

## Uso de dados climáticos globais de reanálise e produtos MODIS na estimativa dos componentes de balanço de energia.

Juliano Schirmbeck<sup>1</sup>  
Denise Cybis Fontana<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGSR/CEPSRM  
Caixa Postal: 15044 - 91501-970 - Porto Alegre – RS/Brasil  
schirmbeck.j@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia –  
Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia  
Caixa Postal: 15100 - 91501-970 - Porto Alegre – RS/Brasil  
dfontana@ufrgs.br

**Abstract.** Most studies of estimation of Energy Balance components on a regional scale, in addition to using images, require surface meteorological data. The most commonly used data are air temperature ( $T_a$ ), global radiation ( $R_g$ ) and wind speed ( $U_2$ ). The purpose of this paper is to analyze the possibility of the use of MODIS products and meteorological data of reanalysis (NCEP/DOE Reanalysis II). The study period covered three years, from 2009 to 2011, using data from three different sources: a) MODIS products, b) climatic data of reanalysis and c) data from a micrometeorological tower located in the municipality of Cruz Alta - RS. The analysis of the results from the import process and spatial interpolation of the reanalysis data allowed the smoothing of the spatial distribution of the climatic variables, which allows the use of the data of this product as input data in the BE models. The dispersions between the meteorological variables measured in the tower and the reanalysis data presented high association for the  $T_a$  and  $R_g$  data. Estimates of BE components presented satisfactory performance, the dispersions presented concentration of points in the vicinity of the 1: 1 line for the different BE components, with more significant deviations observed on some specific days. The use of reanalysis data has as its main advantage the regular spatial distribution and constant temporal sequence of the meteorological variables, which has contributed greatly to studies on a regional scale..

**Palavras-chave:** *Latent heat flux, Sensible heat flux, Eddy Covariance*, Fluxo de calor latente, Fluxo de calor sensível.

### 1. Introdução

As estimativas dos componentes do Balanço de Energia (BE) em nível regional permitem a compreensão da subdivisão dos fluxos de energia e massa em condições de cobertura diversificada da superfície terrestre, o que pode contribuir sobremaneira em estudos climáticos, hidrológicos e agrometeorológicos.

A maioria dos estudos de estimativa dos componentes do BE baseia-se em modelos de fluxo unidimensionais, observando o princípio de conservação de energia (Brutsaert, 1984). Lembrando que BE pode ser definido como a maneira que se distribui o saldo de radiação ( $R_n$ ) da superfície, em fluxo de calor latente (LE) e nos fluxos de calor sensível para o ar (H) e para o solo (G) (Friedl, 2002, Timmermans et al., 2007).

Em escala regional, as imagens de Sensoriamento Remoto (SR), adquiridas nas distintas regiões do espectro eletromagnético, permitem determinar algumas propriedades físicas da superfície como albedo, temperatura de superfície, índice de vegetação, as quais possibilitam dimensionar os fluxos de energia e massa entre a superfície e a atmosfera (Boegh et al., 2002; Kustas et al., 2004; Timmermans et al., 2007).

Porém, a quase totalidade dos modelos de estimativa dos componentes de BE a partir de imagens de satélites necessitam de dados meteorológicos, como temperatura do ar, radiação global e velocidade do vento, adquiridos em escala local. A fonte mais comumente utilizada

são as estações meteorológicas de superfície, que apesar de atualmente existirem disponíveis diversas redes de dados (BDMEP-INMET, PCSD-INPE, dentre outras), os mesmos muitas vezes apresentam limitações nas aplicações para uso nos modelos regionais.

Dentre as principais limitações, podem-se mencionar as quebras de séries com falta de leituras, os dados disponibilizados sem terem passados por análises de confiabilidade, os registros não coincidentes aos horários de passagem dos satélites, além de dificuldades oriundas dos mais distintos formatos de armazenamento e organização das bases de dados.

