

Loops de histerese na evapotranspiração em área de pastagem no sul do Brasil

Hysteresis loops in the evapotranspiration in a pasture area in South Brazil

Gisele Cristina Dotto Rubert, Débora Regina Roberti e Marcelo Bortoluzzi Diaz

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil

Resumo

Um dos principais componentes nos balanços de água e energia em ecossistemas terrestres, a evapotranspiração (ET), foi estimada utilizando a técnica de covariância de vórtices. Para melhor compreender os processos de transferência de energia é necessário o conhecimento de como a ET responde as diferentes variáveis meteorológicas. O objetivo principal deste trabalho é investigar a resposta de histerese de ET às principais variáveis meteorológicas, que incluem temperatura do ar (Temp), déficit de pressão de vapor (DPV) e saldo de radiação (R_n) em uma escala de tempo diária para uma área de pastagem do Sul do Brasil. ET apresenta histerese com DPV e Temp, respondendo mais fortemente ao déficit de pressão de vapor.

Palavras-chave: *Evapotranspiração. Histereses. Variáveis meteorológicas.*

Abstract

One of the main components of water and energy balance in terrestrial ecosystems, the evapotranspiration (ET), was estimated using the eddy covariance technique. To better understand these energy transfer processes it is necessary to know how the ET responds to different meteorological variables. The main objective of this work is to investigate the hysteresis response of ET to environmental variables including air temperature (Temp), vapor pressure deficit (DPV) and net radiation (R_n) at a diel timescale for a pasture area in southern Brazil. ET presents hysteresis with DPV and Temp, responding more strongly to the vapor pressure deficit.

Keywords: *Evapotranspiration. Hysteresis. Environmental variables.*

1 Introdução

Evapotranspiração (ET) é o termo utilizado para descrever os processos de evaporação da água e a transpiração de uma superfície vegetada para atmosfera. Além de ser um componente importante no ciclo hidrológico também é um dos principais processos no balanço de energia em superfície. Como a principal componente de perda de água nos ecossistemas terrestres, a ET afeta fortemente os ciclos biogeoquímicos e o balanço energético da superfície, influenciando diretamente o tempo e o microclima local (WANG et al., 2012). A taxa de evapotranspiração é controlada por diversos fatores, como disponibilidade de energia, déficit de pressão de vapor, temperatura do ar, velocidade do vento e conteúdo de água do solo. Estas variáveis impactam significativamente a variabilidade da ET, e desta forma, varia em diferentes escalas espaço-temporais (LU et al., 2011; WANG et al., 2012).

A relação entre ET e algumas variáveis atmosféricas pode gerar o fenômeno de histerese. Esse fenômeno vem sendo estudado para diferentes ecossistemas. Um exemplo vem de Mallick et al. (2016) que relataram loops de histerese para a evapotranspiração na floresta Amazônica. As relações de histereses também foram encontradas entre a variação diurna da evapotranspiração e o déficit de pressão de vapor em Zhang et al. (2014) e Zheng et al. (2014). A histerese é um fenômeno comum na hidrologia, e pode ser considerada como a dependência de uma variável de resposta não apenas no valor de uma variável de direção, mas também em sua história passada. Assim, os loops de histerese resultantes podem ser considerados indicadores importantes da existência de fatores limitantes (NIU et al., 2011).

Neste trabalho, a evapotranspiração foi estimada utilizando a técnica de covariância dos vórtices sobre pastagem natural em um sítio experimental no estado do Rio Grande do Sul, no bioma Pampa. O objetivo deste estudo é analisar os loops de histerese entre a ET e as variáveis meteorológicas, bem como quais variáveis meteorológicas a ET responde com forte histerese. Deste modo, podemos compreender o padrão diário da ET em resposta à fatores ambientais neste bioma.

2 Materiais e métodos

Descrição do sítio experimental

O sítio experimental de estudo é uma área de pastagem natural localizado em Santa Maria (SM, latitude: 29°40' S e longitude: 53°42' W, 88m de altitude), no estado do Rio Grande do Sul, em que não há indícios de que a área tenha sido utilizada para algum tipo de manejo diferente do atualmente em curso, ou seja, pecuária. O solo na região de SM é classificado como Planossolo (IBGE, 2002), com granulometria aproximada de 29% de argila, 37% de silte e 34% de areia. Segundo a classificação de Köppen (NIMER, 1989), o clima pertence à zona do franco Cfa, subtropical úmido. A vegetação encontrada na área de estudo, é com predominância de *Andropogon lateralis*, e outras espécies como *Paspalum notatum*, *Axonopus affinis*, *Aristida laevis* (SANTOS et al., 2014).

