (b1) e infravermelho próximo (b2) para obtenção dos índices de vegetação.

$$T_s = T_{31} + [2,41 + 0,432(T_{31} - T_{32})](T_{31} - T_{32}) + 0,359 + \alpha(w)(1 - \varepsilon) + \beta(w)\Delta\varepsilon$$

(4)

onde: T_s é a temperatura de superfície (K), T_{31} e T_{32} são as temperaturas de brilho da bandas 31 e 32 (K), $\alpha(w)$ e $\beta(w)$ são componentes de correção atmosférica em função da quantidade de água precipitável, calculados respectivamente pelas equações 5 e 6, ε e $\Delta\varepsilon$ são respectivamente a emissividade média e a diferença de emissividades das bandas 31 e 32.

$$\alpha = 44,1 + 5,4 \frac{w}{\cos(\theta)} - 1,77 \left(\frac{w}{\cos(\theta)} \right)^2$$

(5)

$$\beta = 165,5 - 28,1 \frac{w}{\cos(\theta)}$$

(6)

onde: ε_{31} e ε_{32} são as emissividades das bandas 31 e 32 e W a quantidade de água precipitável estimada a partir de radio sondagens da estação do Aeroporto Internacional Salgado Filho (Porto Alegre - RS).

Estimou-se a emissividade da superfície para o intervalo espectral das bandas 31 e 32 a partir das emissividades do solo e da vegetação para estas bandas, levando em consideração a porcentagem de vegetação P_v de cada pixel, de acordo com a equação 7 (Valor e Caselles 1996).

$$\varepsilon = \varepsilon_v \cdot P_v + \varepsilon_s \cdot (1 - P_v)$$

(7)

onde: ε é a emissividade da banda analisada, ε_v é a emissividade da vegetação que assume o valor de 0,985 para ambas as bandas, ε_s é a emissividade do solo nu, que assume o valor de

0,95 para a b31 e 0,97 para a b32 e P_v é a porcentagem de vegetação a qual obtém-se com a aplicação da equação (8) (Valor e Caselles, 1996).

$$P_v = \frac{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_s}\right)}{\left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_s}\right) - K \cdot \left(1 - \frac{NDVI}{NDVI_v}\right)}$$

(8)

onde: $NDVI$ é o índice de diferença de vegetação normalizada, $NDVI_s$ é o valor de NDVI para o solo nu, $NDVI_v$ é o valor de NDVI para a vegetação, e K é um coeficiente adimensional que obtém-se pela equação 9.

$$K = \frac{IVP_v - V_v}{IVP_s - V_s}$$

(9)

onde: IVP_s é a refletância da banda do infravermelho próximo para o solo, IVP_v é a refletância da banda do infravermelho próximo para a vegetação, V_s é a refletância da banda do vermelho para o solo, e V_v é a refletância da banda do vermelho para a vegetação. Tendo em consideração a grande quantidade de vegetação presente na área de estudos e a heterogeneidade da cobertura vegetal para uma imagem com pixels de 1000m de resolução, se definiu patamares do índice de vegetação para determinar quais são os pixels com solos nu ($P_v = 0$) aqueles que apresentam NDVI no intervalo (0 ; 0,1] e com cobertura vegetal total ($P_v = 1$) aqueles que apresentam NDVI no intervalo [0,7 ; 1].

4 Escala local

Em escala local utilizaram-se dados de sete estações meteorológicas localizadas na área de estudos, disponíveis na base FAO os quais correspondem a médias históricas de um período de 10 anos compreendido entre 1981 e 1990.

Para cada estação calculou-se os parâmetros a e b do modelo ETo_Ts com a aplicação das equações 2 e 3. As variáveis utilizadas na estimação dos parâmetros correspondem a médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento.

Com o objetivo de analisar a consistência dos dados obtidos com o processamento das imagens estimou-se a evapotranspiração de referência para cada uma das estações localizadas na área de estudo com a aplicação de equação proposta por Allen et al. (1998).