Outro fator relevante nesta análise é o fato de que a opção por utilizar dados de apenas um ponto de medição (estação meteorológica), implica na perda de informações referentes à variabilidade espacial das variáveis meteorológicas, ancorando a variabilidade espacial do componente do BE apenas nos temas oriundos das imagens de satélite.

Tendo em vista as dificuldades apresentadas em relação a dados provenientes de estações meteorológicas, a proposta do presente trabalho é analisar a viabilidade de uso de dados meteorológicos de escala global, disponibilizados pelos produtos de reanálise, para a estimativa dos componentes do BE a partir dos produtos MODIS. Também é objetivo apresentar uma metodologia de importação dos dados de reanálise em ambiente de processamento de imagens (PDI).

## 2. Metodologia de Trabalho

A metodologia de estimativa dos componentes de BE foi aplicada em área que compreende ao Estado do Rio Grande do Sul, a qual possui grande importância no nacional de produção de grãos.

O período de estudo abrangeu três anos, de 2009 a 2011, sendo utilizados dados provenientes de três fontes distintas: a) produtos MODIS: temperatura de superfície, albedo, e índice de vegetação, b) dados climáticos de reanálises: temperatura do ar, radiação global e velocidade do vento e c) dados de torre micrometeorológica localizada no município de Cruz Alta - RS (referência para fins de verificação da acurácia das estimativas dos componentes de BE): temperatura do ar, radiação global, velocidade do vento e as componentes do balanço de energia,  $R_n$ ,  $Le$ ,  $H$  e  $G$ .

Ao longo do período de três anos foram analisados um total de 52 datas/imagens, sendo elas 20 de período que compreendem a implementação de culturas de verão, predominantemente soja e 32 de culturas de inverno, predominantemente trigo.

A seleção das 52 datas se deu por dois critérios. O primeiro foi a condição meteorológica, que consistiu na seleção de dias que não apresentaram cobertura de nuvens ao longo de todo o dia sobre as coordenadas da estação, tendo como base os gráficos de  $R_g$ . O segundo critério de seleção foi técnico, ou seja, necessária a disponibilidade simultânea de imagens e de dados em escala local para estimativa e avaliação dos componentes do BE.

### 2.1 Estimativa dos Componentes do BE

Os componentes do BE foram calculados a partir de um modelo de fluxo unidimensional, baseado na maneira que se distribui o saldo de radiação ( $R_n$ ) em nível do solo, em fluxo de calor latente ( $LE$ ) (evapotranspiração), fluxo de calor sensível ( $H$ ) e fluxo de calor no solo ( $G$ ). O  $LE$  foi estimado como termo residual da Equação 1

$$R_n + G + H + LE = 0 \quad (1)$$

O saldo de radiação foi obtido a partir da Equação 2

$$R_n = R_g (1 - \alpha) + \epsilon_s \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (2)$$

onde: o albedo ( $\alpha$ ), a emissividade da superfície ( $\epsilon_s$ ) e a temperatura da superfície ( $T_s$ ) foram

obtidos a partir de imagens de satélite, a temperatura do ar ( $T_a$ ) e Radiação Global ( $R_g$ ) são dados meteorológicos de escala local,  $\epsilon_a$  é a emissividade do ar e  $\sigma$  a constante de Stefan Boltzmann.

O fluxo de calor no solo foi estimado como uma fração do saldo de radiação proporcional à cobertura vegetal, a partir do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), conforme Equação 3 proposta por Moran et al. (1989):

$$G = 0,583 \exp(-2,13NDVI)R_n \quad (3)$$

Fluxo de calor sensível foi obtido a partir de modelo que se baseia na diferença entre a temperatura de superfície e da temperatura do ar, Equação 4 (Boegh et al., 2002):

$$H = \rho c_p \frac{T_s - T_a}{ra} \quad (4)$$

onde:  $\rho$  é a densidade do ar,  $c_p$  e o calor específico do ar úmido a uma pressão constante e  $ra$  a resistência aerodinâmica.

## 2.2 Dados de Reanálise

Os dados de reanálise utilizados para estimativa dos componentes do balanço de energia compreendem dados da série *NCEP/DOE Reanalysis II* gerados pelo *National Climate Prediction Center* – NOAA.

