

## Determinação de zonas homogêneas de evapotranspiração de referência

Josué Ferreira Silva Junior<sup>1</sup>  
Fernando Braz Tangerino Hernandez<sup>2</sup>  
Ilca Puertas de Freitas e Silva<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitário de Votuporanga - UNIFEV  
Av. Nasser Marão, 3069 - 15503-005 - Votuporanga - SP, Brasil  
josue\_ferreira@hotmail.com

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista - UNESP/FEIS  
Avenida Brasil, Centro, 56 - 15385-000 - Ilha Solteira - SP, Brasil  
fbthtang@agr.feis.unesp.br

<sup>4</sup> Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul - UEMS  
Rodovia MS 306 - km 6,4 - 79540-000 - Cassilândia - MS, Brasil  
ilca\_pfs@yahoo.com.br

**Abstract.** The present work presents a proposal for a methodology for the creation of a homogeneous zones map of evapotranspiration of reference with the objective of assisting the management of irrigation by central pivots of the delimited region. We analyzed the climatological water balance in the region which indicated the months of August, September and October as the most critical months for irrigation management. The interpolation of monthly data were made by ordinary kriging with Gaussian model of the experimental semivariograms. The maps of the most critical months superimposed to homogeneous zones and validating the map proposed by the evaluation occurred from the correlation coefficients ( $r$ ), coefficient of determination ( $R^2$ ), the root mean squared error (REMQ) and concordance index ( $d$ ) applied to observed and estimated data. The high rates obtained by the proposed methodology indicate that the map adjusted properly and the monthly table obtained as result can assist in the management of irrigation by central pivots in the region bounded.

**Palavras-chave:** interpolação, mapas climáticos, geoestatística.

### 1. Introdução

O Brasil é o quinto maior exportador de produtos agrícolas do mundo. Comercializou, em 2013, cerca de 83,9 bilhões de dólares, segundo dados da FAO (2013). A extensa área agrícola, estimada em 74,8 milhões de hectares, é ocupada principalmente pelas culturas da soja, do milho e da cana-de-açúcar, que juntas somaram 77,2% da área colhida (IBGE, 2016).

Para manter-se competitivo o setor agrícola tem investido em novas tecnologias que garantam elevada produtividade. Assim, produzir mais utilizando a mesma área é o desafio enfrentado pelos produtores brasileiros. Esse desafio tem fortalecido a agricultura nacional e contribuído para a manutenção do saldo positivo na balança comercial, de empregos e geração de renda e da segurança alimentar.

Por ser uma atividade de risco a produção agrícola está sujeita as ações, positivas ou negativas, de diversos fatores como a disponibilidade de recursos humano e financeiro, correto manejo da cultura, disponibilidade de nutrientes e variações climáticas. Esse último pode interferir negativamente na produção agrícola, pois alterações na temperatura, humidade e distribuição das chuvas comprometem o bom desenvolvimento das culturas e, consequentemente, a produção.

Sabe-se que a disponibilidade de água é fator determinante para o sucesso de qualquer cultura e, por esse motivo, entre as diversas tecnologias utilizadas para a produção agrícola, a irrigação vem ganhando destaque. Dados levantados em 2014 assinalam que o estado de São Paulo possui a quarta maior área irrigada por pivôs centrais com aproximadamente 180 mil

hectares irrigados contra 406, 233 e 201 mil hectares irrigados nos estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia, respectivamente (ANA, 2016).

Acompanhando a tendência da agricultura irrigada as regiões Noroeste e Extremo Oeste paulista têm ampliado suas áreas irrigadas com pivôs centrais. Essas regiões somam mais de 17 mil hectares irrigados, 255 pivôs, distribuídos em 45 municípios. Destacam-se nessas regiões os municípios de Itapura, Riolândia, Cardoso e Pereira Barreto, que juntos somam 35% dos equipamentos instalados na região (ANA, 2016).

