

MEDIÇÃO ESPECTRAL DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE ÁGUAS INTERIORES

SPECTRAL ATTENUATION COEFFICIENT MEASUREMENTS OF INLAND WATERS

M. Potes⁽¹⁾, M. J. Costa⁽¹⁾, R. Salgado⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro de Geofísica de Évora, Rua Romão Ramalho 59, 7000-671 Évora, PORTUGAL,
mpotes@uevora.pt

SUMMARY

Changes in the water surface composition may affect the optical properties of the water column. In addition, the light penetration in the water body is affected by absorption and scattering processes resulting in spectral intensity changes along the water column. Underwater measurements of spectral downwelling radiance were performed at several depths in order to compute the water column spectral attenuation coefficient. Results show that the spectral downwelling radiance is highly dependent on solar zenith angle, water composition and wind speed. Spectral attenuation coefficient was computed whenever a stable logarithmic profile of downwelling radiance was achieved.

Introdução

A penetração da energia solar nas camadas superiores de massas de água está sujeita a flutuações que afectam vários processos na zona eufótica, incluindo processos fotossintéticos e por conseguinte as comunidades fitoplanctónicas (Bukata et al, 1995; Wozniak, 2003). Um parâmetro chave para quantificar a penetração da luz solar nas massas de água é o coeficiente de atenuação. Foi demonstrado por Potes et al. (2012) que este parâmetro é muito importante na modelação da temperatura de superfície, utilizando para o efeito o modelo FLake (Mironov, 2010) aplicado à albufeira de Alqueva.

A Radiância espectral L ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) proveniente de uma direcção específica é definida como o fluxo radiante Φ , num determinado ponto do campo de radiação, por unidade de área dA , por unidade de ângulo sólido $d\Omega$ e por unidade de comprimento de onda λ :

$$L = \frac{d^3\Phi}{dA \cos \theta d\Omega d\lambda} \quad (1)$$

onde θ é o ângulo zenital.

A radiância espectral L ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) expressa em coordenadas polares apresenta a seguinte forma:

$$L(\theta, \phi, \lambda) = \frac{d^4\Phi}{dA \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi d\lambda} \quad (2)$$

onde ϕ é o ângulo azimutal.

A radiação solar incidente numa massa de água vai encontrar primeiramente a interface ar-água. A cada instante alguma dessa radiação vai ser reflectida de volta ao seu meio original (ar) e outra parte vai ser refractada e transmitida para o meio adjacente (água). Para uma superfície calma a quantidade que é reflectida, refractada e transmitida é calculada através dos índices de refração dos respectivos meios (lei de snell).

Quando a radiação solar penetra e se propaga no interior de uma massa de água está sujeita à absorção e difusão pelos materiais em solução e suspensão da massa de água. A combinação destes dois processos conduz à redução da intensidade da distribuição da radiância, enquanto o processo de difusão também altera o padrão direccional da radiância. Por esse motivo, a radiância $L(\theta, \phi, \lambda)$, equação 2, apresenta uma relação com a profundidade z . Como consequência, a radiância $L(\theta, \phi, \lambda)$ é melhor representada por $L(\theta, \phi, z, \lambda)$. A distribuição da radiância para as camadas pouco profundas representa um estrutura complexa que pode ser deduzida teoricamente pela equação de transferência de energia para a radiância de Preisendorfer (1959),

$$\cos \theta \frac{dL(\theta, \phi, z, \lambda)}{dz} = -\alpha(z, \lambda)L(\theta, \phi, z, \lambda) + L_*(\theta, \phi, z, \lambda) \quad (3)$$

onde α é o coeficiente de atenuação total e que representa a perda de radiância pela atenuação e L_* é uma “path function” que representa o ganho de

radiância pela difusão na direcção de propagação proveniente de outras direcções e é definido por:

$$L_*(\theta, \phi, z, \lambda) = \int \beta(\theta, \phi, z, \lambda, \theta', \phi') L(z, \lambda, \theta', \phi') d\Omega \quad (4)$$

onde β é o “volume scattering function” ($W \text{ sr}^{-1}$) na direcção (θ, ϕ) para toda a radiância incidente proveniente de outras direcções (θ', ϕ') .

