

BOMBER: UNA PROCEDURA IDL PER LA STIMA AUTOMATICA DI PARAMETRI DI QUALITÀ DELL'ACQUA DA DATI OTTICI TELERILEVATI

C. GIARDINO (*), M. BRESCIANI (**), G. CANDIANI (***), S. GAGLIANO (****)

(*) CNR-IREA, via Bassini 15 Milano, tel. 02-23699298, fax 02-236999300, e-mail: giardino.c@irea.cnr.it

(**) CNR-Stazione Sperimentale di Sirmione "Eugenio Zilioli", Via Punta Staffalo 16 Sirmione (Bs),
tel. 030-916556, fax 030-916556, e-mail: bresciani.m@irea.cnr.it

(***) UniBS-DEA, via Branze, 38 Brescia, tel. 030-3715510, e-mail: gabriele.candiani@ing.unibs.it

(****) ITT-Visual Information Solutions, viale Colleoni 1, Agrate Brianza (Mi), tel. 039-6058605,
fax 039-6058606, e-mail: sgagliano@ittvis.com

Sommario

In questo studio viene presentato un *tool* basato sulla modellistica bio-ottica per estrarre le proprietà di qualità dell'acqua da dati telerilevati, multi o iper-spetttrali, corretti dall'effetto atmosferico. Il programma, denominato BOMBER (Bio-Optical Model for the evaluation of Bottom Effect on water Reflectance), permette di derivare simultaneamente mappe descrittive dei parametri otticamente attivi dell'acqua, relativi sia allo strato eufotico (concentrazioni di clorofilla-a, solidi sospesi e sostanze gialle) sia al fondale. Nel caso di acque poco profonde, il modello fornisce infatti la batimetria e l'albedo di fino a tre differenti tipologie di substrato, definite dall'utente in funzione delle caratteristiche dell'area di studio. Abilitando diverse finestre d'interfaccia grafica, i menu del programma permettono in modo *user-friendly* di definire la tipologia del caso di studio (acque basse o profonde), la parametrizzazione del modello bio-ottico e i *file* immagine in ingresso e in uscita. Per velocizzare i tempi di calcolo, si può fornire in input un file binario per mascherare i pixel non interessati dal processo di stima. BOMBER, che è integralmente codificato in linguaggio IDL e si può eseguire dal menu principale di ENVI, viene distribuito gratuitamente su richiesta degli interessati.

Abstract

BOMBER (Bio-Optical Model for the evaluation of Bottom Effect on water Reflectance) is an add-on tool for the ENVI software. Through an optimization technique, BOMBER retrieves properties of water column and bottom from remotely sensed imagery. In this process, the input image must be atmospherically corrected to remote sensing reflectance values. Non-water pixels can be masked to improve the inversion performance. The optimization technique allows retrieving simultaneously maps of chlorophyll concentration, suspended particulate matter concentration, coloured dissolved organic matter absorption and, in case of shallow waters, bottom depth and distributions of up to three different substrate albedo defined by the user. For both deep and shallow water models, a map of the relative error involved in the inversion procedure is given as well. Fully programmed in IDL code using widgets for the graphical interface, it enables several menus to choose the model type, the input and output files as well as to set all of the features involved in the model parameterization and inversion. The tool can be applied to any aquatic environments (e.g., lakes, coastal zones). BOMBER is available by request of interested users.

Introduzione

Nelle applicazioni quantitative del telerilevamento ottico orientate ad un monitoraggio semi-operativo della qualità dell'acqua, sia marine sia interne, l'approccio analitico offre ampie

potenzialità (Lindell et al., 1999). Il metodo analitico è basato sull'inversione di una serie di relazioni fisiche attraverso le quali le proprietà ottiche dell'acqua sono associate alla radianza emergente dalla colonna d'acqua (che, nel caso di acque basse, include anche il segnale riflesso dal fondale), a sua volta relazionata al segnale misurato dal sensore. L'inversione fa uso delle equazioni di trasferimento radiativo nella componente sia atmosferica sia acquatica. La prima, che non viene affrontata in questo lavoro, si affronta con i noti metodi di correzione atmosferica la seconda, attraverso la modellistica bio-ottica. L'inversione di un modello bio-ottico, che descrive la radianza riflessa dall'acqua in funzione della concentrazione dei parametri, può compiersi adottando differenti tecniche quali metodi analitici, minimi quadrati, tecniche di ottimizzazione non lineare, approcci basati su *look-up-table*, etc.