Esta série disponibiliza dados com resoluções temporais de 6h (quarto registros por dia), médias diárias e médias mensais, com registros de janeiro de 1979 até junho de 2016. A cobertura espacial compreende uma grade global com resolução espacial variada. São disponibilizados dados em nível de superfície e de outros 17 distintos níveis de pressão atmosférica. (ESRL – NOAA *Earth System Research Laboratory*). As séries de dados são subdivididas em quatro grandes grupos: *Pressure*, *Gaussian Grid*, *Spectral Coefficients Data* e *Surface Data*.

Para a estimativa dos componentes de BE foram utilizados os dados de radiação solar global, temperatura do ar a 2m e velocidade do vento a 10m, disponibilizados no *Gaussian Grid*. Neste grupo, são disponibilizadas as medidas em nível de superfície, sendo a cobertura espacial do mesmo de 88,542°N a 88,542°S e de 0°E a 358,125°E, em uma grade de 192 colunas e 94 linhas (*Global T62 Gaussian Grid*), cuja a resolução espacial é variável (mais detalhes apresentados em resultados). A resolução temporal utilizada foi a de 6h, com 4 registros diários. O formato dos arquivos de dados netCDF.

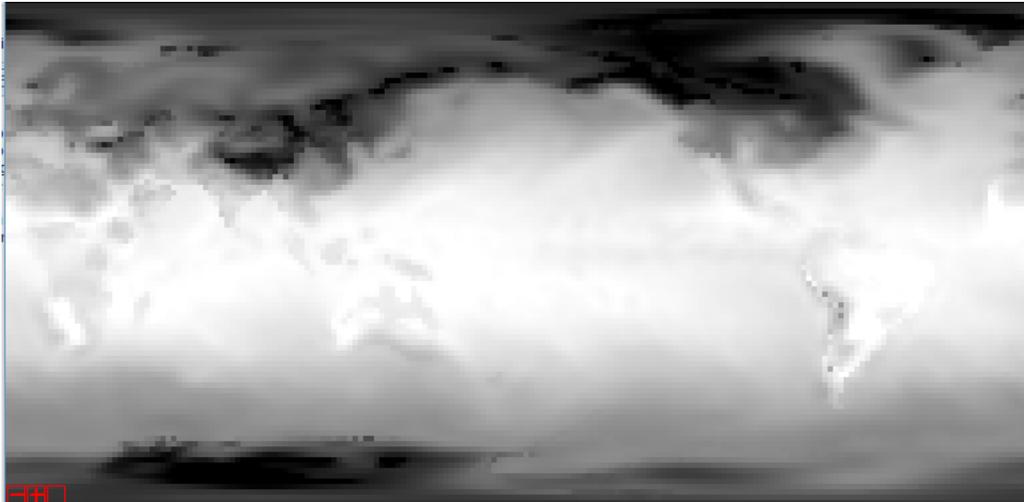
As variáveis meteorológicas de radiação global e velocidade do vento são disponibilizadas em arquivos anuais sendo que cada arquivo possui 1.460 (considerando ano não bissexto). Os dados são disponibilizados em variáveis do tipo inteiro de 32 bits e necessitam ser convertidas em valores de ponto flutuante com a aplicação de um fator de escala (atributo *scale\_factor*) e offset (atributo *add\_offset*).

Os dados de velocidade do vento compreendem registros a 10m de altura e são disponibilizados em dois arquivos por ano, sendo que cada arquivo possui 1.460 (considerando ano não bissexto) e apresentam os componentes de projeção U e V do vetor de vento. Ambas componentes de vento necessitam ser convertidas para valores de ponto flutuante para posteriormente ser aplicado o cálculo do módulo do vetor de vento, que compreende a velocidade do mesmo, e posteriormente converter os dados e vento para 2m ( $U_2$ ) com uso da equação proposta por Allen et al. (1998).