A atenuação da luz solar pelo meio é de extrema importância para o balanço de energia da camada superficial. O coeficiente de atenuação espectral $K(\theta, \phi, z, \lambda)$ na direcção de propagação é definido por,

$$K(\theta, \phi, z, \lambda) = -\frac{1}{L(\theta, \phi, z, \lambda)} \frac{dL(\theta, \phi, z, \lambda)}{dz} \quad (5)$$

Para camadas pouco profundas a radiação solar é a que mais contribui para a “path function” e pode-se descrever θ' e ϕ' apenas como ângulos incidentes solares θ_s e ϕ_s . Com a Eq. 3 o coeficiente de atenuação assume a seguinte forma,

$$K(\theta, \phi, z, \lambda) \cong \frac{1}{\cos \theta} \left[\alpha(z, \lambda) - \frac{\sigma(\theta, \phi, z, \lambda, \theta_s, \phi_s) L_s \Omega_s}{L(\theta, \phi, z, \lambda)} \right] \quad (6)$$

onde L_s e Ω_s são a radiância e ângulo sólido solar respectivamente.

Enquanto nas camadas pouco profundas a distribuição da radiância é dominada pela luz solar directa, para as camadas mais profundas a luz difusa é dominante e a radiância decresce exponencialmente com o aumento da profundidade a uma taxa quase constante. Neste caso, a distribuição da radiância pode ser representada por (Preisendorfer, 1959),

$$L(\theta, \phi, z, \lambda) = L(\theta, \phi, z_0, \lambda) \exp \left\{ -\int_{z_0}^z K(\theta, \phi, \lambda) dz \right\} \quad (7)$$

onde z_0 indica o nível inicial abaixo da superfície da água.

A principal motivação deste trabalho assenta na necessidade de aprofundar o comportamento da radiância espectral em profundidade em massas de água de diferentes composições físico-químico-biológicas e posterior cálculo do coeficiente de atenuação derivado da radiância espectral a vários níveis.

Métodos e locais de estudo

Nos anos 50 e 60 foram desenvolvidos os primeiros instrumentos para a medição de distribuição da radiância em profundidade em lagos (Sasaki et al., 1958; Jerlov and Fukuda, 1960; Tyler, 1960). Mais recentemente novos instrumentos foram

desenvolvidos para tal efeito (Lewis et al., 2011; Antoine et al., 2013).

Neste trabalho foi utilizado um espectroradiómetro portátil com o auxílio de um cabo óptico acoplada à ponta do mesmo o que permitiu a obtenção de medições de radiância no ambiente aquático e a várias profundidades.

O espectroradiómetro portátil utilizado neste trabalho foi o FieldSpec UV/VNIR da Analytical Spectral Devices (ASD) que permite medidas do campo da energia da luz. O domínio espectral do visível ao infravermelho próximo (325 - 1075 nm) é medido com 512 canais de fotodiodos de silício sobrepostos e geometricamente posicionados com uma largura de banda estreita (1.6 nm). O espectroradiómetro tem uma resolução espectral de 3 nm aos 700 nm e um tempo de integração ajustável manualmente de 17 ms até vários minutos. Foi desenvolvida uma estrutura para proteger o cabo óptico de torções e para garantir que a ponta do cabo aponte para o zénite de modo a realizar medições de radiância (zenital) espectral descendente (Fig. 1).



Fig. 1 – Estrutura em PVC de protecção do cabo óptico para medições em profundidade.