5 Resultados

A área de estudo compreende a área de ocorrência do SAG no Rio Grande do Sul, sendo uma região com mais de 18.145.000 ha, o clima predominante é temperado, com temperaturas médias anuais que variam de 16°C a 20°C e a precipitação média anual é de 1.784mm.

Na figura 1 apresenta-se a área de ocorrência do SAG no RS sendo destacadas as áreas de afloramento (verde) e também onde o mesmo encontra-se capeado pelas rochas efusivas da Formação Serra Geral (vermelho).

Em escala local a ETo e os parâmetros do modelo ETo_Ts foram estimados desde dados de 7 estações localizadas na área de estudos (tabela 01).

Os valores médios anuais dos parâmetros a e b do modelo de estimativa de evapotranspiração obtidos a partir das 7 estações meteorológicas, são apresentados na Tabela 2. A baixa variabilidade temporal e espacial observada nos parâmetros a e b do modelo são decorrentes do fato de a temperatura de superfície ser consequência das variáveis climáticas nos primeiros metros da atmosfera, assim sendo a variabilidade espaço temporal é determinada pela variabilidade da temperatura de superfície.

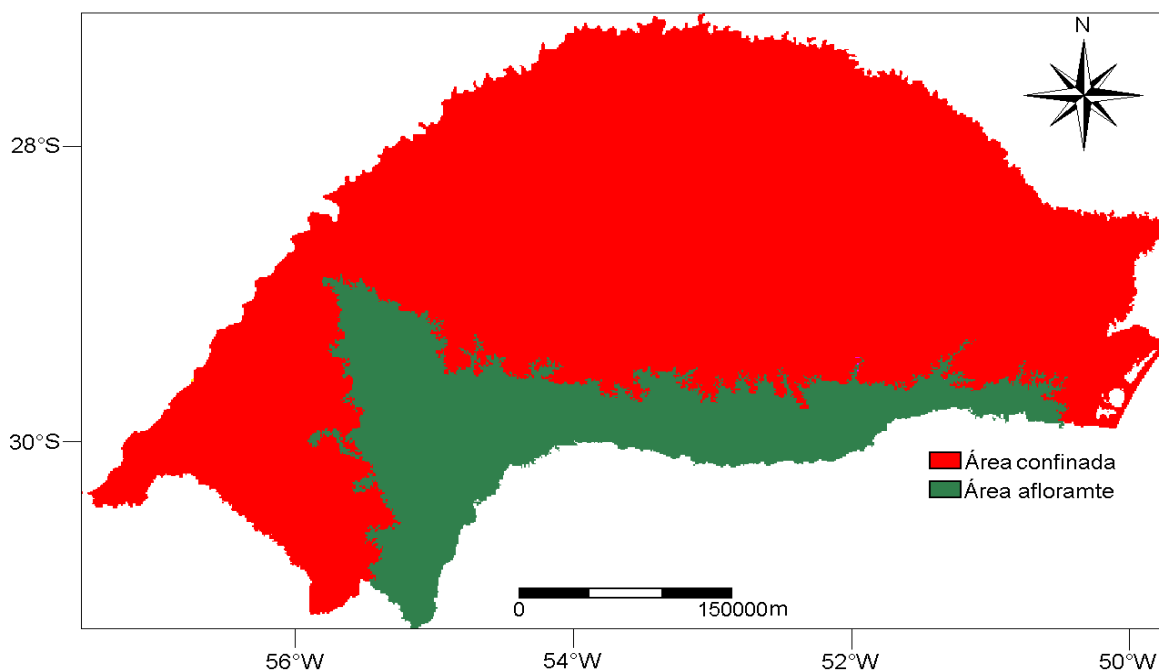


Figura 1 – Área de ocorrência do SAG no Rio Grande do Sul (Modificado de Machado 2005).

