

# CALIBRAGEM DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO EM FUNÇÃO DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO

Willames A. Soares<sup>1</sup>; Maria Cardinale V. Soares<sup>1</sup>; Roseane M. Silva<sup>1</sup>; Pâmela M. Sobral<sup>1</sup>

**Resumo** – Determinar a evaporação é uma necessidade cada vez mais presente no cotidiano do agricultor, principalmente em zonas de clima árido e semi-árido. Entretanto, nem sempre é possível determiná-la devido aos custos e a operacionalidade dos equipamentos envolvidos. Uma forma barata e de fácil aplicação é estimar a evaporação a parti do nível do lençol freático. Há diversos modelos matemáticos para esse fim, porém é necessário uma calibragem para sua correta aplicação. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi calibrar os modelos de Philip (1957), Harbaugh (1988), Moreal-Seytoux (1989) e Grilli & Vidal(1986), para estimar a evaporação em função do nível do lençol freático, utilizando a metodologia de Hargreaves, que é de fácil aplicação. Para a otimização na calibragem utilizou-se uma função–objeto e para uma análise estatística utilizou-se parâmetros como o erro quadrado médio, o coeficiente de massa residual e a razão dos desvios. Os quatro modelos apresentaram uma semelhança quanto aos seus resultados durante o período analisado. Para o período sem chuvas, os modelos de Harbaugh e de Philip apresentaram melhores resultados. Para o período chuvoso, os melhores desempenhos foram obtidos pelos modelos de Morel-Seytoux e de Philip.

**Abstract** - Determinate the evaporation is a need for ever more present in daily life of the farmer, especially in areas of arid and semi-arid. However, it is not always possible to determine it because of cost and operability of equipment involved. An inexpensive and easily applied methodology to estimate the evaporation from the groundwater level. There are several mathematical models for this purpose, but requires a calibration for correct application. Thus, the objective was to calibrate the models of Philip (1957), Harbaugh (1988), Moreal-Seytoux (1989) and Grilli & Vidal(1986), to estimate the evaporation as a function of groundwater level, utilizing a methodology easily and inexpensive proposed for Hargreaves. For a optimization used an function objective e for analysis statistic used parameter suitable. The four models showed a similarity about their results during the period analyzed. Among the four model, the Harbaugh and Philip model showed better results, for the period without rain e the best performances were obtained by the models of Morel-Seytoux and Philip, for period rainy season.

**Palavras-Chaves** – Evaporação do solo, lençol freático, modelos matemáticos

<sup>1</sup> Universidade de Pernambuco – Campus Garanhuns (UPE-FACETEG). Av Rua Capitão Pedro Rodrigues, 105 – São José – Garanhuns – PE 55.294 – 902 willames.soares@upe.br; cardinale\_19@hotmail.com; roseanesilva7@hotmail.com; pamela.nett@gmail.com

## 1. INTRODUÇÃO

A água é tema extremamente debatido e de suma importância nos dias atuais. Recurso esse, encontrado de várias maneiras no planeta, e uma das formas que o encontramos é nas reservas subterrâneas. Constituinte 98% das águas doces e líquidas do planeta (MMA, 2009).

A distribuição deste recurso não é uniforme no planeta, algumas localidades cobertas pelos aquíferos apresentam abundância, enquanto outros lugares apresentam escassez completa. A reserva de água subterrânea no Brasil é estimada em cerca de 112.00 km<sup>2</sup>, considerando uma profundidade de até 1.000 metros, com um volume de reabastecimento de 3.500 km<sup>3</sup> anuais (REBOUÇAS, 1997). Tendo ainda que cerca de 16% dos municípios brasileiros utilizam exclusivamente água subterrânea para o abastecimento (IBGE, 2000).

As águas subterrâneas são responsáveis pela regularização e manutenção de rios, córregos, lagos e outros, sendo parte integrante do ciclo hidrológico. A importância das águas subterrâneas é notável desde o seu elevado padrão de qualidade físico-químico e bacteriológico até o fato de não serem atingidas por secas e estiagens. Além de serem usadas no abastecimento humano, também são utilizadas na agricultura, indústria, no lazer e no turismo. (MMA, 2009).

