

Il progetto CLAM-PHYM: utilizzo di dati HICO™ per lo studio della qualità delle acque del Mare Adriatico in prospettiva delle future immagini del sensore PRISMA

Federica Braga (*), Claudia Giardino (**), Cristiana Bassani (***), Mariano Bresciani (**), Erica Matta (**), Maria Adamo (****), Luigi Alberotanza (*) e Cristina Ananasso (*****)

- (*) Istituto di Scienze Marine, CNR-ISMAR, Arsenale – Tesa 104, Castello 2737/F, 30122 Venezia, tel. 0412407950, e-mail: f.braga; l.alberotanza@ismar.cnr.it
- (**) Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell’Ambiente, CNR-IREA, via Bassini 15, 20133 Milano, tel 02-23699298; e-mail: giardino.c; bresciani.m; matta.e@irea.cnr.it
- (***) Istituto sull’Inquinamento Atmosferico, CNR-IIA, Area di ricerca di Roma 1, Via Salaria Km 29,300, 00016 Monterotondo Scalo, Roma, tel. 06 90672398. e-mail: cristiana.bassani@iia.cnr.it
- (****) Istituto di Studi sui Sistemi Intelligenti per l’Automazione, CNR-ISSIA, via Amendola 122/D, 70126 Bari, tel. 0805929437. e-mail: adamo@ba.issia.cnr.it
- (*****) Agenzia Spaziale Italiana, ASI, UO Osservazione della Terra, Via di Villa Grazioli 23, 00198 Roma, tel. 06 8567354. e-mail: cristina.ananasso@asi.it

Riassunto

Nell’ambito del progetto CLAM-PHYM (*Coasts and Lake Assessment and Monitoring by PRISMA HYperspectral Mission*), finanziato dall’Agenzia Spaziale Italiana (ASI), è stato proposto un approccio fisicamente basato per la stima della qualità delle acque costiere e interne da dati da satellite. In questo lavoro, si presenta l’applicazione delle metodologie proposte per PRISMA a un’immagine del nord Adriatico acquisita con il sensore HICO™ (*Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean*), che ha caratteristiche spettrali e spaziali simili a PRISMA. In sincronia con l’acquisizione di HICO™, sono state misurate *in situ* le proprietà ottiche dell’atmosfera e dell’acqua per la parametrizzazione degli algoritmi. Le mappe di clorofilla (Chl-a) e di solidi sospesi totali (SPM) variano tra 0–3 mgm⁻³ e 0–4 gm⁻³, rispettivamente, e presentano una correlazione significativa con i dati di campo ($R^2 = 0.71$ for Chl-a and $R^2 = 0.85$ for SPM). Questi risultati dimostrano che gli algoritmi fisicamente basati e parametrizzati con dati *in situ* sincroni sono adatti per la valutazione dei parametri di qualità dell’acqua in zone costiere e che sono potenzialmente applicabili alle future generazioni di sensori iperspettrali da satellite.

Abstract

In the framework of CLAM-PHYM (Coasts and Lake Assessment and Monitoring by PRISMA HYperspectral Mission) project, funded by Italian Space Agency, a physically-based approach was proposed for the water-quality estimation of coastal and inland waters starting from satellite data. In this work, we presents the application of the methodologies proposed in CLAM-PHYM to an Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO™) image of the northern Adriatic Sea. Optical properties of atmosphere and water were synchronously measured to parameterise such methods. The HICO™ sensor was selected because its spectral and spatial characteristics are similar to the PRISMA’s ones. HICO™-derived maps of chlorophyll-a (Chl-a) and suspended particulate matter (SPM) range between 0–3 mgm⁻³ and 0–4 gm⁻³, respectively, correlating significantly with field data ($R^2 = 0.71$ for Chl-a and $R^2 = 0.85$ for SPM). These findings support the application of physically-based algorithms, parameterized with synchronous in situ data, to assess water-quality parameters in coastal zones and suggest the feasibility of applying them to future-generation spaceborne hyperspectral images.

