

Il telerilevamento a supporto del controllo ambientale: il caso di una valle da pesca in Laguna di Grado¹

Remote sensing in support of environmental monitoring: the case of a fishing valley in the Grado Lagoon

ANDREA FAVRETTO, ALBERTO FURLANUT

Università di Trieste, afavretto@units.it

Riassunto

Il contributo presenta i primi risultati di una collaborazione fra una valle da pesca del Friuli Venezia Giulia (Valle Noghera) e il Dipartimento di Studi umanistici dell'Università di Trieste. L'obiettivo di lungo termine di tale collaborazione è quello di fornire un supporto gestionale alle valli da pesca della Laguna di Grado, di Venezia e del Delta del Po. Nello specifico, le possibilità offerte dal telerilevamento consentono di monitorare costantemente diversi parametri peculiari di queste realtà. A titolo esemplificativo, è possibile effettuare un controllo dei livelli dell'acqua, della presenza di vegetazione acquatica e dei danni che questa subisce a causa di alcune specie di avifauna (come i fenicotteri), nonché dell'ossigenazione delle acque, grazie alla possibilità di individuare zone in cui si creano aree di anossia o di eccessiva presenza di alghe infestanti.

Parole chiave

Telerilevamento, Valle da pesca, Vegetazione acquatica, Monitoraggio ambientale, Fenicotteri.

Abstract

This paper presents the initial results of a collaboration between a fishing valley in Friuli Venezia Giulia (Valle Noghera) and the Department of Humanities at the University of Trieste. The long-term goal of this collaboration is to provide management support to the fishing valleys of the Grado Lagoon, Venice, and the Po Delta. In particular, the possibilities offered by Remote Sensing (RS) allow for the constant monitoring of various parameters specific to these areas. For example, it is possible to monitor water levels, the presence of aquatic vegetation and the damage it suffers due to certain species of birdlife (such as flamingos), as well as water oxygenation. These features are due to RS capacity in identifying areas where anoxia or excessive algae infestation occurs.

Keywords

Remote Sensing, Fishing valley, Water Vegetation, Environmental Monitoring, Flamingos.

¹ Il lavoro è stato realizzato in piena collaborazione fra gli Autori. Tuttavia, a fini concorsuali, i paragrafi "Introduzione: la Valle Noghera" e "Considerazioni conclusive" vanno attribuiti ad Alberto Furlanut mentre i paragrafi "Materiali e metodi" e "Elaborazione dei dati e risultati raggiunti" ad Andrea Favretto.

1. Introduzione: la Valle Noghera

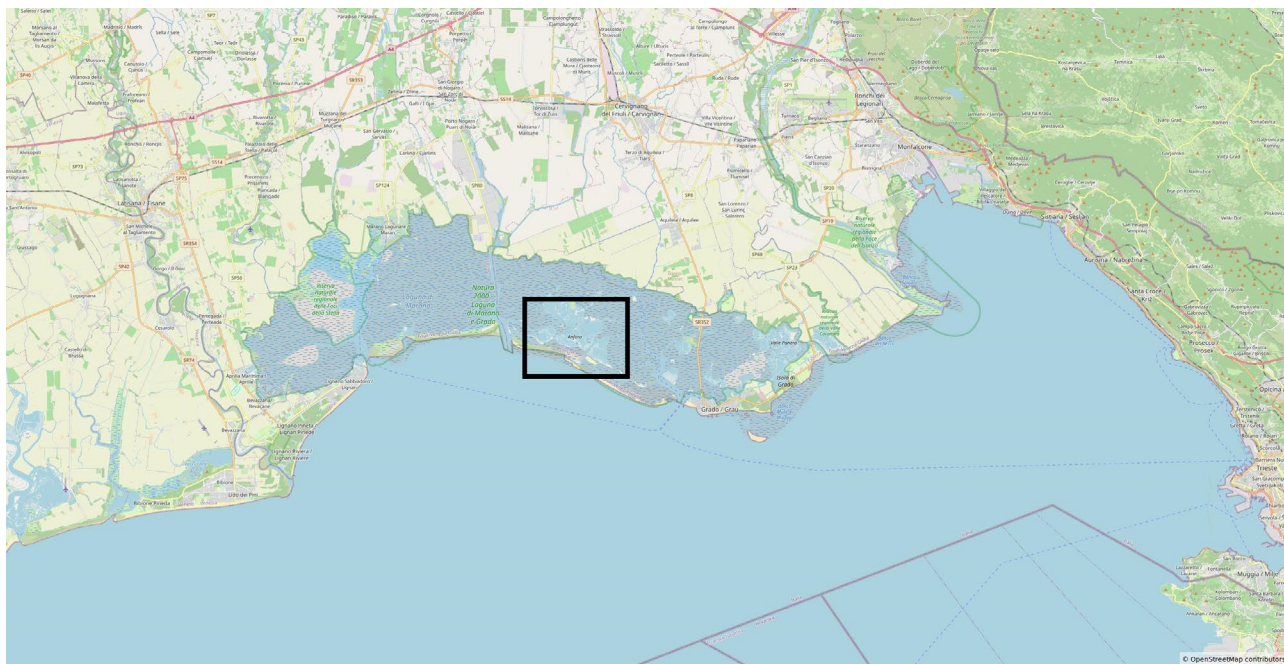
Le valli da pesca sono particolari realtà dell'Alto Adriatico con una storia secolare, in cui viene allevato il pesce in modo estensivo. Si tratta di porzioni di laguna chiuse e indipendenti dal punto di vista idraulico, in cui il flusso d'acqua viene regolato mediante l'utilizzo di chiuse. Sono ambienti di rilevanza internazionale per la loro biodiversità, soprattutto per quanto riguarda gli uccelli acquatici.