A matriz global dos dados disponibilizados na série *NCEP/DOE Reanalysis II* é apresentado na Figura 1, na qual se pode observar o caráter de cobertura global dos dados. Outra característica importante destes dados é que as imagens são representadas com

coordenadas de longitude que variam entre  $0^{\circ}$  a  $360^{\circ}$  e não de  $-180^{\circ}$  a  $+180^{\circ}$  como o padrão adotado nos dados da área de sensoriamento remoto.

O tamanho do pixel da matriz global apresenta variação no eixo y da imagem (latitude), sendo que os menores pixels correspondem às de latitudes extremas, onde o pixel corresponde a  $1,889^{\circ}$ , e os maiores são de  $1,905^{\circ}$  os pixels alocados na matriz entre as linhas 10 e 84 não apresentam variações em seu tamanho, sendo os mesmos de  $1,905^{\circ}$ . Em função desta variabilidade de resolução no uso dos dados disponibilizado em *Gaussian Grid* deve-se atentar a variável latitude disponível no arquivo *netCDF* que fornece a coordenada central do pixel de cada uma das 94 linhas da matriz e para longitude o tamanho é constante.



**Figura 1.** Matriz global de 192 colunas e 94 linhas dos dados de Temperatura do ar, registro das 12h UTC de 01/01/2009. *Fonte:* dados de reanálise (*NCEP/DOE Reanalysis II* gerados pelo National Climate Prediction Center – NOAA).

O ambiente de PDI utilizado para a importação dos dados de reanálise foi ENVI + IDL, com o uso das funções de importação de arquivos *netCDF*, leitura de parâmetros dos arquivos, leitura de identificadores, parâmetros, lista de atributos e dos valores dos atributos das variáveis e leitura das matrizes de dados. As funções são, respectivamente: *NCDF\_OPEN*, *NCDF\_INQUIRE*, *NCDF\_VARIDSINQ*, *NCDF\_VARINQ*, *NCDF\_ATTNAME*, *NCDF\_ATTGET* e *NCDF\_VARGET* ([http://www.harrisgeospatial.com/docs/NCDF\\_Overview.html](http://www.harrisgeospatial.com/docs/NCDF_Overview.html)).

Após importada a matriz de dados, foi efetuado um recorte de 10 linhas por 10 colunas, abrangendo o Estado do Rio Grande do Sul. Para a mesma área foi criada uma matriz com resolução espacial compatível com as imagens MODIS (pixel de  $0,009^{\circ}$  x  $0,009^{\circ}$ ). Após definidas estas duas matrizes, as coordenadas centrais dos pixels da matriz  $10 \times 10$  foram alocadas como pontos na matriz com resolução MODIS, para então interpolar os dados originais do arquivo com o uso do método de Kriging (Isaaks e Srivastava 1989)

Para uma análise da consistência dos dados provenientes da reanálise foi feita a análise do gráfico de dispersão destas variáveis e das medidas de referências registradas na torre micrometeorológica de Cruz Alta. A partir das dispersões, foram obtidas as equações de regressão linear entre os dois conjuntos de dados, testadas a significância e utilizadas para ajuste dos dados de reanálise. Os ajustes foram aplicados somente as variáveis de  $T_a$  e  $R_g$ .

### 2.3 Produtos Modis

Para obtenção dos componentes do BE foram utilizados os produtos MODIS referente a: Temperatura de Superfície da Terra - MOD11A2, índice de vegetação - MOD13A2 e Albedo

- MCD43B3. Todos os produtos foram utilizados na resolução espacial de 1.000 m e as resoluções temporais utilizadas compreende composições temporais de 16 dias para o MOD13, 8 dias para o MOD43 e diária para o MOD11.

Estes produtos são disponibilizados em recortes fixos sempre proporcionando a cobertura de uma área específica do Globo. Para a cobertura da área de estudo foi feito um mosaico dos quadrantes H11V12 e H11V13, os quais foram obtidos do site LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) - <https://lpdaac.usgs.gov/>.

