

## Integrazione di prodotti satellitari e dati in situ per il monitoraggio della qualità delle acque del lago Trasimeno

Mariano Bresciani (a), Giulia Luciani (b), Nicola Ghirardi (a), Annelies Hommersom (c), Valentina Della Bella (d), Rosalba Padula (d), Luca Tamburi (d), Alessandra Cingolani (d), Fedra Charavgis (d), Claudia Giardino(a)

<sup>(a)</sup> Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, CNR-IREA, via Bassini 15, 20133 Milano, *tel.* 02-23699298; *e-mail:* bresciani.m; ghirardi.n; giardino.c@irea.cnr.it

<sup>(b)</sup> Politecnico di Milano,

<sup>(c)</sup> Water Insight, Marijkeweg 22, 6709 PG Wageningen, Olanda; *e-mail:* hommerson@waterinsight.nl

<sup>(d)</sup> Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, ARPA Umbria, *e-mail:* v.dellabella; r.padula; l.tamburi; a.cingolani; f.charavgis@arpa.umbria.it

### Introduzione

Il monitoraggio della qualità dell'acqua nei laghi è di fondamentale importanza per la comprensione delle dinamiche ecologiche e per la loro gestione. In aggiunta ai parametri fisici e chimici delle acque e dei sedimenti, la conoscenza delle caratteristiche e quantità della componente biologica è di fondamentale importanza. Negli ecosistemi acquatici il fitoplancton rappresenta la base delle reti trofiche ed è un buon indicatore dello stato di qualità dei laghi (Ptacnik et al., 2008).

Il fitoplancton lacustre presenta dinamiche di crescita estremamente variabili a livello spaziale e temporale e al fine di poter monitorare il loro stato e valutare il loro impatto sulla qualità delle acque, sulla produttività e sull'ecologia della rete alimentare è necessario avere informazioni spaziali con elevata frequenza temporale (Brentrup et al., 2016). Le acque interne subiscono crescenti pressioni che vanno dai cambiamenti nell'uso del suolo all'interno del loro bacino idrografico, ai cambiamenti climatici con conseguenti aumenti della temperatura dell'aria, variazioni dei livelli idrometrici e degli eventi di precipitazioni estremi (Hayes et al., 2015). A livello globale, la temperatura e le precipitazioni sono cambiate radicalmente e si prevedono cambiamenti ancora più marcati per il futuro (Meehl et al., 2007). Questi cambiamenti influenzeranno notevolmente l'aumento della concentrazione dei nutrienti e le condizioni fisiche della colonna d'acqua determinando notevoli cambiamenti nelle dinamiche temporali del fitoplancton lacustre (Christensen et al., 2007). Il fitoplancton mostra una grande variabilità circadiana (Bresciani et al., 2013), che è determinata dalla capacità di sfruttare l'irradiazione disponibile durante il giorno in modo variabile, che a sua volta influenza la concentrazione di pigmenti fotosintetici (Dall'Olmo et al., 2011), la migrazione verticale del fitoplancton lungo la colonna d'acqua (Serizawa et al., 2008), la capacità di

assimilazione dei nutrienti da parte delle cellule di fitoplancton e la produzione primaria (Clark et al., 2002). La variabilità circadiana del fitoplancton, così come la variabilità stagionale, sono fortemente influenzate dalla meteorologia (Cloern, Jassby, 2010), un fattore sempre più dipendente dai cambiamenti del clima globale, che influenza in particolare la proliferazione di alghe potenzialmente tossiche (O'Neil et al. 2012).

Questo studio presenta l'applicazione di un approccio integrato tra l'utilizzo d'immagini satellitari e dati di riflettanza misurata in continuo ottenuti da uno spettroradiometro (WISPStation) posizionato su una piattaforma nel lago, come parte del progetto europeo H2020 EOMORES (Earth Observation-based Services for Monitoring and Reporting of Ecological Status), sviluppato nel Lago Trasimeno.