In questo studio, si presenta un *tool* che, in modo fisicamente basato permette di produrre mappe di qualità dell'acqua da immagini telerilevate corrette atmosfericamente. Per l'inversione si è utilizzata una tecnica di ottimizzazione non lineare che si è mostrata adatta nella stima di parametri ottici di acque profonde e costiere (Lee et al., 2001). Il modello bio-ottico implementato è costruito in base alle relazioni di Lee et al. (1999) e si compone dei seguenti termini:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{\Pi r(0-, \lambda)}{(1 - \lambda r(0-, \lambda))} \quad (1)$$

$$r(0-, \lambda) = r(0-, \lambda)^C + r(0-, \lambda)^B = r(0-, \lambda)^{dp} \left(1 - A_0 e^{-\left(\frac{1}{\cos(\theta_w)} + D_u^C\right) K(\lambda) H} \right) + A_1 c(\lambda) e^{-\left(\frac{1}{\cos(\theta_w)} + D_u^B\right) K(\lambda) H} \quad (2)$$

dove $R_{rs}(\lambda)$ è la *remote-sensing-reflectance*, Π e γ sono due parametri che tengono conto del passaggio della radiazione all'interfaccia aria/acqua, $r(0-, \lambda)$ è la radianza riflessa, a sua volta composta da un termine legato alla colonna d'acqua $r(0-, \lambda)^C$ e da un altro legato al fondale $r(0-, \lambda)^B$. Per comprendere il *tool* BOMBER occorre esplicitare altre due grandezze dell'equazione 2, mentre si rimanda al lavoro di Lee et al. (1999) per maggiori approfondimenti.

$$r(0-, \lambda)^{dp} = (g_0 + g_1 \cdot u(\lambda)^{g_2}) u(\lambda), \text{ con } u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (3)$$

dove g_0 , g_1 e g_2 sono tre scalari che tengono dell'anisotropia del campo di luce, mentre $a(\lambda)$ e $b_b(\lambda)$ sono i coefficienti di assorbimento e di *backscattering* dei componenti acquatici (proprietà ottiche inerenti).

Il processo di ottimizzazione viene infine compiuto minimizzando la seguente funzione:

$$\delta = \sqrt{\sum_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (R_{rs}^{IMAGE}(\lambda) - R_{rs}^{MOD}(\lambda))^2} \quad (4)$$

dove $R_{rs}^{IMAGE}(\lambda)$ sono i valori di riflettanza dell'immagine telerilevata, da cui derivare i parametri di qualità dell'acqua, mentre $R_{rs}^{MOD}(\lambda)$ sono i valori simulati dall'equazione 1.

Principali caratteristiche dell'interfaccia BOMBER

Il programma BOMBER può essere direttamente linkato ad ENVI in modo da fa apparire un nuovo modulo nella barra principale del suo menu. Cliccando sul nuovo modulo compare l'interfaccia principale *Bomber* (Fig. 1) che a sua volta, in modo *user-friendly*, permette di abilitare i sottomenu per la gestione dell'intero processo di calcolo (Fig. 1, moduli elencati sulla sinistra della finestra). I tre bottoni posti nel menu principale permettono di lanciare il processo di ottimizzazione, a livello sia di singolo spettro (Fig. 1, bottone in basso a sinistra) sia di file immagine (Fig. 1, bottone in basso centrale), o di uscire dal programma (Fig. 1, bottone in basso a destra).

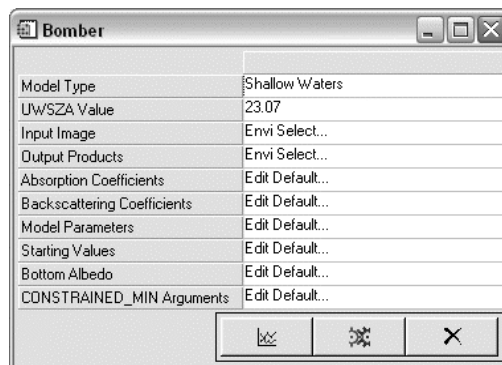


Figura 1 - La finestra iniziale di BOMBER.

