

O CAMINHO ÓPTICO NA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO LINEAR DA RADIAÇÃO SOLAR NA ÁGUA

Antonio A. A. DANTAS¹, Gilberto LAGE², João F. ESCOBEDO³

RESUMO

Este trabalho descreve as correções para as medições da radiação solar global numa represa em diferentes dias e horas, para determinação do coeficiente de atenuação linear da radiação na água. A análise estatística destes coeficientes, calculados com dados corrigidos e sem correção, mostra que as diferenças ocasionadas pelo horário, não aparecem naqueles obtidos a partir dos dados corrigidos.

INTRODUÇÃO

A radiação solar na água está relacionada às reações vitais que ocorrem no interior de um ecossistema aquático. O coeficiente de atenuação da radiação solar na água pode ser usado para caracterização óptica da água de lagos ou outros meios aquáticos similares. Este parâmetro é rotineiramente determinado com auxílio de radiômetros solares ou fotômetros. A metodologia desta determinação envolve uma série de medidas de radiação solar dentro da água, em várias profundidades, e a partir destes dados, é calculado o coeficiente de atenuação. Na maioria das vezes as medidas são feitas corretamente, mas quando aos valores medidos é aplicada a lei exponencial de Beer, é considerada apenas a profundidade, quando outros fenômenos intervêm. A profundidade é alterada pela refração que o feixe de radiação solar sofre ao penetrar na água e portanto uma correção deve ser feita.

MATERIAIS E MÉTODOS

As medições da radiação solar global foram realizadas numa represa em Botucatu, SP, nos dias 05/07, 24/07, 15/08, 05/09, 12/10 e 21/11 nas horas: 09:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00 e 16:00. O método utilizado para medir a radiação solar na água, foi realizado imergindo-se um radiômetro solar sequencialmente em profundidades crescentes, fornecendo as intensidades no perfil, conforme GOLTERMAN et al. (1978). Estas medidas relacionam-se pela lei exponencial de Beer-Bouguer:

$$I_z = I_0 \exp(-kz) \quad 1$$

onde:

I_0 = intensidade da radiação solar global (W/m^2).

I_z = intensidade da radiação solar na profundidade z (W/m^2).

k = coeficiente de atenuação linear da radiação solar na água (m^{-1}).

z = profundidade (m).

Estes valores são submetidos a análise de regressão linear simples onde se ajusta uma reta. A lei exponencial é uma aproximação, uma vez que radiação considerada é global e não monocromática.

Na Fig. 1 (A), é apresentada uma das curvas de transmissividade da radiação solar na água, determinadas por regressão linear simples. O valor de k , é numericamente igual a tangente da reta ajustada.

O sol deslocando-se relativamente a Terra no hemisfério celeste, assume a cada instante um ângulo zenital θ_i diferente, e o correspondente ângulo θ_n causado pela refração do feixe incidente na água, também assume valores diferentes com a variação do ângulo zenital, conforme a lei de Snell:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_n} = \frac{n}{n_i} = n \quad 2$$

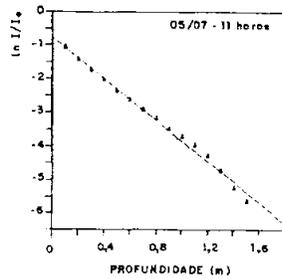
onde:

¹Dr., Bolsista do CNPq, Depto. de Ciências Exatas, FCAV/UNESP, 14870-000, Jaboticabal, SP.

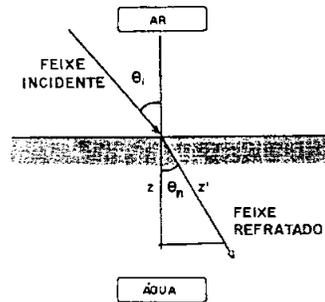
²Dr., Professor Adjunto, Depto de Ciências Exatas, UFLA, Lavras, MG. E-mail: glage@esal.ufla.br.

³Dr., Professor Assistente, Depto. de Ciências Ambientais, FCA/UNESP, Botucatu, SP.

θ_i = ângulo de incidência ou zenital (graus).
 θ_n = ângulo de refração na água (graus).
 n = índice de refração relativo entre ar e água (1.333 para água pura).
 n_i = índice de refração do ar (1).



(A)



(B)

FIGURA 1. (A) Curva de transmissividade da radiação solar na água, as 11:00 horas do dia 05/07. (B) Caminho óptico z' percorrido por um feixe de radiação solar na água.

Considerando-se os meios ar e água, na Fig. 1(B) está esquematizada a transmissão de um feixe de radiação solar com θ_i igual ao ângulo de incidência na superfície da água, o ângulo de refração θ_n e o caminho óptico z' vencido pelo feixe até atingir a profundidade z .

Para determinar o caminho óptico da radiação solar, em uma profundidade qualquer, é necessário encontrar o ângulo zenital θ_i para o instante do dia em que foi registrada a leitura. Esses ângulos foram encontrados utilizando-se tábua astronômica e as equações das relações Terra-Sol.