Valle Noghera è una valle da pesca della Laguna di Grado, in Friuli Venezia Giulia (FVG). Ha una estensione di circa 270 ettari ed è la più grande della Regione (fig. 1). Si tratta di una valle recente, in quanto è stata arginata nel 1969. Le sue attività principali sono la pesca, che viene gestita seguendo la tradizione secolare dell'allevamento estensivo (senza l'utilizzo di mangimi) e la gestione faunistica a scopi venatori. Di recente, come in molte altre valli simili in FVG, è iniziata la produzione di "crediti di carbonio", ovvero certificati di avvenuto assorbimento di anidride carbonica dall'atmosfera, che possono essere venduti alle aziende che decidono di investire in sostenibilità.

Nel tempo, è stato scoperto che la gestione ambientale di questi particolari allevamenti ittici causa diverse esternalità positive. Il mantenimento dell'ossigenazione e di livelli d'acqua idonei, la piantumazione di alberi e la creazione di zone di acqua dolce hanno creato all'interno delle valli dei punti di sverno di rilevanza internazionale per certe specie di uccelli acquatici e, solo di recente, è stato scientificamente dimostrato che questo tipo di gestione permette di assorbire importanti quantità di anidride carbonica dall'atmosfera, grazie al fenomeno del blue carbon (Doimi et alii, 2013).

La gestione di queste realtà non è semplice e le problematiche che gli operatori devono affrontare quotidianamente sono molteplici. Ogni valle ha le sue difficoltà gestionali, legate alla sua morfologia, alla disponibilità di acqua dolce e salata, al tipo di fondale, alle specie animali che la frequentano. In Valle Noghera, ad esempio, per mantenere un'ossigenazione idonea all'interno dei suoi argini, comprese le aree più remote, è fondamentale un ricircolo d'acqua continuo e lo spurgo dei canali, così favorendo la circolazione dell'acqua in tutte le zone. Nelle zone di acqua dolce, alimentate esclusivamente da

FIGURA 1. Localizzazione della Valle Noghera all'interno della Laguna di Grado/Marano.



FONTE: nostra elaborazione su base cartografica di OpenStreetMap.

pozzi artesiani (la valle non ha punti di contatto con la terra ferma), è fondamentale il monitoraggio delle eventuali siccità, che possono essere causate da perdite negli argini oppure dall'evaporazione nei mesi estivi. Talvolta, questo monitoraggio può risultare molto scomodo per una gestione efficiente; ad esempio, in Valle Noghera alcuni laghetti d'acqua dolce sono posti a circa 20 minuti di barca dal centro operativo dell'azienda. Altro esempio di difficoltà gestionale legato a questa valle è il monitoraggio delle praterie di vegetazione sommersa, in particolare di fanerogame. Si tratta di piante fondamentali per l'ecosistema, sia per l'assorbimento dell'anidride carbonica che come alimentazione naturale per gli uccelli migratori che svernano in loco. Negli ultimi 10 anni circa, la presenza di tali alghe è stata messa a dura prova dal crescente numero dei fenicotteri rosa, che si nutrono di quest'alga, estirpandone le radici e scavando dei buchi nelle zone in cui essa si alimenta. Nel periodo autunnale, la popolazione di fenicotteri in Valle Noghera ammonta a circa 2000 individui (<https://www.birdingveneto.eu/feniday/>; Verza et al, 2015).

In tale contesto, è iniziata una collaborazione fra Valle Noghera e il Laboratorio GIS del Dipartimento di Studi umanistici dell'Ateneo triestino, con l'obiettivo di fornire un supporto per ottimizzare il lavoro degli operatori della valle attraverso l'uso di mezzi tecnologici di monitoraggio da remoto. A tal fine, è stato utilizzato il telerilevamento. In questo contributo sono presentati i primi risultati dell'impiego di tale metodologia. Due sono stati i casi di applicazione:

- il primo riguarda il controllo del livello di un lago di acqua dolce¹, recentemente realizzato mediante argini di separazione dal resto delle acque salate, in modo da addolcirlo gradualmente con l'acqua piovana. Nell'estate del 2023, in seguito ad un prolungato periodo di caldo torrido e assenza di precipitazioni, la preoccupante, veloce e progressiva diminuzione del livello del lago (posto ad una certa distanza dal centro operativo della valle), avrebbe richiesto il frequente spostamento del personale per il suo controllo (almeno ogni due giorni). Il monitoraggio da

remoto attraverso le immagini telerilevate del satellite Sentinel 2, ha evidenziato la grave sofferenza del lago e permesso di intervenire tempestivamente, deviando il flusso d'acqua da un altro lago d'acqua dolce presente nella valle, in modo da combattere la forte evaporazione in atto;

- il secondo riguarda il monitoraggio delle praterie di alghe fanerogame. Gli operatori avevano da tempo osservato che i fenicotteri tendono a prediligere le acque ricche di tali praterie e che, per tale causa, la vegetazione algale locale si era drasticamente ridotta. L'analisi di una serie storica di immagini del satellite Sentinel 2 (dal 2018 al 2023), centrate nel momento di massima fioritura algale (luglio e agosto), ha permesso la valutazione di tale drastico calo. In particolare, i fenicotteri preferivano frequentare le zone nelle quali in autunno venivano sparse delle granaglie, per fornire un'alimentazione di supporto alle anatre della valle. Sono state quindi create nuove zone di pasturazione per le anatre, lasciando in tal modo riposare quelle tradizionalmente ad alta produzione di fanerogame. Le immagini di Sentinel 2 posteriori a tale operazione hanno confermato il buon esito della stessa, denunciando la progressiva ricolonizzazione dei fondali in sofferenza, ricolonizzazione tutt'ora in atto.