## 2.4 Medidas de Referência

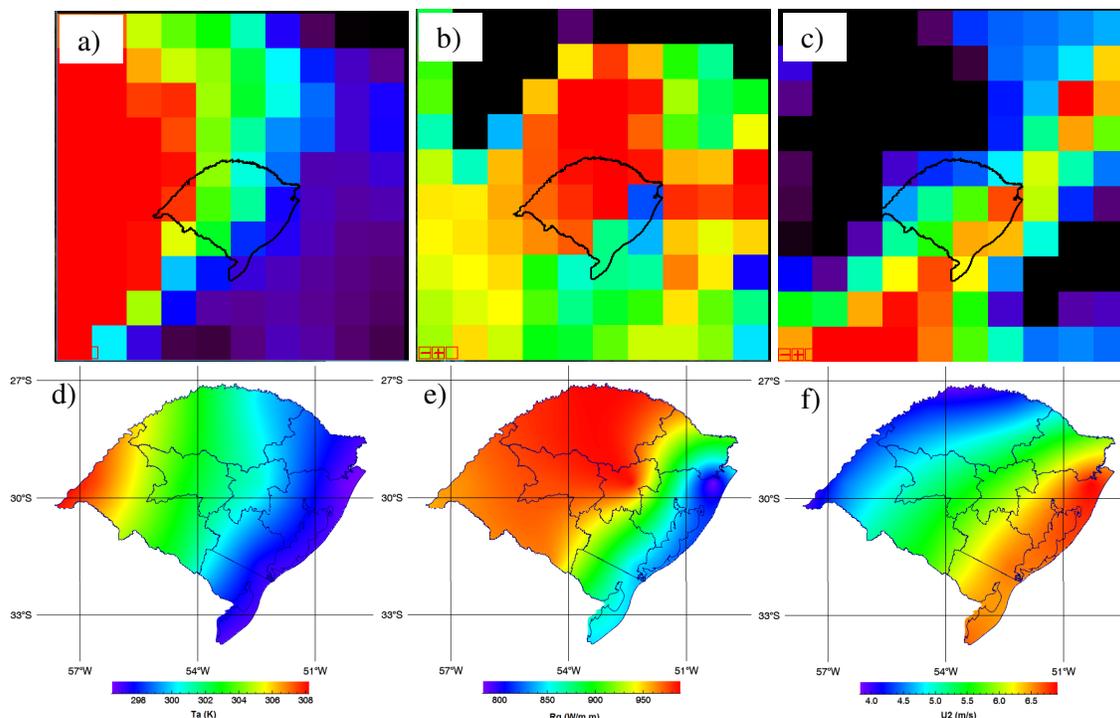
Os componentes do BE foram obtidos experimentalmente, a 3 m de altura, utilizando dados coletados em uma torre micrometeorológica, equipada com um sensor de saldo de radiação ( $R_n$ ) (Kipp & Zonen - NR LI TE) e fluxo de calor no solo ( $G$ ) (Hukseflux - HFP01SC-L), efetuando medidas em 1Hz, um anemômetro sônico 3D, CSAT3 (Campbell Scientific Inc.) e um analisador infravermelho de gás (LI-7500, LI-COR, Inc.) efetuando medidas em alta frequência (10 Hz). Os fluxos turbulentos de calor sensível ( $H$ ) e latente ( $LE$ ) foram estimados pelo método *Eddy Covariance*, obtendo médias de 30 min. As medidas micrometeorológicas foram efetuadas em uma parcela experimental cultivada com soja no verão e trigo no inverno, com de 40 x 60 m, no município de Cruz Alta – RS, nas seguintes coordenadas geográficas: Latitude: -28,6036; Longitude: -53,6736; Altitude: 432 m. Este sítio experimental integra a Rede SULFLUX, que é operada pelo Laboratório de Micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (Lumet-UFSM)

As medidas de referência, tanto dos componentes do balanço de energia,  $R_n$ ,  $LE$ ,  $H$  e  $G$ , bem como das variáveis meteorológicas,  $T_a$ ,  $R_g$  e  $U_2$ , foram usadas para analisar os resultados obtidos a partir da construção de gráficos de dispersão.