Nesses municípios a produção irrigada é composta principalmente pelas culturas da soja, do milho e do feijão. Segundo dados do Instituto de Economia Agrícola (IEA), em 2015, foram irrigados 6 mil hectares e produzidos 27 milhões de toneladas desses produtos (IEA, 2015).

A agricultura irrigada reduz os riscos e proporciona incremento na produção agrícola. Essa premissa é válida e facilmente verificável quando se comparam os valores da produção nos sistemas de cultivo irrigado e não irrigado. Com base nos dados do IEA e considerando os municípios citados (Itapura, Riolândia, Cardoso e Pereira Barreto) a média da produção em áreas irrigadas, no ano de 2014, foram superiores em 152, 100 e 65% para as culturas da soja, do feijão e do milho, respectivamente, quando comparadas a média da produção obtida em áreas não irrigadas.

A crise hídrica brasileira trouxe à tona a importância da gestão de água para os diversos setores usufrutuários desse bem. Embora considerada importante para a produção de alimentos, a agricultura foi duramente criticada como pivô da crise hídrica nacional por consumir cerca de 70% do volume de água disponível (Reynol, 2015).

A crescente demanda por alimentos vem pressionando os diversos setores agrícolas para incorporar novas tecnologias que garantam, tanto quanto possível, maiores produtividades. Nesse contexto, a irrigação vem ampliando sua participação na produção de alimentos pela adição de novas áreas irrigadas.

Acompanhando o cenário nacional, a expansão da irrigação no Noroeste Paulista vem ocorrendo gradativamente (Amendola, 2016). Contudo, a irrigação realizada por pequenos e grandes proprietários tem sido feita de modo especulativo, muitas vezes com projetos de irrigação mal dimensionados, sem a anuência de qualquer profissional da área (Hernandez, [199?]).

Por essa razão, a Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira por meio da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista tem por objetivos aproximar-se dos irrigantes locais, estimulando a utilização de metodologias mais avançadas e transferindo conteúdo e informações técnicas necessárias à modernização da agricultura regional (Hernandez, [199?]).

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo estabelecer mapa de distribuição mensal da evapotranspiração de referência para uma região a noroeste do estado de São Paulo como ferramenta para o manejo sustentável da irrigação no Noroeste Paulista.

## 2. Metodologia de Trabalho

A área delimitada para estudo está localizada geograficamente entre os meridianos 49° 47' e 51° 34' de longitude oeste e os paralelos 19° 47' e 21° 8' de latitude sul (Figura 2) engloba 60 municípios da região que se caracterizou como Noroeste Paulista.

O critério para delimitação da área foi subsidiar o manejo da irrigação em, ao menos, 9.541 hectares irrigados por pivôs centrais, estimados de acordo com Amendola (2016), alicerçado nas variáveis climáticas pelo uso da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), que é informação imprescindível para o uso racional da água na agricultura.