Este aparato, também ele portátil, permite medidas radiativas em todos os tipos de água (em termos da turbidez) com a resolução espectral do espectroradiómetro, a fim de ser calculado o coeficiente de atenuação espectral dessas massas de água. O cabo óptico foi escolhido de modo a satisfazer as propriedades ópticas do espectroradiómetro. A transmissão da luz é realizada

com uma abertura de 0.11 o que resulta num campo de visão de 22° e o núcleo é de quartzo o que permite também medições na zona espectral do ultravioleta. De modo a maximizar o sinal que faz chegar ao espectroradiómetro, o espaço entre o feixe de fibras ópticas é minimizado com a utilização de fibras com dois diâmetros diferentes (0.11 e 0.22 mm).

A estrutura é composta por um polímero de teflon que envolve a ponta do cabo óptico e por três camadas em PVC (Polyvinyl Chloride) que envolvem e protegem o cabo de torções que possam causar a quebra das fibras ópticas com diâmetros de 16, 20 e 40 mm (Fig. 1). A estrutura foi desenvolvida segundo os protocolos de Mueller et al. (2003) no que diz respeito a possíveis perturbações nas proximidades, nomeadamente para evitar sombras e reflexões do barco e da plataforma no campo radiativo. Para tal, foi determinada uma distância de 85 cm entre a secção vertical da estrutura e a ponta do cabo óptico. O comprimento desta estrutura foi estabelecido de acordo com o comprimento do cabo óptico (aproximadamente 6 metros) e permite medições até profundidades máximas de 3 metros.

Este aparato foi primeiramente testado no complexo municipal das piscinas de Évora e posteriormente utilizado nas albufeiras de Alqueva e Monte Novo localizadas a sudoeste de Portugal (Fig. 2) e na lagoa de Thau localizada no sudeste de França (Fig. 2).

Os locais estudados apresentam características diferentes entre eles, à excepção das albufeiras de Alqueva e Monte Novo em que as massas de água são comparáveis em termos de turbidez e clorofila *a* (Tabela I). No complexo de piscinas de Évora foi utilizado o tanque de saltos com cinco metros de profundidade com água límpida e livre de sedimentos em suspensão e de matéria orgânica dissolvida. As medições na albufeira de Alqueva foram realizadas a partir da plataforma fixa de Mourão e na albufeira do Monte Novo foram realizadas a partir de uma embarcação. Na lagoa de Thau foi também utilizada uma embarcação.



Fig. 2 – Localização das albufeiras de Alqueva e Monte Novo e da lagoa de Thau.

Tabela I – Detalhes das campanhas de campo realizadas. Com informação do ângulo zenital solar, velocidade do vento, turbidez e concentração de clorofila *a* da água.

Data	Local	Zen. Solar (°)	Vel. Vento (ms ⁻¹)	Turb. (NTU)	Clor. <i>a</i> (µg/L)
24/08/2011	Thau	52.4	3.1	0.5	-
22/06/2012	Piscina	86.6	4.3	-	-
09/07/2012	Piscina	42.9	2.7	-	-
12/07/2012	Mt.Novo	26.6	1.2	14.8	50.3
31/08/2012	Alqueva	37.8	8.4	13.8	33.2
06/09/2012	Alqueva	41.5	2.6	14.9	41.7
13/09/2012	Piscina	78.5	3.2	-	-

Resultados

Foram realizadas medições de radiância espectral descendente nos vários locais de estudo em dias de céu limpo para garantir a mesma condição solar durante a realização dos perfis. A figura 3 mostra o comportamento espectral da radiância descendente em profundidade para o dia 22 Junho e 9 Julho de 2012 na piscina do complexo municipal de Évora. O que variou entre as duas medições foi apenas o ângulo zenital solar (Tabela I) e que mostrou ser de grande importância para o comportamento da radiância em profundidade. Para o dia 22 Junho (Fig. 3a) com ângulo zenital solar elevado (86.6°) o campo de luz presente na água é apenas composto por radiação difusa e uma diminuição da radiância com a profundidade foi registada para todos os comprimentos de onda. Para o dia 9 Julho (Fig. 3b) com ângulo zenital solar intermédio (42.9°) o campo de luz presente na água é composto pelas componentes solar directa e difusa. Neste perfil a radiância entre os 400 e 600 nm aumenta com a profundidade enquanto fora destes comprimentos de onda o oposto é registado. Este comportamento está associado com o aumento da componente solar directa devida à refacção na superfície e difusão da radiação para o ângulo de visão do aparato. Segundo a equação 3, se a difusão (representada pelo primeiro termo à direita) é superior à atenuação da água (representada pelo segundo termo à direita) a radiância no ângulo de visão do aparato aumenta com a profundidade. Fora desta região espectral (400 aos 600 nm) a difusão do feixe solar é sempre menor do que a atenuação da água o que leva a que a radiância diminua com a profundidade.