Descrizione dei moduli

Di seguito, in relazione alla Fig. 1, sono descritti i principali moduli dell'interfaccia principale.

Model Type - Permette all'utente di definire il caso di studio: acque profonde (*Deep Waters*) o acque basse (*Shallow Waters*). Tale scelta detta gli input per la parametrizzazione del modello in base dell'equazione 2.

UWSZA Value - Richiede il valore medio di angolo zenitale del sole (*Under-Water Solar Zenith Angle*) al di sotto della superficie d'acqua relativo all'intera immagine. L'angolo viene richiesto solo nel caso di *Shallow Waters* e, noto l'indice di rifrazione aria/acqua I si calcola facilmente a partire dall'angolo zenitale del sole (*SZA*, *Solar Zenith Angle*) ($\text{sen}(\text{UWSZA}) = \text{sen}(\text{SZA})/I$).

Input Image - Questo modulo permette di selezionare l'immagine di input da cui stimare i parametri di qualità dell'acqua. L'immagine deve essere corretta atmosfericamente e riportare i valori di riflettanza alla superficie R_{rs} in sr^{-1} . Il file deve essere in formato ENVI e quindi accompagnato dal relativo file di header. In particolare, quest'ultimo deve contenere le informazioni sulla lunghezza d'onda centrale, l'ampiezza (*full width half maximum*) delle bande e la relativa unità di misura (nm o μm) Queste informazioni sono necessarie perchè le equazioni/parametri della modellistica bio-ottica sono in larga parte grandezze spettrali. In questo modulo è inoltre possibile selezionare un file binario (sempre in formato ENVI) per mascherare i pixel dell'immagine non interessati dal processo di inversione.

Output Products - Questo modulo permette di selezionare il nome del file di output che consiste di un'immagine composta da diversi layer: concentrazione clorofilla-a (CHL, mgm^{-3}), concentrazione dei solidi sospesi (SPM, *Suspended Particulate Matter*, in gm^{-3}), concentrazione delle sostanze gialle (o CDOM, *Colored Dissolved Organic Matter*, misurata come coefficiente di assorbimento a 440 nm $a_{\text{CDOM}(440)}$ in m^{-1}). Nel caso di *Shallow Waters* a questi layer se ne aggiungono altri quattro: profondità del fondale (H) e percentuale di copertura per tre diverse classi di substrato (ρ_0 , ρ_1 , ρ_2). Sia nel caso di *Deep Waters* che di *Shallow Waters* vi sono infine altri 2 layer che vanno a comporre il del file di output: la pendenza S_{NAP} del coefficiente di assorbimento delle particelle non algali (NAP, *Non Algal Particle*) e la misura dell'errore (E) associato al processo di inversione. Il file in uscita è in formato ENVI, con la stessa dimensione (pixel e linee) dell'immagine in ingresso.

Absorption Coefficients - Questo modulo gestisce la parametrizzazione del coefficiente di assorbimento totale $a(\lambda)$ dell'equazione 3. A tal fine, è utile scomporre l'assorbimento totale in quattro componenti:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_\phi(\lambda) + a_{\text{NAP}}(\lambda) + a_{\text{CDOM}}(\lambda) \quad (5)$$

dove $a_w(\lambda)$, $a_\phi(\lambda)$, $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ e $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ sono i coefficienti di assorbimento dell'acqua pura, del fitoplancton, delle NAP e del CDOM. I dati in ingresso sono file ASCII contenenti i dati spettrali degli assorbimenti alla risoluzione di 1 nm o degli scalari.

In particolare, $a_w(\lambda)$ viene definito richiamando dal menu (Water a) il file ASCII contenente il coefficiente di assorbimento delle acque pure (e.g., Pope & Fry, 1997).