Dopo la presentazione dei materiali e dei metodi utilizzati (immagini satellitari ed elaborazione delle stesse), vengono approfonditi i due casi applicativi di cui sopra, spiegando le elaborazioni realizzate sulle immagini telerilevate e visualizzando i risultati raggiunti sotto forma di carte tematiche.

2. Materiali e metodi

Per quanto riguarda il primo caso di applicazione, ovvero il controllo dello stato di sofferenza del lago d'acqua dolce per la siccità e le alte temperature dell'estate 2023, sono state utilizzate otto immagini del sensore MSI (MultiSpectral Imager, satellite Sentinel 2), riprese nei giorni: 21/3/2023; 10/4/2023; 25/5/2023; 2/6/2023; 12/6/2023; 9/7/2023; 17/7/2023; 11/8/2023; 10/9/23.

Alle immagini è stato applicato l'indice NDWI (Normalized Difference Water Index). Per ciò che riguarda il telerilevamento, tale indice è stato proficuamente impiegato per il

¹ Nelle valli da pesca la creazione di zone di acqua dolce è fondamentale da un punto di vista faunistico perché l'avifauna (specialmente le anatre), gradisce zone di acqua potabile insieme a quelle di acqua salata, utili per l'alimentazione (Verza et al, op.cit).

controllo delle acque (ad esempio: McFeeters, 1996; Li et alii, 2023; Quang et alii, 2023). Lo stesso si è rivelato particolarmente efficace per evidenziare la presenza di acque nelle immagini telerilevate.

Esso si calcola mediante un algoritmo, che fa uso del verde e dell'infrarosso vicino, così combinati:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$$

nel caso di Sentinel 2 diventa:

$$NDWI = (B3 - B8) / (B3 + B8)$$

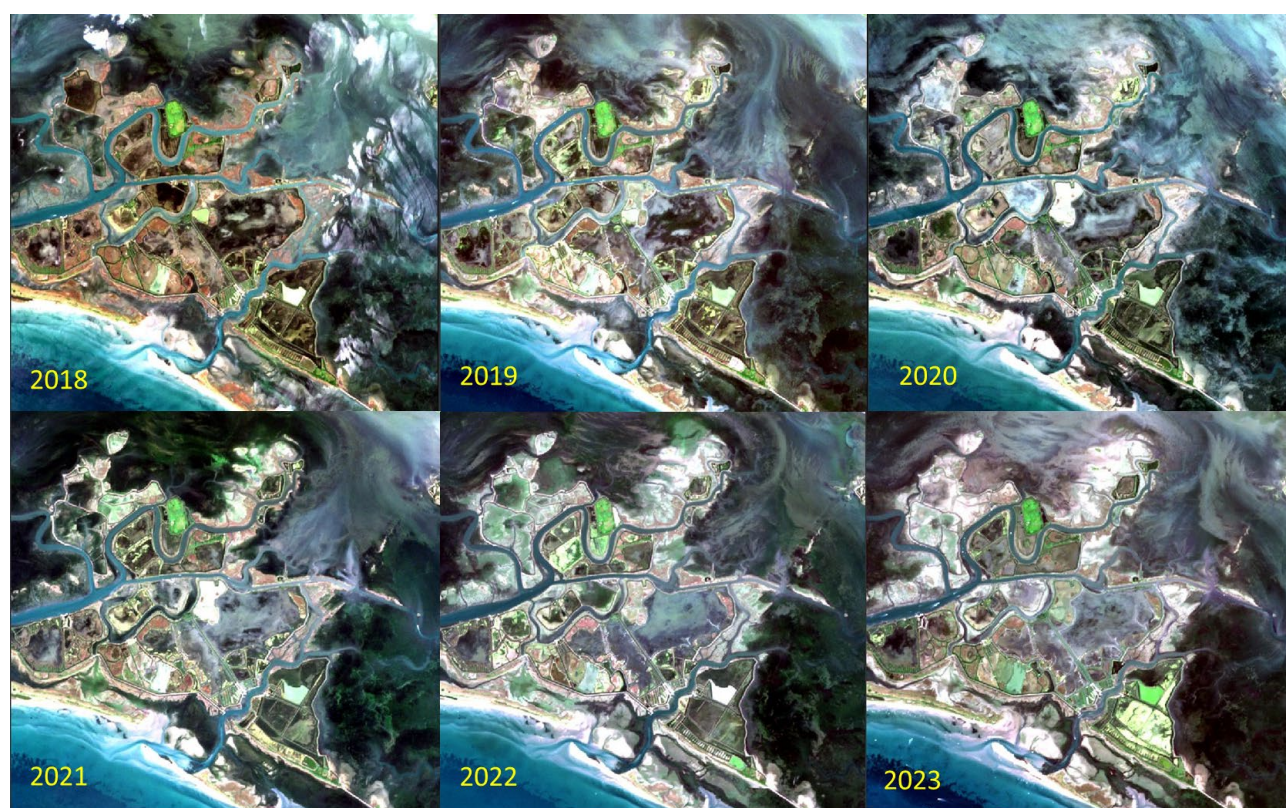
ove B3 è la banda 3 di Sentinel 2 (Green, lunghezza d'onda del centro banda: 560 nm);

B8 è la Banda 8 (NIR – Near InfraRed, lunghezza d'onda del centro banda: 842 nm).

