

Evaporação e Evapotranspiração

- Conceituação
- Fatores intervenientes
- Grandezas características
- Medidas e estimativas

1. GENERALIDADES

Cerca de 70% da quantidade de água precipitada sobre a superfície terrestre retorna à atmosfera pelos efeitos da evaporação e transpiração. Devido a isso, a mensuração desses dois processos é fundamental para o hidrólogo na elaboração de projetos, visto que afetam diretamente o rendimento de bacias hidrográficas, a determinação da capacidade do reservatório, projetos de irrigação e disponibilidade para o abastecimento de cidades, entre outros.

Em zonas áridas, como o Iraque, em que a evaporação anual pode atingir valores superiores a 2 metros, a desconsideração do fenômeno implicaria numa superestimativa das disponibilidades hídricas.

2. MECANISMO DA EVAPORAÇÃO

A água, recebendo incidência de calor, inicia um processo de aquecimento até que seja atingido seu ponto de ebulição. Prosseguindo a cessão de calor, este não mais atua na elevação da temperatura, mas como calor latente de vaporização, convertendo a água do estado líquido para o gasoso. Este vapor d'água, se liberta da massa líquida e passa a compor a atmosfera, situando-se nas camadas mais próximas da superfície.

Caso a evaporação possa se processar livremente, sem restrições do suprimento de água, esta evaporação é dita EVAPORAÇÃO POTENCIAL.

2.1. FATORES INTERVENIENTES NA EVAPORAÇÃO

2.1.1. VENTO

A ação do vento consiste em deslocar as parcelas de ar mais úmidas encontradas na camada limite superficial, substituindo-as por outras mais secas. Inexistindo o vento, o processo de evaporação cessaria tão logo o ar atingisse a saturação, uma vez que estaria esgotada sua capacidade de absorver vapor d'água.

2.1.2. UMIDADE

O ar seco tem maior capacidade de absorver vapor d'água adicional que o ar úmido, desta forma, a medida em que ele se aproxima da saturação, a taxa de evaporação diminui, tendendo a se anular, caso não haja vento para promover a substituição desse ar.

2.1.3. TEMPERATURA

A elevação da temperatura ocasiona uma maior pressão de saturação do vapor (e_s), adquirindo o ar uma capacidade adicional de conter vapor d'água.

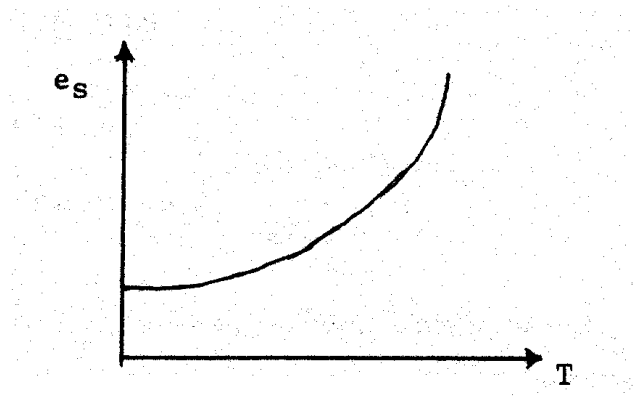


Figura 7.1 – Curva da pressão de saturação de vapor em função da temperatura.

2.1.4. RADIAÇÃO SOLAR

A energia necessária para o processo de evaporação tem como fonte primária o sol; a incidência de sua radiação varia com a latitude, clima e estação do ano.

3. MECANISMO DE TRANSPIRAÇÃO

A água constitui um elemento essencial para a manutenção da vida. Os vegetais, para desempenhar suas necessidades fisiológicas, retiram a água do solo através de suas raízes, retêm uma pequena fração e devolvem o restante através das superfícies folhosas, sob forma de vapor d'água, pelo processo de transpiração.

Os fatores intervenientes na transpiração são praticamente os mesmos associados à evaporação (vento, temperatura e umidade). A luz age como fator limitante, uma vez que é responsável pela abertura dos estômatos. Sendo assim, a transpiração é considerada quase que desprezível durante as horas sem insolação.

4. EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Em solos com cobertura vegetal é praticamente impossível separar o vapor d'água proveniente da evaporação do solo daquele originado da transpiração. Neste caso, a análise do aumento da umidade atmosférica é feita de forma conjunta, interligando os dois processos num processo único, denominado de **evapotranspiração**.

