

## Uso do sensoriamento remoto para a determinação da produtividade de água no Submédio São Francisco

Antônio Heriberto de Castro Teixeira<sup>1</sup>  
Wim G.M. Bastiaanssen<sup>2,3</sup>

Embrapa Semi-Árido, CP 23, 56302-970, Petrolina, PE, Brasil.

[heribert@cpatsa.embrapa.br](mailto:heribert@cpatsa.embrapa.br)

<sup>2</sup> WaterWatch, Generaal Foulkesweg 28, 6703 BS, Wageningen, The Netherlands;

<sup>3</sup> Delft University of Technology, Stevinweg 1, 2600 GA, Delft, The Netherlands

[w.bastiaanssen@waterwatch.nl](mailto:w.bastiaanssen@waterwatch.nl)

**Abstract.** Applications of remote sensing to estimate the impact of land use change on regional water consumption in the Low-Middle São Francisco River basin are presented in this paper. Ten Landsat images for a period from 2001 to 2007 were used, together with the locally calibrated Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), agro-meteorological data and statistical information to derive regional actual evapotranspiration (ET), biomass production (BIO), and crop water productivity (CWP). The results revealed that ET for irrigated crops is around 3.6 mm day<sup>-1</sup> higher than for natural vegetation (1.4 mm day<sup>-1</sup>). The consequence of this land use change on São Francisco River's downstream stream flow was assessed by estimating volumetric incremental ET at the regional scale. Tree representative fruit farms were analysed in terms of CWP. The bio-physical crop water productivity per unit of actual evapotranspiration (CWP<sub>ET</sub>) varied between 0.4 to 1.7 litres of wine per m<sup>3</sup> of water consumed for wine grapes; 1.7 to 4.0 kilograms of fruits per m<sup>3</sup> of water consumed for table grapes; and 2.2 to 5.0 kilograms of fruits per m<sup>3</sup> of water consumed for mangos. The analyses of economic water productivities revealed that the agricultural water usage in the fruit farms is highly productive.

**Keywords:** energy balance, actual evapotranspiration, biomass production, water management.

**Palavras chaves:** balanço de energia, evapotranspiração atual, produção de biomassa, manejo de água.

### 1. Introdução

O Submédio São Francisco tem uma área total de 115987 km<sup>2</sup>, sendo 93200 ha irrigados, representando 27% da área irrigada da bacia de Rio de São Francisco. A vegetação dominante é caatinga. As principais culturas comerciais são videiras tanto para vinho como para mesa e manga. A escassez de água pode causar competição pelos recursos hídricos bem como o excesso hídrico drena os produtos agrícolas deteriorando a qualidade da água do rio.

O desafio no manejo de água é produzir mais alimento com um mínimo de utilização dos recursos hídricos. A produtividade da água (PA) reflete esta questão considerando a relação dos benefícios líquidos de culturas, da silvicultura, da pesca e dos rebanhos animais pela água utilizada para a produção destes benefícios (Molden et al., 2007). A produtividade da água de culturas agrícolas (PAC) representa a relação entre as colheitas dos produtos frescos (kg ha<sup>-1</sup>) ou os benefícios alcançados (\$ ha<sup>-1</sup>) pela unidade de água aplicada ou consumida (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) durante os ciclos produtivos. Recomenda-se analisar a PAC em termos da evapotranspiração atual (ET) porque este indicador também inclui a água proveniente da precipitação e da ascensão capilar.

Valores de PAC em culturas irrigadas (trigo, arroz, algodão, milho) foram apresentados por Zwart e Bastiaanssen (2004). Poucos exemplos na literatura sobre produtividade da água em fruteiras são disponíveis (Teixeira et al. 2007, 2008a). Nas regiões semi-áridas e áridas, o consumo de água em culturas irrigadas excede aquele dos ecossistemas naturais reduzindo o

fluxo do rio à jusante. Atualmente, os efeitos desse problema em escala de bacias hidrográficas podem ser analisados por meio do sensoriamento remoto.