Le immagini satellitari sono ampiamente utilizzate per osservare e comprendere la variabilità spaziale e temporale (giornaliera/settimanale) dei parametri lacustri otticamente attivi (es. Pinardi et al., 2018; Tyler et al. 2016), mentre l'esplorazione della variabilità temporale oraria è ancora limitata ai sensori geostazionari (Kwon et al., 2018), le cui risoluzioni spaziali e spettrali sono limitate per monitorare la complessità ottica delle acque interne. L'integrazione delle informazioni ottenute dall'analisi delle immagini satellitari con il monitoraggio in situ ha il grande vantaggio di permettere una visione sinottica, multitemporale e multiparametrica.

Gli obiettivi del lavoro sono: i) la creazione di opportune catene di processamento delle immagini Sentinel-2 e Sentinel-3 per la stima della concentrazione di Clorofilla-a (Chl-a); ii) la conversione delle riflettanze ottenute dalla WISPstation in concentrazioni di Chl-a; iii) l'analisi dei prodotti ottenuti nel 2018 per il monitoraggio delle dinamiche spazio-temporali del fitoplancton e la valutazione dello stato di qualità delle acque del lago Trasimeno sulla base della Water Framework Directive (WFD).

### **Area di studio**

Il lago Trasimeno (Fig. 1) ha una superficie di 124 km<sup>2</sup>, è il quarto lago italiano più grande per estensione e il principale invaso naturale dell'Italia peninsulare. Il volume dello specchio lacustre, in condizioni idrologiche normali, è di circa 0.59 km<sup>3</sup>, ha forma tondeggiante e sviluppo spondale di 53 km. Il lago Trasimeno è di origine tettonica, è un lago chiuso e poco profondo (profondità media 4.2 m, profondità massima 6 m), con un tempo di ritenzione idrica piuttosto elevato di circa 24 anni (Burzigotti et al, 2003).

Parte integrante del bacino del Tevere, ha un bacino di raccolta di 387 km<sup>2</sup> cui corrisponde un sottobacino naturale di 306 km<sup>2</sup>.

I bassi livelli idrometrici, l'aumento della temperatura delle acque (Pareeth et al., 2017), l'apporto di nutrienti di origine agricola e zootecnica, gli scarichi civili e le attività turistiche rendono tendenzialmente eutrofica la condizione di questo lago (Giardino et al., 2010). La conseguente diminuzione sia della biodiversità della fauna ittica sia della complessità vegetazionale, in particolare con la perdita dell'area a canneto nell'area a sud dell'Oasi La Valle (Gigante et al., 2011), e l'innescarsi di effetti a domino, hanno inoltre causato un cambiamento della natura e distribuzione della vegetazione sommersa con l'innescarsi di fioriture estive-autunnali di cianobatteri (Bresciani et al., 2011).



Figura 1 – Immagine del lago Trasimeno con indicazione della posizione della WISPstation in prossimità dell'isola Polvese e indicazione dell'Oasi La Valle. In alto la fotografia della WISPstation montata su piattaforma e schema della WISPstation con indicazione della posizione delle differenti ottiche.

## Materiali e metodi

Il 24 aprile del 2018, su una piattaforma posta a circa 400 metri dalle coste dell'Isola Polvese, è stata installata la WISPstation (figura 1). La WISPstation è un sistema di spettroradiometri a posizione fissa costituita da un sistema di misurazione ottica per la misura della riflettanza dell'acqua. Gli spettroradiometri della WISPstation, come il portatile WISP-3 (Hommersom et al., 2012) misurano la radianza che fuoriesce dall'acqua ( $L_{up}$ ), la radianza del cielo ( $L_{sky}$ ) e l'irradianza solare ( $Ed$ ) nell'intervallo spettrale di 350-900 nm con una risoluzione spettrale di 3 nm in accordo con il protocollo SeaWiFS (Mobley, 1999). Al fine di avere un angolo di azimuth ottimale di misura durante tutta la giornata, in modo da evitare problemi speculari, è costituito da due triplette di sensori, una rivolta a NNE e una a NNW. La WISPstation è alimentata tramite pannello solare, acquisisce ogni 15 minuti e invia i dati automaticamente tramite connettività 3G. I circa 5000 dati di riflettanza misurati dal 24 Aprile al 3 Ottobre 2018, sono stati convertiti in valori di concentrazione di Chl-a tramite l'applicazione dell'algoritmo di Gons (1999). I dati di riflettanza misurati con la WISPstation sono stati confrontati con dati acquisiti da spettroradiometri portatili (FieldSpec ASD-FR e Spetral Evolution SR3500) in occasione di due campagne di misura *in situ* il 24 Aprile e 14 Giugno 2018. Le stime di Chl-a sono state validate tramite confronto con 6 campioni d'acqua raccolti in prossimità della piattaforma il 14/06, 24/07, 06/08 e 04/09 e analizzati in laboratorio (Lorentzen, 1967).