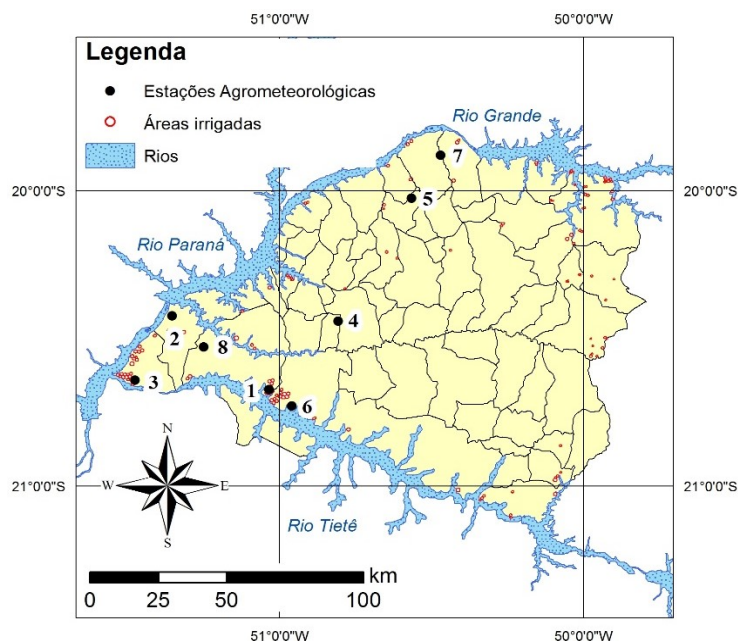


Figura 1. Localização geográfica da área, das estações agrometeorológicas e identificação dos perímetros irrigados por pivô central (adaptado de Amendola, 2016)

Foram considerados os dados de ETo, calculados segundo Penman-Monteith (Allen et al, 1998), e a precipitação pluviométrica, em escalas mensais, para o período compreendido de janeiro de 2012 a dezembro de 2015. Esses dados foram obtidos gratuitamente no portal do canal CLIMA, UNESP Ilha Solteira, <http://clima.feis.unesp.br/>.

O canal CLIMA é parte integrante da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista, que monitora as condições climáticas da região por meio de 8 estações meteorológicas distribuídas em 7 municípios, são elas: 1 - Bonança; 2 - Ilha Solteira; 3 - Itapura; 4 - Marinópolis; 5 - Paranapuã; 6 - Pioneiros; 7 - Populina e 8 - Santa Adélia (Figura 1).

Com os valores da ETo e da precipitação pluviométrica foi possível calcular o balanço hídrico climático. A metodologia utilizada foi proposta por Thornthwaite e Mather (1955) e os calculados foram realizados por meio da ferramenta BHnorm (Rolim et al., 1998).

A capacidade de água disponível (CAD) adotada para os cálculos foi de 60 mm, considerando uma profundidade média do solo de 60 centímetros, o que abrange grande parte das culturas anuais e perenes, e a predominância de argissolos na área delimitada (Oliveira et al., 1999), cuja CAD é, em média, de  $1,0 \text{ mm cm}^{-1}$  (Reichardt, 1987).

Os meses em que se registraram os maiores valores de deficiência hídrica foram caracterizados como aqueles mais críticos para o manejo da irrigação e serviram de referência para determinação das zonas homogêneas de ETo.

Foram interpolados os dados de ETo para os três meses mais críticos, utilizando o método de krigagem ordinária. Neste estudo foi utilizado o modelo isotrópico experimental de variograma do tipo gaussiano, com patamar. O ajuste e os parâmetros dos modelos foram obtidos pelo software GS+ (Gamma Design Software, 2012), que utiliza o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o menor valor para soma de quadrados de resíduo ( $SQ_{\text{res}}$ ) como critério para determinação do melhor ajuste.

Os parâmetros foram transcritos no software ArcGis 10.1 para composição dos mapas de distribuição da ETo. Os mapas para os três meses mais críticos foram sobrepostos utilizando o comando *Intersect* e, posteriormente, sobre esse mapa foram delimitadas as zonas homogêneas.

A validação das áreas ocorreu aplicando-se diferentes indicadores que correlacionam dados observados com dados estimados (coeficiente de correlação,  $r$ ; coeficiente de

determinação,  $R^2$ ; raiz do erro médio quadrático, REMQ e índice de concordância, d). Essa metodologia é uma adaptação da proposta por Castro et al. (2010) que utilizou os indicadores na escolha do método de interpolação mais indicado para os parâmetros do balanço hídrico.

Foi considerado como valor observado a média da ETo para as estações contidas dentro de uma mesma zona homogênea e, de forma análoga, foi considerado como valor estimado a média da ETo predita para as estações contidas nessa mesma zona homogênea.

As estimativas da ETo foram obtidas pelo procedimento Validation/Prediction do ArcGis 10.1 que determinou os valores preditos e os erros padrões associados a cada ponto inserido no mapa.