O objetivo deste trabalho foi determinar a contabilidade hídrica no Submédio São Francisco através de imagens de satélite, dados agro-meteorológicos e informações estatísticas e se estas retiradas estão sendo produtivas, analisando-se a PAC das principais culturas comerciais nesta sub-bacia hidrográfica.

## 2. Metodologia de trabalho

O algoritmo SEBAL tem sido desenvolvido por Bastiaanssen (1995) e vem sendo extensivamente descrito e aplicado em bacias hidrográficas (Bastiaanssen et al., 2008). Dez imagens Landsat adquiridas em 10 de setembro de 2001, 04 de outubro de 2001, 06 de julho de 2003, 24 de setembro de 2003, 12 de outubro de 2004, 14 de novembro de 2004, 15 de outubro de 2005, 16 de novembro de 2005, 30 de julho de 2006 e 22 de janeiro de 2007 foram usadas neste estudo.

Com dados de sete estações agro-meteorológicas na região semi-árida do Submédio São Francisco, os valores diários da evapotranspiração de referência ( $ET_{0,24}$ ) foram interpolados. As evapotranspirações no ciclo produtivo (subscrito CP) e anual (subscrito ano) foram calculadas:

$$ET_{ano,CP} = \left( \frac{ET_{24}}{ET_{0,24}} \right)_{avg} ET_{0,ano,CP} \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

onde os valores  $\left( \frac{ET_{24}}{ET_{0,24}} \right)_{avg}$  são as razões diárias médias e calibradas com dados de campo para o ano ou ciclo produtivo.

Para a obtenção da produção de biomassa, os valores diários interpolados da radiação solar global ( $R_{G,24}$ ) foram usados na estimativa da radiação fotossinteticamente ativa para a mesma escala de tempo ( $PAR_{24}$ ):

$$PAR_{24} = aR_{G,24} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (2)$$

onde  $a$  é uma constante da regressão (Teixeira et al., 2008b).

Os valores da radiação fotossinteticamente ativa absorvida em 24 horas foram calculados como:

$$APAR_{24} = fPAR_{24} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (3)$$

Bastiaanssen e Ali (2003) consideram a seguinte expressão para o fator  $f$ :

$$f = -0.161 + 1.257NDVI \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (4)$$

As produções de biomassa nos ciclos produtivos e no ano foram calculadas por:

$$\text{BIO}_{\text{ano,CP}} = \sum (\varepsilon_{\text{max}} E_{F_{24}} \text{APAR}_{24} 0.864) \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

onde  $E_F$  é a fração evaporativa, ou seja, a relação entre a evapotranspiração e a energia disponível (Teixeira et al., 2008b),  $\varepsilon_{\text{max}}$  é a máxima eficiência de uso da luz e o subscrito 24 significa valores diários.

A produtividade de água de culturas baseada na evapotranspiração atual ( $\text{PAC}_{\text{ET}}$ ) em três fazendas representativas de produção de vinho, uvas de mesa manga foram analisadas através da seguinte equação:

$$\text{PAC}_{\text{ET}} = \left( \frac{\text{BIO}_{\text{CP}}}{\text{ET}_{\text{CP}}} \right) \text{IC} \text{ (kg m}^{-3} \text{ ou L m}^{-3}\text{)} \quad (6)$$