Per quanto invece riguarda il secondo caso applicativo, quello delle fanerogame nelle acque vallive, sono state utilizzate sei immagini di MSI-Sentinel 2, centrate temporalmente a luglio, per il periodo 2018 – 2023. Precisamente, le immagini risalgono a: 13/7/2018; 20/7/2019; 14/7/2020; 29/7/2021; 19/7/2022; 9/7/2023. Sulla fig. 2 si può vedere la serie storica delle immagini, centrate su Valle Noghera e visualizzate a colori veri (ovvero utilizzando il canale rosso per la banda 4 (Red, lunghezza d'onda del centro banda: 665 nm); il canale verde per la banda 3 (Green, lunghezza d'onda del centro banda: 560 nm); il canale blu per la banda 2 (Blue, lunghezza d'onda del centro banda: 490 nm).

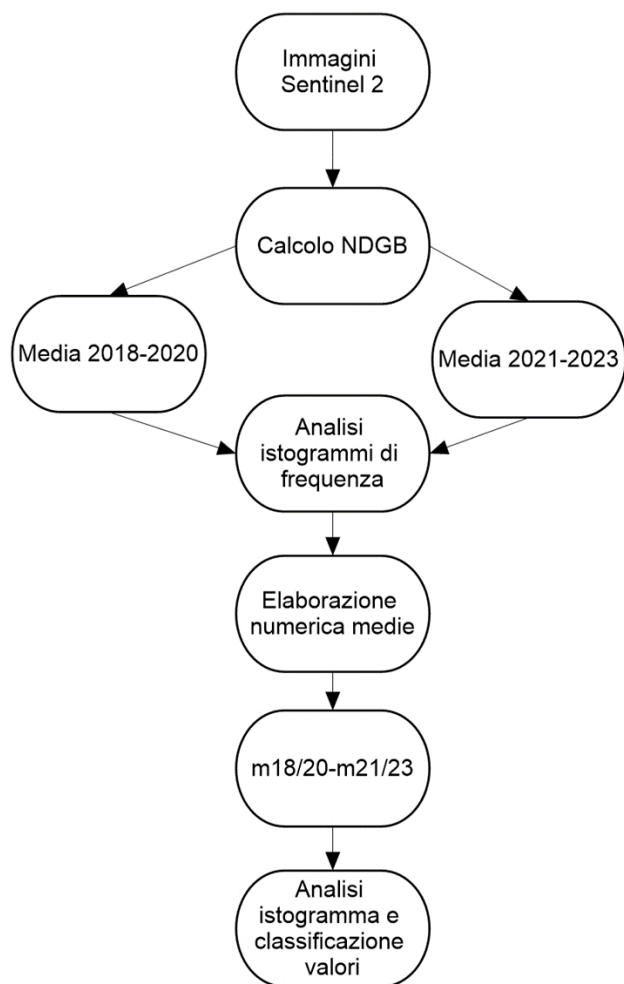
Alle immagini è stato applicato un procedimento costituito da diversi livelli operativi, il cui schema si può vedere sulla fig. 3.

FIGURA 2. Mosaico relativo alla serie storica delle immagini di Sentinel 2 della valle da pesca Noghera, riprese nel mese di luglio del periodo 2018 – 2023 e visualizzate a colori veri (si veda il testo).



FONTE: nostra elaborazione.

FIGURA 3. Procedimento utilizzato sulla serie storica delle immagini Sentinel 2 per l'analisi della tendenza della concentrazione di alghe fanerogame nelle acque della valle per il periodo 2018-2023 (si veda il testo).



Vediamo brevemente i punti relativi alle elaborazioni applicate:

1. Attraverso l'analisi di alcuni scatter plot applicati a coppie di bande (si veda ad es.: Raidou et alii, 2019), si sono prescelte le bande 1² e 3 per la costruzione di un indice, in quanto queste due bande sono risultate

² La Banda 1 di Sentinel 2 è centrata a 443 nm (leggermente prima del blu "tradizionale" della Banda 2, centrata a 490 nm), ha una risoluzione spaziale di 60 metri (al posto dei 10 della banda 2). Denominata anche coastal blu, essa è stata creata per il controllo dell'aerosol nell'atmosfera ma viene proficuamente utilizzata anche per verificare la presenza di particelle in sospensione nelle acque, resa possibile dalla sua maggior penetrazione sotto la superficie (Poursanidis et alii, 2019).

quelle che hanno fatto registrare la miglior separazione fra i pixel dell'immagine. Tale indice è stato denominato NDGB (Normalized Difference Green Blue) ed è stato calcolato mediante il seguente algoritmo:

$$NDGB^3 = (Green - Blu)/(Green + Blu) = (B3 - B1)/(B3 + B1).$$

2. I sei layer NDGB, risultato del punto 1, sono stati raggruppati in due periodi (2018-2020 e 2021-2023). Sono state calcolate le medie di ciascun periodo, ricavando in tal modo due layer NDGB, rispettivamente per il periodo 2018-2020 e 2021-2023.
3. I valori dei pixel del layer NDGB21-23 sono stati sottratti a quelli del layer NDGB18-20, ricavando in tal modo un nuovo layer risultato, i cui pixel, opportunamente analizzati attraverso l'istogramma di frequenza, sono stati classificati in classi di intervalli e tematizzati in una carta finale, che ha permesso di capire l'evoluzione della presenza algale nel periodo considerato.