Os dados atmosféricos foram coletados no período de 01 de setembro de 2014 a 01 de setembro de 2015. A concentração de vapor d'água e a velocidade do vento foram medidas a 3 m de altura usando um analisador de gás infravermelho caminho fechado (LI-7500, Li-Cor) e um anemômetro sônico tridimensional (Wind Master Pro/Gill Instruments). Saldo de radiação, temperatura do ar e umidade relativa do ar foram medidas pelos seguintes sensores a 3m de altura: CNR4 (Kipp & Zonen) e Termo-higrômetro (HMP155/ Vaisala).

Processamento dos dados

O fluxo de energia na forma de calor latente (LE) necessário para o estudo foi obtido por meio da técnica de covariância dos vórtices (BALDOCCHI et al., 1988; MONCRIEFF et al., 1997) com o software EddyPro®, versão 6.1, Li-Cor (Lincoln, Nebraska, EUA). As medições das variáveis para covariância turbulenta foram amostradas a uma frequência de 10 Hz e LE obtido em médias de 30 minutos, com cálculo das flutuações turbulentas em média bloco, rotação dupla e correção para os efeitos da densidade (WEBB et al., 1980). A correção espectral de alta frequência foi baseada no uso de formulações matemáticas para modelar as propriedades de fluxo e espectrais que descrevem atenuações de fluxo devido à configuração instrumental (GASH and CULF, 1996). Correções filtro passa alta e baixa seguiram a metodologia de Moncrieff et al. (2004) e Moncrieff et al. (1997), respectivamente. Testes de qualidade nos fluxos seguiram a metodologia de Mauder and Foken, (2004). Correção de ângulo de ataque para componentes de vento segundo metodologia de Nakai e Shimoyama, (2012). E por fim, para análise estatística, a remoção de spikes seguiu o método de Vickers e Mahrt (1997).

Neste trabalho, após o processamento do LE, foram removidos dados fisicamente não aceitáveis, valores menores que -40 W m⁻² e maiores que 650 W m⁻², e dos horários em que houve precipitação e 1 hora após o evento. Após esta filtragem, aproximadamente 30% dos dados de LE foram considerados lacunas. Em um pós-processamento foi realizado o fechamento do balanço de energia seguindo a metodologia de Foken et al. (2008). Nesta metodologia, a energia residual disponível (RAE), diferença entre a energia disponível ($R_n - G$) e a energia utilizada para processos turbulentos ($H + LE$), é particionada entre

os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H), segundo a razão de Bowen (β) experimental. As lacunas, geradas pelos filtros ou pelo mau funcionamento dos sensores, foram preenchidas utilizando o método de proposto por Reichstein et al. (2005), utilizando a ferramenta computacional R-Forge para executar o pacote REdyProc. Nesta etapa utilizam-se dados das variáveis meteorológicas: temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar. Para completar a série temporal destas variáveis foram utilizados dados coletados pelas estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet). Para o sítio experimental de Santa Maria, a estação do Inmet mais próxima encontra-se a aproximadamente 4 km da torre de fluxo (29,72°W, 53,72°S, 103 m de altitude).

Estimativa da evapotranspiração

A evapotranspiração real do bioma Pampa (mm h^{-1}) foi estimada a partir do ciclo diário médio do fluxo de energia na forma de calor latente, LE , em W m^{-2} , utilizando a relação $ET = a * LE$, sendo $a = 0,0015$ o fator de conversão de W m^{-2} para mm h^{-1} .

3 Resultados e Discussões

A temperatura média para o ano de 2014/2015 foi de 20°C e a precipitação bem distribuída ao longo do ano, com acumulado de 1922 mm. Foram observados loops de histerese no sentido horário nas relações entre ET e as variáveis meteorológicas, déficit de pressão de vapor (DPV) e temperatura do ar (Temp), nos ciclos diários médios no ano de 2014/2015 (Figura 1). Nas relações de ET com o saldo de radiação não houve formação de loops de histerese, mostrando melhor correlação de ET com esta variável. Zengh et al. (2014) relataram loops de histerese nas relações de temperatura do ar e déficit de pressão de vapor com ET. Da mesma forma, naquele estudo não houve resposta de histerese de ET ao saldo de radiação.

Os valores de ET durante a noite foram negativos e foram removidos das curvas de histerese. Frequentemente os valores de fluxo de energia na forma de calor latente são negativos no período noturno nestes sítios, indicando formação de orvalho (WILSON et al., 2002). Durante a noite, os valores de ET apresentaram pequenas variações, em seguida aumentam rapidamente, atingindo um pico máximo aproximadamente às 13 h (hora local).

