

SPLINES CÚBICAS PARA REPRESENTAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO

EDMAR J. SCALOPPI

Eng. Agrônomo, Prof. Titular, Depto. Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrônômicas/UNESP, Botucatu - SP, Fone (0xx14) 38117165, edmar@fca.unesp.br

Apresentado no XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia
02 a 05 de julho de 2007 – Aracaju – SE

RESUMO: A representação analítica da evapotranspiração, tem importantes aplicações práticas na agroclimatologia e na agricultura irrigada tais como, a execução de balanços hídricos, a determinação da vazão nas unidades de bombeamento, o dimensionamento das estruturas de adução e distribuição de água, além da definição de estratégias de manejo das irrigações. Em geral, essas curvas se aproximam da forma senoidal, variando em função da época de cultivo e do regime hídrico submetido à cultura. Esse comportamento pode ser convenientemente representado por equações resultantes de ajustamentos aplicados aos dados observados, empregando-se a técnica de splines cúbicas. Tal procedimento, permite interpolações mais precisas, sem imposições ao número e ao intervalo dos pares de dados necessários à sua implementação. Para ilustrar a aplicação do procedimento proposto, foi incorporado um exemplo numérico, utilizando-se dados agrometeorológicos registrados entre 1981 e 2000, em um período de 120 dias, de 1º de agosto a 28 de novembro. As estimativas da evapotranspiração de referência foram computadas em base diária, pela equação de Penman-Monteith. Os resultados, agrupados em períodos pentadiais, mostraram-se satisfatórios para as aplicações pretendidas. O programa computacional desenvolvido acrescenta um pequeno trabalho às aplicações numéricas codificadas para processamento.

PALAVRAS-CHAVE: Demanda hídrica, representação analítica, irrigação

CUBIC SPLINES TO REPRESENT EVAPOTRANSPIRATION

ABSTRACT: Analytical representation of the plant water requirements has many practical applications in agroclimatology and irrigation, including the execution of water balances, the computation of irrigation system capacities, and the definition of appropriate irrigation scheduling strategies. Water demand curves are typically sinusoidal, but depending on the growing season characteristics and the imposed soil water regime they may become fairly variable. Such behavior, however, may be conveniently represented by cubic splines, a procedure that allows precise interpolation, without restricting the number and the interval of the data pairs. A numerical example has been incorporated to illustrate the proposed procedure. It used meteorological data from 1981 to 2000, starting in August 1st, and ending in November 28. Daily reference evapotranspiration was estimated by the Penman-Monteith equation. The obtained results computed for 5-day period may be considered satisfactory to the recommended applications. Also, the computational program adds only a little effort to the required numerical application inserted in the computer code written for processing.

KEY WORDS: Water demand, analytical representation, irrigation

INTRODUÇÃO

A demanda hídrica das culturas, quer avaliada experimentalmente ou estimada, em geral, exhibe

formas que não favorecem a execução de cálculos interpolativos com a precisão e a conveniência muitas vezes desejadas. Há, portanto, um grande interesse em aproximar essas curvas empregando-se procedimentos numéricos apropriados. Tal recurso, possibilita a aplicação de técnicas de integração numérica na execução de balanços hídricos.

Apesar de variadas, as formas das curvas de demanda hídrica assemelham-se à função senoidal, exibindo uma condição inicial ligeiramente crescente, enquanto a cultura se estabelece. Com o desenvolvimento das plantas, ocorre um aumento acentuado na demanda hídrica, até atingir um valor máximo, coincidente com o estágio de maior desenvolvimento vegetativo. Em culturas anuais, uma vez encerrada a fase de acúmulo de produtos de diferenciação, observa-se um declínio na demanda, quando se manifesta a fase de maturação e, posteriormente, a senescência das plantas.