Per il coefficiente $a_\Phi(\lambda)$ sono richiesti due file ASCII (menu CHL A e CHL B) necessari per definire i valori $A(\lambda)$ e $B(\lambda)$ secondo il modello di Bricaud et al. (1995):

$$a_\Phi(\lambda) = a_\Phi^*(\lambda) \cdot \text{CHL} = A(\lambda) \cdot \text{CHL}^{B(\lambda)} \cdot \text{CHL} \quad (6)$$

Il parametro $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ è modellato in base a Babin et al. (2003):

$$a_{\text{NAP}}(\lambda) = a_{\text{NAP}}(440) \cdot e^{-S_{\text{NAP}}(\lambda-440)} = (G_a \cdot \text{SPM} + O_a) \cdot e^{-S_{\text{NAP}}(\lambda-440)} \quad (7)$$

dove G_a e O_a sono due scalari (richiesti dal menu) necessari per impostare pendenza/intercetta dell'equazione che permette di convertire i valori di $a_{\text{NAP}}(440)$ in concentrazione di solidi sospesi SPM (*Suspended Particulate Matter*), mentre S_{NAP} definisce la pendenza della curva esponenziale dell'equazione 7. S_{NAP} può essere considerato un parametro incognito (e quindi stimato attraverso il processo di ottimizzazione) oppure fissato ad un valore costante.

Il coefficiente di assorbimento $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ è modellato analogamente al NAP:

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_{\text{CDOM}}(440) e^{-S_{\text{CDOM}}(\lambda-440)} = a_{\text{CDOM}}(440) e^{-C \cdot a_{\text{CDOM}}(440)^{-D} (\lambda-440)} \quad (8)$$

dove C e D sono due scalari (richiesti dal menu $a_{\text{CDOM}}(440)$ C e $a_{\text{CDOM}}(440)$ D) necessari per relazionare la pendenza S_{CDOM} alla concentrazione di CDOM, misurata come $a_{\text{CDOM}}(440)$. Tale dipendenza può essere omessa impostando $C=S_{\text{CDOM}}$ e $D=0$.

Backscattering Coefficients - Questo menu gestisce, analogamente all'assorbimento, tutti i componenti del coefficiente di *backscattering* totale dell'equazione 3.

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{b\Phi}(\lambda) + b_{b\text{NAP}}(\lambda) \quad (9)$$

dove $b_{bw}(\lambda)$, $b_{b\Phi}(\lambda)$ e $b_{b\text{NAP}}(\lambda)$ sono i coefficienti di *backscattering* dell'acqua pura, del fitoplancton e del NAP. I dati in ingresso sono file ASCII contenenti i dati spettrali degli assorbimenti alla risoluzione di 1 nm o degli scalari.

Allo scopo di definire $b_{bw}(\lambda)$, l'utente richiama (menu Water b_b) un file ASCII contenente il coefficiente di *backscattering* dell'acqua pura (e.g., Dall'Olmo e Gitelson, 2006).

Il parametro $b_{b\Phi}(\lambda)$ è modellato in base a Brando e Dekker (2003):

$$b_{b\Phi}(\lambda) = \text{CHL} \cdot b_{b\Phi}^*(\lambda) \quad (10)$$

Dove il coefficiente di *backscattering* del fitoplancton $b_{b\Phi}^*(\lambda)$ è il file ASCII da selezionare come input (menu CHL b_b).

Il parametro $b_{b\text{NAP}}(\lambda)$ è modellato come segue:

$$b_{b\text{NAP}}(\lambda) = b_{b\text{NAP}}(\lambda_T) \cdot b_{b\text{NAP}}^*(\lambda) = (G_b \cdot \text{SPM} + O_b) \cdot b_{b\text{NAP}}^*(\lambda) \quad (11)$$

dove il coefficiente specifico di *backscattering* $b_{b\text{NAP}}^*(\lambda)$ è fornito in input come file ASCII (menu SPM b_b) e G_b e O_b sono due scalari necessari per definire (menu SPM G_b e SPM O_b) pendenza/intercetta dell'equazione utilizzata per convertire $b_{b\text{NAP}}(440)$ in concentrazione dei solidi sospesi SPM.