A figura 4 mostra o comportamento espectral da radiância descendente em profundidade para a albufeira de Monte Novo no dia 12 Julho 2012. No painel de baixo está representado o perfil (em escala logarítmica) médio da radiância para a zona

espectral azul (400-500 nm), verde (500-600 nm) e vermelho (600-700 nm).

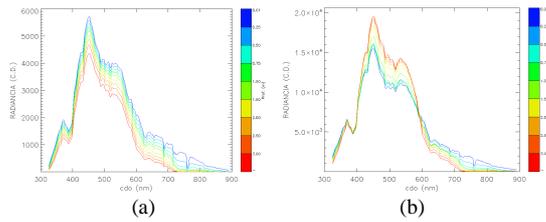


Fig. 3 – Medições de radiância espectral descendente em profundidade realizadas nas piscinas municipais de Évora nos dias 22 Junho (a) e 9 Julho (b) de 2012.

A medição foi realizada com um ângulo zenital solar baixo (26.6°) e a massa de água apresentava uma turbidez de 14.8 NTU. Foi registado um aumento da radiância desde o nível sub-superficial (0.01 m) até aos 0.50 m e 0.25 m, na zona espectral verde/vermelho e azul respectivamente, seguido de um decréscimo logarítmico constante até aos 3 metros. Deste modo, a radiância apresenta dois comportamentos opostos durante o perfil realizado. Primeiro um aumento de radiância até um ponto de inflexão (0.50 e 0.25 m) seguido de uma diminuição de radiância até aos 3 metros. Antes do ponto de inflexão a difusão da componente directa solar é superior à atenuação (Eq. 3), mas depois deste ponto a atenuação é superior à difusão. Enquanto na piscina o aumento de radiância, para o caso do ângulo zenital solar baixo, se verificou até aos 3 metros neste caso da albufeira de Monte Novo apenas se verifica até um determinado ponto de inflexão devido ao elevado número de sedimentos em suspensão e de matéria orgânica dissolvida (Tabela I) que vai aumentar a atenuação da água à radiação solar.

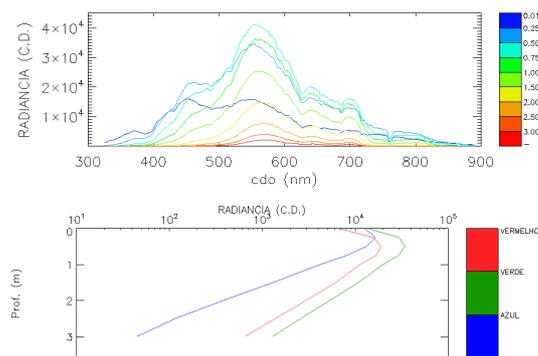


Fig. 4 – Medição de radiância espectral descendente em profundidade realizada na albufeira de Monte Novo no dia 12 Julho de 2012. No painel de baixo está representado o perfil médio da radiância para a zona espectral azul (400-500 nm), verde (500-600 nm) e vermelho (600-700 nm).

