



Venezia2021

**Programma di ricerca scientifica
per una laguna “regolata”**

Linea 1.4

*Rilevazione e previsione di eventi anossici
con metodologie di remote sensing*

Rapporto Finale

Periodo 01/11/2018 - 30/06/2022

Federica Braga (CNR-ISMAR)

10/10/2022

Federica Braga

EXECUTIVE SUMMARY

1. Principali risultati emersi dalla Linea riferiti agli obiettivi iniziali

All'interno dell'ecosistema lagunare, la comprensione delle variazioni annuali e stagionali della presenza delle acque biancastre, dovute alla formazione di zolfo colloidale in condizioni ipo-anossiche, è una questione complessa che coinvolge molteplici fattori che interagiscono su diverse scale spaziali e temporali. La formazione di zolfo colloidale in condizioni ipo-anossiche nella colonna d'acqua è un fenomeno noto, ma non era ancora stato monitorato in laguna di Venezia, nonostante abbia un impatto significativo sull'ecosistema, sull'acquacoltura e sul turismo a causa delle sue proprietà tossiche. Ad esempio, la presenza di zolfo colloidale è spesso associata a crisi distrofiche che influenzano la fauna acquatica con massicce morie per soffocamento anche delle specie più tolleranti o mobili, come si è verificato nel luglio 2013 e riportato ampiamente dalla stampa locale.

Nell'ambito della Linea 1.4, abbiamo testato le potenzialità delle immagini satellitari Landsat 8 e Sentinel-2, per identificare, mappare e monitorare le acque biancastre in laguna di Venezia nel periodo 2013-2021. La metodologia implementata è stata applicata sia ad immagini di archivio, sia in *near real time* per individuare in modo sinottico le aree critiche caratterizzate dalla presenza di eventi di acque biancastre e attivare rapidamente e tempestivamente eventuali campagne di misura per la caratterizzazione dello stato ecologico delle zone interessate.

L'analisi spaziale e temporale delle mappe ottenute dalle immagini satellitari ha rivelato che eventi multipli di acque biancastre sono stati registrati nella laguna di Venezia durante la maggior parte degli anni investigati. Le acque biancastre sono state osservate soprattutto nei mesi di luglio e agosto, e in alcuni casi anche giugno. Nessun evento è stato individuato nel 2014 e nel 2019 e un solo evento è stato osservato nel 2021. Gli anni con un numero maggiore di eventi visibili dalle immagini da satellite sono il 2013 e il periodo 2015-2017, durante i quali sono stati identificati sia eventi ricorrenti nella stessa area, sia eventi in zone diverse della laguna. Ad esempio, nel 2015 sono stati registrati gli eventi più estesi e di maggior durata, con un'area totale occupata dalle acque biancastre di 18.45 km² e la presenza di acque biancastre nell'area della laguna centrale in tutte le immagini disponibili tra il 1 e il 24 luglio 2015. Nel periodo successivo (2018-2021) ci sono stati pochi eventi con estensione limitata e di breve durata. Sulla base degli eventi osservati, è stato possibile distinguere un *trend* nella distribuzione spaziale delle acque biancastre: nel periodo giugno-prima metà di luglio, gli eventi si verificano principalmente nell'area più a nord-ovest, tra San Giuliano e il canale di Tessera, mentre tra luglio e agosto le acque biancastre sono presenti soprattutto nell'area della laguna centrale.

La relazione tra i dati di ossigeno disciolto (DO) misurati in continuo in 3 stazioni della rete SAMANET e gli eventi di acque biancastre ha indicato che le aree identificate da satellite corrispondono o sono immediatamente successivi ai giorni in cui si sono verificati eventi di ipossia (DO < 3 mg/l) della durata di diverse ore, confermando che lo zolfo colloidale è associato a condizioni ipo-anossiche, come riportato in letteratura.