Introduzione

L'analisi ecologica delle acque costiere e lacustri rappresenta una sfida interessante per la comunità scientifica che si occupa di Osservazione della Terra. Lo sviluppo e il miglioramento di metodologie robuste per l'interpretazione dei dati remoti stanno portando risultati promettenti, permettendo di ottenere stime di parametri di qualità dell'acqua, quali solidi sospesi (SPM), clorofilla a (Chl-a) e CDOM (Brando et al., 2009; Giardino et al., 2012; Gege, 2013). Misure *in situ* della variabilità ottica delle acque e immagini in grado di rappresentare tale variabilità, spazialmente e spettralmente, sono necessari per raggiungere i risultati attesi, come dimostrato da numerosi autori (Brando e Dekker, 2003; Giardino et al., 2003; Santini et al., 2008).

Ciò che condiziona maggiormente la valutazione dello stato ecologico degli ambienti acquatici basata su dati da satellite è la frequenza delle acquisizioni, che deve essere adeguata alla variabilità temporale dei processi coinvolti. In Bresciani et al. (2011), l'analisi delle mappe di Chl-a da dati MERIS nel periodo 2003-2009 ha confermato il contributo fondamentale offerto delle serie temporali di dati da satellite per studiare la dinamica di superficie. Altri autori (Chen et al., 2004; Rosenqvist et al., 2003) hanno dimostrato il ruolo fondamentale delle tecnologie di telerilevamento per il monitoraggio multitemporale e spazializzato anche nell'applicazione di legislazione europea e protocolli internazionali.

Il progetto CLAM-PHYM (*Coasts and Lake Assessment and Monitoring by PRISMA Hyperspectral Mission*), finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), si pone l'obiettivo di verificare le potenzialità di PRISMA, in termini di risoluzione spaziale, temporale e spettrale, per il monitoraggio e la gestione degli ecosistemi acquatici (Braga et al., 2011). Il progetto studia la variabilità ottica degli ambienti costieri e interni e le loro problematiche con un approccio fisicamente basato, per migliorare la qualità dei prodotti di qualità dell'acqua. Tale approccio richiede la disponibilità di dati *in situ* per la parametrizzazione di modelli bio-ottici e di algoritmi di correzione atmosferica, e per la validazione dei prodotti. In attesa del lancio previsto nel 2017, l'approccio metodologico proposto in CLAM-PHYM è testato su dati del sensore HICO™ (*Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean*), che ha performance spaziali e spettrali simili a quelle previste per PRISMA.

In questo lavoro sono presentate le metodologie applicate ad un'immagine HICO™ del Nord Adriatico e i risultati ottenuti. L'immagine HICO™ è stata acquisita in sincronia a misure *in situ* di proprietà ottiche inerenti e apparenti dell'acqua, di proprietà dell'atmosfera e di concentrazione dei parametri otticamente attivi, che sono stati utilizzati per la calibrazione e la validazione.

Materiali e Metodi

Il Nord Adriatico si trova nella parte del Mediterraneo nord-orientale e comprende il golfo di Venezia arrivando fino ad Ancona. È caratterizzato da acque basse con profondità media di 35 m. L'idrologia e i processi dinamici del Nord Adriatico sono principalmente influenzati dalle forzanti meteorologiche (in particolare, il vento), variazioni termiche e input di acqua dolce dai fiumi. La zona costiera è ricca di estuari e lagune ed il Po rappresenta circa il 70 % del *run-off* totale, con una notevole variabilità stagionale della portata, con picchi in primavera e in autunno. Le maggiori fioriture fitoplanctoniche si verificano negli strati superficiali della colonna d'acqua nel tardo inverno e in estate, soprattutto vicino al delta del Po. Secondo Hooker et al. (2004), il Nord Adriatico alterna acque di caso 1 e di caso 2, così definite da un punto di vista ottico. Le acque di caso 2 sono dovute principalmente agli effetti dei venti locali, che risospingono i sedimenti dal fondo, e agli input fluviale del Po e degli altri fiumi dell'Alto Adriatico, che portano materiale sospeso e disciolto di origine terrestre.