In aggiunta alle misure in continuo sono state acquisite e processate immagini ottiche satellitari dei sensori MSI (*MultiSpectral Instrument*) e OLCI (*Ocean and Land Colour Instrument*) rispettivamente a bordo dei satelliti Sentinel-2 (S2A/B) e Sentinel-3 (S3A/B). Il sensore MSI acquisisce in 13 bande nella regione spettrale compresa tra 442 e 2201 nm, con una risoluzione spaziale variabile tra i 10-20-60 m al suolo (in questo lavoro le immagini sono state riprocessate a 10 m) e intervallo temporale di 5 giorni. Il sensore OLCI è

contraddistinto da 21 bande nell'intervallo spettrale fra 400 e 1020 nm, acquisisce giornalmente ad una risoluzione spaziale di 300 m. Nel periodo temporale febbraio-dicembre 2018, 30 immagini OLCI/Sentinel-3 e 26 immagini MSI/Sentinel-2 prive di copertura nuvolosa, glint e disturbi radiometrici sono state corrette atmosfericamente in accordo con l'approccio di Cazzaniga et al. (2019) rispettivamente con il codice POLYMER (Steinmez et al., 2011) e il codice 6Sv (Vermote et al., 2006). Le immagini in riflettanza sono state convertite in mappe di concentrazione di Chl-a con il codice bio-ottico BOMBER (Giardino et al., 2012) parametrizzato sulla base delle proprietà ottiche specifiche delle acque del lago Trasimeno (Giardino et al., 2015). Le serie temporali dei prodotti ottenuti dalla WISPstation e dalle mappe satellitari sono state fuse al fine di fornire il maggiore numero d'informazioni e sono state convertite in stato di qualità delle acque in accordo con i limiti e le metriche della WFD.

## Risultati

Il confronto tra le misure effettuate dagli spettroradiometri della WISPstation e quelli portatili SpectralEvolution e FieldSpec ASD, come visibile in figura 2, ha evidenziato un eccellente accordo; lo stesso vale per le stime di Chl-a ottenute dalla WISPstation rispetto alle misure *in situ*, in cui il valore di  $r^2$  è risultato di 0.97.