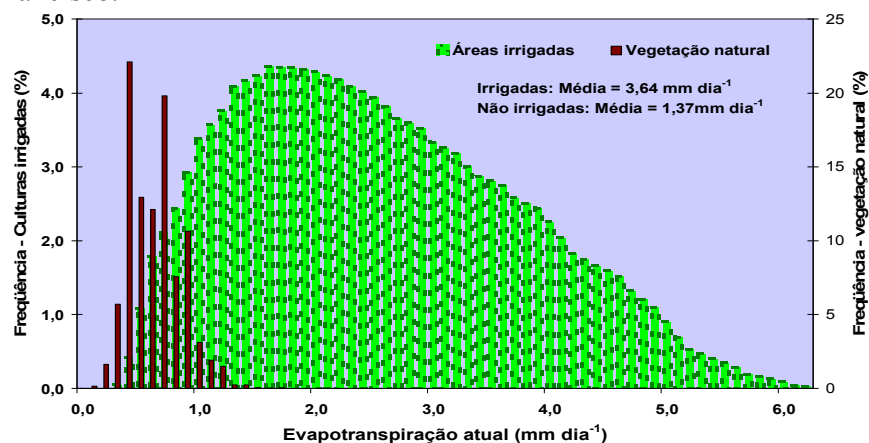
onde IC é o índice de colheita requerido para a conversão de matéria seca em produto colhido. No atual trabalho esse índice foi obtido com base nos dados de BIO provenientes de sensoriamento remoto e medições da produção de frutos nas fazendas. No caso de uvas para vinho a produção de 1,25 kg de frutos representou 1 litro de vinho (Teixeira et al., 2007).

Os valores de  $\text{ET}/\text{ET}_0$ ,  $E_F$  e NDVI foram calibrados com dados de campo (Teixeira et al. 2007, 2008a, 2008b). Após as calibrações e sucessivas interpolações das imagens os valores regionais de ET e BIO foram obtidos pelas equações 1 e 5, respectivamente.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1 Evapotranspiração atual

A Figura 1 apresenta os histogramas dos valores diários de ET na região semi-árida do submédio São Francisco.

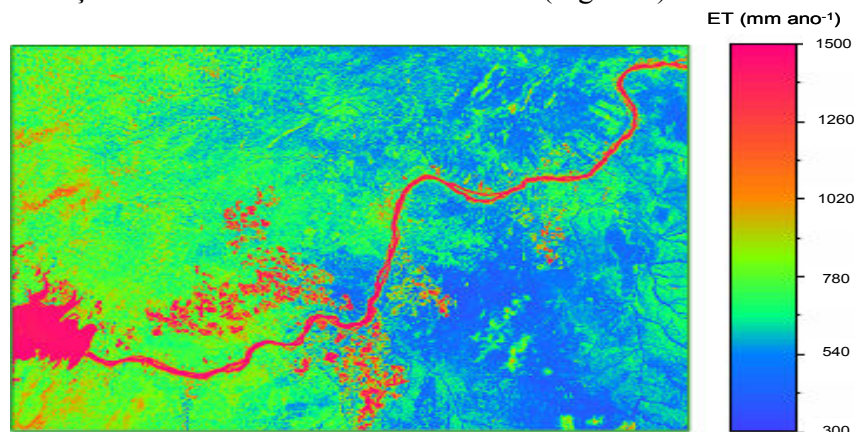


**Figura 1.** Histogramas da ET diária para áreas irrigadas e não irrigadas na região compreendida pela rede de estações agro-meteorológicas no Submédio São Francisco.

A Figura 1 foi obtida pela média de 10 imagens Landsat em diferentes épocas do ano no período de 2001 a 2007. O efeito da umidade do solo foi forte durante a estação seca. Os valores de ET inferiores a  $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$  ocorreram frequentemente durante esta condição nas áreas de vegetação natural (caatinga), sendo a distribuição mais estreita neste tipo de vegetação. Valores

de 1,0 a 5,0 mm dia<sup>-1</sup> coincidiram com as áreas de culturas irrigadas, com o limite superior para uvas de mesa. Enquanto que o valor médio para todas as áreas irrigadas foi de 3,6 mm dia<sup>-1</sup>, a vegetação natural apresentou um valor médio de 1,4 mm dia<sup>-1</sup>. As culturas irrigadas consomem então aproximadamente 2.2 mm dia<sup>-1</sup> mais do que a caatinga.

