

Pegada hídrica de um olival super-intensivo em condições mediterrânicas, utilizando medições de campo e detecção remota

António Macedo Nogueira¹, Teresa Afonso do Paço¹, José Couto Silvestre², Mariana Mota¹, Luís Filipe Gonzalez³, Francisco Lúcio Santos⁴ & Luís Santos Pereira¹

¹ CEER – Biosystems Engineering/Instituto Superior de Agronomia/Universidade Técnica de Lisboa (UTL), Lisboa, Portugal (anogueira@isa.utl.pt),

² INRB – Instituto Nacional dos Recursos Biológicos, Dois Portos, Portugal,

³ UNESP – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Brasil,

⁴ Universidade de Évora, Évora, Portugal

Resumo

A pegada hídrica de uma cultura representa o volume de água necessário para a produzir, relacionando as necessidades hídricas da cultura com a produção. As suas componentes, pegadas hídricas azul, verde e cinzenta, referem-se respectivamente aos volumes de água superficial e subterrânea, precipitação e de água necessária para assimilar a poluição, utilizados pela cultura. A determinação das pegadas hídricas azul e verde é normalmente conseguida através da estimativa da evapotranspiração cultural, aplicando coeficientes culturais a uma evapotranspiração de referência, calculada a partir de dados meteorológicos.

No presente estudo foram utilizadas medições da evapotranspiração para estimar a pegada hídrica de um olival super-intensivo na região de Évora. As necessidades hídricas foram medidas utilizando um método de fluxo de seiva para determinar a transpiração e do método micrometeorológico das flutuações instantâneas para medir directamente a evapotranspiração. Esta técnica foi utilizada durante um período de tempo limitado, enquanto as medições do fluxo de seiva que foram efectuadas para períodos alargados, permitiram a extensão dos registos. A evapotranspiração medida directamente apresentou valores de cerca de 3 mm.d⁻¹ e o quociente entre evapotranspiração e evapotranspiração de referência é próximo de 0,6 para o mesmo período. Comparou-se a estimativa da pegada hídrica obtida com o procedimento habitual com a obtida utilizando medições *in-situ* e ainda utilizando técnicas de detecção remota.

A pegada hídrica do olival sob estudo foi inferior às simulações encontradas na literatura, o que pode ser explicado por diferenças na densidade de plantação, produção e gestão da rega. O olival em estudo obteve uma produção elevada, com um azeite que preencheu as características essenciais à classificação de azeite extra virgem, o mais valorizado, o que contraria o efeito do elevado consumo de água, resultando numa pegada hídrica inferior à de olivais não regados ou com menor densidade de plantação.

Palavras-chave: *Olea europaea*, fluxo de seiva, flutuações instantâneas, rega, NDVI

Abstract

Water Footprint of a Super-intensive Olive Grove Under Mediterranean Climate using Ground-based Evapotranspiration Measurements and Remote Sensing. The water footprint of a crop is the volume of water that is necessary to produce it, therefore relating crop water requirements and yield. The components of

water footprint, blue, green and grey water footprints, refer to the volumes of respectively, surface and groundwater, rainfall, and water required to assimilate pollution, that are used to produce the crop yield. Determining blue and green water footprints is generally achieved using estimates of evapotranspiration. In the present study we have used evapotranspiration measurements to estimate the water footprint of a super-intensive olive grove in southern Portugal. Crop water requirements were measured using a sap flow technique, to determine transpiration and the eddy covariance method for direct measurement of evapotranspiration. This technique was used for a short period, while the sap flow measurements were performed for long periods, hence allowing the extension of the data series. Evapotranspiration measured directly was in average close to 3 mm d^{-1} and the ratio of evapotranspiration to reference evapotranspiration approached 0.6 for the same period.

The water footprint of the olive crop under study was lower than those reported in literature. A possible reason relates to the density of plantation, yield and irrigation crops management. The irrigated grove under study had a high yield, which compensates high water consumption, leading to a water footprint lower than for rainfed or less dense groves. Furthermore, as evapotranspiration measurements were used to calculate water footprint instead of the common procedure, this might have also introduced some differences.