Uma das alternativas para exploração dessas reservas são as barragens subterrâneas, estruturas que objetivam barrar o fluxo subterrâneo de um aquífero pré-existente ou criado concomitantemente à construção da barreira impermeável (SANTOS & FRANGIPANI, 1978). A barreira, também conhecida como septo impermeável pode ser construída com argila compactada, alvenaria, concreto ou lona de plástico, dependendo das condições locais do produtor e da disponibilidade de materiais da região (BRITO et al., 1989).

Esses tipos de barragens foram construídos no Brasil, principalmente na região Nordeste, desde o início do século. Diversos autores (TIGRE, 1949; DUQUE, 1980; IPT, 1981, entre outros) preconizam a construção dessas barragens com objetivo de aumentar a disponibilidade de água no meio rural. (BRITO et al, 1997).

As barragens subterrâneas em relação às barragens superficiais apresentam várias vantagens, as principais são acumulação de água com reduzida evaporação, menor risco de salinização, quando bem manejada agricolamente, e a não-ocupação de áreas agricultáveis (DUQUE, 1980 & BRITO et al., 1989). Esses tipos de barragens também têm uso importante no manejo de aquíferos freáticos contaminados, pois servem como barreira de contenção da pluma poluidora, evitando a rápida propagação dos poluentes em um tempo suficiente para que a carga poluidora possa entrar em degradação natural ou seja removida através de bombeamento.

Determinar a evaporação da água a partir do nível do lençol freático é de extrema importância. Há diversos modelos matemáticos para esse fim, neles há imprecisões quantos aos

resultados, dessa forma o objetivo deste trabalho é calibrar os modelos de: a) PHILIP (1957), b) HARBAUGH (1988), c) MOREAL-SEYTOUX (1989) e d) GRILLI & VIDAL (1986), para estimar a evaporação de água em função do nível do lençol freático Comprando-os com o modelo de fácil aplicação e de parâmetros bem mais acessíveis de Hargreaves (WU, 1997).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados para comparação foram observados na estação experimental do departamento de energia nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE). Os dados observados foram a precipitação pluviométrica (P, mm/d), as radiações incidente ( $R_i$ ,  $Wm^{-2}$ ) e refletida ( $R_e$ ,  $Wm^{-2}$ ), a temperatura do ar (T, °C) e a umidade relativa (UR, %) foram monitoradas de forma automatizada, com registros a cada 30 minutos (figura 1a).

A evaporação foi obtida por meio do modelo proposto por Hargreaves, que é de fácil aplicação e requer apenas dois parâmetros facilmente acessíveis, a temperatura T em °C e a radiação solar incidente em  $MJ/m^2/dia$ . Modelo este apresentado da seguinte maneira:

$$ET_o = 0,0135(t + 17,78)R_s \left( \frac{238,8}{595,5 - 0,55T} \right) \quad (1)$$

A profundidade do lençol freático foi determinada utilizando um medidor de nível elétrico, da marca Plastitronic (figura 1b) com dispositivo de contato elétrico para detectar a posição da água. O dispositivo era cuidadosamente introduzido num piezômetro instalado na parcela, até atingir o nível d' água, emitindo um sinal sonoro e a altura assim determinada a partir das marcas de graduação existentes no fio.



Figura 1. a) Visualização parcial da parcela experimental, com pluviômetro e central de dados e b) Medidor de nível do lençol freático

O solo do local é classificado como um neossolo flúvico. As classes texturais do solo desta área estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Classe textural das camadas do solo (PAULA, 2005)

Profundidade (cm)	Classificação textural
0 a 20	Franco siltoso
20 a 40	Franco
40 a 80	Franco argiloso
80 a 100	Franco siltoso
100 a 140	Franco
140 a 160	Areia fina

## 2.1 Modelos para Evaporação:

Para estimar a evaporação em função da variação do nível do lençol freático alguns autores descreveram modelos matemáticos, dentre os quais destacamos os modelos: de PHILIP (1957), HARBAUGH(1988), MOREAL-SEYTOUX(1989) e GRILLI & VIDAL(1986) descritos abaixo:

### 2.1.1 Philip (1957):

Este modelo propõe que a taxa de evaporação diminui exponencialmente à medida que sua profundidade aumenta. Sugerindo que para um lençol superficial a evaporação é máxima. O modelo é representado pela seguinte equação:

$$Ev = Ev_{max} e^{-\alpha z} \quad (2)$$

Onde  $Ev$ ,  $Ev_{Max}$ ,  $\alpha$  e  $z$  são respectivamente taxa de evaporação do solo, evaporação máxima, parâmetro de ajuste e profundidade.