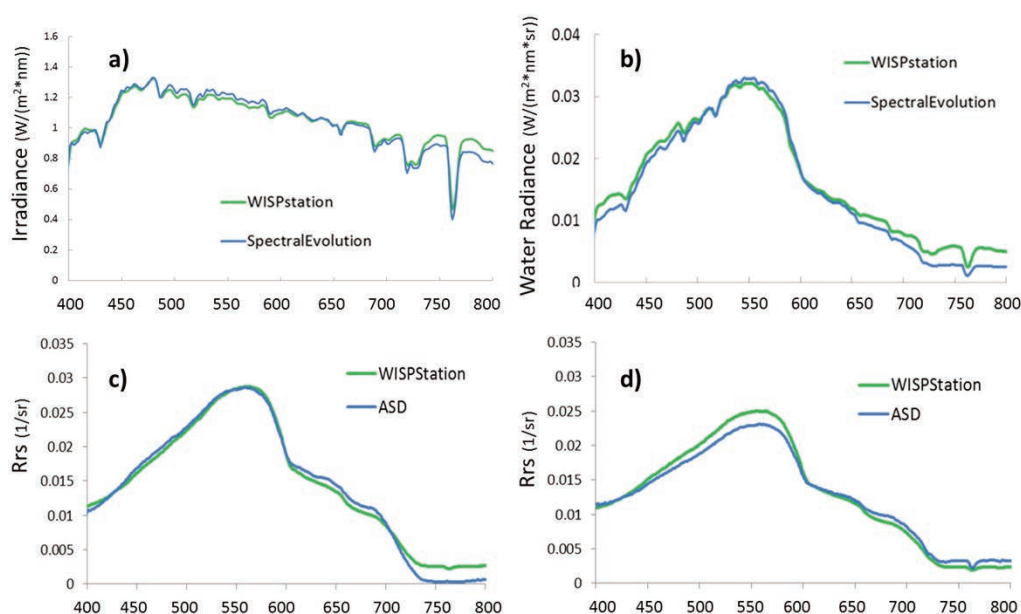
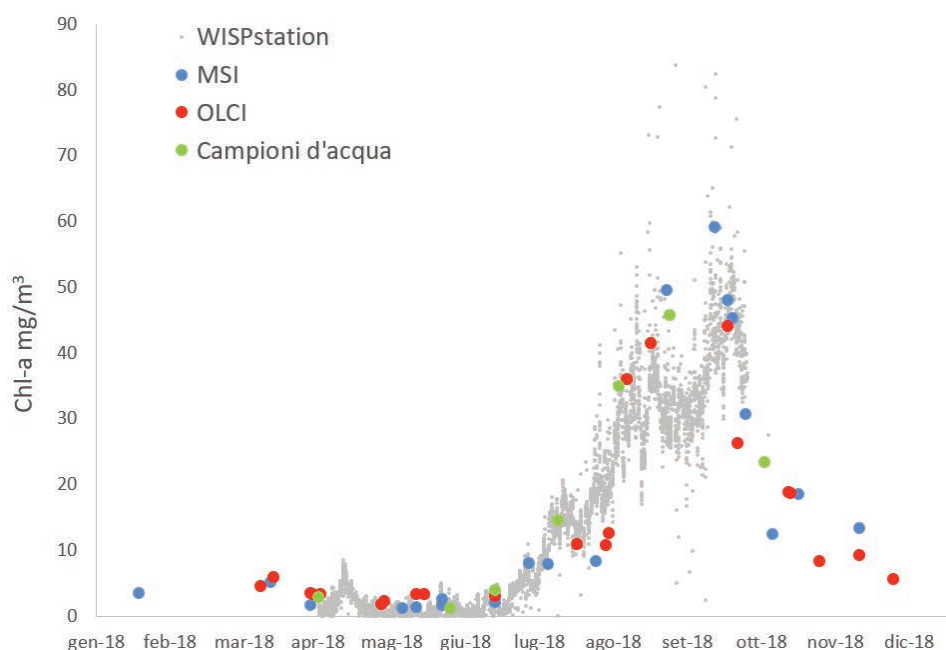


Figura 2 - In alto sono mostrati i confronti tra i valori di irradianza solare (a) e di radianza che fuoriesce dalle acque (b) acquisiti il giorno 24 Aprile 2018 alla 12.30 (le misure sono state effettuate con una differenza temporale di cinque minuti) tra la WISPstation e lo Spectral Evolution. Sotto il confronto tra le riflettanze (Remote sensing reflectance - Rrs) acquisite il giorno 14 Giugno 2018 dalla WISPstation e dal FiledSpec ASD: alle ore 10:05 e alle ore 11:45.

L'andamento temporale di Chl-a, rappresentato in figura 3, mostra la grande variabilità delle concentrazioni sia a livello stagionale, sia intragiornaliero, sia orario.