5. MEDIDAS E ESTIMATIVAS

5.1. MÉTODOS DE MEDIDAS

5.1.1. EVAPORÍMETROS

{ Tanque Classe A
Atmômetro Piche

Medições de evaporação podem ser facilmente conduzidas com o emprego de recipientes achatados em forma da bandeja circular, de difundido uso nas estações meteorológicas do Brasil – **o tanque classe A.**

O tanque deve ser instalado nas imediações do reservatório em que se pretende determinar a taxa de evaporação, ou ainda podem ser acopladas estruturas flutuadoras de modo a permitir que a medida seja feita sobre a própria superfície líquida.

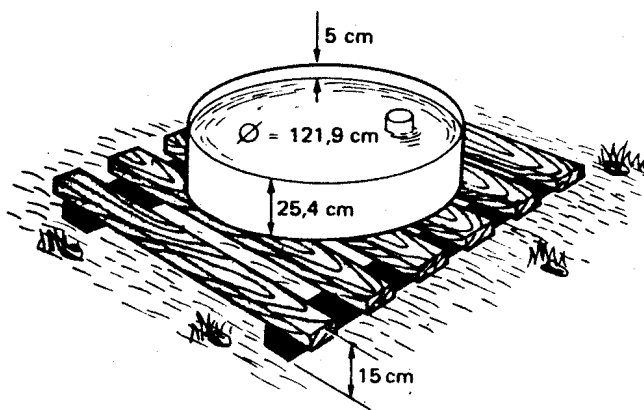


Figura 7.2 – Tanque “Classe A” (Fonte: VILLELA, 1975).

Existem ainda outros tipos de evaporímetros, dentre os quais podemos citar o atmômetro, notadamente o tipo Piche.

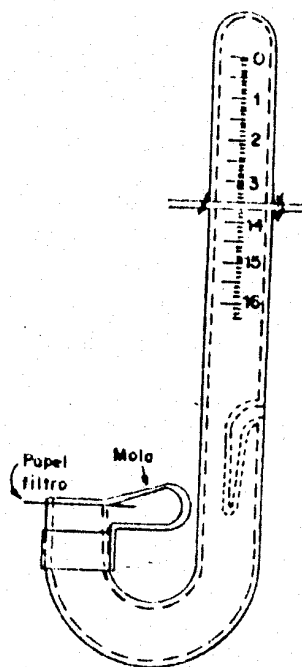


Figura 7.3 – Evaporímetro Piche

5.1.2. FITÔMETRO

Em razão da dificuldade de se proceder em campo medidas de transpiração, têm-se adotados métodos laboratoriais dentre os quais aqueles em que se emprega o fitômetro fechado, o qual consiste num recipiente no interior do qual é colocada a planta, bem como solo para sua alimentação. A água necessária para manter vivo o sistema é adicionada em quantidades conhecidas. Nenhuma outra troca é permitida senão àquela advinda da transpiração do vegetal, a qual é determinada subtraindo o peso inicial do sistema (incluindo a água adicionada) e o peso final.

5.2. MÉTODOS DE ESTIMATIVA

5.2.1. Método aerodinâmico (EVAPORAÇÃO)

Este método baseia-se na **difusão do vapor**. Em sua forma simplificada, a evaporação é obtida como função da velocidade média do vento e da diferença de pressão de vapor entre os níveis em que ela se processa.

$$E = (a + b \cdot \bar{v}) (e_s - e)$$

onde:

\bar{v} – velocidade média do vento

$(e_s - e)$ – diferença entre as pressões de saturação de vapor à superfície e no ar.

5.2.2. MÉTODO DE HARGREAVES

A equação proposta por Hargreaves e Christiansen (1973) é de fácil uso e requer dados de temperatura, umidade e latitude. Ela se aproxima muito da evapotranspiração da grama, podendo ser usada com dados climáticos do Brasil.

A evapotranspiração (já modificada para os dados climáticos disponíveis no Brasil) é dada por:

$$ETP = F \times TF \times CH$$

onde:

F = fator mensal dependente da latitude (em mm/mês – tabela 1)

TF = temperatura média em °F

CH = fator de correção da umidade relativa média mensal.