As imagens para as estações secas de 2004 e de 2005 (outubro e novembro) foram integradas com as aquelas que representam as estações mais úmidas de 2006 (junho) e de 2007 (janeiro) e para obtenção dos valores médios anuais de ET (Figure 2).



**Figura 2.** Valores médios da ET anual na região compreendida pela rede de estações agro-meteorológicas no Submédio São Francisco.

O ano de 2004 choveu acima da normal climatológica enquanto que em 2005 o total foi abaixo. Então a média desses dois anos representada na Figura 2 foi considerada representativa para a região. Os valores mais altos ocorreram nas áreas cultivadas com uvas de mesa, em torno de 800 a 1300 mm ano<sup>-1</sup>. Os mangueirais apresentaram valores um pouco inferiores em relação aos parreirais, variando de 600 a 1100 mm ano<sup>-1</sup>, enquanto na caatinga os valores estiveram entre 200 e 600 mm ano<sup>-1</sup>, correlacionados com às quantidades de precipitação anual.

Um resumo estatístico de uso da terra e ET no Submédio São Francisco é apresentado na Tabela 1. Os dados de área cultivada são do IBGE para o ano de 2005.

**Tabela 1:** Principais tipos de uso da terra, área e média da evapotranspiração atual no Submédio São Francisco baseados em medições de campo, sensoriamento remoto e dados estatísticos.

Superfície	Area (ha)	Area (%)	ET <sub>24</sub> (mm d <sup>-1</sup> )	ET <sub>ano</sub> (km <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup> )
Parreirais	8180	9	3,9 <sup>(1)</sup>	0,12
Mangueirais	18607	20	3,6 <sup>(2)</sup>	0,24
Culturas irrigadas	93180	100	3,6 <sup>(3)</sup>	1,22
Não irrigada	11505520	-	1,4 <sup>(4)</sup>	58,79

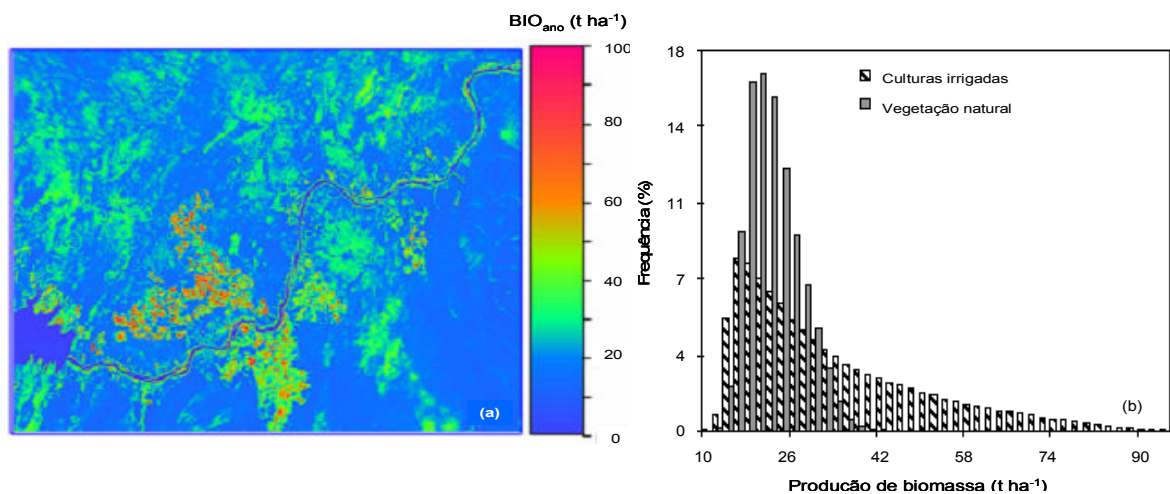
<sup>(1)</sup>: fonte - Teixeira et al. 2007, <sup>(2)</sup>: fonte - Teixeira et al., 2008a, <sup>(3)</sup> e <sup>(4)</sup>: fonte - imagens da Figura 1.