*Figura 3 – Andamento delle concentrazioni di Chl-a ottenute dalla WISPstation, dalle immagini OLCI e MSI e dai campioni d’acqua prelevati nella zona antistante alla piattaforma dell’isola Polvese.*

I prodotti ottenuti dalle immagini OLCI e MSI e i prodotti puntuali della WISPstation sono in stretto accordo come evidenziato in figura 3. I prodotti di Chl-a ottenuti da OLCI e da MSI hanno mostrato un buon accordo reciproco ( $r^2=0.95$ ) e con i dati in situ (MAE 1.47, rRMSE 12.5) come indicato in Cazzaniga et al. (2019). Le mappe di Chl-a, mostrate in figura 4, confermano la variabilità stagionale delle concentrazioni di questo parametro, con valori maggiori nelle zone ad ovest e nord del lago.

I risultati sono stati aggregati in classi, secondo le soglie previste dalla WFD per la valutazione dell’indice di clorofilla (DM 260/2010, Tab. 4.2.1/c). Il giudizio relativo al 2018, dato dal valore medio annuo di clorofilla sull’intero specchio lacustre, ha evidenziato complessivamente uno stato “scarso”, anche se l’area a sud dell’Isola Polvese ha presentato valori compatibili con la classe “sufficiente”. Osservando l’andamento temporale, il giudizio di qualità passa dallo stato “cattivo” nel periodo di transizione estivo-autunnale a quello “buono” del periodo invernale e primaverile. Tali risultati appaiono in linea con quanto emerso dal monitoraggio in discreto svolto da ARPA Umbria ai sensi della WFD.

La valutazione di quali fattori abbiano condizionato gli andamenti spaziali e temporali della clorofilla è ancora in corso; alcuni risultati preliminari denotano come il vento e la temperatura siano fattori chiave nel determinare le dinamiche e i bloom di fitoplancton.

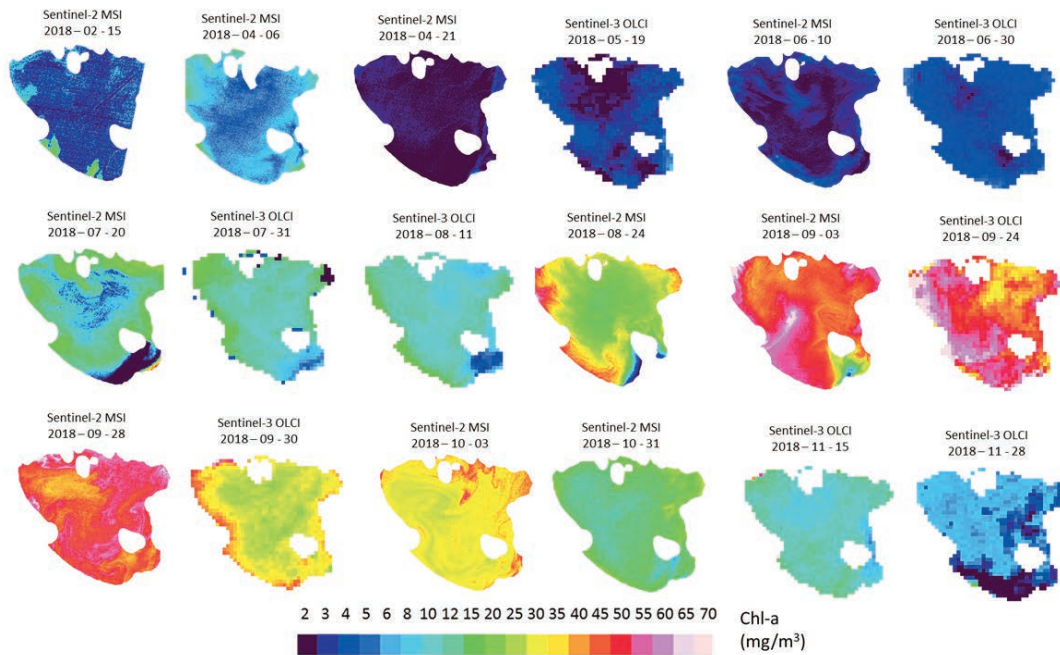


Figura 4 – Esempi di mappe di concentrazione di Chl-a ottenute dalle immagini MSI e OLCI durante il 2018.