As recently discussed in literature, remote sensing techniques can provide estimates of actual evapotranspiration, precipitation, surface runoff and irrigation needs, when associated with modeling. Here, water footprint estimates using in situ evapotranspiration measurements were further compared with water footprint estimates obtained with remote sensing.

Keywords: *Olea europaea*, sap flow, eddy covariance, irrigation, NDVI

Introdução

A pegada hídrica (PH) de uma cultura, é o volume de água que é necessário para a sua produção, relacionando necessidades hídricas da cultura e a produção. O conceito foi introduzido por Hoekstra (2003) e desenvolvido por Hoekstra e Chapagain (2008) e pode ser usado como um indicador da apropriação de recursos de água doce. As componentes da pegada hídrica, a pegada hídrica azul, verde e cinza, referem-se aos volumes de água superficiais/subterrâneos, chuva e água necessária para assimilar a poluição, que são usados para produzir a cultura, respectivamente. O conceito tem sido aplicado a muitas culturas, inclusivé olival (p. ex., Salmoral et al., 2011), mas a informação sobre olival super-intensivo é escassa. A representatividade do olival super-intensivo aumentou em Portugal nos últimos anos, principalmente na região Sul do país. Prevê-se que esta região venha a ter Verões mais quentes, com secas mais intensas, assim como Invernos e Outonos menos chuvosos (Santos e Miranda, 2006). Esta situação tenderá a aumentar a pressão sobre os recursos hídricos e portanto, dada a crescente importância do olival super-intensivo, é necessário avaliar os seus padrões de consumo de água e os riscos associados às condições das alterações climáticas. Uma possível abordagem a esta questão reside na utilização da PH da cultura, que tem a vantagem de ser comparável para diferentes sistemas culturais.

A determinação das pegadas hídricas azul e verde é geralmente realizada usando estimativas da evapotranspiração (ET), obtidas com uma abordagem que recorre ao uso de coeficientes culturais e de uma evapotranspiração de referência, utilizando o modelo

CROPWAT (Hoekstra et al, 2011; Mekonnen e Hoekstra, 2011). No entanto, quando estão disponíveis medições de ET, a precisão da estimativa da PH pode ser melhorada. A utilização de uma abordagem de estimativa da ET que recorra ao uso dos coeficientes culturais duais (Allen et al., 1998), como é o caso do modelo SIMDualKc (Rosa et al., 2012), poderá também contribuir para uma estimativa da PH mais precisa. O potencial de utilização de técnicas de detecção remota para a avaliação da PH de culturas tem sido discutida em literatura recente (Romaguera et al., 2010). A detecção remota pode fornecer a estimativa da evapotranspiração, precipitação, escoamento superficial e necessidades de rega, quando associada à modelação. O trabalho apresentado integra-se no projecto H2Olive3s que visa estudar a dinâmica da água em olivais regados no Alentejo, numa escala temporal de 3 anos. O projecto inclui o uso do modelo METRIC (Allen et al., 2007), em que o cálculo do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) é parte integrante do processo. Neste trabalho apresentam-se dados preliminares sobre a determinação do NDVI a partir de imagens do Landsat 5 TM e comparam-se com dados de campo, para um olival super-intensivo no Sul de Portugal. São também comparadas as estimativas da PH utilizando medições in situ da ET e a informação obtida por detecção remota.

Material e Métodos

O presente estudo foi realizado em 2011 num olival comercial localizado na região do Alentejo, perto de Évora (38° 24 'N, 7° 43' O, 143 m de altitude). O clima do Alentejo é mediterrânico, com uma precipitação média anual entre 600 e 800 mm e uma temperatura média anual entre 16 e 17° C. O sistema de produção do olival (propriedade da empresa "Olivais do Sul") baseava-se na plantação de alta densidade de árvores da cultivar Arbequina (1,35 m × 3,75 m, 1975 árvores ha⁻¹), realizada em 2006. O olival era regado com uma frequência próxima da diária durante a Primavera e o Verão, com um sistema gota-a-gota (gotejadores com espaçamento de 0,75 m). A área molhada após a rega era de cerca de 23% da área total e a fracção de solo coberto pela vegetação era cerca de 0,37. O terreno era ondulado e a parcela experimental encontrava-se integrada numa área total de aproximadamente 78 ha.