As áreas com mangueirais e parreirais representaram 20% e 9% da área irrigada total, respectivamente, com uma depleção evaporativa total de 0.36 km<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>. Para todas as culturas irrigadas, a depleção evaporativa total aumenta para 0.75 km<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> (93180 ha e ΔET de 2,2 mm dia<sup>-1</sup>), o que representa a água consumida que não se torna mais disponível à jusante do rio.

Em um estudo anterior na área do Nilo Coelho (Bastiaanssen et al., 2001), a eficiência de aplicação de água na irrigação foi de 60%. Aplicando esta porcentagem ao consumo de  $0,75 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  a retirada total do rio no Submédio São Francisco foi estimada em  $1,25 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ . Supondo-se que em torno de 80% da diferença entre o bombeamento da água e ET retornam ao rio, a retirada líquida transforma-se em  $0,85 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  com um fluxo de retorno de  $0,40 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  com  $0,10 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  sendo escoado para os aquíferos.

### 3.3 Produtividade de água

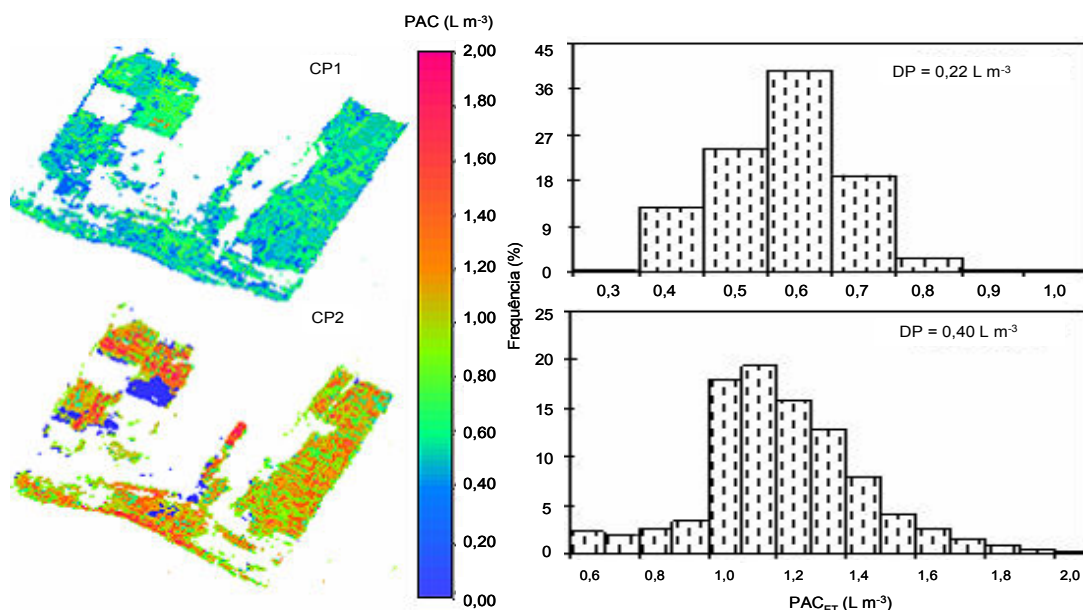
Após as calibrações e sucessivas interpolações de  $E_F$  e do APAR, os valores anuais foram usados para estimar a produção total da biomassa ( $BIO_{\text{ano}}$ ) pela Equação 5 (Figura 3).



**Figura 3.** Mapa (a) e histogramas (b) da produção anual média de biomassa ( $BIO_{\text{ano}}$ ) na região compreendida pela rede de estações agro-meteorológicas no Submédio São Francisco.