Il fattore più importante per il verificarsi di eventi di acque biancastre sembra essere la densa copertura di macrofite, in particolare le macroalghe appartenenti alle specie *Ulva* spp. Infatti, l'eccessiva biomassa macroalgale, che viene rapidamente degradata da batteri aerobici eterotrofi in presenza di elevate temperature, porta a condizioni anossiche con acque ricche di solfuri, successivamente ri-ossidati a zolfo colloidale nella colonna d'acqua. Il confronto tra la distribuzione spaziale degli eventi di acque biancastre e la copertura di macrofite sommerse ha confermato che la maggior parte delle acque biancastre si riscontra nelle aree con vegetazione densa (cioè con copertura maggiore del 75%). Questo indica che la gestione e il monitoraggio della biomassa macroalgale nel periodo tardo primaverile è un aspetto chiave per evitare il verificarsi di crisi ipossiche/anossiche e quindi l'insorgere di condizioni critiche nel funzionamento dell'ecosistema.

2. Tre risultati concreti divulgabili ai decisori politici/ pubblico generico

2.1 Mappatura delle “acque biancastre” e identificazione in near real time in laguna di Venezia

Nell’ambito della Linea 1.4, è stata implementata una metodologia applicata ad immagini satellitari per identificare e mappare le acque biancastre in laguna di Venezia nel periodo 2013-2021. L’algoritmo di classificazione è stato sviluppato a partire dall’analisi spettrale di diversi target acquatici nelle immagini di archivio, sfruttando le proprietà ottiche delle acque biancastre che presentavano valori di riflettanza molto alti. I risultati sono stati confrontati e validati con le immagini a colori reali (Figura 1). Le acque biancastre sono causate dalla formazione di zolfo colloidale in condizioni ipo-anossiche e sono spesso associate a crisi distrofiche. Nel corso del progetto, gli eventi sono stati identificati quasi in tempo reale per individuare le aree critiche e attivare tempestivamente eventuali campagne di rilevamento delle condizioni ecologiche.