A transpiração das plantas foi avaliada através da medição do fluxo de seiva pelo método de *Granier* (Granier, 1985), entre o dia do ano (DDA) 134 e 353/2011. Um conjunto de 6 sensores foi distribuído por árvores seleccionadas, de acordo com a frequência de classes de diâmetro do tronco, obtidas a partir de uma amostra de plantas mais alargada. As médias de 30 minutos foram armazenadas num datalogger (modelo CR1000, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA). Os gradientes naturais de temperatura do tronco foram corrigidos usando dados de um sensor sem aquecimento. A evapotranspiração (ET) foi medida pelo método micrometeorológico das flutuações instantâneas (*eddy covariance technique* na terminologia anglo-saxónica, EC), utilizando um anemómetro sónico tridimensional e um higrómetro de Krypton (Modelos CSAT3 e KH20, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) conectados a um datalogger (Modelo CR1000, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA), a partir do fim de Julho até ao final de Agosto. Os sensores foram colocados numa torre metálica a uma altura de medição de 4,8 m. Os dados brutos foram recolhidos com uma frequência de 10 Hz e posteriormente analisados com o Software TK3 (Universidade de Bayreuth, Alemanha) para a correção e cálculo de médias para 30 minutos. A correcção dos dados foi realizada de acordo com Foken et al. (2011) e os dados brutos foram submetidos a uma rotação de coordenadas usando o método de rotação duplo (Kaimal e

Finnigan, 1994), dadas as condições não planas do terreno. A representatividade espacial das medições foi examinada através de uma análise da pegada (Schuepp et al., 1990). Os dados aqui apresentados são preliminares e dados posteriores permitirão melhorar as relações matemáticas entre fluxo de seiva, evaporação do solo e evapotranspiração e produzir resultados de ET mais precisos.

Os valores de NDVI foram calculados para as seguintes datas de 2011: 01/31, 03/20, 04/05, 05/23, 06/24, 07/26, 08/27, 09/12 e 10/30. As datas foram distribuídas ao longo do ano, mas com particular atenção para o período de Verão. Não foi possível utilizar a imagem de 06/08 (fig. 1), devido à cobertura de nuvens do campo experimental. As 3 bandas e 4 das 5 imagens Landsat 5 TM para as datas mencionadas foram importadas e convertidas para o formato de arquivo do software ERDAS IMAGINE. Este software foi utilizado para pré-processamento das imagens e cálculos finais. Como descrito em Café et al. (2008), a técnica *dark-object subtraction* foi utilizada para a correção da interferência atmosférica que ocorre nas imagens. Em seguida, a correção radiométrica foi aplicada às imagens, afim de converter números digitais (DN) [0, 255], em valores de reflectância [0, 1] e posteriormente foram calculados os NDVI para a área da imagem completa. Foram geradas estatísticas para uma área de interesse (AOI) dentro da área de estudo, que foi estabelecida de forma a ser homogênea, sem estradas ou eventos de escoamento superficial. Os valores de NDVI obtidos foram utilizados para estimar o coeficiente cultural basal (K_{cb}), seguindo o método FAO56, utilizando coeficientes culturais duais (Allen et al., 1998) para calcular a ET do olival. A relação K_{cb} -NDVI utilizada foi a descrita em Simonneaux et al. (2008):

$$K_{cb} = 1,64 \times (NDVI - NDVI_{min})$$

onde $NDVI_{min}$ é o valor de NDVI para um solo nu. Posteriormente, foi calculado um coeficiente de uniformidade, de acordo com Café et al. (2008), utilizando a seguinte equação:

$$UC = 100 \times (1,0 - (SD / m) \times (2 / \pi)^{0,5})$$

onde UC é o coeficiente de uniformidade (%), SD é o desvio padrão e o símbolo m representa a média dos valores de K_{cb} calculados para AOI.