Un'ultima precisazione va fatta per gli strumenti utilizzati. Il primo caso di applicazione è stato realizzato mediante Copernicus browser⁴, l'applicazione in modalità cloud computing di ESA. Nel secondo è stato invece impiegato SNAP (SeNtinel Application Platform), il software libero di ESA per la gestione delle immagini telerilevate.

³ Dalle ricerche effettuate in letteratura, un indice che fa uso di queste bande di Sentinel 2, legate dall'algoritmo utilizzato, non è stato trovato in alcuna pubblicazione scientifica e non compare nel Index DataBase on line, a cura di Henrich et alii, accessibile presso https://www.indexdatabase.de/db/isis.php?sensor_id=96 (Henrich et alii, 2009, 2025).

⁴ Si tratta di un ottimo applicativo che permette di visualizzare le immagini telerilevate della flotta Sentinel (ed anche alcune dell'americana Landsat) nonché diverse elaborazioni delle stesse. Sono anche possibili animazioni (particolarmente utili per il controllo delle differenze territoriali nel tempo) e ritagli di zone di interesse, tutte liberamente scaricabili anche in diversi sistemi di coordinate.

3. Elaborazione dei dati e risultati raggiunti

3.1 Primo caso di applicazione: sofferenza del lago d'acqua dolce per la siccità

Sulla fig. 4 si può vedere un mosaico dei layer risultato dell'applicazione dell'indice NDWI alle nove immagini di partenza. I valori numerici, poco leggibili nella legenda del mosaico per motivi di spazio, vanno da -0.8 (verde), a 0 (bianco), a +0.8 (blu). Il lago d'acqua dolce è evidenziato in ciascuna immagine del mosaico con un riquadro tratteggiato in nero. Osservando l'evoluzione del colore del lago, è evidente una progressiva diminuzione del livello

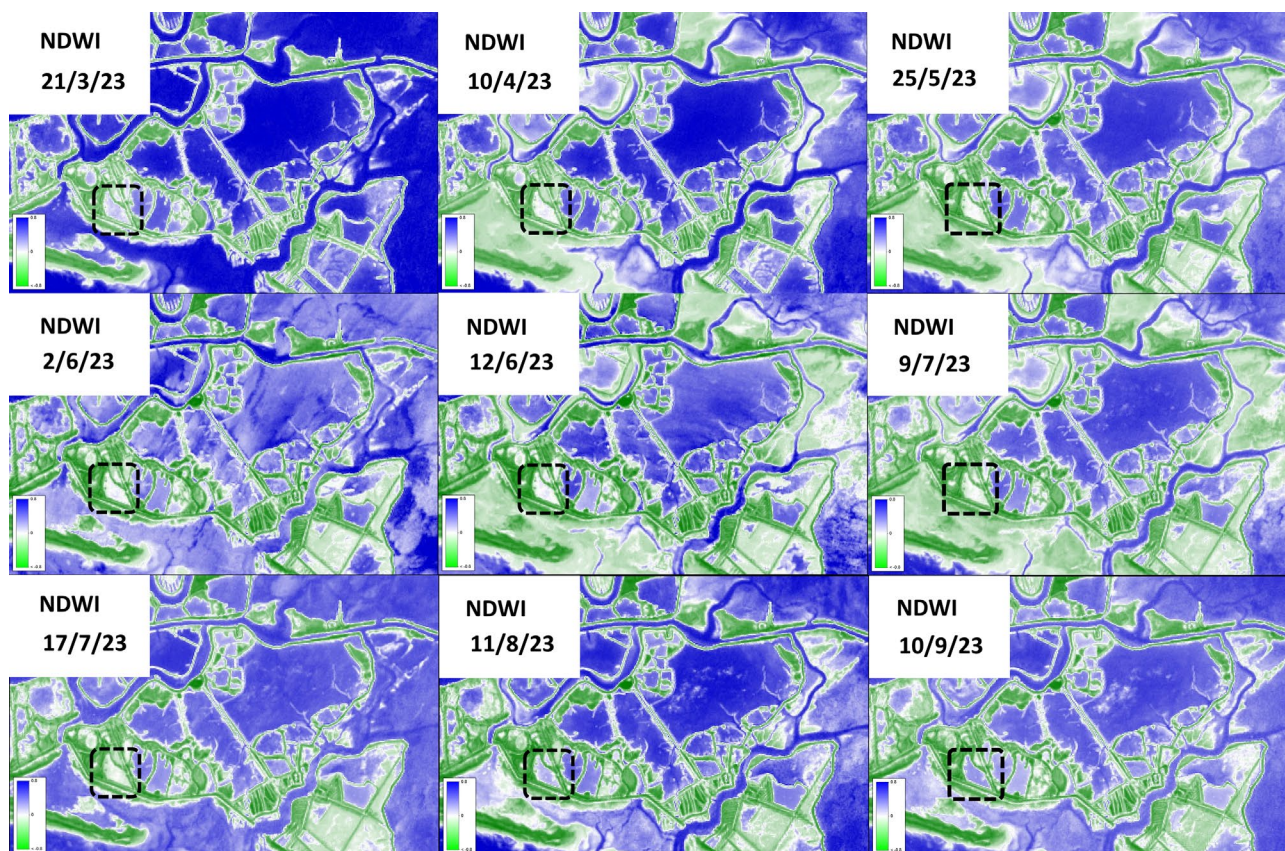
d'acqua dolce da marzo a luglio (colore da azzurro chiaro a bianco), mentre da metà luglio a settembre si riscontra un miglioramento dello stesso (colore dal bianco all'azzurro), legato all'intervento degli operatori e alle diverse condizioni climatiche (diminuzione della temperatura e della siccità).