### 2.1.2. Harbaugh (1988):

Propõe uma relação linear entre a evaporação e a profundidade a qual é nula quando o lençol é mais profundo e atinge valor máximo na superfície;

$$Ev = az + b \quad (3)$$

Onde a e b são parâmetros de ajuste e z profundidade.

### 2.1.3 Morel–Seytoux (1989):

Descreve uma equação semelhante à de Philip, considerando que a profundo;

$$Ev = E_0 z^{-m} \quad (4)$$

Na qual  $E_0$  e m são taxa de evaporação mínima e parâmetro de ajuste.

### 2.1.4 Grilli & Vidal (1986):

Propuseram que a evaporação ocorre em duas etapas, a partir de um valor máximo, que diminui exponencialmente com a profundidade do solo.

$$Ev = Ev_{max} e^{\alpha(z-z_0)} \quad ,Ev \leq Ev_{max} \quad (5)$$

$$Ev = Ev_{max} \quad ,Ev > Ev_{max}$$

Sendo  $Ev_{max}$  é a evaporação máxima e  $Z_0$  é a profundidade inicial.

## 2.2 Obtenções dos parâmetros

Os parâmetros das equações (2), (3), (4) e (5) são determinados de forma otimizada, considerando como critério à minimização de uma função-objeto, que utiliza as diferenças entre os valores medidos e calculados.

A função-objeto a ser utilizada tem a seguinte forma:

$$F(p) = \sum_{i=1}^N [X(t_i) - \hat{X}(\widehat{t}_{i,p})]^2 \quad (6)$$

Sendo  $X(t_i)$  um conjunto de valores medido em tempos específicos  $t_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) e  $\hat{X}(\widehat{t}_{i,p})$  o conjunto de valores calculados com a otimização do vetor de parâmetros  $p = \{E_0, E_{v_{\max}}, \alpha, a, b, m, Z_0\}$ .

### 2.3 Desempenho dos modelos

Quatro critérios estatísticos foram utilizados para a análise dos dados calculados: o erro quadrático médio, EQM; razão de desvios, RD; e o coeficiente de massa residual, CMR (LOAGUE & GREEN, 1991).

$$EQM = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{100}{\bar{M}} \quad (7)$$

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{M})^2} \quad (8)$$

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^N M_i - \sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N M_i} \quad (9)$$

Sendo  $T_i$  os valores calculados pelo modelo,  $M_i$  os valores experimentais,  $\bar{M}$  a média dos valores experimentais e  $N$  o número de determinações. Os valores ótimos de EQM, RD e CRM são 0,1 e 0, respectivamente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Durante o período 31 dias em estudo ocorreram chuvas totalizando aproximadamente 240 mm. Como pode ser visto na figura 2, a distribuição das chuvas não ocorreram de forma bem distribuída. Na primeira quinzena praticamente não ocorreram chuvas. As maiores chuvas ocorreram nos dias 16 e 30. Como as chuvas do mês ocorreram praticamente na segunda quinzena, espera-se que a presença de nuvens afetem a evaporação no período e que o nível do lençol freático se eleve.