Empregando análise de regressão, Jensen et al. (1971) e Wright & Jensen (1978) ajustaram equações polinomiais às curvas de demanda hídrica para fins computacionais. Por outro lado, Jensen et al. (1990) admitiram, para fins práticos, interpolações lineares, desde que os intervalos das informações sejam inferiores a 10 dias. Entretanto, há uma reconhecida vantagem computacional resultante do emprego de equações para o cálculo da integração numérica subsequente às interpolações.

Este trabalho teve por objetivo aplicar a técnica de splines cúbicas para representar as curvas de demanda hídrica em função do tempo de ciclo e apresentar alguns exemplos interpolativos para evidenciar as vantagens práticas do procedimento proposto.

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS E COMPUTACIONAIS

A equação de Penman-Monteith foi empregada para o cálculo da evapotranspiração de referência. Esta equação tem sido avaliada em diferentes condições, sendo reconhecida como fisicamente consistente (Allen, 1986; Amatya et al., 1995) mesmo em condições deficientes de aplicação de água às culturas (Hatfield & Allen, 1996).

Jensen et al. (1990) observaram que a equação de Penman-Monteith é mais precisa mesmo quando empregada em base horária. Dessa forma, os resultados poderão ser integrados em estimativas diárias. A dificuldade resume-se na obtenção de valores horários de todos os parâmetros requeridos, em geral, fornecidos em base diária. Por essa razão, há necessidade de se introduzir simplificações empíricas para estimativas diárias, a partir de valores totalizados ou intermediados durante o dia.

Os dados meteorológicos necessários aos cálculos da evapotranspiração de referência foram registrados no Posto Agrometeorológico da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, em Piracicaba, SP, localizado a $22^{\circ} 42' 30''$ de latitude sul, e $47^{\circ} 38' 30''$ de longitude oeste, e altitude de 546 m. Foram utilizados dados registrados entre 1981 a 2000, em um período de 120 dias, entre 01 de agosto e 28 de novembro. Esse período deve encerrar a maior demanda hídrica anual para dimensionamento de sistemas de irrigação, uma vez que a condição crítica das culturas anuais ocorreria no mês de outubro, em geral caracterizado por uma demanda evaporativa atmosférica relativamente elevada.

Uma vez calculados os valores da evapotranspiração de referência em cada pântada, foi aplicado um tratamento estatístico aos dados para permitir o cálculo da probabilidade de ocorrência. Inicialmente, os dados foram agrupados no intervalo de irrigação previsto (5 dias), no período de cultivo especificado (agosto a novembro). Assumindo-se que o plantio tenha ocorrido no dia 1^o de agosto, o ciclo de 120 dias deve encerrar-se no dia 28 de novembro. Assim, um total

de 24 pântadas foram consideradas nesse período. O cálculo da evapotranspiração envolveu a estimativa de coeficientes de cultura basais genéricos.

Tanto a representação analítica quanto as interpolações foram desenvolvidas utilizando-se a técnica de splines cúbicas, apresentada com suficiente detalhe em Hornbeck (1975). As quantidades de água foram computadas pela técnica de integração numérica, utilizando-se a regra do trapézio.

Um programa computacional foi implementado em linguagem C, para processamento no software comercial Borland Turbo C⁺⁺. Inicialmente, determina-se a evapotranspiração diária, agrupando-se os valores obtidos em intervalos pentadiais. A seguir, o procedimento utiliza a técnica de splines cúbicas para diversos aplicativos decorrentes de interpolação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de evapotranspiração de referência, acumulados em cada pântada considerada, estão anotados na Tabela 1. Deve-se destacar, que estes valores representam cerca de 70% de probabilidade de ocorrência. Além disso, os coeficientes de cultura não foram desdobrados para contabilizar a contribuição direta da evaporação da água no solo, após a ocorrência de chuvas ou irrigações. Também, não foram consideradas as contribuições de precipitações que poderiam ocorrer no período considerado.