Nella seconda settimana di maggio 2012 è stata eseguita una campagna oceanografica a bordo della N/O URANIA di raccolta di dati allo scopo di calibrare un modello bio-ottico per le acque del Nord Adriatico (Braga et al., 2012). In 18 stazioni sono state effettuate misure di proprietà ottiche inerenti (IOP) e apparenti dell'acqua (AOP), di proprietà dell'atmosfera e di concentrazione dei parametri otticamente attivi. Le misure di IOP sono state eseguite in continuo lungo la colonna d'acqua con

profili ascendenti e discendenti, dalla superficie al fondo. Il coefficiente di *backscattering* (b_b) è stato misurato in sei lunghezze d'onda (442, 488, 510, 550, 620, 676 nm) mediante lo strumento Hydroscat-6 della Hobi Labs Inc. Il coefficiente di attenuazione (c) è stato misurato a 650 nm con lo strumento C-Star di WetLabs, montato sulla rosette. Per la misura della fluorescenza è stato utilizzato Cyclops-7 (Turner Designs), attrezzato con 4 sensori specifici per la misura dei pigmenti algali e del disciolto (CDOM, Chl-a, Ficocianine e Ficoeritrine). Misure di assorbimento $a_{CDOM}(\lambda)$, $a_{ph}(\lambda)$ e $a_{NAP}(\lambda)$ divise nelle componenti principali (CDOM, fitoplancton e particolato non algale) sono state ottenute da campioni d'acqua filtrati durante la campagna, conservati in condizioni idonee e successivamente analizzati in laboratorio e successivamente modellate in accordo con Fargion e Mueller (2000) e Strömbeck e Pierson (2001). La misura delle concentrazioni di Chl-a e SPM sono state effettuate con metodo spettrofotometrico (Lorenzen, 1967) e gravimetrico (Van der Linde, 1998) rispettivamente. Le misure di AOP sono state eseguite con lo spettroradiometro WISP-3 (Water Insight), progettato specificatamente per il monitoraggio della qualità dell'acqua, nel range 380-800 nm. Presso la stazione AERONET-OC AAOT (45.31390° N, 12.50830° East, 10.0m s.l.m.) posizionata sulla piattaforma Acqua Alta nel Nord Adriatico in prossimità della Laguna di Venezia, sono stati misurati i dati atmosferici (spessore ottico degli aerosol @550nm (AOT) e il contenuto colonnare di vapor d'acqua (WV)) acquisiti contemporaneamente all'immagine HICO.

L'immagine HICOTM (Figura 1) sincrona con le misure *in situ* è stata acquisita il 12 maggio 2012. HICOTM è il primo sensore iperspettrale da satellite, specificatamente configurato per le acque costiere; acquisisce immagini con differenti angoli e ad orari diversi in aree selezionate. Ogni pixel misura 90 m x 90 m, con 87 canali spettrali nel range 400-900 nm, fornendo informazioni sulle proprietà delle acque e sulla riflettanza dei fondali. Una completa descrizione delle caratteristiche di HICOTM è riportata in Lucke et al. (2011).

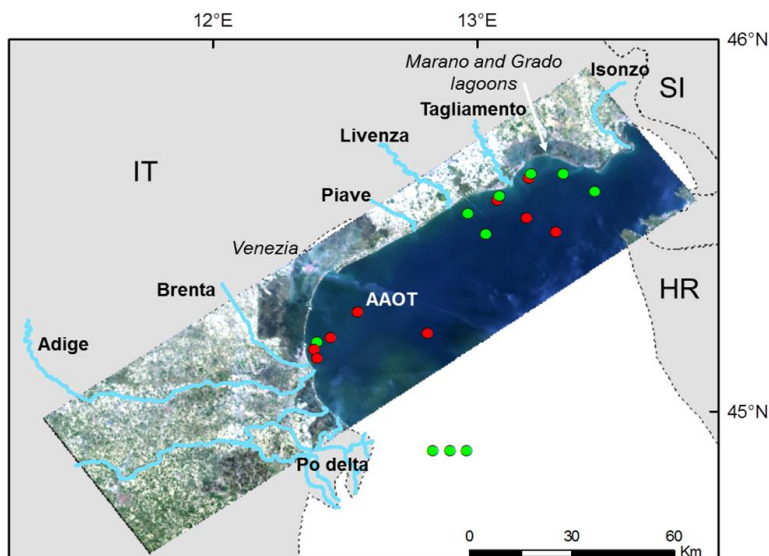


Figura 1. Immagine HICOTM del 12 maggio 2012. Nell'area di studio sono indicate le stazioni misurate durante la campagna. I pallini rossi indicano le stazioni effettuate il 10, 11 e 12 maggio 2012, in cui dati sono stati utilizzati per validare la metodologia proposta. AAOT indica la stazione AERONET-OC.