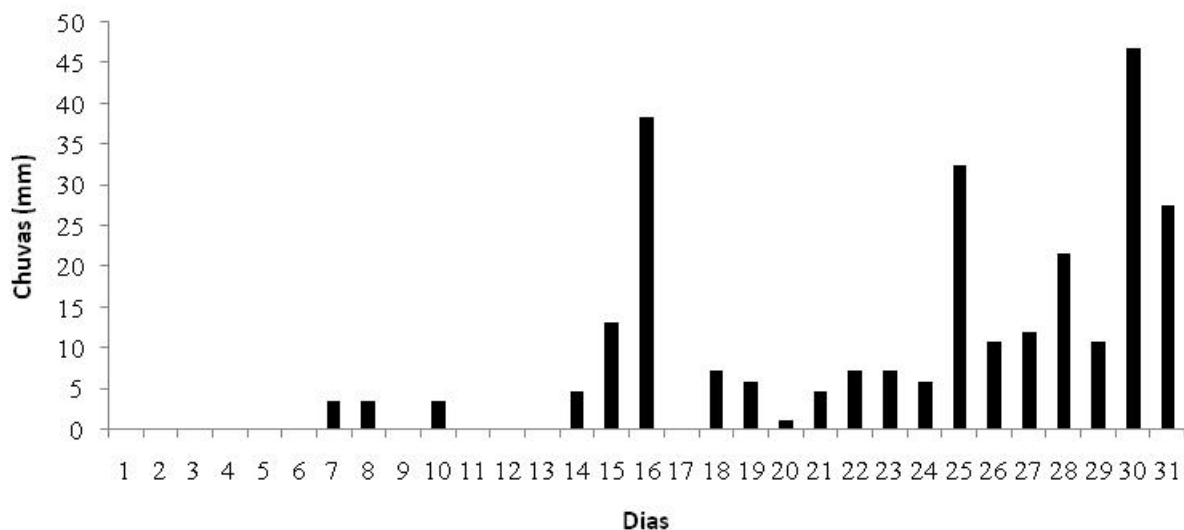


Figura 2. Chuvas ocorridas no período

A evaporação obtida pelo método de Hargreaves no período está apresentada na figura 3. Como pode ser visto, a evaporação apresentou valores aproximadamente constantes nos 10 primeiros dias, com pequenas reduções nos dias 6 e 8, período que ocorreram chuvas. No dia 5 a evaporação foi maior, apesar de não ter chovido nos dias anteriores. Isso se explica devido à forte radiação incidente e ao aumento de temperatura. A segunda maior evaporação ocorreu no dia 9 devido à maior disponibilidade hídrica. Com o início do período chuvoso, a evaporação diminuiu seus valores, pois embora o solo dispusesse de uma maior quantidade de água, as condições atmosféricas não permitiam que ocorressem grandes evaporações, principalmente devido à presença das nuvens.

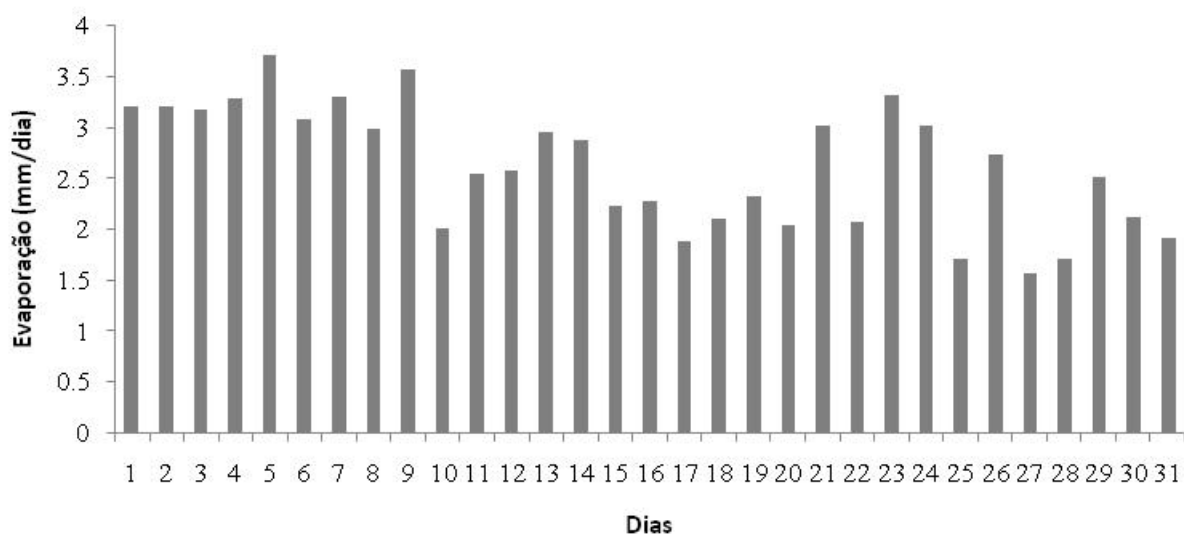


Figura 3. Evaporação ocorrida no período

Como o nível do lençol freático não fora automatizado, a profundidade do lençol freático foi determinada em alguns dias durante o período de estudo. Para os dias em que foram medidos a sua profundidade, ele apresentou um comportamento de acordo com as chuvas, como pode ser visto na figura 4, com uma maior profundidade na primeira quinzena do mês, com aproximadamente 4,5 m de profundidade, apresentando uma grande elevação no dia 23, com um nível de cerca de 3,4 m de profundidade, devido as constantes chuvas ocorridas no período e apresentando uma profundidade de aproximadamente 4 m no restante dos dias.