A figura 5 mostra o comportamento espectral da radiância descendente em profundidade para a lagoa

de Thau no dia 24 Agosto de 2011. No painel de baixo está representado o perfil (em escala logarítmica) médio da radiância para a zona espectral azul (400-500 nm), verde (500-600 nm) e vermelho (600-700 nm). A medição foi realizada com um ângulo zenital solar elevado (52.4°) e a massa de água apresentava uma turbidez de 0.5 NTU. Neste caso a difusão é inferior à atenuação em todo o perfil o que resulta numa diminuição da radiância com a profundidade. Esta diminuição é no entanto mais pronunciada na zona espectral da azul comparada com a zona verde e vermelho o que resulta num coeficiente de atenuação mais elevado nesta zona espectral (Fig. 7).

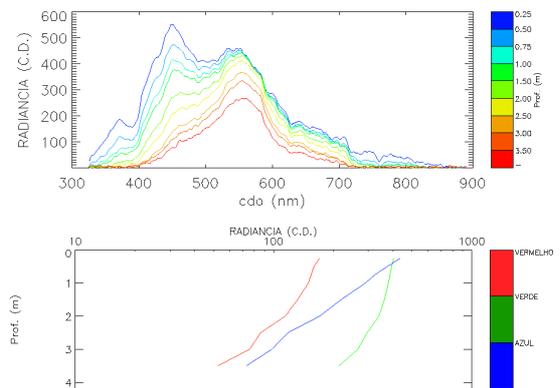


Fig. 5 – Medição de radiância espectral descendente em profundidade realizada na lagoa de Thau no dia 24 Agosto de 2011. No painel de baixo está representado o perfil médio da radiância para a zona espectral azul (400-500 nm), verde (500-600 nm) e vermelho (600-700 nm).

A figura 6 mostra o comportamento espectral da radiância descendente em profundidade para a albufeira de Alqueva nos dias 31 de Agosto (a) e 6 de Setembro (b) de 2012. Nos painéis de baixo está representado o perfil (em escala logarítmica) médio da radiância para a zona espectral azul (400-500 nm), verde (500-600 nm) e vermelho (600-700 nm). As medições foram realizadas com um ângulo zenital solar idêntico, turbidez e concentração de clorofila *a* idênticos mas com diferentes velocidades do vento (Tabela I). Estas condições permitem estudar o impacto da velocidade do vento no padrão da radiância espectral descendente. Em ambos os casos existe um aumento de radiância desde o nível sub-superficial até um determinado ponto de inflexão para as zonas espectrais verde e vermelho. A profundidade deste ponto vai variar consoante a velocidade do vento. Para o caso com a velocidade do vento de 8.4 m/s a profundidade do ponto de inflexão é de 0.25 m enquanto para o caso com a velocidade do vento de 2.6 m/s a inflexão situa-se aos 0.5 m. Em ambos os casos após o ponto de inflexão a radiância decresce a um ritmo constante até aos 3 metros. Para a zona espectral azul a radiância decresce sempre com a profundidade mas

com um ritmo constante apenas após o ponto de inflexão registado para as zonas verde e vermelho. Segundo Hieronymi and Macke (2012) um aumento da velocidade do vento leva a que as flutuações máximas da luz se desloquem na direcção da superfície, visto que para velocidades do vento elevadas as ondas capilaro-graviticas resultantes focam o campo da luz mais junto à superfície do que para velocidades do vento inferiores.