3.2 Secondo caso di applicazione: evoluzione algale nelle acque della valle

Sulla fig. 5 si può vedere lo scatter plot⁵ relativo alle due bande dell'immagine di luglio 2022, poi

⁵ Nel telerilevamento, lo scatter plot è uno strumento utile per verificare le relazioni spettrali fra bande, in modo da poter discriminare meglio gli oggetti geografici

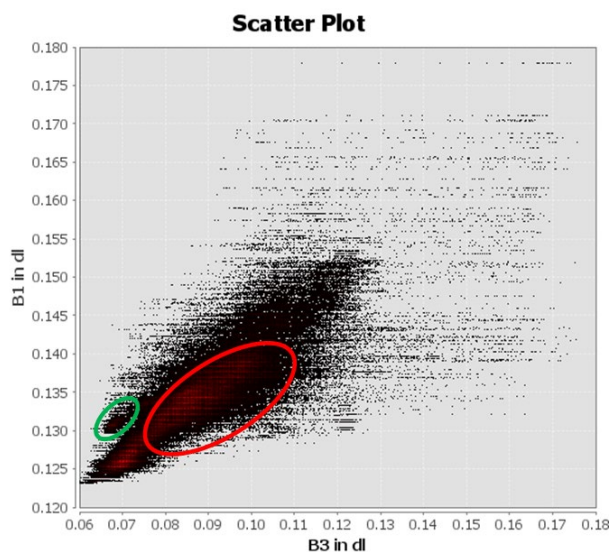
FIGURA 4. Mosaico relativo ai layer dell'indice NDWI applicati alla serie storica delle immagini Sentinel 2, da marzo a settembre 2023. Il riquadro tratteggiato in nero mostra la localizzazione del lago d'acqua dolce, in sofferenza a causa delle alte temperature e della siccità (colore bianco), poi recuperato grazie all'intervento degli operatori (colori azzurro/blu). I valori dell'indice vanno da -0.8 (colore verde), a 0 (colore bianco), a 0.8 (colore azzurro/blu).



FONTE: nostra elaborazione.

utilizzate per il calcolo dell'indice NDGB (Banda 1 – coastal blu; Banda 3 – Green). Con le due ellissi colorate sono evidenziate le coppie di valori che mostrano la buona separazione dei pixel nell'immagine. Le aree segnate sul grafico corrispondono a diverse caratteristiche geografiche sull'immagine telerilevata e possono essere apprezzate nella fig. 6, che mostra la localizzazione nel territorio delle ellissi nello scatter plot. L'applicativo utilizzato per l'elaborazione delle immagini (SNAP di ESA si può scaricare liberamente presso: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>), permette la visualizzazione sull'immagine telerilevata delle aree di concentrazione dei dati nel grafico.

FIGURA 5. Scatter plot delle due bande B1 (coastal blu) e B3 (Green) dell'immagine di luglio 2022. Con le ellissi colorate si sono evidenziate le zone sul grafico corrispondenti a diverse zone geografiche, caratterizzate rispettivamente da valori più alti di B1 e meno alti di B3 (ellissi verde) e da valori meno alti di B1 e più alti di B3 (ellissi rossa).



Fonte: nostra elaborazione.

dell'immagine. Se due bande presentano nel grafico delle zone di concentrazione di valori (sono le aree rosse di fig. 5), queste corrispondono a diversi oggetti nell'immagine e un indice costruito fra le due bande si può rivelare efficace nel descrivere una determinata tipologia di fenomeno geografico (nel nostro caso: la concentrazione algale nelle acque).

FIGURA 6. L'immagine Sentinel 2 di luglio 2022 con evidenziate le zone geografiche corrispondenti alle aree del grafico di fig. 5 (si veda il testo).



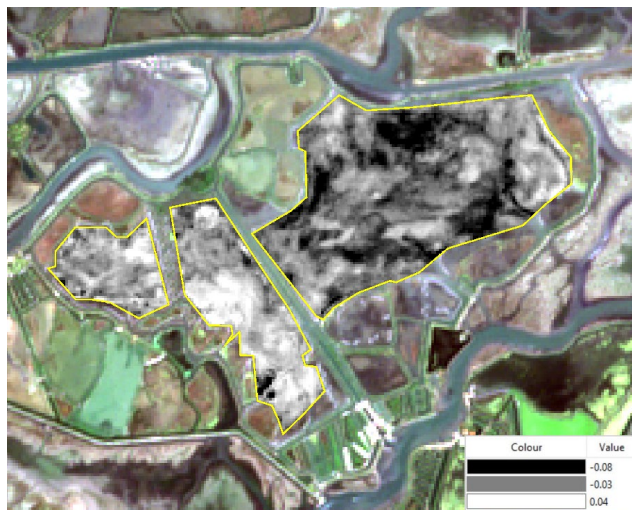
Fonte: nostra elaborazione.

Come si può vedere, i punti dello scatter plot evidenziati dall'ellissi rossa sono relativi ai pixel dell'immagine ove i valori della Banda 3 (verde) sono più elevati di quelli della Banda 1 (coastal blu). Sono le aree interne della laguna, ove la presenza delle alghe disciolte rende questo colore predominante. L'ellissi verde invece si localizza in mare aperto, dove il blu è predominante rispetto al verde.