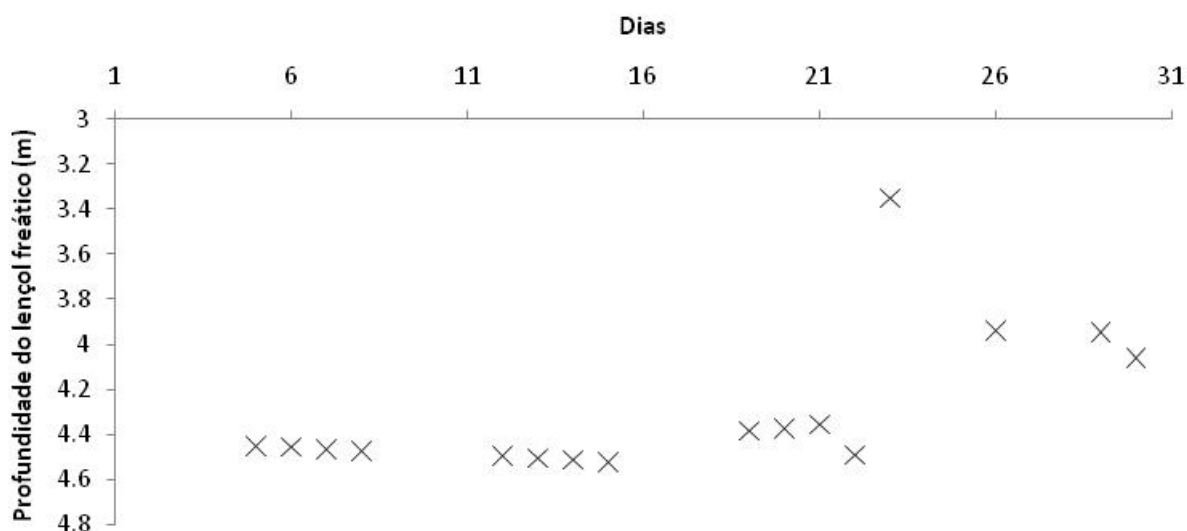


Figura 4. Profundidade do lençol freático

De posse dos valores do nível do lençol freático, utilizou-se a equação (6) para se determinar os valores dos parâmetros do vetor p. Os valores dos parâmetros foram obtidos para dias com e sem chuvas (ou com chuvas que não interferiram no nível do lençol freático) Os resultados obtidos após a otimização para os dois momentos encontra-se na tabela 2.

Tabela 2. Valores dos parâmetros do vetor p após otimização

Dias	Philip (1957)		Harbaugh (1988)		Morel-Seytoux (1989)		Grilli & Vidal (1986)		
	a	b	a	b	E <sub>0</sub>	m	Z <sub>0</sub>	Ev <sub>max</sub>	α
Sem chuva	10,00	0,25	20,25	93,66	3,50	0,05	3,27	10,00	0,15
Com chuva	9,93	0,26	0,59	4,81	11,28	1,10	1,24	9,54	0,26

Na figura 5 estão apresentados as comparações da evaporação determinada pelo modelo de Hargreaves e estimada pelos modelos de Philip, Hanbaugh, Morel e Grili, em dias sem e com chuvas.



Na calibragem do período sem chuva, o modelo de Harbaugh (1988) foi o que apresentou maiores diferenças. No dia 5/1 a evaporação foi subestimada pelos modelos, enquanto a determinada pelo método de Hargreaves apresentou um valor de 3,70 mm/dia, enquanto as estimativas encontradas pelo modelos de Philip (1957), Harbaugh (1988), Morel-Seytoux e Grilli & Vidal (1986) apresentaram valores de 3,27 mm/dia, 3,46 mm/dia, 3,25 mm/dia e 3,24 mm/dia, respectivamente. No dia 6/1 todos os modelos superestimaram os valores determinados pelo método de Hargreaves, sobretudo o modelo de Harbaugh (1988), que apresentou uma diferença de aproximadamente 11%. No dia 7/1 os modelos estimaram os valores da evaporação muito bem, exceto o modelo de Harbaugh (1988) que apresentou uma subestimativa de 5%. No dia 8/1 a evaporação foi superestimada por todos os modelos. Entretanto essa subestimativa foi de apenas 4% para o modelo de Harbaugh (1988).