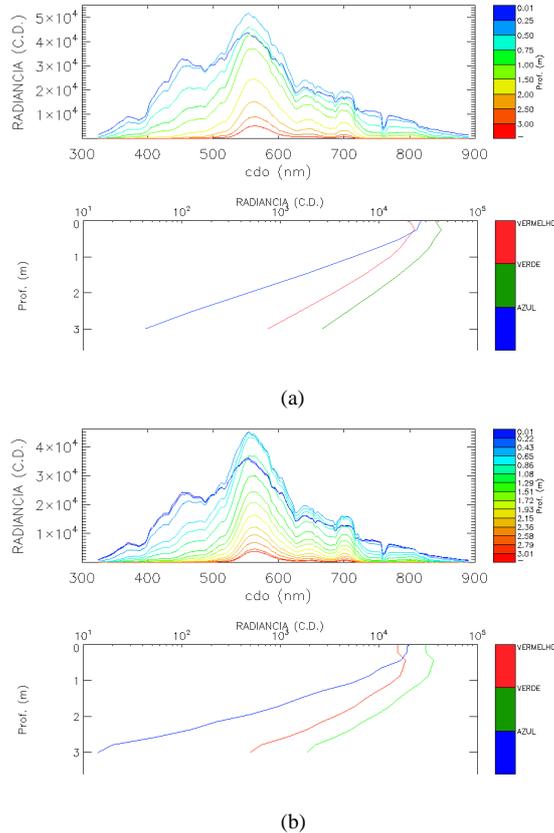


Fig. 6 – Medições de radiância espectral descendente em profundidade realizadas na albufeira de Alqueva nos dias 31 Agosto (a) e 6 Setembro (b) de 2012. No painel de baixo está representado o perfil médio da radiância para a zona espectral azul (400-500 nm), verde (500-600 nm) e vermelho (600-700 nm).

As medições de radiância espectral descendente mostradas acima foram utilizadas para, através da Eq. 8, calcular os coeficientes de atenuação espectral da coluna de água onde o logaritmo da radiância apresentava um decréscimo constante com a profundidade. A Eq. 7 assume assim a seguinte forma, onde ζ é o ponto onde o declive constante se inicia,

$$L(z, \theta, \phi, \lambda) = L(\zeta, \theta, \phi, \lambda) \exp\left\{-\int_{\zeta}^z K(\theta, \phi, \lambda) dz\right\} \quad (8)$$

A figura 7 mostra o coeficiente de atenuação espectral para a água pura (obtido por Smith and

Baker, 1981) e os coeficientes derivados da Eq. 8 para as campanhas de medições realizadas (Tabela I). Os resultados mostram, como esperado, que a água límpida da piscina apresenta um coeficiente de atenuação mais próximo da água pura. No entanto, entre os 400 e 500 nm a atenuação da piscina é cerca de quatro vezes superior do que a água pura. Águas mais turvas (Tabela I) apresentam o coeficiente de extinção superior. Para comprimentos de onda superiores a 710 nm todos os locais analisados apresentam valores de coeficiente de atenuação muito próximos. Os mínimos de atenuação migram dos 450 nm, nas águas límpidas, para os 550 nm nas águas turvas.

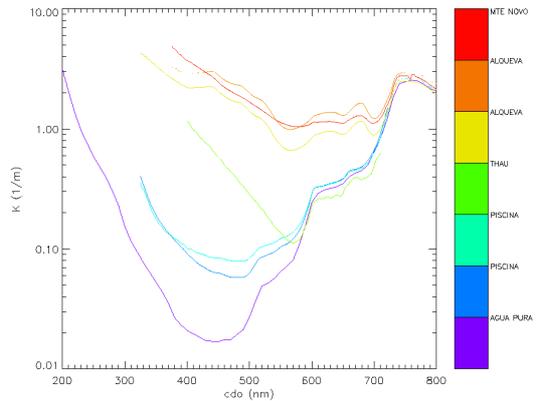


Fig. 7 – Coeficiente de atenuação espectral para a água pura, piscina, lagoa de Thau e albufeiras de Alqueva e Monte Novo.

Conclusões

Foi desenvolvido um novo aparato que acoplado a um espectrorradiómetro portátil permite a medição da radiância espectral descendente em profundidade. Ficou claro que a radiância descendente depende do ângulo zenital solar, da composição da massa de água e da condição da superfície da água. Foi mostrado que as camadas superficiais estão mais expostas à penetração da luz solar directa, numa direcção próxima da vertical, devido à refacção na superfície e à difusão da luz pelas moléculas de água e sólidos em suspensão. Através da equação de transferência radiativa (eq. 3) pode existir aumento da radiância, num determinado ângulo de visão, com a profundidade nos casos em que o ganho por difusão e refacção na superfície é superior à perda por atenuação. O coeficiente de atenuação foi calculado a partir do ponto em que o logaritmo da radiância decresce a uma taxa constante com a profundidade (eq. 8).