O azeite resultante das azeitonas colhidas no dia 25 de Outubro de 2011 foi analisado em termos de reacções degradativas de hidrólise (acidez), oxidação (índice de peróxido, análise espectrofotométrica) e estabilidade oxidativa (Rancimat) de acordo com as metodologias preconizadas pelo Regulamento Europeu 1989/2003.

Resultados e Discussão

A evapotranspiração medida directamente com o método *eddy covariance* foi em média 3 mm d⁻¹ e a razão entre a evapotranspiração e a evapotranspiração de referência aproximou-se de 0,6 para o mesmo período. As plantas estavam sob um stress hídrico moderado, como confirmada com medições pontuais do potencial hídrico de madrugada.

Como mostrado na fig. 2, os valores de NDVI do campo experimental permanecem estáveis ao longo do ano em comparação com as zonas circundantes. Os valores de K_{cb} (fig. 3) foram calculados para as 9 datas das imagens de satélite

escolhidas e são comparativamente mais elevados do que os reportados na literatura (Allen et al., 1998).

A UC do K_{cb} calculada variou entre um valor máximo de 90,4% para 2011/01/31 e um mínimo de 87,5% para 2011/09/12, representando uma homogeneidade de desenvolvimento da cultura ao longo do ano para a área de interesse seleccionada.

A pegada hídrica do olival em estudo foi menor do que as relatadas na literatura, o que estará relacionado com diferenças na densidade de plantação, produção e gestão da rega. O olival em estudo apresentou uma produção elevada (14 ton ha^{-1}), o que compensa um elevado consumo de água, originando uma pegada hídrica menor do que no caso dos olivais de sequeiro ou com menor densidade de plantação. Os parâmetros de qualidade determinados para o azeite obtido (Quadro 2) permitem classificá-lo como azeite extra virgem, o mais valorizado. Dado que foram utilizadas medições da evapotranspiração para calcular a pegada hídrica, em vez de ser seguido o procedimento comum (usando estimativas de evapotranspiração), as diferenças observadas poderão também estar relacionadas com esta alteração.

Conclusões

Uma abordagem muito simplificada pode dividir a pegada hídrica de uma cultura agrícola em duas variáveis principais: a evapotranspiração total anual e a produção da cultura. Para o presente estudo, desenvolvido para um olival super-intensivo, os valores da evapotranspiração situam-se numa gama média-alta, quando se comparam com referências da literatura, mas a produção é superior à de olivais menos intensivos da região. Tal permite explicar o valor relativamente baixo encontrado para a pegada hídrica.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: 1) Project H2Olive3S - Integration of *in-situ* biophysical information on crop and land surface with remotely sensed observations to model olive water use and irrigation scheduling at local and regional scales (PTDC/AGR-PRO/111717/2009), 2) Programa Ciência 2008, FCT. Os autores agradecem o apoio dado pela empresa “Olivais do Sul” onde se situava a parcela experimental e as informações fornecidas pelo Dr. Matthias Mauder (Karlsruhe Inst. Technology, Alemanha).

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. Rome, Italy.
- Allen, R.G., Tasumi, M. & Trezza, R. 2007. Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133:380-394.
- Café, C., Branco, R., Pereira, L.S. & Tavares, R. 2008. Estima de coeficientes culturais basais usando imagens Landsat. Aplicação ao regadio do Caia. In: L.S. Pereira, F.B. Victoria, P. Paredes, M. Garcia, E. Palácios, A. Torrecillas (eds.), *Tecnologias para o Uso Sustentável da Água em Regadio*, 30-33, Edições Colibri e CEER, Lisboa.