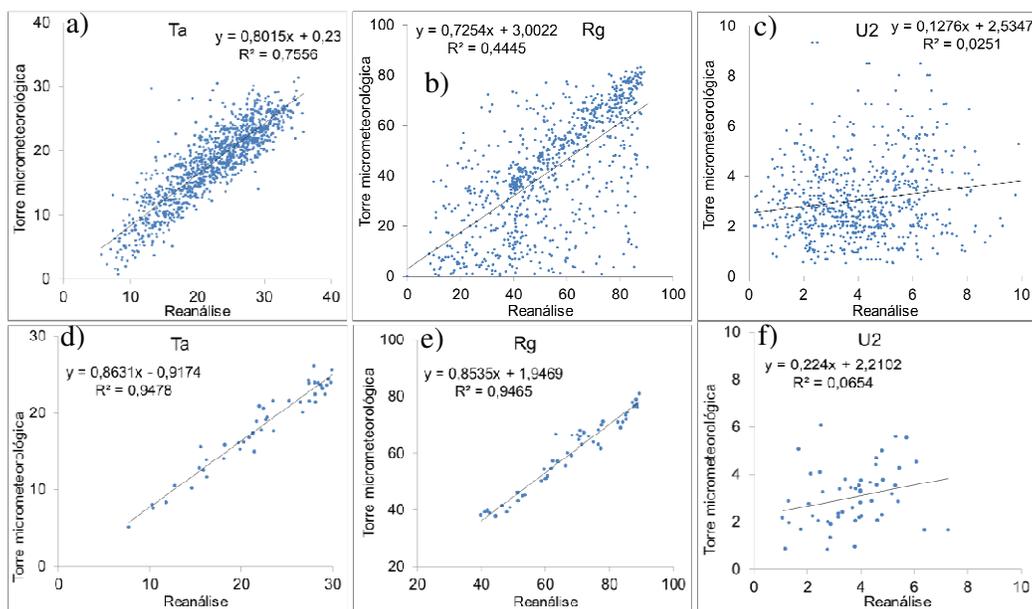
## 3. Resultados e Discussão

A Figura 2 ilustra os resultados decorrentes do processo de importação e interpolação espacial dos dados de reanálise, mostrando a suavização obtida quanto à distribuição espacial das variáveis meteorológicas (Figura 2), o que permite o uso dos dados deste produto como dados de entrada nos modelos de BE. Pode-se observar, como exemplo, que no dia 23/01/2009 o gradiente de temperatura em direção ao limite noroeste do estado, bem como os maiores valores de velocidade do vento no litoral do estado, já o padrão de distribuição espacial dos dados de  $R_g$  dependem da nebulosidade.

A dispersão entre os dados meteorológicos provenientes da reanálise e os da medidas na torre de Cruz Alta (Figura 3a, 3b e 3c) mostraram associação para a variável  $T_a$ , com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,76, e dados situados próximos à linha 1:1. Para os dados de  $R_g$ , o  $R^2$  encontrado foi de 0,44, com uma maior dispersão nos valores. Apesar disso, verifica-se um grande número de dados no entorno da reta 1:1 para esta variável. Já para os dados de velocidade do vento, que se trata de uma variável com maior dinâmica espacial, verificou-se baixa associação e o  $R^2$  foi de apenas 0,02. As dispersões entre as variáveis meteorológicas nos 52 dias analisados são apresentados na Figura 3d, 3e e 3f. Nestas, a dispersão foi bem menor e já apresentaram altos coeficientes de determinação, o que era esperado, visto que se trata de dias com céu aberto em que a variabilidade dentro do pixel é menor e mais similar ao observado no ponto de medição.



**Figura 2.** Subset de 10 x 10 pixels importado do arquivo *netCDF* com sobreposição do limite do Rio grande do Sul para os dados de temperatura do ar a), velocidade do vento b) e radiação solar global c) e as mesmas variáveis meteorológicas interpoladas em matriz compatível com as imagens Modis em d), e), f), do dia 23/01/2009.