Tabela 1 – coordenadas das estações utilizadas.

Estação	Responsável	Lat	Long	Alt (m)
Alegrete	INMET	-29°41'	-55°31'	121
Caxias do Sul	INMET	-29°10'	-51°12'	759
Cruz Alta	INMET	-28°38'	-53°37'	464
Passo Fundo	INMET	-28°15'	-52°24'	684
Santa Maria	INMET	-29°42'	-53°42'	95
São Luiz Gonzaga	INMET	-28°24'	-55°01'	260
Uruguaiana	INMET	-29°45'	-57°05'	62

Em escala regional a metodologia foi aplicada a um total de 12 imagens MODIS do ano de 2005 sendo elas de 8 datas distintas, das quais 4 dias foram utilizados 2 imagens de uma mesma órbita, as quais possibilitaram a cobertura da área de estudos com a confecção de um mosaico.

Os mapas de ETo_Ts de julho (a), agosto (b), setembro (c), outubro (d), novembro (e) e dezembro (f), são apresentados na figura 2, na qual se pode observar uma grande variabilidade espacial e temporal do fenômeno monitorado. Estes mapas foram obtidos desde a temperatura de superfície (equação 4) com a aplicação da equação 1 na qual se utilizou os valores médios dos parâmetros a (0,13) e b (0,38).

Observa-se que ao longo de todo o período analisado os valores mínimos ocorreram na região leste, onde o relevo é mais acidentado e apresenta cobertura vegetal com predominância arbustiva a qual consiste um sistema solo-água-plantas mais estável, não sujeito a variações climáticas normais.

Tabela 2 – Parâmetros a e b do modelo de estimação de Eto_Ts.

Estação	a(mm/dia*C)	b(mm/dia)
Alegrete	0,12 +- 0,02	-0,35 +- 0,07
Caxias do Sul	0,16 +- 0,01	-0,42 +- 0,05
Cruz Alta	0,15 +- 0,02	-0,40 +- 0,07
Passo Fundo	0,14 +- 0,02	-0,39 +- 0,07
Santa Maria	0,15 +- 0,02	-0,39 +- 0,07
São Luiz Gonzaga	0,15 +- 0,02	-0,41 +- 0,07
Uruguaiana	0,14 +- 0,02	-0,36 +- 0,08
Média	0,13 +- 0,04	-0,38 +- 0,10