Mas,

$$TF = 32 + 1,8T \text{ (T em } ^\circ\text{C)}$$

$$CH = 0,158 \times (100 - U)^{1/2}, \text{ com o valor máximo de 1,0}$$

Resumindo:

$$ETP = F \times 0,158 \times (100 - U)^{1/2} \times (32 + 1,8T)$$

onde:

F = tabela 1

U = umidade relativa média mensal (%)

$$U = (U_{12:00} + U_{18:00} + 2 \times U_{24:00}) \div 4$$

T = temperatura média mensal ($^\circ\text{C}$)

$$T = (T_{12:00} + 2 \times T_{24:00} + T_{\max} + T_{\min}) \div 4$$

Tabela 7.1 – Fator de evapotranspiração potencial (F), para a ETP em mm/mês. (Fonte: HARGREAVES, 1974).

LAT SUL	MÊS											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0	2.255	2.008	2.350	2.211	2.165	2.023	2.123	2.237	2.200	2.343	2.205	2.229
-1	2.288	2.117	2.354	2.197	2.137	1.990	2.091	2.216	2.256	2.358	2.234	2.265
-2	2.371	2.136	2.357	2.182	2.108	1.936	2.059	2.194	2.251	2.372	2.263	2.301
-3	2.353	2.154	2.360	2.167	2.079	1.902	2.076	2.172	2.246	2.386	2.290	2.337
-4	2.385	2.172	2.362	2.151	2.050	1.908	1.993	2.150	2.240	2.398	2.318	2.372
-5	2.416	2.189	2.363	2.134	2.020	1.854	1.960	2.126	2.234	2.411	2.345	2.407
-6	2.447	2.205	2.363	2.117	1.989	1.800	1.926	2.103	2.226	2.422	2.371	2.442
-7	2.479	2.221	2.363	2.099	1.959	1.785	1.893	2.078	2.218	2.433	2.397	2.476
-8	2.509	2.237	2.362	2.081	1.927	1.700	1.858	2.054	2.210	2.443	2.423	2.520
-9	2.538	2.251	2.360	2.062	1.896	1.715	1.824	2.028	2.201	2.453	2.448	2.544
-10	2.567	2.266	2.357	2.043	1.864	1.673	1.789	2.003	2.191	2.462	2.473	2.577
-11	2.596	2.279	2.354	2.023	1.832	1.644	1.754	1.976	2.180	2.470	2.407	2.010
-12	2.575	2.292	2.350	2.002	1.799	1.608	1.719	1.950	2.169	2.477	2.520	2.043
-13	2.657	2.305	2.345	1.981	1.767	1.572	1.684	1.922	2.157	2.484	2.543	2.075
-14	2.680	2.317	2.340	1.959	1.733	1.536	1.648	1.895	2.144	2.490	2.566	obs
-15	2.707	2.328	2.334	1.937	1.700	1.500	1.612	1.867	2.131	2.496	2.588	obs
-16	2.714	2.339	2.327	1.914	1.666	1.404	1.576	1.838	2.117	2.500	2.610	2.769
-17	2.760	2.349	2.319	1.891	1.632	1.427	1.540	1.809	2.103	2.504	2.631	2.799
-18	2.785	2.359	2.311	1.867	1.598	1.391	1.504	1.780	2.089	2.508	2.651	2.930
-19	2.811	2.368	2.302	1.843	1.564	1.354	1.467	1.750	2.072	2.510	2.671	2.859
-20	2.835	2.377	2.293	1.818	1.529	1.319	1.471	1.719	2.056	2.512	2.691	2.899
-21	2.860	2.395	2.282	1.792	1.494	1.281	1.394	1.689	2.039	2.514	2.710	2.918
-22	2.883	2.392	2.272	1.767	1.459	1.244	1.357	1.658	2.021	2.514	2.728	2.947
-23	2.907	2.399	2.260	1.740	1.423	1.208	1.320	1.626	2.003	2.514	2.747	2.975
-24	2.930	2.405	2.248	1.713	1.388	1.171	1.283	1.595	1.984	2.513	2.754	3.003
-25	2.952	2.411	2.234	1.686	1.352	1.104	1.246	1.583	1.965	2.512	2.781	3.031
-26	2.975	2.416	2.221	1.659	1.316	1.097	1.209	1.530	1.945	2.510	2.798	3.058
-27	2.996	2.420	2.206	1.630	1.280	1.001	1.172	1.497	1.924	2.507	2.814	3.085
-28	3.018	2.424	2.191	1.502	1.244	1.024	1.134	1.464	1.903	2.503	2.830	3.112
-29	3.039	2.427	2.178	1.573	1.208	0.988	1.097	1.431	1.881	2.499	2.845	3.139
-30	3.059	2.430	2.159	1.544	1.172	0.952	1.060	1.397	1.859	2.494	2.859	3.185
-31	3.079	2.432	2.142	1.514	1.135	0.916	1.023	1.364	1.836	2.493	2.874	3.191
-32	3.099	2.434	2.125	1.484	1.099	0.830	0.996	1.329	1.812	2.493	2.883	3.217
-33	3.119	2.435	2.106	1.453	1.067	0.844	0.949	1.295	1.788	2.476	2.901	3.242
-34	3.138	2.436	2.087	1.422	1.026	0.808	0.912	1.261	1.764	2.469	2.914	3.268
-35	3.157	2.436	2.068	1.391	0.999	0.773	0.876	1.226	1.739	2.460	2.927	3.293
-36	3.149	2.415	2.030	1.348	0.945	0.731	0.832	1.180	1.698	2.430	2.914	3.289
-37	3.120	2.378	1.980	1.297	0.895	0.606	0.784	1.129	1.647	2.385	2.982	3.265