- Daamen, C.C., Simmonds, J.S., Wallace, J.S., Laryea, K.B. & Sivakumar, M.V.K. 1993. Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils. *Agricultural and Forest Meteorology* 65:159-173.
- Foken, T., Leuning, R., Oncley, S.P., Mauder, M. & Aubinet, M. 2011. Corrections and data quality. In: M. Aubinet et al. (eds), *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Granier, A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières* 42:193-200.
- Hoekstra, A. Y. (Ed) 2003. *Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12–13 December 2002, Value of Water Research Report Series No. 12, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands*.
- Hoekstra, A.Y. & Chapagain, A.K. 2008. *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*, Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. & Mekonnen, M.M. 2011. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan, London, Washington.
- Kaimal, J.C. & Finnigan, J.J. 1994. *Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement*. Oxford University Press, New York, NY.
- Mekonnen, M.M. & Hoekstra, A.Y. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences* 15:1577-1600.
- Paço, T.A., Ferreira, M.I. & Conceição, N. 2006. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach. *Agricultural Water Management* 85:305-313.
- Romaguera, M., Hoekstra, A.Y., Su, Z., Krol, M.S. & Salama, M.S. 2010. Potencial of Using Remote Sensing Techniques for Global Assessment of Water Footprint of Crops. *Remote Sensing* 2:1177-1196.
- Rosa, R.D., Paredes, P., Rodrigues, G.C., Alves, I., Fernando, R.M., Pereira, L.S., Allen, R.G., 2010. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agricultural Water Management* 103:8-24.
- Salmoral, G., Aldaya, M.M., Chico, D., Garrido, A. & Llamas, M.R. 2011. The water footprint of olives and olive oil in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9: 1089-1104.
- Santos, F.D. & Miranda, P. (Eds) 2006. *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II*. Gradiva, Lisboa.
- Simonneaux, V., Thomas, S., Lepage, M., Duchemin, B., Kharrou, H., Berjami, B., Boulet, G. & Chehbouni, G. 2008. « SAMIR », A tool for irrigation monitoring using remote sensing for landcover mapping and evapotranspiration estimates. Proc. 13th Int. Water Resources Assoc. World Water Congress. 1-4 Sept., Montpellier, France.

Quadro 1 – Comparação da pegada hídrica de olival obtida com medições da evapotranspiração (ET) (presente estudo) e com estimativas (presente estudo e referências bibliográficas); K_c – coeficiente cultural, K_{cb} – coeficiente cultural basal, K_s – coeficiente de stress, K_e – coeficiente da evaporação do solo, T – transpiração, E_s – evaporação do solo.

Fonte	Processo de cálculo das necessidades hídricas da cultura	Período em análise	Resolução espacial	Pegada hídrica azul + verde ($m^3 ton^{-1}$)
Mekonnen e Hoekstra, 2011	CROPWAT: $ET = K_c \times K_s \times ETo$	1996-2005	Global	2970
Salmoral et al., 2011	CROPWAT: $ET = K_c \times K_s \times ETo$	1997-2008	Espanha	1264
Este estudo	CROPWAT: $ET = K_c \times K_s \times ETo$	2011	Alentejo, Portugal	576
Este estudo	Medições no terreno; $ET = T + E_s$	2011	Alentejo, Portugal	733
Este estudo, detecção remota	Coef. cultural dual: $ET = (K_{cb} + K_e) \times ETo$	2011	Alentejo, Portugal	757

Quadro 2 – Análise química do azeite produzido e referência respectiva para azeites extra virgem.

Parâmetros	Referência	Olival
Acidez (% ácido oleico)	≤ 0.8	0.1
Índice de peróxido (meq O_2 /Kg)	≤ 20	3
	K232	≤ 2.5
Análise espectrofotométrica	K270	≤ 0.22
	ΔK	≤ 0.01
Ceras (mg/kg)	≤ 250	142.5
Rancimat (h) (T=110°C; ar=20 L/h)		13.7