Os valores mais frequentes de  $BIO_{\text{ano}}$  para todos os ecossistemas ficaram na faixa de  $14,0$  a  $34,0 \text{ t ha}^{-1}$ . Os mais elevados foram encontrados nos mangueirais ( $50 - 100 \text{ t ha}^{-1}$ ) e nos parreirais ( $30 - 100 \text{ t ha}^{-1}$ ).

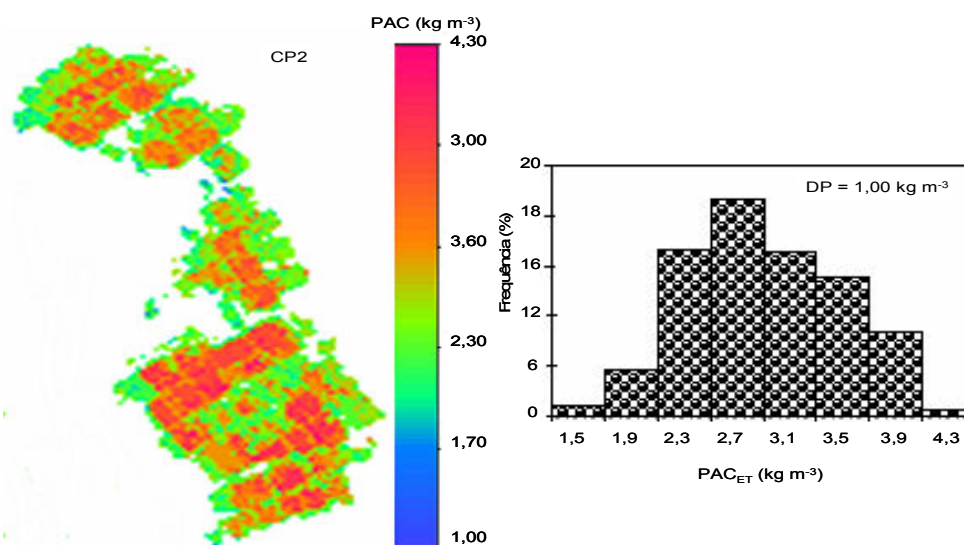
Os mapas de  $PAC_{ET}$  da videira para vinho, assim como os histogramas nos dois ciclos produtivos (CP1 e CP2) na fazenda Vitivinícola Santa Maria, são mostrados na Figura 4. As análises foram feitas em termos de produção de vinho (Teixeira et al., 2007). Para CP1, as videiras apresentaram valores entre  $0,40$  e  $0,80 \text{ L m}^{-3}$  para 98% dos valores. A média foi de  $0,60 \text{ L m}^{-3}$  ( $0,75 \text{ kg m}^{-3}$ ) com um desvio padrão (DP) de  $0,22 \text{ L m}^{-3}$ . Para CP2, 90% dos valores estiveram na faixa de  $0,70$  a  $1,70 \text{ L m}^{-3}$  com média de  $1,15 \text{ L m}^{-3}$  ( $1,44 \text{ kg m}^{-3}$ ) e um DP de  $0,40 \text{ L m}^{-3}$ . O coeficiente de variação médio (CV) para as duas estações foi de 32%.



**Figura 4.** Produtividade de água baseada na evapotranspiração atual ( $PAC_{ET}$ ) na fazenda Vitivinícola Santa Maria para o primeiro (CP1) e para o segundo (CP2) ciclos produtivos da videira para vinho, Lagoa Grande-PE.

Considerando o preço médio de  $0,91 \text{ US\$ L}^{-1}$  para o vinho de Shiraz em 2002 e na região do estudo, os valores monetários correspondentes ( $PAC_{ET}^{\$}$ ) variaram de  $0,36$  a  $1,55 \text{ US\$ m}^{-3}$ .