5.2.3. MÉTODO DE THORNTHWAITE (EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MENSAL)

Thornthwaite estabeleceu a seguinte equação para um mês de 30 dias.

$$E = \left(\frac{10t}{I} \right)^a$$

Esta equação, bastante complexa para uso prático, pode ser facilmente aplicada com o auxílio de um nomograma. Como a temperatura do ar é um elemento geralmente medido em postos meteorológicos com bastante precisão, Camargo substituiu o índice de calor (I) pela temperatura média anual.

Algoritmo:

1. Unir o valor da temperatura média anual ao ponto de convergência (C).
2. Usar o valor da temperatura média mensal (na escala à direita) e traçar uma horizontal até interceptar a linha traçada no passo anterior, subindo então, verticalmente, até encontrar o valor da evapotranspiração potencial.

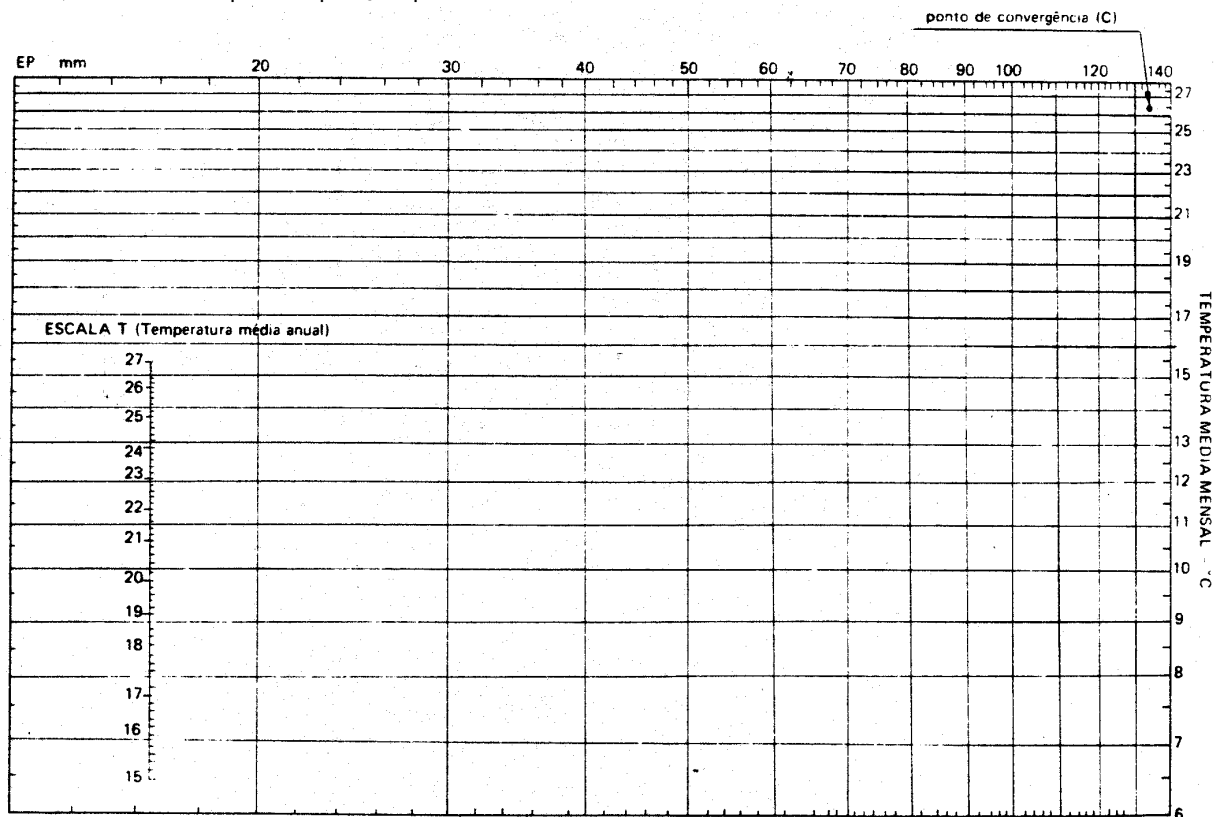


Figura 7.4 – Nomograma para o cálculo da evapotranspiração potencial mensal, não ajustada, pela fórmula de Thornthwaite. (Fonte: VILLELA, 1975).

3. Ajustar o valor obtido no passo anterior as condições reais, multiplicando-o pelo fator correspondente à latitude e ao mês desejado.

Tabela 7.2 – Fatores para correção da evapotranspiração potencial mensal, dada pelo nomograma Thornthwaite para ajustá-la ao número de dias do mês e duração do brilho solar diário, nos vários meses do ano e latitude entre 15 graus norte 37 graus sul. (Fonte: VILLELA; 1975).

Lat.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
15°N	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
10°N	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,05	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
5°N	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
Eq	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5°S	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10°S	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15°S	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20°S	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
22°S	1,14	1,00	1,05	0,97	0,95	0,90	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