Tabela 1. Valores pentadiais da evapotranspiração de referência e da evapotranspiração, ambas estimadas ao nível de 70% de probabilidade de ocorrência.

| | | | | | | | | | | | | |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Pântada | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Etr mm | 15,1 | 16,2 | 17,4 | 16,9 | 18,9 | 19,3 | 18,7 | 19,4 | 21,5 | 19,3 | 20,9 | 18,9 |
| Et mm | 6,0 | 6,5 | 7,3 | 7,6 | 9,1 | 10,0 | 10,5 | 11,8 | 14,4 | 14,5 | 17,8 | 17,4 |
| Pântada | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Etr mm | 22,5 | 22,2 | 22,5 | 21,9 | 23,0 | 22,5 | 24,2 | 23,1 | 22,9 | 23,1 | 23,4 | 23,2 |
| Et mm | 21,8 | 22,4 | 23,2 | 22,8 | 24,2 | 23,6 | 25,4 | 23,8 | 22,2 | 20,8 | 18,7 | 16,2 |

A primeira aplicação ilustrativa consiste em se determinar o volume total de água requerido no processo de evapotranspiração. A técnica de splines cúbicas é empregada para interpolar 100 valores intermediários entre o início e o final do ciclo, e possibilitar a aplicação de integração numérica, através da regra do trapézio. O resultado obtido neste cálculo revelou um volume total requerido de 3920 m³ ha⁻¹.

Uma outra aplicação pode ser ilustrada, assumindo-se que a capacidade instalada de um sistema de irrigação seja 3,6 mm d⁻¹, ou 18 mm por pântada. Assim, torna-se importante determinar o período no qual o déficit operacional pode prevalecer, bem como o volume total de água correspondente.

Na Figura 1 pode-se observar que a demanda excede a capacidade do sistema entre a 12^a e a 13^a pântadas. Com a maturação da cultura, a demanda diminui, cruzando novamente a linha correspondente à capacidade do sistema, entre a 23^a e 24^a pântadas. A curva traçada com linha cheia representa as interpolações da demanda hídrica, convertida em mm d⁻¹, empregando-se a técnica de splines cúbicas. Os pontos identificados por triângulos representam os valores médios diários de demanda correspondentes a cada pântada. A linha horizontal destacada, representa a capacidade operacional da unidade de bombeamento. A área da poligonal superior, definida pelas

linhas da demanda hídrica e da capacidade operacional da unidade de bombeamento, indica o volume deficitário de água, e a inferior, o volume no qual a capacidade de bombeamento excede a demanda hídrica da cultura.