Para a zona homogênea em que não houve a presença de estações agrometeorológicas os valores estimados e observados foram considerados equivalentes. Esses valores foram calculados com base na ponderação feita pelo software ArcGis 10.1. Desta forma, para os meses em que a zona foi coberta por uma única classe de intervalo da ETo os valores estimados e observados foram os do ponto médio da classe. Para os meses em que a zona foi coberta por mais de uma classe de intervalo da ETo os valores foram determinados pela média aritmética dos pontos médios das classes envolvidas.

### 3. Resultados e Discussão

O balanço hídrico para as oito estações agrometeorológicas indicaram os meses de agosto, setembro e outubro como aqueles mais críticos ao manejo da irrigação. Em média foram observados déficits de 114, 49 e 81 mm respectivamente para os meses de agosto, setembro e outubro (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo mensal e anual dos parâmetros precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETp), déficit hídrico (Def) e excedente hídrico (Exc) para a Rede de Agrometeorológica do Noroeste Paulista

Bonança	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	163	187	142	65	65	55	33	3	104	53	180	164	1214
ETp (mm)	138	126	124	99	81	66	78	112	123	146	138	140	1369
Def (mm)	-	-	-	8	8	7	33	100	19	92	-	-	266
Exc (mm)	25	61	18	-	-	-	-	-	-	-	-	7	111
Ilha Solteira	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	227	160	182	128	22	75	26	3	60	88	174	147	1292
ETp (mm)	153	140	130	111	96	81	96	136	156	158	156	161	1575
Def (mm)	-	-	-	-	32	4	59	129	96	70	-	10	400
Exc (mm)	28	20	52	17	-	-	-	-	-	-	-	-	117
Itapura	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	131	222	195	65	45	60	36	3	93	61	162	132	1205
ETp (mm)	156	134	133	102	87	75	87	127	138	155	150	152	1496
Def (mm)	22	-	-	9	26	11	44	119	45	94	-	16	386
Exc (mm)	-	33	62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	95
Marinópolis	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	209	157	221	68	35	74	27	4	70	51	145	139	1200
ETp (mm)	147	137	130	105	87	75	93	133	150	158	147	152	1515
Def (mm)	-	-	-	9	33	1	57	125	80	107	2	13	427
Exc (mm)	2	20	91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	113
Paranapuã	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	254	169	260	69	28	72	35	6	63	88	132	238	1414

ETp (mm)	123	129	121	102	87	75	90	121	138	152	141	149	1427
Def (mm)	-	-	-	8	37	2	47	111	74	64	9	-	353
Exc (mm)	131	40	139	-	-	-	-	-	-	-	-	29	340
Pioneiros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	168	200	147	78	63	61	37	4	121	53	187	167	1286
ETp (mm)	144	126	118	93	74	63	74	102	108	143	141	146	1332
Def (mm)	-	-	-	2	3	1	20	82	-	77	-	-	184
Exc (mm)	24	74	29	-	-	-	-	-	-	-	-	11	138
Populina	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	212	124	198	95	65	52	34	2	80	100	152	131	1245
ETp (mm)	135	129	124	99	84	72	84	118	129	152	132	127	1384
Def (mm)	-	-	-	-	4	8	33	105	48	51	-	-	250
Exc (mm)	41	-	69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	111
Sta. Adélia	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	182	124	192	96	60	63	40	5	112	71	140	156	1241
ETp (mm)	141	129	121	102	96	87	105	152	144	167	141	146	1531
Def (mm)	-	1	-	-	12	14	52	141	32	96	1	-	349
Exc (mm)	-	-	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59

O padrão de distribuição das chuvas é fortemente influenciado pela ocorrência de chuvas convectivas, caracterizadas por uma distribuição localizada, grande variabilidade espacial, intensidade moderada a forte, de curta a média duração e predominância de ocorrência no final da tarde ou início da noite muitas (UNESP Ilha Solteira, 2016; Garcez e Alvarez, 1988).