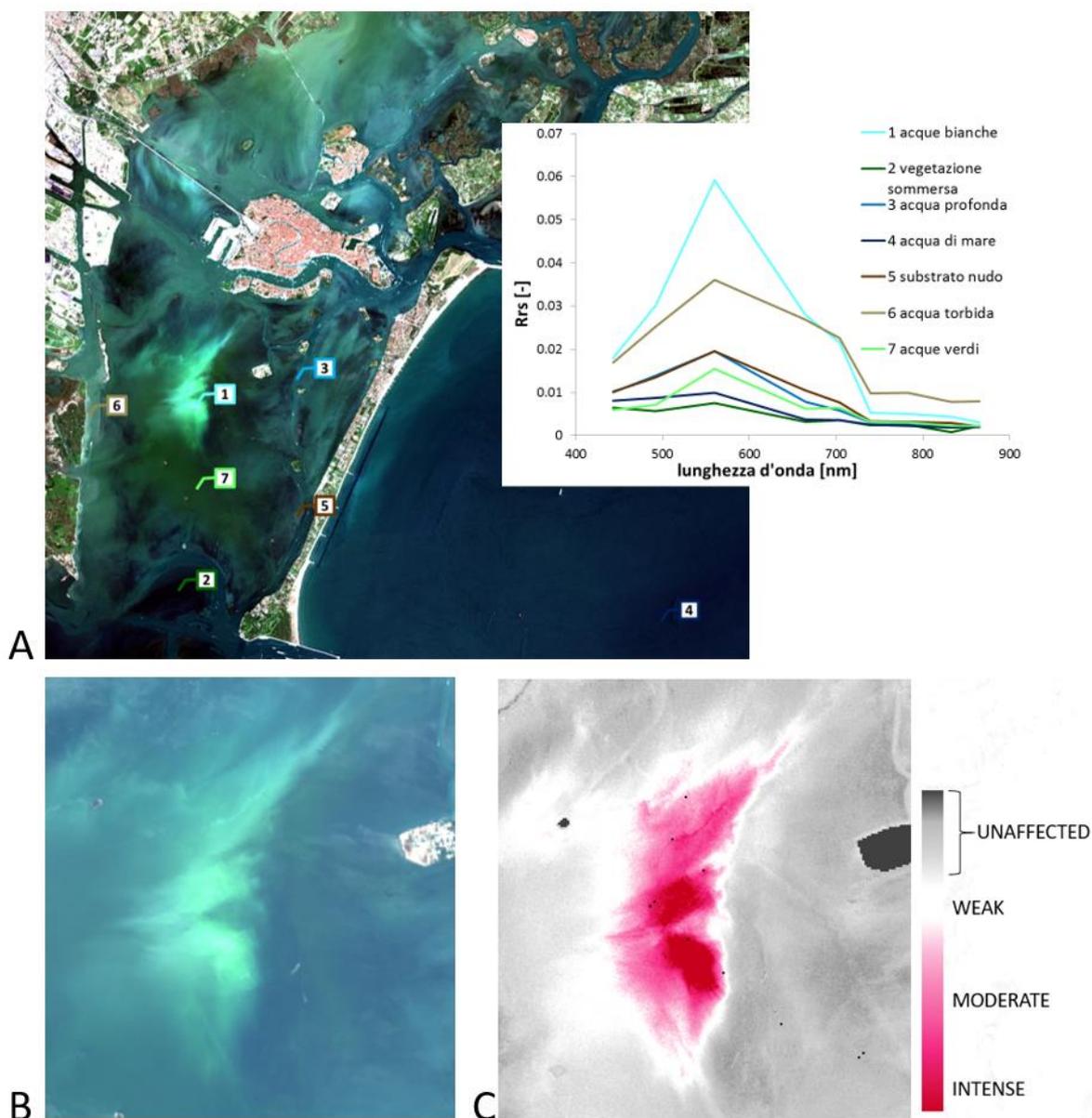


Figura 1. A) Nel grafico sono riportate le curve di riflettanza di 7 target acquatici, indicati nell’immagine satellitare Sentinel-2 del 18 luglio 2016. Le acque biancastre hanno valori molto alti, permettendo di discriminare i *pixel* interessati. B) Ritaglio dell’immagine a colori reali in cui sono presenti le acque biancastre; C) Mappa raster, ottenuta con l’algoritmo di classificazione sviluppato. I pixel colorati indicano l’area interessata dalla presenza di zolfo colloidale.

2.2 Distribuzione spaziale e temporale della acque biancastre nel periodo tra il 2013 e il 2021

L'analisi spaziale e temporale delle mappe ottenute dalle immagini satellitari ha rivelato che eventi multipli di acque biancastre sono stati registrati in laguna di Venezia durante la maggior parte degli anni investigati. In Figura 2 è riportata l'analisi relativa al 2015, durante il quale sono avvenuti gli eventi più estesi, con un'area totale occupata di 18.45 km², e di maggior durata (visibili in laguna centrale in tutte le immagini tra 1 e 24 luglio 2015). I valori di ossigeno disciolto misurati in 3 stazioni della rete SAMANET mostrano che gli eventi di acque biancastre corrispondono o sono immediatamente successivi ai giorni in cui si sono verificati eventi di ipossia di diverse ore, in particolare per la stazione VE-1, che si trova proprio nell'area interessata.