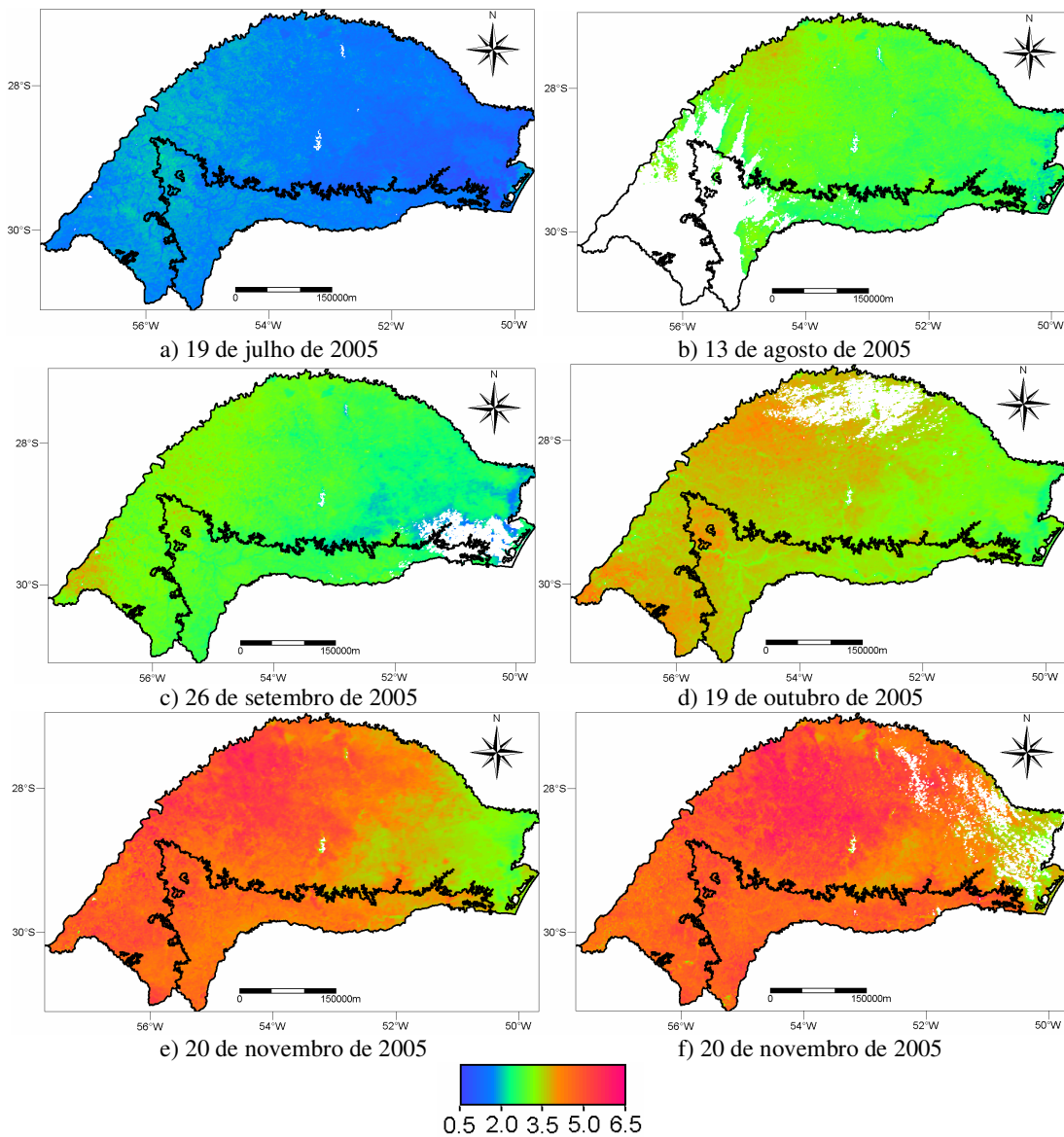


Figura 2 – Mapas de Eto_Ts (mm/dia) obtidos desde as imagens MODIS.

Já os maiores índices de evapotranspiração apresentam-se na parte centro norte do Rio Grande do Sul, onde se destacam atividades agrícolas.

Na área de afloramento do SAG se observa uma grande variabilidade espacial da evapotranspiração em toda sua extensão (leste oeste), nesta região também se observa que áreas próximas aos cursos dos rios Jacuí e Ibicuí, não são afetadas de forma significativa nos meses de forte demanda evaporativa da atmosfera, apresentando os menores índices de evapotranspiração da área de afloramento do SAG.

Na figura 5 apresenta-se a comparação dos resultados obtidos desde as imagens e os índices de evapotranspiração de referência obtidos a partir dos dados das estações localizadas na área de estudo, se pode observar o bom ajuste do modelo ($R^2 = 0,8$). Os valores de ET_o _Ts correspondem a valores médios de áreas vegetadas próximas as estações.

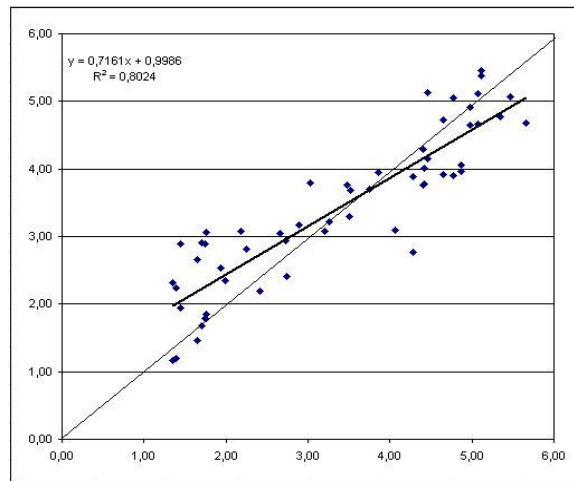


Figura 3 – ET_o x Eto_{Ts} (mm/dia).