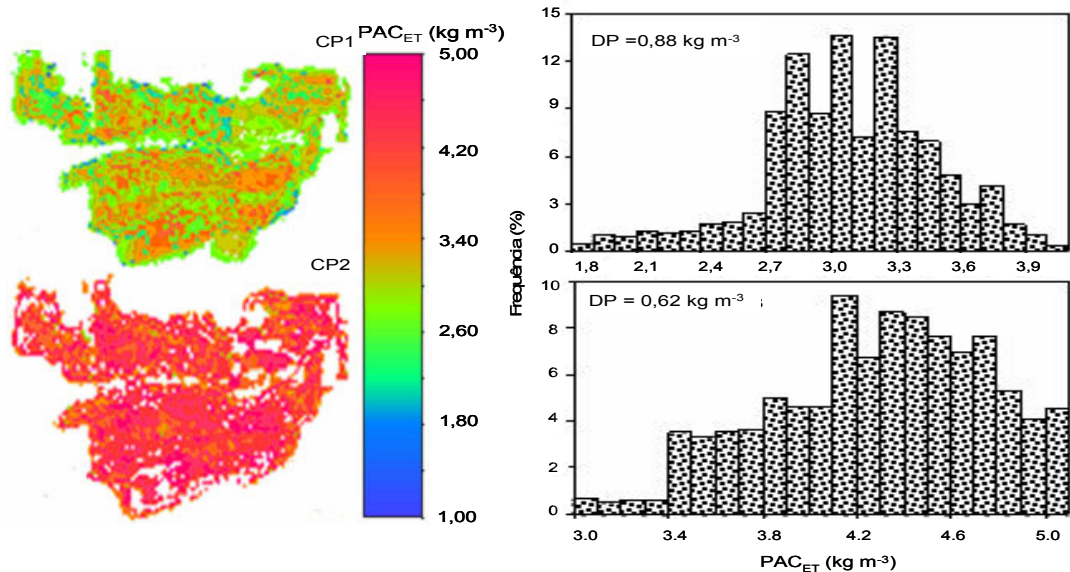
Apenas o segundo ciclo (CP2) de produção de uvas de mesa na fazenda Vale das Uvas foi analisado em termos de PAC, pois no primeiro ciclo a cultura era muito jovem não havendo produção comercial (Teixeira et al., 2007). O mapa e histograma são apresentados na Figura 5.



**Figura 5.** Produtividade de água baseada na evapotranspiração atual ( $PAC_{ET}$ ) na fazenda Vale das Uvas para o segundo ciclo produtivo da videira para mesa (CP2), Petrolina-PE.

Cerca de 99% dos valores estiveram entre 1,70 e 4,00 kg m<sup>-3</sup>, com uma média de 2,80 kg m<sup>-3</sup> e um DP de 1,00 kg m<sup>-3</sup>. O CV é igualmente elevado (36%) como no caso das uvas para vinho, o que mostrou variações espaciais relativamente grandes para ambos os tipos de parreiral. Com o preço das uvas sem sementes de 2.20 US\$ kg<sup>-1</sup> em 2003, PAC<sub>ET</sub> variou de 3,74 a 8,80 US\$ m<sup>-3</sup>, fornecendo um valor bruto de produção maior do que no caso de videira para vinho. Como o ciclo da videira de mesa sem sementes (três meses) é menor que o ciclo da videira para vinho (quatro meses), a ET para o ciclo completo do último parreiral foi maior do que para o primeiro, contribuindo para uma menor PAC, entre outros fatores.

Os resultados das análises da produtividade de água de mangas são apresentados na Figura 6.



**Figura 6.** Produtividade de água baseada na evapotranspiração atual (PAC<sub>ET</sub>) na fazenda Fruitfort para o primeiro (CP1) e para o segundo (CP2) ciclos produtivos da mangueira, Petrolina-PE.