Model Parameters - Questo menu permette all'utente di impostare il set di parametri (g_0 , g_1 , g_2 , A_0 , A_1 , D_0^C , D_1^C , D_0^B , D_1^B , Π e γ) delle equazioni 1 e 2. Per una descrizione accurata dei parametri si rimanda allo studio di Lee et al. (1998).

Starting Values - Questo modulo permette di definire i valori di inizializzazione delle incognite, richiesti di processi di stima basati su tecniche di ottimizzazione. Questa scelta ricade solitamente sui parametri di qualità dell'acqua derivati da serie storiche, su valori medi di batimetria e per distribuzioni uniformi delle classi di substrato. Si ricorda che questo passaggio richiede particolare attenzione perchè i risultati dell'inversione possono dipendere fortemente dai valori di inizializzazione (Keller, 2001). In questo modulo è anche richiesto di includere (*Delta True*) oppure no (*Delta False*) una costante di offset spettrale che normalizza i valori di R_{rs}^{IMAGE} eventualmente affetti da *sunlint* (Lee et al., 1999).

Bottom Albedo - Questo menu richiede tre file ASCII che descrivano i tre diversi tipi di albedo del fondale la cui combinazione lineare definisce il valore $\rho(\lambda)$ di equazione 2. L'utente può utilizzare dati di campo (firme spettrali) oppure valori di letteratura.

CONSTRAINED_MIN Arguments - Questo modulo gestisce tutti i parametri della procedura del processo di minimizzazione della funzione CONSTRAINED_MIN implementata da IDL (Lasdon e Waren, 1979). In questo modulo BOMBER prevede dei valori di *default*; nel caso si volesse modificarli si rimanda alla guida di IDL.

Descrizione dei 3 bottoni del menu principale

Una volta definiti gli attributi del modello bio-ottico, i file immagine in ingresso/output e i parametri dell'ottimizzazione, il processo può essere lanciato per tutti i pixel dell'immagine cliccando il bottone *Run* (Fig. 1, bottone in basso centrale con il simbolo dell'ingranaggio). Considerato che questo processo può essere molto oneroso in termini computazionali, il codice BOMBER permette di applicare l'algoritmo anche ai valori di R_{rs} estratti a livello di pixel. Cliccando il bottone *Probe Convergence* (Fig. 1, bottone in basso a sinistra) si abilita la finestra grafica rappresentata in Fig. 2.

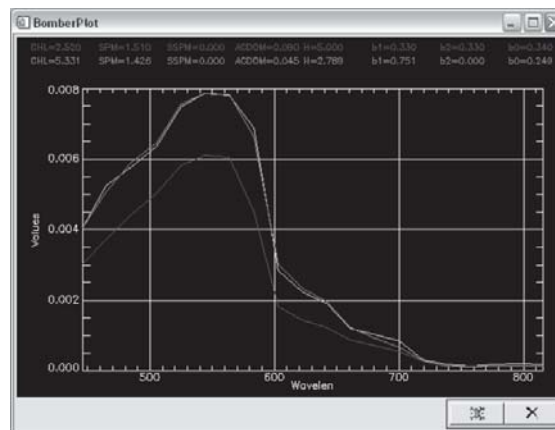


Fig. 2 – Finestra grafica di BOMBER che si abilita premendo il bottone *Probe Convergence* (Fig. 1, in basso a sinistra). La linea rossa rappresenta la riflettanza R_{rs}^{MOD} simulata in base ai valori iniziali (*Starting Values*, in alto in rosso); la linea verde è la riflettanza R_{rs}^{IMAGE} del pixel immagine; la linea blu è la riflettanza R_{rs}^{MOD} simulata dal modello per i valori delle incognite, (in alto in blu), derivate dal processo di ottimizzazione.

Nell'interfaccia *BomberPlot* (Fig. 2) la linea rossa rappresenta i valori di R_{rs}^{MOD} simulati dal modello a partire dagli *Starting Values* e riportati sul grafico medesimo in colore rosso; la linea verde rappresenta i valori di riflettanza R_{rs}^{IMAGE} dell'immagine corretta atmosfericamente e appare nel grafico cliccando su di un pixel del file immagine (aperta in una finestra di ENVI). Premendo il bottone *Run* (Fig. 2, bottone in basso a sinistra) si dà inizio al processo di ottimizzazione e si noterà una terza linea, di colore blu, la cui forma cambia sino a convergere verso lo spettro di colore verde.