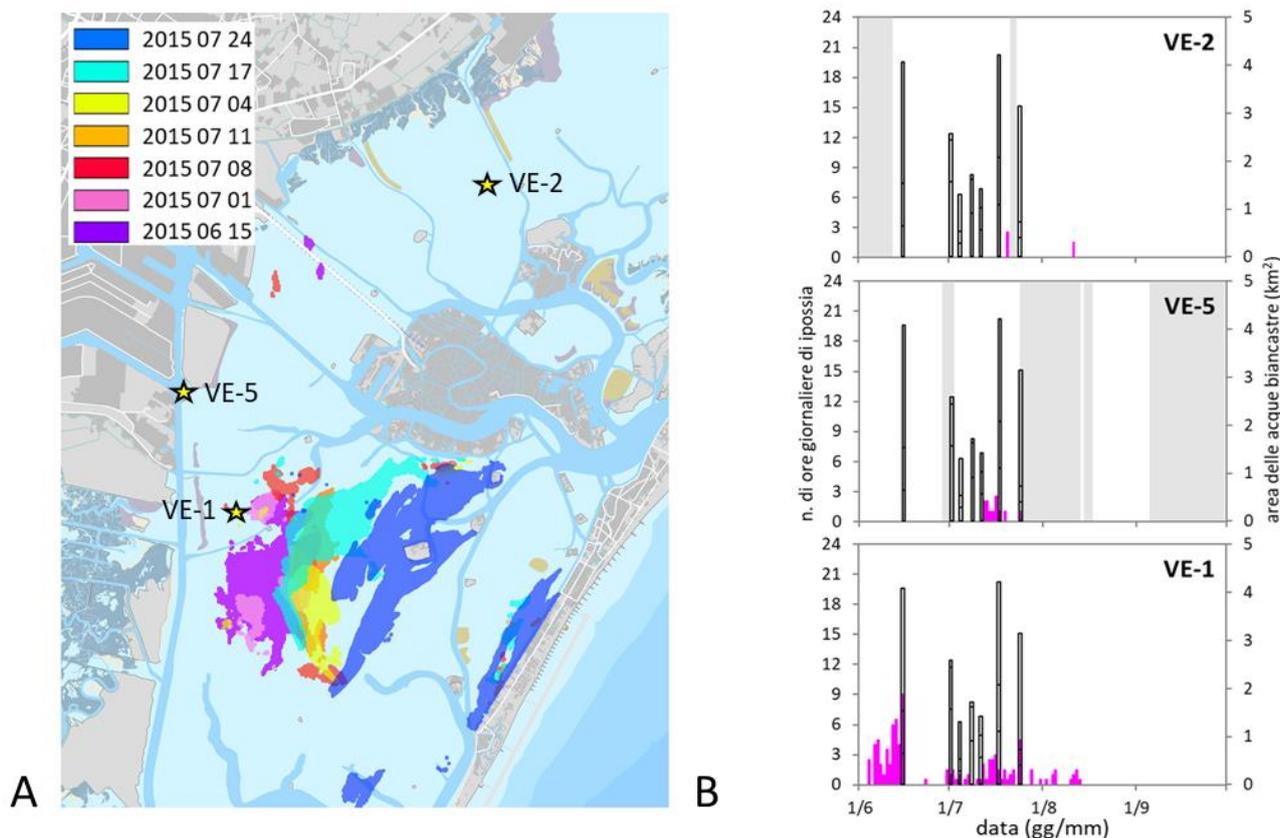


Figura 2. Eventi di acque biancastre riferiti all'anno 2015. A) Mappa della laguna di Venezia in cui sono riportate le aree interessate dalla presenza di acque biancastre; B) Eventi di ipossia misurati in 3 stazioni della rete SAMANET (in magenta numero di ore giornaliere con valori di ossigeno disciolto minori di 3 mg/l) e aree interessate dalla presenza di acque biancastre (in nero). Le aree in grigio indicano i periodi in cui non sono disponibili i dati in situ.

2.3 Relazione tra eventi di acque biancastre e copertura di vegetazione sommersa

In Figura 3, il confronto tra la distribuzione spaziale delle aree interessate da acque biancastre e la copertura di macrofite sommerse ottenuta da satellite indica che la maggior parte degli eventi si riscontra nelle aree con vegetazione densa, in particolare macroalghe appartenenti alle specie *Ulva* spp., segnalando l'importanza di monitorare la biomassa macroalgale nel periodo tardo primaverile per evitare il verificarsi di crisi ipo-anossiche e quindi l'insorgere di condizioni critiche nel funzionamento dell'ecosistema.