I dati HICOTM acquisiti nel Nord Adriatico sono stati elaborati con metodologie fisicamente basate per convertire la radianza al sensore in riflettanza alla superficie e per estrarre i parametri di qualità

dell'acqua. Gli algoritmi sono stati parametrizzati con le misure in situ delle proprietà ottiche atmosferiche e dell'acqua, sincrone all'acquisizione di HICOTM. Per la correzione atmosferica è stato utilizzato l'algoritmo HICO@CRI, adattando l'algoritmo presentato in Bassani et al. (2010) all'immagine HICOTM. HICO@CRI è basato sul codice di trasferimento radiativo 6SV (Kotchenova et al., 2008; Vermote et al., 1997) e implementa anche la correzione per l'effetto di adiacenza secondo Vermote et al. (1997). Le riflettanze così ottenute sono state elaborate tramite il pacchetto software BOMBER (Giardino et al., 2012). Il modello bio-ottico implementato in BOMBER è basato su una tecnica di ottimizzazione d'inversione del segnale che permette di risolvere il trasferimento radiativo nella colonna d'acqua per derivare simultaneamente mappe di concentrazione ed assorbimento dei parametri otticamente attivi delle acque (Chl-a, SPM e CDOM). Il modello è stato parametrizzato utilizzando i dati ricavati dalle misure di campo (assorbimenti e concentrazioni di Chl-a, SPM, CDOM e back-scattering dovuto a Chl-a e SPM) acquisite durante la campagna.

Risultati e discussione

Le metodologie utilizzate per la stima della qualità dell'acqua da dati HICOTM sono state validate con i dati in situ raccolti in 9 stazioni (su 18) misurate sincrone al passaggio del sensore e due giorni prima (figura 1, pallini rossi).

La figura 2 presenta le mappe di concentrazione di Chl-a e SPM ottenute dalla applicazione delle metodologie proposte all'immagine HICOTM. Le mappe variano tra 0–3 mgm^{-3} per la Chl-a e 0–4 gm^{-3} per i SPM. La mappa di Chl-a mostra valori piuttosto bassi con distribuzione omogenea, eccetto per l'area a sud-ovest, dove si nota la presenza di una fioritura residua di fitoplancton, indotta dal carico di nutrienti provenienti dal fiume Po e successivamente dispersa dalle correnti costiere. Anche la mappa di SPM indica *pattern* omogenei con concentrazione di circa 1 g m^{-3} . Concentrazioni più alte si trovano nelle zone costiere e in particolare nelle vicinanze della laguna di Grado e Marano, dove i fiumi a nord trasportano quantità significative di detriti inorganici. Infine le mappe sono poco correlate, fatto salvo le zone a sud-ovest dove la corrispondenza tra SPM e Chl-a è legata al bloom di fitoplancton.

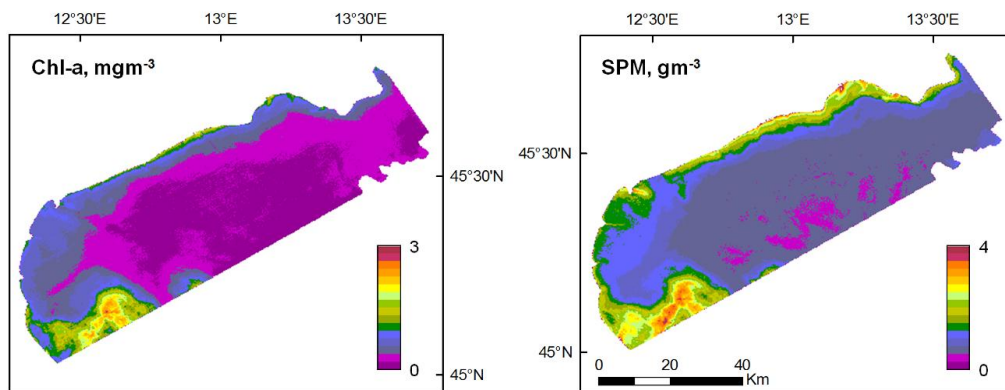


Figura 2. I prodotti derivati dall'applicazione di BOMBER dall'immagine HICOTM acquisita il 12 maggio 2012.