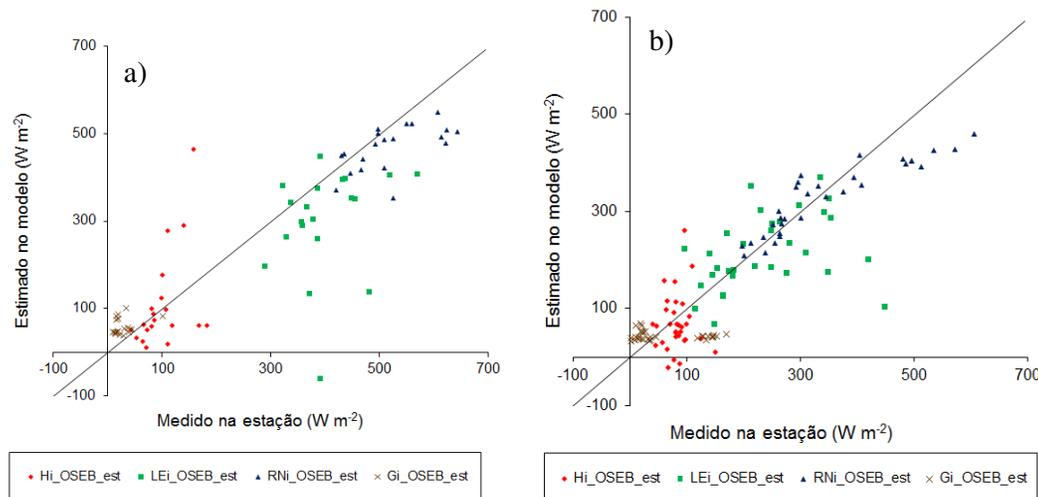


**Figura 3.** Dispersão entre as variáveis meteorológicas provenientes da reanálise e medidas na torre micrometeorológica de Cruz Alta. Sendo as dispersões a, b e c respectivamente as variáveis Ta, Rg, U2 registradas ao longo dos anos de 2009 a 2011 e as dispersões d, e e f correspondem as mesmas variáveis porem para os registros correspondentes aos 52 dias analisados.

O impacto do uso de variáveis meteorológicas provenientes da reanálise ou de medição nos resultados de estimativa dos componentes do BE pode ser observado nos gráficos de dispersões mostrados na Figura 4, também para Cruz Alta, para culturas de verão e inverno.

O saldo de radiação apresentou padrão similar para os dois tipos de cobertura vegetal. Este foi o componente estimado que mais se aproximou dos valores experimentais, com os pontos da dispersão se aproximando da reta 1:1 e erros RMSE iguais ou inferiores a  $80 \text{ W m}^{-2}$ . Isto é esperado, pois, em geral, nos estudos de BE a partir de imagens, as estimativas de  $R_n$  são consideradas como as de mais fácil obtenção e de menor erro. (Tang et al. 2013, Timmermans et al., 2007).

Na estimativa do fluxo de calor sensível para o ar observa-se maior dispersão entre os valores estimados e medidos experimentalmente em ambos os cultivos. Observou-se, que os valores de  $H$  foram pequenos e agrupados nas proximidades da reta 1:1, com RMSE de  $95 \text{ W m}^{-2}$  para os cultivos de verão e  $59 \text{ W m}^{-2}$  para cultivos de inverno. Baseado no uso do diferencial entre temperatura do ar e de superfície e na resistência aerodinâmica obtida a partir da velocidade do vento (Kustas et al., 2004; Tang et al., 2013), este pode ser apontado como o componente com maior sensibilidade às variáveis de reanálise utilizadas na estimativa do mesmo.



**Figura 4.** Dispersão dos componentes do Balanço de Energia: experimental X simulação, para as diferentes coberturas vegetais a) cultivos de verão e b) cultivos de inverno, dos 52 dias analisados. Os valores experimentais correspondem a medidas realizadas em Cruz Alta.