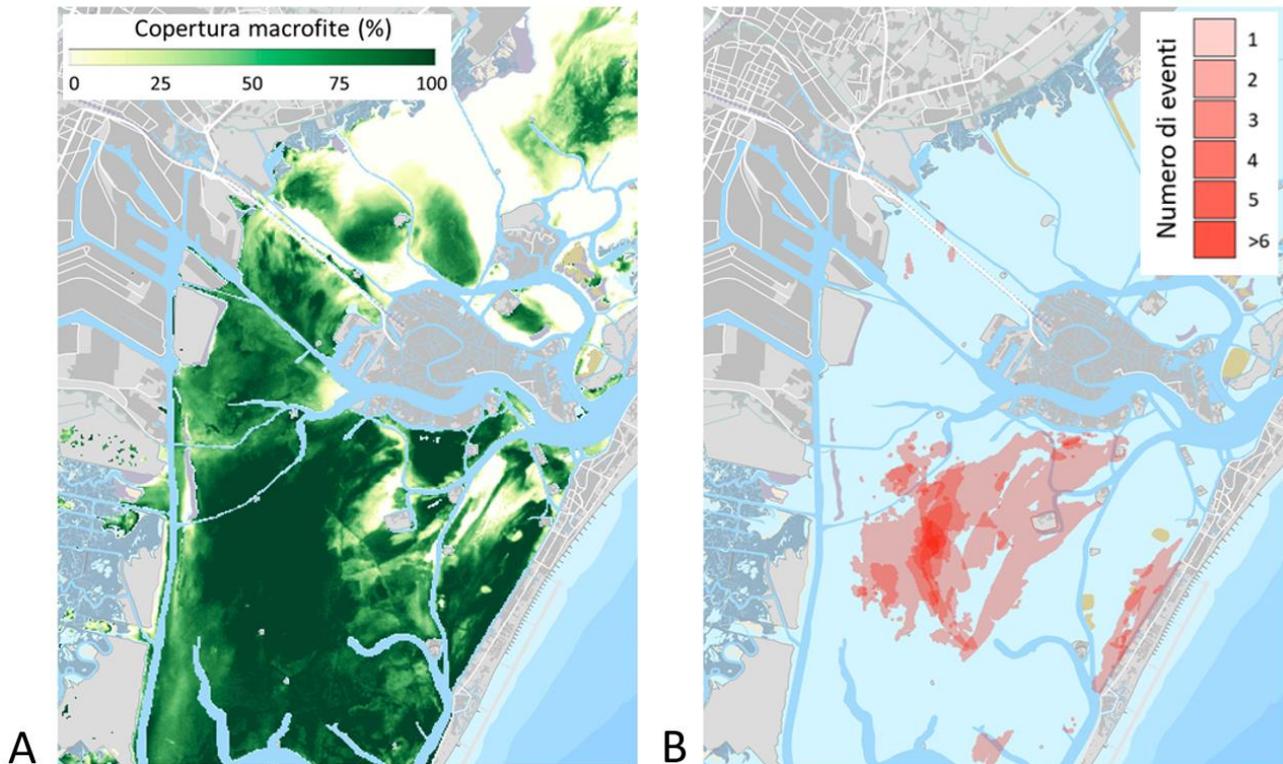


Figura 3. A) Mappa di copertura di macrofite sommersive ottenuta dall'immagine satellitare del 14 maggio 2015. B) Distribuzione spaziale di acque biancastre identificate nel periodo giugno-settembre 2015.

3. Spunti per il futuro

L'individuazione delle acque biancastre da immagini satellitari rappresenta una tecnica innovativa e a costo contenuto per la mappatura e il monitoraggio delle aree affette dalla formazione e presenza di zolfo colloidale. La metodologia può supportare i dati forniti dalle reti di monitoraggio in continuo e dalle campagne di misura, perché offre un quadro sinottico e quasi in tempo reale, con un'elevata risoluzione spaziale e temporale.

L'analisi spaziale e temporale degli eventi dovrebbe essere approfondita includendo ulteriori variabili ambientali e forzanti meteomarine, che possono derivare sia da test e misure sperimentali, sia dagli output di modelli idrodinamici ed ecologici, per investigare le condizioni della colonna d'acqua e del sedimento e gli scambi alle interfacce (acqua/sedimento e aria/acqua) e per comprendere i fattori che influenzano lo sviluppo macroalgale, in particolare delle Ulvacee. Ciò permetterà anche di evidenziare i possibili scenari e relazioni tra acque biancastre e chiusura delle barriere mobili.

Per valutare i possibili scenari e le relazioni tra eventi di acque biancastre e chiusura delle barriere mobili, le mutate condizioni idrodinamiche dovute alla regolazione dei flussi alle bocche di porto dovranno essere prese in considerazione non solo per i mesi estivi (che è il periodo in cui si verificano gli eventi), ma anche per il periodo primaverile, durante il quale si ha lo sviluppo e l'espansione della biomassa macroalgale.

Infine, la lunga serie storica di dati Landsat (disponibili dal 1972) offre un'opportunità unica per studiare i cambiamenti a lungo termine, incluse ad esempio le crisi ipertrofiche-distrofiche avvenute in laguna di Venezia negli anni '70 e '80, utili anche per l'analisi delle variazioni climatiche a scala decennale.