A maior parte dos valores de PAC<sub>ET</sub> para manga esteve entre 2,20 e 3,80 kg m<sup>-3</sup> em CP1 (95%). A média foi de 2,80 kg m<sup>-3</sup> com um DP de 0,88 kg m<sup>-3</sup> (CV = 31%). Para CP2, 97% dos valores estiveram entre 3,40 a 5,00 kg m<sup>-3</sup> com média de 4,00 kg m<sup>-3</sup> e DP de 0,62 kg m<sup>-3</sup> (CV = 16%). Os valores de CV foram mais baixos do que no caso dos parreirais, mostrando mais uniformidade na fazenda Fruitfort. A razão principal para os valores mais baixos de PAC encontrados para CP1 pode ser atribuída ao manejo da irrigação durante o período chuvoso. O fazendeiro parou a irrigação por um tempo demasiado longo após as chuvas, causando um certo grau de estresse hídrico. Considerando o preço da manga de 1.02 US\$ kg<sup>-1</sup> em 2005 e na região do estudo, os valores monetários correspondentes baseados na evapotranspiração atual (CWPS<sub>ET</sub>) variaram entre 2,24 a 5,10 US\$ m<sup>-3</sup>.

#### 4. Conclusões

As equações calibradas localmente do algoritmo SEBAL foram aplicadas para demonstrar que é praticável computar as mudanças nos balanços hídricos em escala regional pela substituição da vegetação natural por culturas irrigadas no Submédio São Francisco. Estas informações são importantes quando se planeja uma expansão da área irrigada.

As retiradas totais de água do rio para irrigação no Submédio São Francisco foram estimadas sendo  $1,25 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ , a evapotranspiração incremental de  $0,75 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ , e um fluxo de retorno ao rio de  $0,40 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  e então uma depleção líquida de  $0,85 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ .

Os valores de produtividade de água baseados na evapotranspiração atual em videiras de vinho e de mesa foram em média de  $0,80 \text{ L m}^{-3}$  e de  $2,80 \text{ kg m}^{-3}$ , respectivamente, enquanto que para manga foi  $3,40 \text{ kg m}^{-3}$ . As análises dos valores econômicos nos parreirais e em mangueira indicaram que as uvas de mesa classificaram-se mais elevados ( $3,74$  a  $8,80 \text{ US\$ m}^{-3}$ ), seguido por manga ( $2,24$  a  $5,10 \text{ \$ m}^{-3}$ ) e por uvas para vinho ( $0,36$  a  $1,55 \text{ \$ m}^{-3}$ ).

## 5. Referências Bibliográficas

Bastiaanssen, W.G.M.. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates**. 1995. 273p. Ph.D. dissertation, CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, The Netherlands. 1995.

Bastiaanssen, W. G. M., Brito, R. A. L., Bos, M. G., Souza, R. A., Cavalcanti, E. B., Bakker, M. M.. Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: Benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 15, p. 53-79, 2001.

Bastiaanssen, W.G.M., Ali, S.. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 94, n. 3, 321–340, 2003.

Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Kijne, J.W., Hanjra, M.A., Bindraban, P.S., 2007c. Pathways for increasing agricultural water productivity. In: Chapter 7 in **Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture**, International Water Management Institute, London, Earthscan, Colombo.

Teixeira, A.H. de C.; Bastiaanssen, W.G.M.; Bassoi, L.H.. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in Sao Francisco River basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 94, p. 31-42, 2007.

Teixeira, A.H. de C.; Bastiaanssen, W.G.M.; Moura, M. S. B.; Soares, J. M.; Ahmad, M-ud-D; Bos, M. G.. Energy and Water Balance Measurements for Water Productivity Analysis in Irrigated Mango Trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p.1524-1537, 2008a.

Teixeira, A.H. de C.; Bastiaanssen, W.G.M.; Ahmad, M.D.; Moura, M.S.B.; Bos, M.G.. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, p. 110-127, 2008b.

Zwart, S.J., Bastiaanssen, W.G.M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. **Agricultural Water Management**, v. 69, p. 115-153, 2004.