Come si è detto nel paragrafo precedente, si è proceduto applicando l'indice NDGB a tutte le immagini della serie storica. Queste sono poi state ritagliate, in modo da considerare solamente le zone lagunari d'acqua salata di interesse per il controllo delle alghe. Sono state poi calcolate le due medie (m2018-2020 e m2021-2023); infine, si è sottratto il layer m2021-2023 al layer m2018-2020. Sulla fig. 7 si può vedere il risultato di queste procedure.

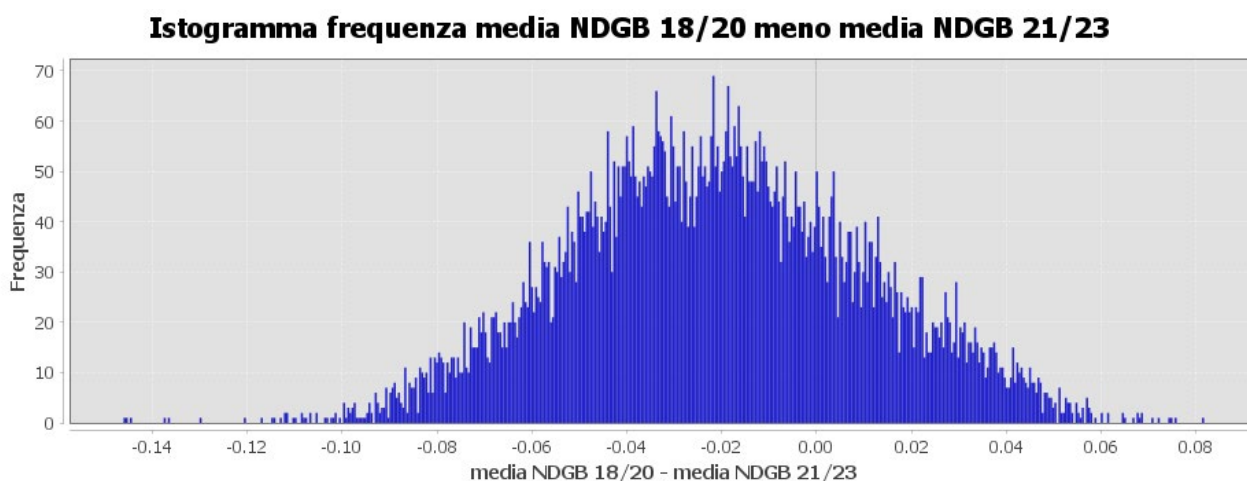
Lo sfondo della figura è costituito dall'immagine di luglio 2023, visualizzata a colori veri. In giallo sono evidenziati i contorni delle aree lagunari ritagliate, al cui interno si può vedere in sovrapposizione il layer risultato della sottrazione di cui sopra, visualizzato in toni di grigio (si vedano i valori in legenda). Valori negativi dei pixel indicano un decremento della concentrazione algale; valori attorno allo zero, stabilità; valori positivi,

FIGURA 7. I tre poligoni in toni di grigio, evidenziati in giallo e sovrapposti all'immagine di luglio 2023, riportano l'evoluzione della concentrazione algale nel periodo 2018/23. I colori scuri denunciano un decremento della concentrazione mentre quelli chiari l'incremento della stessa. Si veda il testo.



FONTE: nostra elaborazione.

FIGURA 8. Istogramma di frequenza dei pixel dei tre poligoni di fig. 7, risultato della sottrazione del layer m21/23 (NDGB) al layer m18/20 (NDGB).



FONTE: nostra elaborazione.

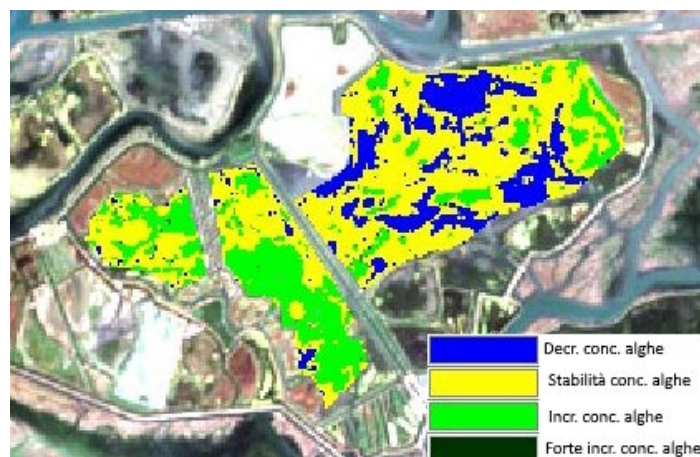
incremento. Al fine di classificare il layer sottrazione in classi di intervalli, si è considerato il suo istogramma di frequenza, che si può vedere in fig. 8.

L'andamento del grafico suggerisce di suddividere l'intervallo di variabilità dei pixel in quattro classi (isolando

ciascuna classe attraverso le variazioni di pendenza dell'istogramma⁶, in modo da trovare i punti di rottura

⁶ Tale sistema empirico è di diretta derivazione dal cosiddetto metodo "natural breaks" o algoritmo di Jenks, che opera la suddivisione in intervalli raggruppando i valori maggiormente simili

FIGURA 9. Carta tematica risultato finale delle elaborazioni, indicante l'evoluzione della concentrazione algale nei tre maggiori laghi d'acqua salata della valle nel periodo 2018-2023. I tre poligoni classificati sono sovrapposti all'immagine di luglio 2023.



FONTE: nostra elaborazione.

della distribuzione, dove questa viene interrotta da punti di minimo relativo).