O modelo e os parâmetros de ajuste à semivariogramas experimentais utilizados para interpolação dos dados da ETo estão contidos na Tabela 2.

Tabela 2. Critérios de ajuste ( $SQ_{res}$  e  $R^2$ ), tipo de modelo e parâmetros de semivariogramas experimentais para interpolação de dados da ETo por krigagem ordinária

Meses	$SQ_{res}$	$R^2$	Modelo	Parâmetros		
				Co	C + Co	A
Agosto	0,125	0,34	Gaussiano	0,0010	0,3460	31523,325
Setembro	0,110	0,45	Gaussiano	0,0010	0,4130	45552,936
Outubro	0,045	0,21	Gaussiano	0,0001	0,1672	34467,811

$SQ_{res}$  - soma de quadrados do resíduo;  $R^2$  - coeficiente de regressão; Co - efeito pepita; C + Co - distância entre o efeito pepita e o patamar e A - alcance.

A interseção dos mapas dos meses mais críticos ao manejo da irrigação e a definição das zonas climáticas estão representadas nas Figuras 2A e 2B.

A.

B.



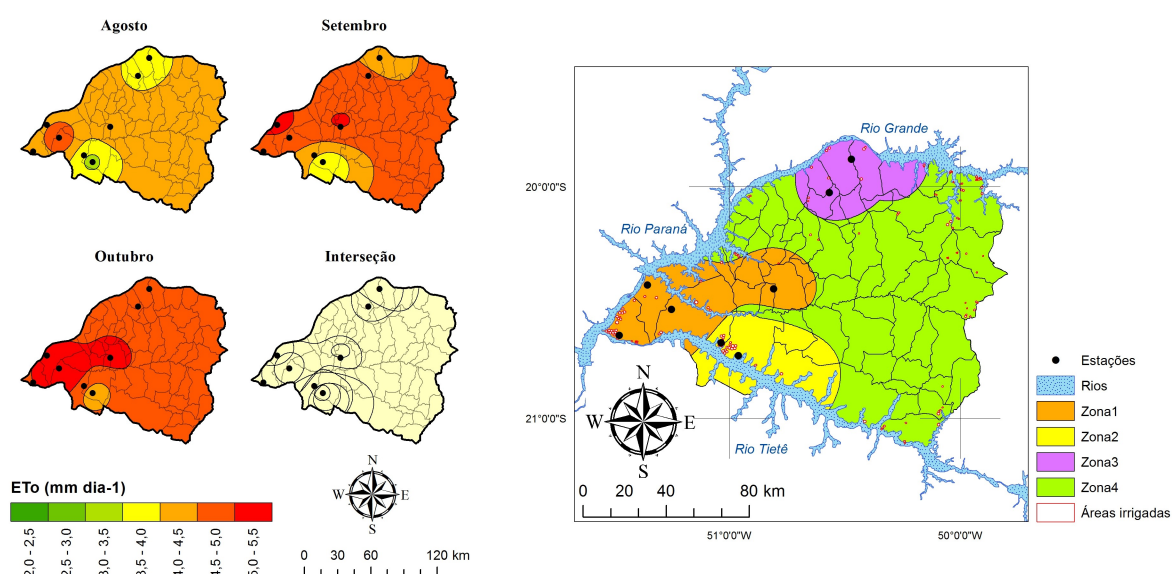


Figura 2. Distribuição da evapotranspiração de referência (ETo), em mm dia<sup>-1</sup>, para os meses mais críticos ao manejo da irrigação, interseção dos mapas (A) e determinação das zonas homogêneas (B)

Analisando o comportamento dos mapas na Figura 2A é possível observar que a demanda evapotranspirativa aumenta continuamente entre os meses de agosto a outubro, quando atinge o maior valor da ETo, em média 5,0 mm dia<sup>-1</sup>.