Para os dias com precipitação pluviométrica os modelos apresentaram praticamente os mesmos valores, não apresentando diferenças significativas entre si.

No período chuvoso temos três casos distintos, dois dias sem muita precipitação, um dia posteriores a um grande evento chuvoso e um dia de grandes chuvas. Nos dias 19/1 e 29/1, a estimativa da evaporação foram os mesmos dos valores medidos, dias esses que não ocorreram grandes chuvas. No dia 26/1, dia que precede uma grade precipitação, a evaporação é subestimada. Esse aumento na evaporação se deu devido à grande disponibilidade hídrica no momento. No dia 30, dia de grande precipitação, a evaporação é baixa, principalmente pela cobertura do céu pelas nuvens, e as estimativas são altas, devido ao aumento no nível do lençol freático.

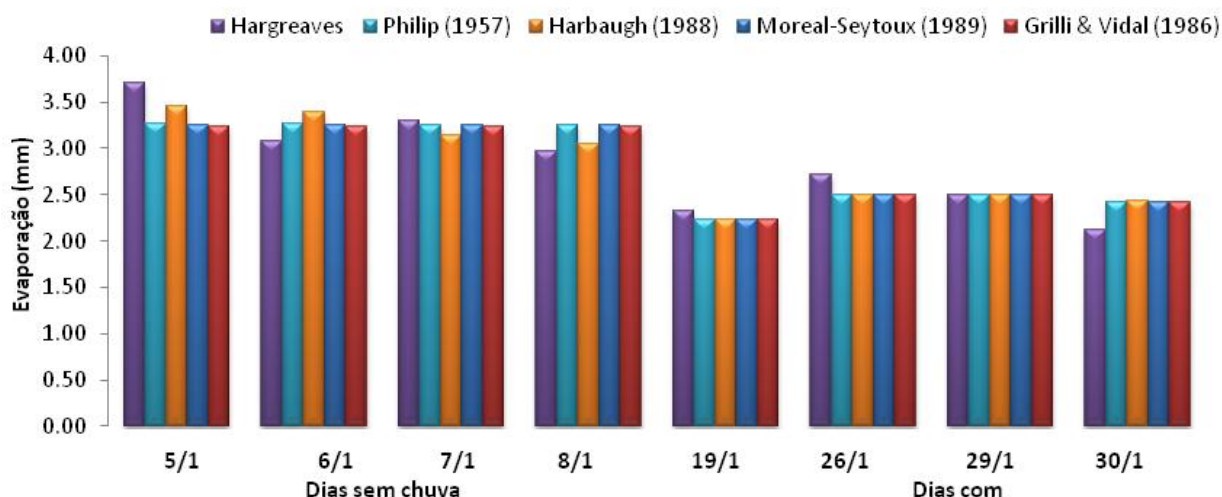


Figura 5. Evaporação medida e estimada em dias sem e com chuvas

Os índices estatísticos para cada modelo, nos dias sem e com chuvas estão apresentados na tabela 3. Para o período sem chuvas, o modelo de Harbaugh(1988) apresentou melhores resultados, seguido pelo modelos de Philip (1957), Grilli & Vidal (1986) e de Morel-Seytoux (1989).

Para o período chuvoso acontece o inverso, os melhores desempenhos foram obtidos pelos modelos de Morel-Seytoux (1989), Philip (1957), Grilli & Vidal (1986) e por último o modelo de Harbaugh(1988).

Tabela 3. Valor da função-objeto (F(p)), erro quadrático médio (EQM), razão de desvios (RD) e coeficiente de massa residual (CMR) para os modelos de Philip (1957), Harbaugh(1988), Moreal-Seytoux (1989) e Grilli & Vidal (1986).