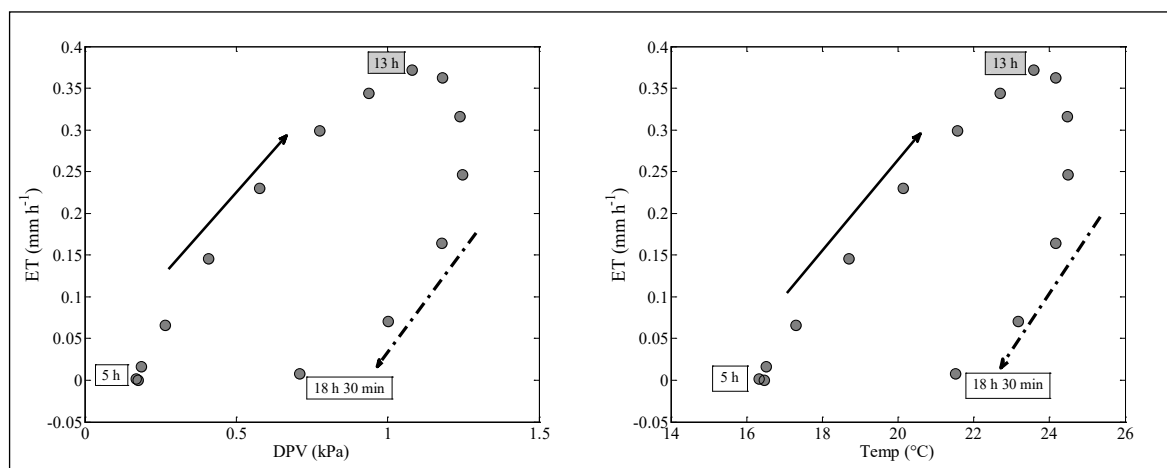


Figura 1 - Curvas de resposta da evapotranspiração (ET, mm h^{-1}) em relação às variáveis meteorológicas: (a) déficit de pressão de vapor (DPV, kPa) e (b) temperatura do ar (Temp, °C), em um ciclo diário médio para o sítio de Santa Maria no período de 01 de setembro de 2014 a 01 de setembro de 2015. Os pontos representam valores médios de 60 minutos para um ano. A flecha sólida indica a direção da resposta na parte da manhã e flecha tracejada à tarde. Retângulos cinza indicam os horários de máxima evapotranspiração e os brancos indicam os horários de inversão no sinal de ET.

Em relação às curvas, é observado que à medida que as variáveis DPV e Temp aumentam no período da manhã, a ET responde rapidamente a este aumento, indicando resposta à demanda atmosférica. Em seguida, na parte da tarde, ET decresce com a redução das variáveis meteorológicas. Entretanto, com diminuição na resposta às variáveis meteorológicas. Entre as 13 h e as 16 h, horários de máxima ET e máximos valores de DPV e Temp, respectivamente, é observado o rápido decréscimo de ET, ainda com o aumento das variáveis meteorológicas. Mostrando assim, que as condições climáticas locais definem a taxa evapotranspirativa da vegetação.

O mesmo comportamento foi obtido por Zengh et al. (2014) e Ahrends et al. (2014). O aumento de ET no período da manhã e subsequente diminuição na parte da tarde podem estar diretamente relacionados à energia disponível e teor de água

no solo disponível para a planta. A abertura e/ou fechamento dos estômatos podem contribuir para o surgimento da histerese. Estudos anteriores descobriram que os estômatos responderam de forma diferente às mudanças nos fatores ambientais durante os processos de controle estomático, com maior condutância estomática pela manhã (TAKAGI et al., 1998; BAI et al., 2015), indicando maior condutância de superfície e, portanto, maior taxa evapotranspirativa em comparação com a tarde. Desta forma, o controle estomático afeta a transpiração do dossel e evita a perda excessiva de água nos dias em que o déficit de pressão de vapor é maior.

Com relação à intensidade de resposta de ET às variáveis meteorológicas, mensurada pela área dos loops de histerese, as relações foram mais fracas em ET-Temp quando comparadas a relação ET-DPV. Os valores obtidos para as áreas são apresentados na Tabela 1. Para o ano analisado, podemos concluir que para a vegetação do bioma Pampa, a ET responde mais fortemente ao DPV com uma área média 71% maior que na relação de ET-Temp.

Tabela 1 – Áreas das curvas de histereses das relações ET-DPV e ET-Temp para o sítio de Santa Maria (SM) no ano de 2014/2015.