O fluxo de calor no solo apresentou baixos valores em ambos os cultivos, com magnitudes semelhantes a da torre. Podem-se observar maiores desvios na estimativa da  $G$  para alguns dias para o cultivo de inverno. Porém nestes dias, o padrão de medida da torre foi anormal, com valores acima do padrão das observações.

O fluxo de calor latente é obtido como termo residual na equação do BE utilizada e, desta forma, sua estimativa fica diretamente vinculada ao desempenho da estimativa dos outros componentes, principalmente de  $H$ , que é responsável pela segunda maior parcela de consumo de energia no nível da superfície (Friedl, 2002, Timmermans et al., 2007). Nas estimativas durante os cultivos de verão  $LE$  apresentou erro de estimativa mais expressivo  $167 \text{ W m}^{-2}$ , já as estimativas durante os cultivos de inverno foram de  $121 \text{ W m}^{-2}$ .

De um modo geral, as estimativas apresentaram desempenho satisfatório, tendo as dispersões apresentado concentração de pontos nas proximidades da reta 1:1 para os distintos componentes do BE. Desvios mais significativos foram observados em três datas durante os cultivos de verão (Figura 4 a), nas quais ocorreram sobreestimativa de  $H$  e a consequente



subestimativa de  $LE$ . Já nos cultivos de inverno (Figura 4 b), pode-se observar em apenas duas datas desvios mais expressivos na estimativa de  $LE$ .

#### 4. Conclusões

A análise dos dados disponíveis na série de reanálise mostra coerência e associação com os dados registrados na torre micrometeorológica, principalmente para as variáveis de  $Ta$  e  $Rg$  comprovando sua versatilidade para uso na estimativa do BE.

A estimativa dos componentes do BE com uso conjugado de produtos MODIS e dados meteorológicos de reanálise são satisfatórios e apresentam erros de estimativa aceitáveis.

Os dados de reanálise, apesar de inserirem algum nível de incerteza na estimativa dos componentes do BE, frente aos dados registrados na torre, tem como sua principal vantagem a distribuição espacial regular e sequência temporal constante das variáveis meteorológicas, que vem a contribuir amplamente para estudos em escala regional. Nessa escala, metodologias clássicas, baseados no uso de dados de apenas uma estação, trazem grandes incertezas.

#### Agradecimentos

Ao CNPq pela concessão de auxílio financeiro à pesquisa, projeto 456.585/2014-1.

#### Referências bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and drainage paper 56. Water Resources, Development and Management Service, Rome, Italy. 1998.
- Boegh, E., Boegaard, H., Thomsen, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. *Remote Sensing of Environment* 79, 329-343. 2002.
- Brutsaert, W., *Evaporation into the atmosphere. Theory, history, and applications.* Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 299 pp. 1984.
- ESRL – NOAA Earth System Research Laboratory Disponível em:  
< <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html> > Acesso em 16/11/2016.
- Friedl, M.A., Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements *Remote Sensing of Environment*, 79: 344– 354. 2002
- Kustas, W.P., LI, F., Jackson, T.J., Prueger, J.H., Macpherson, J.L., Wolde, M. Effects of remote sensing pixel resolution on modelled energy flux variability of croplands in Iowa. *Remote Sensing of Environment*, 92: 535–547. 2004.
- Moran, M. S., Jackson, R. D., Raymond, L. H., GAY, L. W., Slater, P. N. Apping surface energy balance components by combining landsat thematic mapper and ground-based meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, Vol.30, p. 77-87. 1989.
- Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M., *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 1989.
- Timmermans, W. J., Kustas, W. P., Anderson, M. C., French, A. N., An intercomparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) modeling schemes. *Remote Sensing of Environment*, vol. 108, n4, p 369-384. 2007.
- USGS (U.S. Geological Survey), ESPA (Center Science Processing Architecture). Disponível em:  
< <https://espa.cr.usgs.gov> > Acesso em 16/11/2016.