In figura 3 sono riportati gli scatter-plot che rappresentano le misure di Chl-a e SPM derivate da HICOTM messe in relazione con le concentrazioni *in situ* misurate nelle 9 stazioni campionate e usate per la validazione (cf. figura 1, pallini rossi). Le concentrazioni sono state estratte dall'immagine come valore medio di 3 x 3 pixel, centrati sulla posizione di ogni stazione. I grafici

mostrano che vi è una correlazione significativa con i dati in situ ($R^2 = 0.71$, $RMSE = 16.5\%$ e una pendenza di 1.013 per la Chl-a; $R^2 = 0.85$, $RMSE = 25.1\%$ e pendenza di 0.985 per SPM).

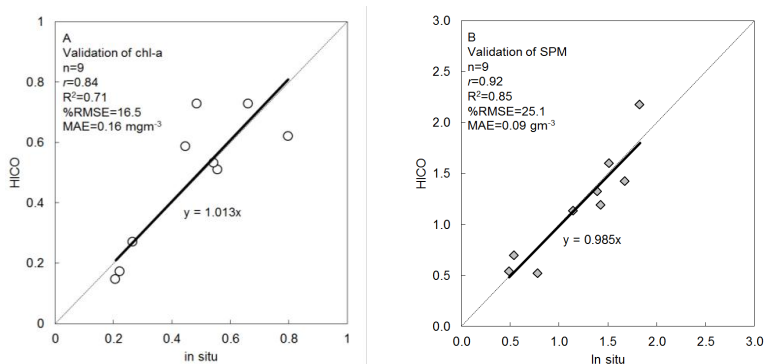


Figura 3. Scatter plot dei prodotti derivati dall'immagine HICOTM e le concentrazioni in situ misurate nelle 9 stazioni campionate e usate per la validazione (cf. figura 1, pallini rossi): (a) Chl-a; (b) SPM. Le statistiche riportano coefficiente di correlazione (r); coefficiente di determinazione (R^2); errore quadratico medio relativo (% $RMSE$) ed errore medio assoluto (MAE).

Conclusioni

Un'immagine HICOTM del Nord Adriatico è stata acquisita il 12 maggio 2012 per testare le metodologie proposte nel progetto CLAM-PHYM. A questo scopo, sono state applicate metodologie fisicamente basate per convertire la radianza al sensore in valori di riflettanza alla superficie (tramite HICO@CRI, Bassani et al. (2010)) e successivamente per ottenere simultaneamente mappe di qualità dell'acqua (BOMBER, Giardino et al. (2012)). Questi metodi sono stati parametrizzati con le misure *in situ* di proprietà ottiche atmosferiche e IOP specifiche dell'acqua. Le *performance* dei modelli proposti sono state misurate attraverso il confronto con le misure effettuate simultaneamente all'acquisizione dell'immagine.

Questo studio conferma che i dati HICOTM hanno buone potenzialità per la stima della qualità dell'acqua e per descrivere la variabilità dovuta a fenomeni locali. Inoltre, in attesa della nuova generazione di sensori iperspettrali da satellite (ad es. SENTINELs, HYSPiRY, PRISMA, EnMap), HICOTM ha fornito l'opportunità di simulare e testare le capacità dei futuri sensori iperspettrali.