Relação dos loops de histerese	Área
ET-DPV	0,0764
ET-Temp	0,0220

4 Conclusões

Foram observados loops de histerese no sentido horário para as variáveis meteorológicas temperatura do ar e déficit de pressão de vapor em um sítio sobre vegetação de pastagem no bioma Pampa. Entretanto, não foi obtido resposta de histerese de ET ao saldo de radiação. A taxa evapotranspirativa responde às condições climáticas locais, sendo com maior resposta ao déficit de pressão de vapor (DPV).

Agradecimentos

Os autores agradecem a Capes e ao CNPq.

Referências

- AHRENDTS, H.E.; HASENEDER-LIND, R.; SCHWEEN, J.H.; CREWELL, S.; STADLER, A.; RASCHER, U. Diurnal Dynamics of Wheat Evapotranspiration Derived from Ground-Based Thermal Imagery. *Remote Sens.* 2014; 6: 9775-9801.
- BAI, Y. et al. 2015. Hysteresis loops between canopy conductance of grapevines and meteorological variables in an oasis ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2015; 214–215: 319–327.
- BALDOCCHI, D. D.; HINCKS, B. B.; MEYERS, T. P. Measuring biosphere atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology.* 1988; v. 69, n. 5: 1331-1340.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Mapa exploratório de solos do Estado do Rio Grande do Sul, 2002. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>. Acesso em 25 maio 2017.
- JACÓBSEN, L.O.; FONTANA, D.C.; SHIMABUKURO, Y.E. Efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do Estado do Rio Grande do Sul observados através do NDVI/NOAA. *Revista Brasileira de Meteorologia.* 2004; v.19, n.2: 129-140.
- LU N.; CHEN, S.; WILSKÉ, B.; SUN, G.; CHEN, J. Evapotranspiration and soil water relationships in a range of disturbed and undisturbed ecosystems in the semi-arid Inner Mongolia, China. *Journal of Plant Ecology.* 2011; 4: 49–60.

- MALLICK, K. et al. Canopy-scale biophysical controls of transpiration and evaporation in the Amazon Basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2016; 20: 4237–4264.
- MAUDER, M.; FOKEN T. Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure. *Meteorologische Zeitschrift.* 2006; 15: 597-609.
- MONCRIEFF, J. B. et al. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapor and carbon dioxide. *Journal of Hidrology.* 1997; v.188-189: 589-611.
- MONCRIEFF, J. B. et al. Averaging, detrending and filtering of eddy covariance time series, *Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurements*, (Eds.) Lee, X.; Massman W. J.; Law B. E. Dordrecht: Kluwer Academic, 7-31, 2004.
- NAKAI, T.; SHIMOYAMA, K. Ultrasonic anemometer angle of attack errors under turbulent conditions. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2012; 18: 162-163.
- NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=281099&view=detalhes>>. Acesso em: 16 novembro 2016.
- NIU, S. et al. Seasonal hysteresis of net ecosystem exchange in response to temperature change: patterns and causes. *Global Change Biology.* 2011; 17: 3102–3114.
- SANTOS, A. B. dos. et al. Rio Grande do Sul State's (Brazil) native grasses morphogenesis under rotational grazing during spring and summer. *Ciência Rural*, vol. 44, n. 1, p. 97-103, 2014. DOI: 10.1590/S0103-84782014000100016.
- REICHSTEIN, M. et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology.* 2005; 11: 1424-1439.
- TAKAGI, K.; TSUBOYA, T.; TAKAHASHI, H. Diurnal hystereses of stomatal and bulk surface conductances in relation to vapor pressure deficit in a cool temperate wetland. *Agricultural and Forest Meteorology.* 1998; v. 91: 177-191.
- VICKERS, D.; MAHRT L. Controle de qualidade e problemas de amostragem de fluxo para dados de torre e aeronave. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 1997; 14: 512-526.
- WANG, K.C.; DICKINSON, R.E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology and climatic variability. *Reviews of Geophysics* 50, RG2005, 2012.
- WEBB, E. K.; PEARMAN, G. I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 1980; 106: 85–100.
- WILSON, K. B. et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2002; 113: 223-243.
- ZHANG, Q.; MANZONI, S.; KATUL, G.; PORPORATO, A.; YANG, D. The hysteretic evapotranspiration - vapor pressure deficit relation, *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2014; 119:125–140.
- ZHENG, H.; WANG, Q.; ZHU, X.; LI, Y.; YU, G. Hysteresis Responses of Evapotranspiration to Meteorological Factors at a Diel Timescale: Patterns and Causes. *PLoS ONE* 9(6): e98857, 2014.

Débora Regina Roberti

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil
E-mail: debora@ufsm.br

Marcelo Bortoluzzi Diaz

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil
E-mail: marbdiaz@gmail.com