Le classi risultano:

1. decremento concentrazione algale: valore pixel ≤ -0.05
2. sostanziale stabilità concentrazione algale: $-0.05 < \text{valore pixel} \leq 0$
3. incremento concentrazione algale: $0 < \text{valore pixel} \leq 0.05$
4. forte incremento concentrazione algale: valore pixel > 0.05

La fig. 9 mostra la carta tematica così costruita. Anche in questo caso, lo sfondo della figura è costituito dall'immagine del luglio 2023, visualizzata a colori veri.

e massimizzando la differenza fra gli intervalli (per approfondire si veda: de Smith et alii, 2007; Jenks, 1967; Jenks, 1963; per applicazioni in ambiente GIS, fra i tanti: Brewer et alii, 2002; Chen et alii, 2013; Geloogherdi et alii, 2023).

7 Si è deciso allargare l'intervallo di stabilità della concentrazione algale per meglio seguire l'andamento dell'istogramma di frequenza (fig. 8) che, come si può vedere, non presenta un picco ma una sorta di "Plateau" superiore, centrato grosso modo a -0.025 .

Considerazioni conclusive

Osservando la fig. 9 è evidente la diversa evoluzione della concentrazione algale nei due bacini occidentali, rispetto a quello più grande, ad est. In particolare, è evidente la grande estensione della classe verde ("Incremento concentrazione alghe"), del lago salato centrale. Proprio in quest'ambito ha avuto luogo la maggior parte degli interventi realizzati dagli operatori della valle, dall'autunno 2022 in poi. Sono stati infatti scavati alcuni canali, con lo scopo di favorire la circolazione e l'ossigenazione dell'acqua. I fenicotteri sono stati inoltre concentrati altrove, spargendo periodicamente delle granaglie. Infine, in tutti e tre i laghi sono state create delle lingue di terra, a beneficio dei volatili che necessitano di zone asciutte per riposare. L'effetto delle misure adottate trova riscontro nei risultati delle nostre analisi alle immagini telerilevate, configurando in tal modo il telerilevamento come un utile strumento, da aggiungere a quelli tradizionali, per la gestione della valle da pesca.

I due casi applicativi descritti sono naturalmente solo un esempio delle molteplici attività di monitoraggio che si possono realizzare. Come si è visto, l'estrema duttilità del telerilevamento può essere d'aiuto sia per il raggiungimento degli obiettivi economici dell'ente gestore, sia per la tutela della biodiversità nell'ecosistema.

Ulteriori applicazioni sono in progetto in Valle Noghera ma anche in altri siti della laguna di Grado.

Bibliografia

- Brewer, C. A., & Pickle, L., (2002), "Evaluation of Methods for Classifying Epidemiological Data on Choropleth Maps in Series", *Annals of the Association of American Geographers*, 92(4), pp. 662–681, <https://doi.org/10.1111/1467-8306.00310>.
- Chen, J., Yang, S. T., Li, H. W., Zhang, B., Lv, J. R., (2013), "Research on Geographical Environment Unit Division Based on the Method of Natural Breaks (Jenks)", *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-4/W3, pp. 47–50.
- De Smith M. J., Goodchild M. F., Longley P. A., (2007), *Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software*, Troubador Publishing Ltd.
- Doimi M., Ferrari A., Dal Molin D., Gardan I., (2013), "Model of Wetland Carbon Sequestration in the Venetian Lagoon, Italy", *Journal of Environmental Science and Engineering*, B 2, pp. 657–671.
- Geloogardi S. H., Vali A., Sharifi M. R., (2023), "Desertification simulation using wavelet and box-jenkins time series analysis based on TGSI and albedo remote sensing indices", *Journal of Arid Environments*, 219.
- Henrich V., Krauss G., Gotze C., Sandow C., (2025), *Index DataBase. A database for remote sensing indices*, <https://www.indexdatabase.de/info/idb.php>, ultimo accesso: ottobre 2025.
- Henrich, V., Jung, A., Götze, C., Sandow, C., Thürkow, D., Gläßer, C. (2009), "Development of an online indices database: Motivation, concept and implementation", *6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop Innovative Tool for Scientific and Commercial Environment Applications*, Tel Aviv, Israel, March 16-18, 2009.
- Jenks G. F., (1963), "Generalization in Statistical Mapping", *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 53, No. 1, pp. 15–26.
- Jenks, G. F., (1967), "The data model concept in statistical mapping", *International Yearbook of Cartography*, 7, pp. 186–190.
- Li Y., Bai J., Chen S., Chen B., Zhang L., (2023), "Mapping seagrasses on the basis of Sentinel-2 images under tidal change", *Marine Environmental Research*, 185, pp. 1–12.
- McFeeters, S. K. (1996), "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features", *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), pp. 1425–1432, <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
- Poursanidis D., Traganos D., Reinartz P., Chrysoulakis N., (2019), "On the use of Sentinel-2 for coastal habitat mapping and satellite-derived bathymetry estimation using downscaled coastal aerosol band", *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 80, pp. 58–70.
- Quang, N.H.; Dinh, N.T.; Dien, N.T.; Son, L.T., (2023), "Calibration of Sentinel-2 Surface Reflectance for Water Quality Modelling in Binh Dinh's Coastal Zone of Vietnam", *Sustainability*, 15, pp. 1410 <https://doi.org/10.3390/su15021410>.
- Raidou R. G., Groller M. E., Eisemann M., (2019), "Relaxing Dense Scatter Plots with Pixel-Based Mappings", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 25, Nn. 6, pp. 2205–2216.
- Verza E., Trombin D., (2015), *Le Valli del Delta del Po*, Apogeo Editore.