23°S	1,15	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17
24°S	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,89	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
25°S	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
26°S	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
27°S	1,18	1,02	1,05	0,96	0,93	0,87	0,92	0,97	1,00	1,11	1,12	1,19
28°S	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29°S	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,86	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30°S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31°S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32°S	1,21	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23
33°S	1,22	1,04	1,06	0,94	0,90	0,83	0,88	0,95	1,00	1,13	1,16	1,23
34°S	1,22	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,84	1,00	1,13	1,16	1,24
35°S	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
36°S	1,24	1,04	1,06	0,94	0,88	0,81	0,86	0,94	1,00	1,13	1,17	1,26
37°S	1,25	1,05	1,06	0,94	0,88	0,80	0,86	0,93	1,00	1,14	1,18	1,27

5.2.4. MÉTODO DE BLANEY E CRIDDLE (EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MENSAL)

Esse método utiliza temperatura média mensal e um fator ligado ao comprimento do dia.

$$E = (t - 0,5 T) p \times K$$

onde:

E = evapotranspiração potencial mensal (mm)

t = temperatura média mensal (°C)

T = temperatura média anual (°C)

P = percentagem de horas diurnas do mês sobre o total de horas diurnas do ano

K = coeficiente empírico mensal, que depende da cultura, do mês e da região (tabela 2)

Tabela 7.3 – Coeficiente de evapotranspiração “K” para as plantas cultivadas, segundo Blaney e Criddle. (Fonte: VILLELA, 1975).

Culturas	Período de crescimento (meses)	Coeficientes de evaporação “K”	
		Litoral	Zona Árida
Algodão	7	0,60	0,65
Arroz	3 - 4	1,00	1,20
Batata	3	0,65	0,75
Cereais menores	3	0,75	0,85
Feijão	3	0,60	0,70
Milho	4	0,75	0,85
Pastos	-	0,75	0,85
Citrus	-	0,50	0,65
Cenoura	3	0,60	-
Tomate	4	0,70	-
Hortaliças		0,60	-