La curva blu rappresenta la R_{rs}^{MOD} che meglio descrive la curva R_{rs}^{IMAGE} di colore verde; i valori di output delle incognite compariranno infine sul medesimo grafico, in colore blu. Con questo *tool* si può quindi testare il programma e poi decidere se applicare il processo di stima all'intera immagine.

Conclusioni

BOMBER è un programma eseguibile in ENVI che implementa un modello bi-ottico per derivare le proprietà ottiche della colonna d'acqua e, nel caso di acque basse, la batimetria e la distribuzione di tre differenti tipologie di substrato sulla base dei loro valori di albedo. La sua affidabilità è ovviamente legata alla parametrizzazione del modello bio-ottico ed alla qualità, in termini di R_{rs} dell'immagine di input. Prodotti telerilevati già corretti atmosfericamente (es. *water-leaving-reflectance* da MERIS o MODIS) e dati di letteratura da usarsi nella calibrazione del modello rappresentano un buon punto di partenza per familiarizzare con l'uso di BOMBER. Se si volesse disporre del tool si prega di contrarre uno degli autori del presente contributo. Una sua recente applicazione, per la stima delle variazioni delle coperture a vegetazione sommersa della pensiola di Sirmione da dati MIVIS, è descritta in Giardino et al. (2007).

Ringraziamenti

Grazie a Vittorio Brando, Arnold Dekker e Niklas Strömbeck per il prezioso supporto, continuo e duraturo, alla nostra attività di ricerca. Siamo inoltre grati a Daniela Stroppiana che si dimostra sempre molto generosa nell'aiutarci a risolvere argomentazioni di IDL e a rivedere i testi.

References

- Babin, M., Stramski, D., Ferrari, G. M., Claustre, H., Bricaud, A., Obolensky, G., Hoepffner N., 2003. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe, *J. of Geoph. Res.*, 108, 3211, 4,1-4,20.
- Brando V. E., Dekker A. G., 2003. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality, *IEEE Trans. on Geos. and Rem. Sens.*, 41, 1378-1387.
- Bricaud, A., Babin, M., Morel, A., and Claustre, H., 1995. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization. *J. of Geoph. Res.*, 100, 13,321-13,332.
- Dall'Olmo, G., Gitelson, A. A., 2006. Effect of bio-optical parameter variability and uncertainties in reflectance measurements on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: modelling results. *App. Opt.*, 45, 3577-3592.
- Giardino C., Bartoli M. E., Candiani G., Bresciani M., Pellegrini L., 2007. Recent changes in macrophyte colonisation patterns: an imaging spectrometry-based evaluation of the southern Lake Garda (northern Italy), *J. of App. Rem. Sens.*, 1, 011509.
- Keller, P. A., 2001. Comparison of two inversion techniques of a semi-analytical model for the determination of lake water constituents using imaging spectrometry data. *S of the Tot Environ*, 268, 189-196.
- Lasdon, L.S., Waren, A.D., 1979. Generalized Reduced Gradient Software for Linearly and Nonlinearly Constrained Problems, in "Design and Implementation of Optimization Software", H. Greenberg, ed., Sijthoff and Noordhoff, pubs.
- Lee Z., Carder K. L., Mobley C. D., Steward R. G., Patch J. S., 1998. Hypespectral remote sensing for shallow waters: 1. A semianalytical model, *Applied Optics*, 37, 6329-6338.
- Lee, Z., Carder, K. L., Chen, R. F., Peacock, T. G., 2001, Properties of the water column and bottom derived from Airborne Visible Infrared Imaging Specrometer (AVIRIS) data. *J. of Geoph. Res.*, 106, 11,639-11,651.
- Lindell, T., Pierson, D., Premazzi, G., Zilioli, E., (Eds.) (1999). Manual for monitoring European lakes using remote sensing techniques. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, EUR Report n. 18665 EN, 164 pp.
- Pope, R. M., Fry, E. S., 1997. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, 36, 8710-8723.