6 Conclusões

Os resultados apresentados na figura 5 demonstram que o modelo é consistente e possibilita a obtenção da distribuição espacial da evapotranspiração em grandes áreas com uma reduzida quantidade de informações de terreno.

Para estudos em escala regional na área de ocorrência do SAG no Rio Grande do Sul é possível estimar-se a evapotranspiração desde mapas de temperatura de superfície com o uso dos valores médios dos parâmetros a (0,13) e b (0,38) apresentando um erro de $\pm 0,5$ mm/dia. Pois a variabilidade espaço temporal é representada de forma satisfatória pela temperatura de superfície.

Vale neste momento salientar que a aplicação deste modelo não está limitada ao sensor utilizado, podendo os mapas de temperatura serem gerados a partir de dados de diferentes satélites.

Em caso de estudos em menores áreas do SAG os autores indicam o uso dos parâmetros a e b das estações próximas à área analisada. Os resultados obtidos com uso de parâmetros locais aprestam erros que variam inferiores a 0,3mm/dia.

7 Referências

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and drainage paper 56. Water Resources, Development and Management Service, Rome, Italy.

- Boegh, E., Soegaard, H., Thomsen, A.**, 2002. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance., *Remote Sensing of Environment*, 79: 329– 343.
- Friedl, M.A.**, 2002. Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements *Remote Sensing of Environment*, 79: 344– 354.
- Kustas, W.P., Li, F., Jackson, T.J., Prueger, J.H., MacPherson, J.L., Wolde, M.**, 2004. Effects of remote sensing pixel resolution on modelled energy flux variability of croplands in Iowa. *Remote Sensing of Environment*, 92: 535–547.
- Machado, J. L. F.** 2005 *Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia, UNISINOS. São Leopoldo. 237 p.*
- Niclòs, R., Caselles, V., Coll, C., Valor, E.**, 2007 Determination of sea surface temperature at large observation angles using an angular and emissivity-dependent split-window equation. *Remote Sensing of Environment* 111 (2007) 107–121
- Rivas, R., Caselles, V.**, 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing –based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 93: 68-76.
- Sánchez, J. M., Kustas, W. P., Caselles, V., Anderson, M.C.**, 2007. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112: 1130–1143.
- Schirmbeck J.** 2005. Estimativa de evapotranspiração regional em área de ocorrência do Sistema Aquífero Guarani-Vale do Rio dos Sinos-RS: Uma aplicação de técnicas de sensoramento remoto, São Leopoldo - RS, 132 pp.
- Schirmbeck, J., Rivas, R.**, 2007a. Estimación de la radiación neta a nivel del suelo a partir de datos captados por el sensor ETM+. *Anais del XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*: 6159-6165.
- Schirmbeck, J., Rivas, R.**, 2007b. Comportamiento de los términos del balance de energía en una pastura. En *Teledetección: hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*, editado por R. Rivas, A. Grisotto, M. Sacido. 317-322; 490 pp. Disponible on line en: www.aet.org.ar
- Sobrino, J., Jimenez Muñoz, J. C., Paolini, L.**, 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90: 434-440.
- Timmermans, W. J., Kustas, W. P., Anderson, M. C., French, A. N.**, 2007. An intercomparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) modeling schemes. *Remote Sensing of Environment*, 108: 369–384.
- Valor E., Caselles, V.** 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas. *Remote Sensing of Environment* 57: 167-184.