Este trabalho permitiu, através do aparato desenvolvido, estimar valores de coeficiente de atenuação em diferentes massas de água e em diferentes condições meteorológicas.

Agradecimentos

Os autores querem agradecer a colaboração dos colegas do Laboratório da Água (Centro de Geofísica de Évora), em especial ao António Serafim pela ajuda nas campanhas de campo nas albufeiras de Alqueva e Monte Novo. À Câmara Municipal de Évora pela disponibilidade do complexo de piscinas de Évora. Aos colegas da METEO FRANCE e do IFREMER pelo convite à participação na campanha de medições THAUMEX realizada na lagoa de Thau, em especial ao Patrick Le Moigne. Aos colegas do CGE Samuel, Josué, Flávio e Daniele pela ajuda na elaboração do aparato e na participação nas campanhas, o que permitiu este trabalho. Este trabalho foi financiado pelo FEDER (Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE), pela FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) no âmbito da bolsa de doutoramento SFRH/BD/45577/2008 e pelo projecto FCOMP-01-0124-FEDER-009303 (PTDC / CTE-ATM / 102142 / 2008). Os autores querem também agradecer o financiamento disponibilizado pelo Centro de Geofísica de Évora, Portugal, através do contracto com a FCT - PEst-OE/CTE/UI0078/2011.

Referências

- Antoine, D., Morel, A., Leymarie, E., Houyou, A., Gentili, B., Victori, S., Buis, J.-P., Buis, N., Meunier, S., Canini, M., Crozel, D., Fougny, B., and Henry, P. 2013. Underwater Radiance Distributions Measured with Miniaturized Multispectral Radiance Cameras. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 30, 74–95.
- Bukata, R. P., Jerome, J. H., Kondratyev, K. Ya. and Pozdnyakov, D. V. 1995. *Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters* (CRS Press, Inc.), Florida.
- Hieronymi, M. and Macke, A. 2012. On the influence of wind and waves on underwater irradiance fluctuations. *Ocean Sci.* 8, 455-471.
- Jerlov, N. G. and Fukuda, M. 1960. Radiance distribution in the upper layers of the sea. *Tellus XII* 3, 348-355.
- Lewis, M. R., Wei, J., Van Dommelen, R. and Voss, K. J. 2011. Quantitative estimation of the underwater radiance distribution. *J. Geophys. Res.* 116, C00H06.
- Mironov, D. V., Heise, E., Kourzeneva, E., Ritter, B., Schneider, N. and Terzhevik, A. 2010. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Env. Res.* 15, 218-230.
- Mueller, J. L., Fargion, G. S. and McClain, C. R. 2003. *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume III*. In: NASA/TM-2003-211621/Rev4-Vol.III (NASA Goddard Space Flight Center), Greenbelt.
- Potes, M., Costa, M. J., Salgado, R. 2012. Satellite remote sensing of water turbidity in Alqueva reservoir and implications on lake modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 1623-1633.
- Preisendorfer, R. W. 1959. Theoretical proof of the existence of characteristic diffuse light in natural waters. *Jour. Mar. Research*, 18, 1-9.
- Sasaki, T., Watanabe, S., Oshiba, G. and Okami, N. 1958. Measurements of angular distribution of submarine daylight by means of a new instrument. *The Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 14, nº2.
- Smith, R. C. and Baker, K. S. 1981. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm). *Appl. Opt.* 20, 177-184.
- Tyler, J. R. 1960. Radiance distribution as a function of depth in an underwater environment. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr.* 7, 363-411.
- Wozniak, B., Dera, J., Ficek, D., Majchrowski, R., Ostrowska, M. and Kaczmarek, S. 2003. Modelling light and photosynthesis in the marine environment. *Oceanologia*, 45, 171-245.