Bibliografia

- Bassani C., Cavalli R.M., Pignatti, S. (2010). Aerosol optical retrieval and surface reflectance from airborne remote sensing data over land. *Sensors*, 10: 6421-6438.
- Braga F., Bresciani M., Matta E., Giardino C., Bassani C., DeCarolis G., Alberotanza L., Ananasso C. (2012). Caratterizzazione delle proprietà ottiche delle acque costiere del Mar Adriatico per il progetto CLAM-PHYM. Atti 16[°] Conferenza Nazionale ASITA, 6-9 Novembre 2012, pp. 305-312.
- Braga F., Giardino C., Cavalli R. M., Bresciani M., Bassani C., Alberotanza L. (2011). Struttura del progetto CLAM-PHYM per lo studio delle acque costiere e interne italiane tramite il sensore PRISMA. Atti 15[°] Conferenza Nazionale ASITA, 15-18 Novembre 2011, pp. 489-490.
- Brando V.E., Dekker A. G. (2003). Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1378-1387.
- Brando V. E., Anstee J. M., Wettle M., Dekker A. G., Phinn S. R., Roelfsema, C. (2009). A physics based retrieval and quality assessment of bathymetry from suboptimal hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 113(4): 755-770.

- Bresciani M., Stroppiana D., Odermatt D., Morabito G., Giardino C. (2011). Assessing remotely sensed chlorophyll-a for the implementation of the Water Framework Directive in European perialpine lakes. *Science of the Total Environment*, 409 (17): 3038-3091.
- Chen Q., Zhang Y., Ekroo, A., Hallikainen M. (2004). The role of remote sensing technology in the EU water frame work directive (WFD). *Environmental Science and Policy*, 7(4): 267–276.
- Fargion G. S., Mueller J. L. (2000). Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 2, NASA Technical Memorandum 209966 (SeaWiFS Technical Report Series) (Greenbelt,MD: NASA Goddard Space Flight Center).
- Gege P. (2013). WASI-2D: A software tool for regionally optimized analysis of imaging spectrometer data from deep and shallow waters. *Computers & Geosciences*. *In press*.
- Giardino C., Candiani G., Bresciani M., Lee Z., Gagliano S., Pepe M. (2012). BOMBER: A tool for estimating water quality and bottom properties from remote sensing images. *Computers & Geosciences*, 45: 313-318.
- Giardino C., Brando V. E., Dekker A. G., Strömbeck N., Candiani G. (2007). Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion. *Remote Sensing of Environment*, 109(2): 183-195.
- Hooker S. B., Zibordi G., Berthon, J. F., Brown, J. W. (2004). Above-water radiometry in shallow coastal waters. *Applied Optics*, 43: 4254-4268.
- Kotchenova S. Y., Vermote E. F., Levy R., Lyapustin A. (2008). Radiative transfer codes for atmospheric correction and aerosol retrieval: intercomparison study. *Applied optics*, 47: 2215-2226.
- 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 Spectrometer (AVIRIS) data. *Journal of Geophysical Research* 106: 11639–11651.
- Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G., Patch J.S. (1999). Hypespectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Applied Optics* 38: 3831–3843.
- Lorenzen C. J. (1967), Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations, *Limnology and Oceanography*, 12 (2): 343–346.
- Lucke R. L., Corson M., Mcglothlin N. R., Butcher S. D., Wood D. L., Korwan D. R., Li R., Snyder W. A., Davis C. O., Chen D. T., (2011). Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean: instrument description and first images. *Applied Optics*, 50: 1501-1516.
- Rosenqvist A., Milne A., Lucas R., Imhoff M., Dobson C. (2003). A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. *Environmental Science and Policy*, 6 (5): 441–455.
- Santini F., Alberotanza L., Cavalli R. M., Pignatti S. (2010). A two-step optimization procedure for assessing water constituent concentrations by hyperspectral remote sensing techniques: An application to the highly turbid Venice lagoon waters. *Remote Sensing of Environment*, 114(4): 887-898.
- Strömbeck N., Pierson D. C. (2001). The effects of variability in the inherent optical properties on estimations of chlorophyll a by remote sensing in Swedish reservoirs, *Science of the Total Environment*, 268: 123–137.
- Van der Linde D. W. (1998). Protocol for determination of total suspended matter in oceans and coastal zones, Report, Joint Res. Cent., Ispra, 182 pp.
- Vermote E. F., Tanré D., Deuze J. L., Herman M., Morcette J. J. (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 675-686.