	F(p)	EQM (%)	RD	CRM
Dias sem chuva				
Philip (1957)	0,31	8,483	17,026	-0,001
Harbaugh(1988)	0,20	6,811	2,694	-0,001
Moreal-Seytoux (1989)	0,32	8,606	8,071	0,012
Grilli & Vidal (1986)	0,31	8,561	16,444	0,065
Dias com chuva				
Philip (1957)	0,15	7,996	4,035	0,004
Harbaugh(1988)	0,35	8,045	17,370	0,131
Moreal-Seytoux (1989)	0,46	7,947	3,883	0,001
Grilli & Vidal (1986)	0,46	7,996	4,032	0,139

### 3. CONCLUSÕES

Comparando os quatro modelos notou-se uma semelhança quanto aos seus resultados no decorrer do período analisado, principalmente para o período chuvoso.

Quanto a comparação pelos critérios estatísticos os modelos apresentaram uma margem de erro grande em relação ao erro quadrático médio e a razão de desvio, já para o coeficiente de massa residual os valores se mostraram mais próximos dos resultados esperados.

Para o período sem chuvas, o modelo de Harbaugh(1988) apresentou melhores resultados, seguido pelo modelos de Philip (1957), Grilli & Vidal (1986) e de Morel-Seytoux (1989).

Para o período chuvoso acontece o inverso, os melhores desempenhos foram obtidos pelos modelos de Morel-Seytoux (1989), Philip (1957), Grilli & Vidal (1986) e por último o modelo de Harbaugh(1988).

Para uma melhor calibragem é necessário uma maior quantidade de dados observados tanto para a evaporação quanto para o nível do lençol freático.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRITO, L.T. de L.; ANJOS, José Barbosa dos. Barragem subterrânea: Captação e armazenamento de água no meio rural. Petrolina: Embrapa-CPATSA, 1997. 1p.

\_\_\_\_\_; SILVA, A. de S.; MACIEL, J.L.; MONTEIRO, M.A.R. Barragem subterrânea. I: construção e manejo. Petrolina: Embrapa-CPATSA, 1989. 39p. il. (Embrapa-CPATSA. Boletim de Pesquisa, 36).

DUQUE, J.G. Solo e água no polígono das secas. 5.ed. Mossoró: ESAM/FGD/CNPq, 1980. 273p. (ESAM. Coleção Mossoroense, v.142).

GRILLI, A. and E. Vidal (). "Evaporación desde salares: metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación en las Regiones I y II." Revista de Ingeniería Hidráulica de Chile, n.1, v.2, p. 155- 168, 1986.

HARBAUGH, A. W. Modflow, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model: the groundwater flow process, U.S. Geological Survey Techniques and Methods, p. 6-16, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTADÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2000.

IPT. INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA, São Paulo, SP. Levantamento das potencialidades para implantação de barragens subterrâneas no Nordeste: bacias dos Rios Piranhas-Açu RN e Jaguaribe CE. São Paulo: IPT, 1981. 56 p. il. Relatório 14887.

LOAGUE, K. M; GREEN, R.E. Statistical and graphical methods for solute transport models. Journal of Contaminant Hydrology, v. 7, p.51-73, 1991.

MMA. Plano Nacional de Recursos Hídricos/ Programa Nacional de Águas Subterrâneas. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. Brasília, 2009.

PAULA, JOSILENNE IARA VICNETE. Avaliação das propriedades hidrodinâmicas do solo para a estimativa da recarga do aquífero. UFPE. Dissertação (Mestrado). 2005. p. 67.

PHILIP, J. R. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. *Journal of Meteorology* n.14, p. 354-366, 1957.

REBOUÇAS, A. Água subterrânea: fonte mal-explorada no conhecimento e na sua utilização. *A Água em Revista*, Belo Horizonte, CPRM, v. 5 , n. 8, p. 84-87, 1997.

SANTOS, J.P. dos & Frangipani, A. Barragens submersas - uma alternativa para o Nordeste brasileiro. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 2, São Paulo, SP, 1978. Anais... São Paulo, ABGE, 1978. V.1. p.119-126.

TIGRE, C. B. Barragens Subterrâneas e Submersas como Meio Rápido e Econômico de Armazenamento de Água. *Anuário do Instituto Nordeste*, Fortaleza, CE, p.13-29. 1949.

WU, I-Pai. A Simple evapotranspiration Model for Hawaii: The Hargreaves Model. Hawaii at Manoa, CTAHR, 1997.