Aplicando-se a lei de Snell, acha-se o correspondente ângulo de refração θ_n na água. Considerou-se o índice de refração da água igual a 1.33, mesmo sabendo-se que na represa este valor deve ser um pouco maior. A partir de θ_n se determina a que distância, da superfície da água, o feixe incidente encontra radiômetro, naquela determinada profundidade, portanto:

$$z' = \frac{z}{\cos(\theta_n)}$$

onde:

z' = caminho óptico (m).

z = profundidade (m).

θ_n = ângulo de refração na água.

Utilizou-se o teste F, procedendo-se a análise de variância para verificar a significância das diferenças encontradas nos coeficientes de atenuação determinados, conforme GOMES (1970), primeiro, para valores de k calculados com as profundidades, e a seguir, para os valores de k' determinados em função do caminho óptico. Os dias das medições, 05/07, 24/07, 15/08, 05/09, 12/10 e 21/11, foram tomados como blocos e o fator de interesse, as horas: 09:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00 e 16:00.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos coeficientes de atenuação linear da radiação solar na água, foram calculados em função das profundidades em que foram tomadas as medidas e são mostrados no Quadro 1. A seguir efetuadas as correções, transformando-se z em z' , e em função destes, determinou-se novamente os coeficientes de atenuação k' , agora em função dos caminhos ópticos z' que são mostrados no Quadro 2. O coeficiente de atenuação é o coeficiente angular, igual a tangente $\Delta(\ln I / \ln I_0) / \Delta z$. Verifica-se que na correção de profundidade para caminho óptico, a distância torna-se maior, entretanto os correspondentes $\Delta(\ln I / \ln I_0)$ permanecem iguais. Nesta nova relação, k' é menor do que k , exceto no caso da incidência normal, $\theta_i = 0$, onde são iguais. As análises feitas através do teste F para os coeficientes de atenuação calculados com a profundidade e com o caminho óptico, forneceram resultados opostos ou seja, enquanto os valores determinados de k , não diferiram entre si nos diferentes horários em que foram feitas as medidas, os valores de k' diferiram significativamente.

QUADRO 1. Valores dos coeficientes de atenuação k calculados em função das profundidades z .

Horas	Dias / k (m^{-1})					
	05/07	24/07	15/08	05/09	12/10	21/11
		7	8			
7:00	-	-	-	-	-	2.97
8:00	-	-	-	2.90	3.85	-
9:00	3.57	3.35	3.12	3.18	3.85	2.63
10:00	3.07	3.08	-	2.82	3.92	2.36
11:00	3.08	2.93	2.66	2.74	3.41	2.25
12:00	2.75	2.75	2.65	2.61	3.37	-
13:00	2.65	2.56	2.81	2.65	3.44	2.21
14:00	3.55	2.71	-	2.69	3.41	-
15:00	3.47	2.67	-	2.88	-	2.52
16:00	-	-	-	-	-	2.82

QUADRO 2 Valores dos coeficientes de atenuação k' calculados em função dos caminhos ópticos z' .

Horas	Dias / k' (m^{-1})					
	05/07	24/07	15/08	05/09	12/10	21/11
7:00	-	-	-	-	-	2.13
8:00	-	-	-	2.17	2.88	-
9:00	2.69	2.47	2.42	2.54	3.19	2.25
10:00	2.45	2.47	-	2.41	3.59	2.22
11:00	2.58	2.48	2.34	2.50	3.22	2.22
12:00	2.34	2.33	2.35	2.43	3.35	-
13:00	2.23	2.16	2.46	2.43	3.31	2.17
14:00	3.78	2.16	-	2.31	3.11	-
15:00	2.46	2.02	-	2.30	-	2.16
16:00	-	-	-	-	-	2.18

CONCLUSÕES

É necessário calcular o caminho óptico da irradiância solar nas medições realizadas dentro da água, para corrigir a profundidade onde se mediu uma certa irradiância, de modo que a correspondência entre a distância percorrida pelo feixe de radiação e sua intensidade medida possa ser corretamente estabelecida. O caminho óptico só é igual a profundidade quando θ_i é zero. A correção da profundidade para caminho óptico, na determinação do coeficiente de atenuação da radiação solar na água, é mais coerente com o fenômeno da transmissão. A utilização pura e simples da profundidade para se proceder os cálculos, conduz a valores de coeficientes de atenuação (k) superestimados.

BIBLIOGRAFIA

- GOLTERMAN, H.L., CLYMO, R.S., OHNSTAD, M.A.M. *Methods for physical and chemical analysis of fresh waters*. 2. ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1978. 215p.
- GOMES, F.P. *Curso de estatística experimental*. 4. ed. São Paulo: Nobel, 1970. 430p.
- Agradecimentos: Ao CNPq. Processo n. 301376/95-6