DESCRIZIONE ESTESA

4. Descrizione delle attività

WP1.4.1 Raccolta ed analisi di immagini da satellite di archivio

Nel corso di questo WP sono state raccolte e selezionate 58 immagini da satellite per il periodo 2013-2018, caratterizzate da anomalie di colore dell'acqua, potenzialmente riconducibili alla presenza di acque biancastre dovute al verificarsi di condizioni anossiche. Le immagini Landsat 8, disponibili a partire dal 2013, sono state scaricate da <https://earthexplorer.usgs.gov/>; le immagini Sentinel-2A e B, disponibili rispettivamente dal 2015 e dal 2017, sono state scaricate da <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>. Per poter confrontare le immagini, è stato necessario effettuare la calibrazione radiometrica e la correzione atmosferica, in modo da rimuovere gli effetti dovuti al contributo dell'atmosfera, alla geometria di illuminazione e alle caratteristiche del sensore. La correzione atmosferica è stata effettuata con il *software* ACOLITE, un processore per la correzione atmosferica specifico per ambienti acquatici, sviluppato dal *Royal Belgian Institute of Natural Sciences* (RBINS). Il dato di Riflettanza di *remote sensing* (Rrs), ottenuto dopo la correzione radiometrica e atmosferica, è stato elaborato per l'identificazione delle acque biancastre dopo un'analisi delle caratteristiche spettrali delle acque presenti in laguna di Venezia e nelle zone costiere. Rispetto agli altri *target*, le acque biancastre erano caratterizzate da alti valori di Rrs tra i 450 e 600 nm, come risultato dello *scattering* associato alla presenza di zolfo colloidale in colonna d'acqua (Figura 4).

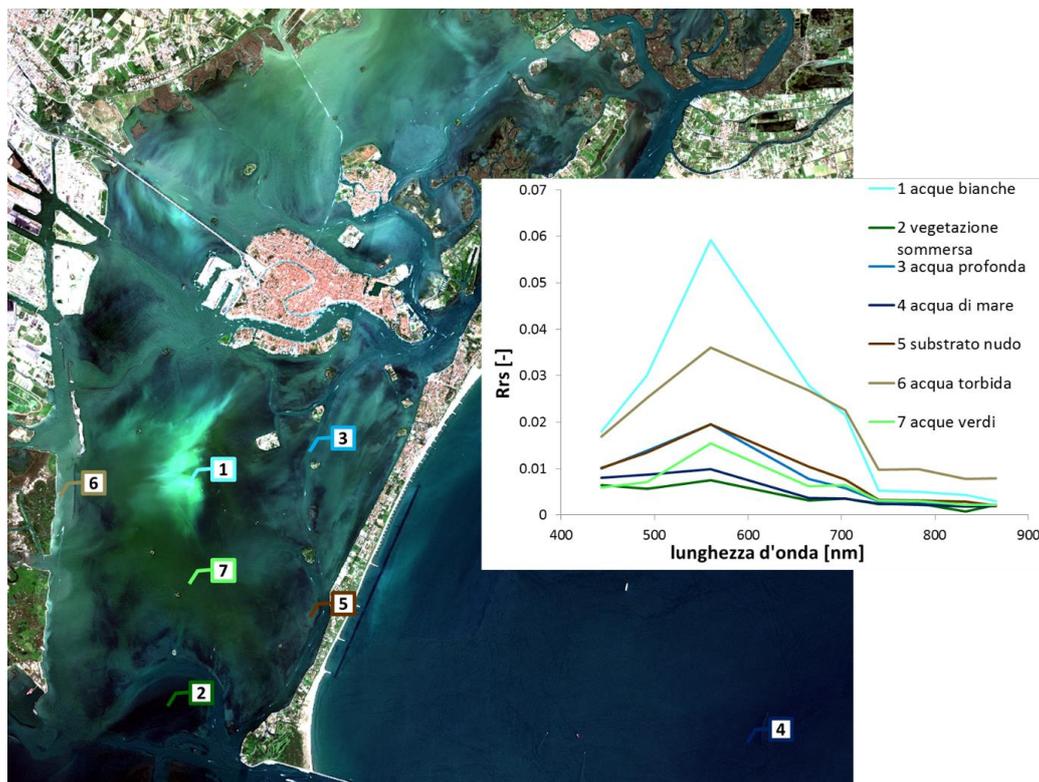


Figura 4. Sentinel-2 del 18 luglio 2016 con indicati i diversi target acquatici. Nel grafico sono riportate le curve di riflettanza di *remote sensing* dei 7 target. Le acque bianche hanno valori molto alti in tutto il *range* spettrale del visibile, permettendo di discriminare i *pixel* interessati.