## Conclusioni

I risultati ottenuti hanno evidenziato l'importanza di avere a disposizione serie di dati che coprano sia la variabilità spaziale sia frequenze temporali molto elevate. La validazione dei dati di riflettanza di concentrazione di Chl-a della WISPstation ha confermato la buona qualità dei dati. L'integrazione dei prodotti ottenuti da Sentinel-2 e Sentinel-3 fornisce una serie di elevato valore per il monitoraggio delle acque. I risultati ottenuti dall'analisi spazio-temporale hanno evidenziato l'elevata dinamicità della componente fitoplanctonica nelle acque del lago. In particolare, l'analisi dei prodotti ha evidenziato condizioni di criticità delle acque nel periodo estivo ed autunnale, in cui le concentrazioni di clorofilla hanno superato i 50 mg/m<sup>3</sup>. Elevata irradiazione solare, alte temperature e ridotta intensità del vento sono i fattori che maggiormente condizionano le dinamiche del fitoplancton. I dati della WISPStation hanno permesso di stimare come la Chl-a può cambiare significativamente durante il giorno (fino al 200%), con valori massimi delle concentrazioni rilevate nelle ore pomeridiane.

## Ringraziamenti

Le attività sono inserite all'interno del progetto H2020 EOMORES (GA n. 730066). Si desidera ringraziare la Cooperativa dei Pescatori del Trasimeno sul lago per il supporto nella attività di campo ed in particolare Aurelio Cocchini. Si ringrazia la Provincia di Perugia per aver reso disponibile la piattaforma dell'isola Polvese.

## Bibliografia

Brentrup J.A., Williamson C.E., Colom-Montero W., Eckert W., de Eyto E., Grossart H.P., Huot Y., Isles P.D., Knoll L.B., Leach T.H. and McBride C.G.

- (2016), "The potential of high-frequency profiling to assess vertical and seasonal patterns of phytoplankton dynamics in lakes: an extension of the Plankton Ecology Group (PEG) model", *Inland Waters*, 6(4): 565-580.
- Bresciani M., Rossini M., Morabito G., Matta E., Pinardi M., Cogliati S., Julitta T., Colombo R., Braga F. and Giardino C. (2013), "Analysis of within-and between-day chlorophyll-a dynamics in Mantua Superior Lake, with a continuous spectroradiometric measurement", *Marine and Freshwater Research*, 64(4): 303-316.
- Burzigotti R., Dragoni W., Evangelisti C. and Gervasi L. (2003), "The role of Lake Trasimeno (central Italy) in the history of hydrology and water management", *IWHA 3rd International Conference, Alexandria, Egypt*.
- Christensen J.H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I. et al. (2007), "Regional climate projections", In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller), Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 847-940.
- Clark D.R., Flynn K.J. and Owens N.J.P. (2002), "The large capacity for dark nitrate-assimilation in diatoms may overcome nitrate limitation of growth", *New Phytologist*, 155: 101-108.
- Cloern J.E. and Jassby A.D. (2010), "Patterns and scales of phytoplankton variability in estuarine-coastal ecosystems", *Estuaries and Coasts*, 33(2): 230-241.
- Dall'Olmo G., Boss E., Behrenfeld M.J., Westberry T.K., Courties C., Prieur L., Pujol-Pay M., Hardman-Mountford N. and Moutin T. (2011), "Inferring phytoplankton carbon and eco-physiological rates from diel cycles of spectral particulate beam-attenuation coefficient", *Biogeosciences*, 8(11): 3423-3439.
- Giardino C., Bresciani M., Matta E. and Brando V.E. (2015), "Imaging Spectrometry of Inland Water Quality in Italy Using MIVIS: An Overview. In: Younos T., Parece T. (eds) *Advances in Watershed Science and Assessment*", *The Handbook of Environmental Chemistry*, Springer, Cham, 33: 61-83.
- Giardino C., Candiani G., Bresciani M., Lee Z., Gagliano S. and Pepe M. (2012), "BOMBER: A tool for estimating water quality and bottom properties from remote sensing images", *Computers & Geosciences Elsevier*, 45: 313-318.
- Giardino C., Bresciani M., Villa P., Martinelli A. (2010), "Application of Remote Sensing in water resource management: The case study of Lake Trasimeno, Italy", *Water Resources Management*, 4: 3885-3899.
- Bresciani M., Giardino C. and Boschetti L. (2011), "Multi-temporal assessment of biophysical parameters in Lakes Garda and Trasimeno from MODIS and MERIS", *Italian Journal of Remote Sensing*, 43(3): 49-62.
- Gigante D., Venanzoni R. and Zuccarello V. (2011), "Reed die-back in southern Europe? A case study from Central Italy", *Comptes Rendus Biologies*, 334(4): 327-336.
- Gons H. (1999), "Optical Teledetection of Chlorophyll a in turbid inland waters", *Environ. Sci. Technol*, 33: 1127-1132.
- Hayes N.M., Vanni M.J., Horgan M.J., Renwick W.H. (2015), "Climate and land use interactively affect lake phytoplankton nutrient limitation status", *Ecology*, 96: 392-402.