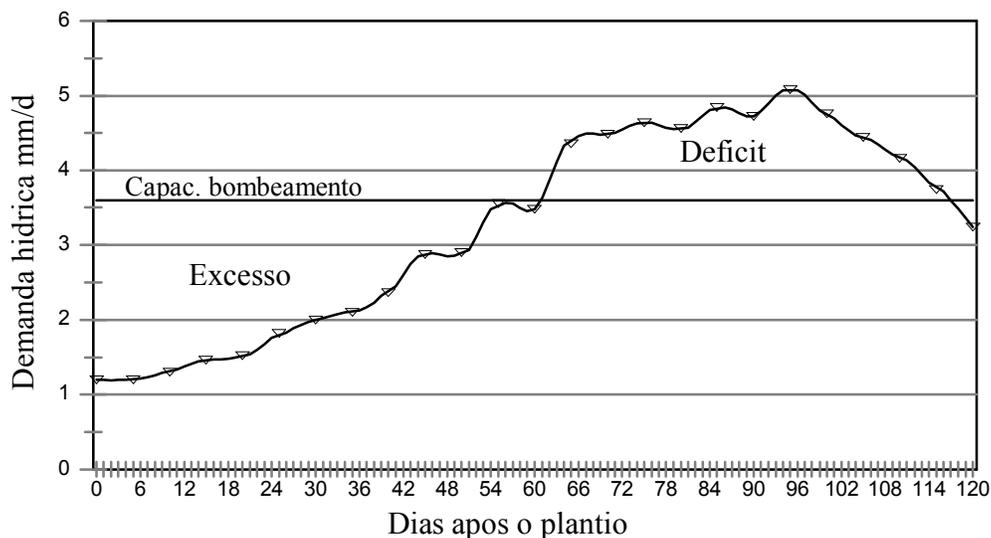


Figura 1. Curva de demanda hídrica temporal, obtida por interpolações a partir dos valores médios pentadiais calculados indicados por triângulos. As áreas indicadas por déficit e excesso referem-se às diferenças entre a demanda e a capacidade de bombeamento fixada em $3,6 \text{ mm d}^{-1}$.

A destacada coincidência entre a curva resultante das interpolações e os pontos indicativos das demandas hídricas pentadiais, na Figura 1, revela a conveniência do procedimento proposto.

A técnica de splines cúbicas pôde também ser aplicada com sucesso, para interpolar precisamente o período no qual deve ocorrer a deficiência hídrica. O resultado revelou que a demanda excede a capacidade de bombeamento no intervalo entre a 12,2^a e a 23,28^a pântadas (do 61^o ao 116^o dias após o plantio).

Outra aplicação consiste em se determinar o volume de água no qual a capacidade instalada do sistema de irrigação é superada pela demanda hídrica. Nesse cálculo, empregou-se novamente a técnica de splines cúbicas para interpolar 100 valores equidistantes no intervalo entre o início e o final do período de deficiência operacional. A seguir, a regra do trapézio foi aplicada para integrar numericamente os valores excedentes de demanda, em relação à capacidade do sistema, resultando no volume deficitário de água de $507,6 \text{ m}^3/\text{há}$, ou uma lamina aproximada de 51 mm.

A possibilidade de se utilizar o procedimento proposto no dimensionamento de sistemas de irrigação é facilmente reconhecida. Além disso, o fato de requerer um programa computacional muito simples para implementar seu processamento, adiciona um esforço pouco significativo ao programa de simulação aplicativo, que deverá se beneficiar da representação analítica referida.

CONCLUSÕES

A técnica de splines cúbicas pode ser empregada com vantagens, para se obter a representação analítica da demanda hídrica das plantas cultivadas em função do tempo de ciclo. Pode-se utilizar

um número satisfatório de pares de dados, e os intervalos da variável independente não precisam ser equidistantes. O procedimento resulta em equações mais representativas, podendo ser facilmente incorporadas aos programas computacionais envolvendo diferentes aplicativos. Além disso, permite empregar vantajosamente técnicas de integração numérica, para se computar os volumes de água requeridos, ou os momentos correspondentes onde possa haver interesse prático.

Assumindo-se que a capacidade operacional instalada de um sistema de irrigação seja inferior à demanda máxima, pode-se estimar com suficiente precisão o volume de déficit, bem como, o momento em que a demanda hídrica passa a exceder a capacidade instalada do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R.G., A Penman for all seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, v.112, n.4, p.348-368, 1986

Amatya, D.M.; Skaggs, R.W.; Gregory, J.D. Comparison of methods for estimating REF- ET. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, v.121, n.6, p.427-435, 1995.

Hatfield, J.L; Allen, R.G. Evapotranspiration estimates under deficient water supplies. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, v.122, n.5, p.301-308, 1996.

Hornbeck, R.W. *Numerical methods*. New York: Quantum Publishers, 1975. 310p.

Jensen, M.E.; Burman, R.D.; Allen, R.G. *Consumptive use of water and irrigation water requirements*. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 331p.

Jensen, M.E.; Wright, J.L.; Pratt, B.J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v.14, n.6, p.954-959, 1971.

Wright, J.L.; Jensen, M.E. Development and evaluation of evapotranspiration models for irrigation scheduling. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v.21, n.1, p.88-96, 1978.