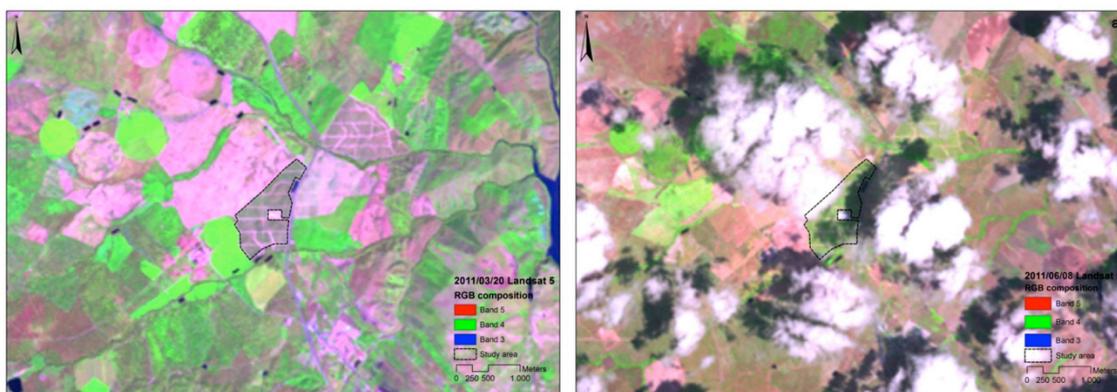


Figura 1 – Composição de falsa cor para detecção da presença de nuvens.

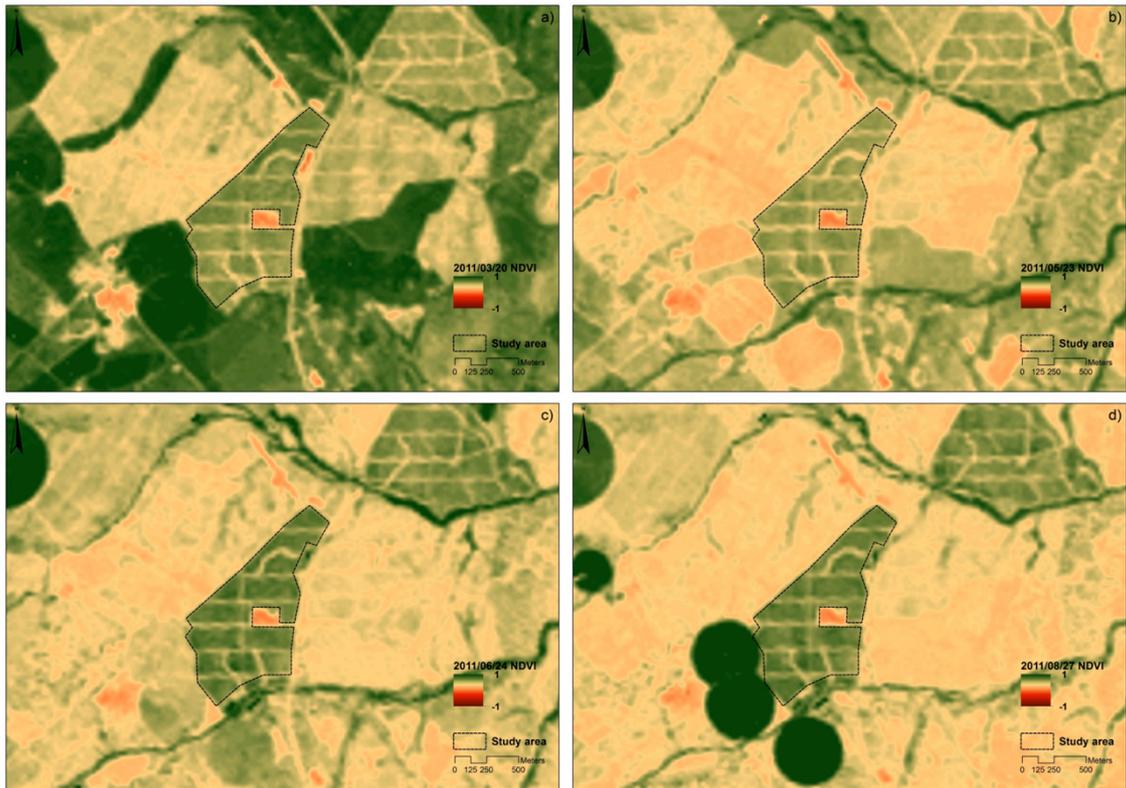


Figura 2 – imagens NDVI para 4 datas diferentes: a) 2011/03/20, b) 2011/05/23, c) 2011/06/24 e d) 2011/08/27.

Figura 3 – evapotranspiração em olival obtida a partir de medições de campo (ET), evaporação do solo (Es) e evapotranspiração obtida a partir de informação de detecção remota (ET_RS), DDA = dia do ano, 2011.