- Hommersom A., Kratzer S., Laanen M., Ansko I., Ligi M., Bresciani M., Giardino C., Beltrán-Abaunza J.M., Moore G., Wernand M. and Peters S. (2012), "Intercomparison in the field between the new WISP-3 and other radiometers (TriOS Ramses, ASD FieldSpec, and TACCS)", *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1): 63615.
- Jindal R. and Thakur R.K. (2013), "Diurnal variations of plankton diversity and physico-chemical characteristics of Rewalsar Wetland, Himachal Pradesh, India", *Recent Research in Science and Technology*, 5(3).
- Kwon Y.S., Jang E., Im J., Baek S.H., Park Y. and Cho K.H. (2018), "Developing data-driven models for quantifying *Cochlodinium polykrikoides* using the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)", *International journal of remote sensing*, 39(1): 68-83.
- Lorenzen C.J. (1967), "Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations 1", *Limnology and Oceanography*, 12: 343-346.
- Mobley C.D. (1999), "Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements", *Appl. Opt.*, 38(36): 7442-7455.
- Neveux J., Dupouy C., Blanchot J., Le Bouteiller A., Landry M.R. and Brown S.L. (2003), "Diel dynamics of chlorophylls in high-nutrient, low-chlorophyll waters of the equatorial Pacific (1808): interactions of growth, grazing, physiological responses, and mixing", *Journal of Geophysical Research–Ocean*, 108(12).
- Pareeth S., Bresciani M., Buzzi F., Leoni B., Lepori F., Ludovisi A., Morabito G., Adrian R., Neteler M. and Salmaso N. (2017), "Warming trends of perialpine lakes from homogenised time series of historical satellite and in-situ data", *Science of the Total Environment*, 578: 417-426.
- Pinardi M., Bresciani M., Villa P., Cazzaniga I., Laini A., Tóth V., Fadel A., Austoni M., Lami A. and Giardino C. (2018), "Spatial and temporal dynamics of primary producers in shallow lakes as seen from space: Intra-annual observations from Sentinel-2A", *Limnologica*, 72: 32-43.
- Ptácnik R., Lepistö L., Willén E., Brettum P., Andersen T., Rekolainen S., et al. (2008), "Quantitative responses of lake phytoplankton to eutrophication in Northern Europe", *Aquatic Ecology*, 42: 227-236.
- Serizawa H., Amemiya T., Rossberg A.G. and Itoh K. (2008), "Computer simulations of seasonal outbreak and diurnal vertical migration of cyanobacteria", *Limnology*, 9: 185-194.
- Steinmetz F., Deschamps P.Y. and Ramon D. (2011), "Atmospheric correction in presence of sun glint: application to MERIS", *Optics express*, 19(10): 9783-9800.
- Tyler A.N., Hunter P.D., Spyrakos E., Groom S., Constantinescu A.M. and Kitchen J. (2016), "Developments in Earth Observation for the Assessment and Monitoring of Inland, Transitional, Coastal and Shelf-Sea Waters", *Science of the Total Environment*, 572: 1307-1321.
- Vermote E.F., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J., Kotchenova S.Y. (2006), "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6s: An Overview", *6S User Guide Version 3*.