Com base em diversos coeficiente e índices foi possível avaliar e validar as zonas propostas por essa metodologia. Um resumo dos valores alcançados com base nos valores preditos e observados, mês a mês, estão contidos na Tabela 3.

Tabela 3. Análise dos dados observados e preditos por krigagem ordinária, ajustados para o modelo gaussiano do semivariograma

Mês	R	R <sup>2</sup>	REMQ	d
Janeiro	0,82	0,68	0,20	0,86
Fevereiro	0,81	0,65	0,11	0,87
Março	0,69	0,48	0,14	0,70
Abril	0,51	0,26	0,12	0,68
Maio	0,84	0,71	0,14	0,89
Junho	0,84	0,70	0,13	0,90
Julho	0,86	0,73	0,18	0,91
Agosto	0,88	0,77	0,22	0,93
Setembro	0,89	0,80	0,29	0,91
Outubro	0,88	0,77	0,15	0,93
Novembro	0,79	0,62	0,24	0,81
Dezembro	0,77	0,59	0,30	0,76

Com exceção dos meses de março e abril, a proposta das zonas homogêneas apresentou altos valores de correlação, acima de 0,50 que é considerado uma correlação moderada, até 0,89, considerada uma correlação forte. Também para os meses de março e abril o coeficiente de determinação ficou abaixo de 0,50.



Segundo Castro et al. (2010) a exatidão do modelo está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados; matematicamente, esta aproximação é dada pelo índice de concordância (d), seus valores variam de zero para nenhuma concordância a 1 para a concordância perfeita. Desta forma a proposta apresentada é adequada para representar a área de estudo.

#### 4. Conclusões

A metodologia utilizada mostra-se adequada para determinação de zonas climáticas, com base na ETo, a partir dos meses mais críticos visando o manejo adequado da irrigação.

#### Agradecimentos

Ao CNPq pela concessão da Bolsa de Pesquisa e à UNIFEV pela bolsa concedida do Programa Institucional de Qualificação e Capacitação Docente.

#### Referências Bibliográficas

Allen, R. G et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

Amendola, E. C. Evolução da agricultura irrigada por pivô central no Noroeste Paulista. 2016. 51 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil - ano 2014. 2016. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/metadados/>>. Acesso em: 10 jul. 2016.

Castro, F. da S.; Pezzopane, J. E. M.; Cecílio, R. A.; Pezzopane, J. R. M.; Xavier, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 8, p. 871-880, 2010.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Top 10 exporters of agricultural products. 2013. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

Hernandez, F. B. T. Agricultura irrigada e atuação da UNESP no Oeste Paulista. [199?]. Disponível em: <<http://www.agr.feis.unesp.br/fernando.htm>>. Acesso em: 27 set. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA: Dados de Previsão de Safra. 2016. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/prevsaf/>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA (IEA). Estatística da produção paulista. 2015. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br>>. Acesso em: 10 jul. 2016.

Oliveira, J. B.; Camargo, M. N.; Rossi, M.; Calderano Filho, B. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida. Campinas, Instituto Agrônomo/EMBRAPASolos. Campinas. 1999. 64p.

Reichardt, K. A água nos sistemas agrícolas. São Paulo: Manole, 1987, 188p.

Raynol, F. Verdades e mitos sobre a água na agricultura. In: XXI Ciência para a vida EMBRAPA: Agrossistemas e produção sustentável. 10. ed. Brasília: Marina Artes Gráficas e Editora, 2015. p. 8-12. Disponível em: <<http://www.univasf.edu.br/~cpgea/files/noticias/49.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2016.



Rolim, G. S.; Sentelhas, P. C.; Barbieri, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.6, p.133-137, 1998.

Thornthwaite, C. W.; Mather, J. R. The water balance. Publication in climatology. V. 8, n. 1, 104 p, 1955.