A partire dall'analisi degli spettri di riflettanza, è stato quindi implementato l'algoritmo di classificazione *Blue Green Red Area* (BGRAA), per distinguere ed identificare in modo qualitativo la presenza delle acque biancastre rispetto ad altri target. Alle mappe *raster* ottenute dall'applicazione dell'algoritmo BGRAA è stata applicata una specifica scala cromatica che metteva in evidenza i valori più alti, che identificavano le aree interessate dalla presenza di acque biancastre. I risultati sono stati confrontati e validati con le immagini *true*

color (Figura 5). Le aree rilevate sono state utilizzate per determinare la posizione e l'estensione delle macchie di acque biancastre, nonché per studiarne lo sviluppo temporale e spaziale nel periodo investigato.

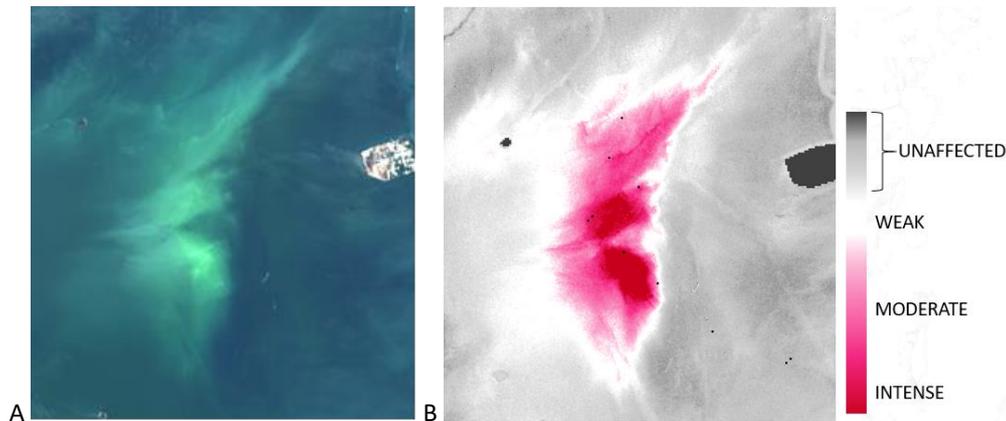


Figura 5. A) Ritaglio dell'immagine Sentinel-2 a colori reali del 18 luglio 2016, in cui sono presenti le acque bianche; B) Mappa raster corrispondente ottenuta dall'immagine applicando l'algoritmo BGRAA. I pixel colorati indicano l'area in cui i valori sono più alti e probabilmente dovuti alla presenza di zolfo colloidale. Un indice qualitativo della abbondanza di zolfo colloidale è dato dall'intensità del colore, dato che maggiore è la concentrazione di zolfo, più alto è il picco a 560 nm e maggiore è il valore ottenuto dal calcolo BGRAA.

WP1.4.2 Acquisizione ed elaborazione rapida di nuove immagini da satellite

Durante i mesi estivi del progetto, le immagini satellitari Landsat 8, Sentinel-2A e 2B sono state scaricate ed analizzate per l'identificazione delle acque biancastre, poche ore dopo l'acquisizione. L'elaborazione rapida delle immagini *true color* e delle mappe BGRAA ha permesso l'identificazione in *near real time* delle anomalie di colore dell'acqua potenzialmente riconducibili ad eventi di anossia e l'attivazione di campagne di misura per la caratterizzazione delle proprietà ottiche nelle aree interessate. Le immagini relative al periodo del progetto sono state analizzate per determinare la posizione e l'estensione delle aree interessate dalla presenza delle acque biancastre. Il *dataset* completo, che includeva le immagini di archivio e di nuova acquisizione, è stato utilizzato per lo studio della distribuzione temporale e spaziale degli eventi.

WP1.4.3 Attività di calibrazione e validazione per la caratterizzazione degli eventi di anossia

Nei mesi estivi del periodo 2019-2021 sono state effettuate 14 campagne di misura, per un totale di 82 stazioni misurate. La strategia di campionamento ha previsto sia campagne preparatorie e propedeutiche per la caratterizzazione degli eventi di anossia, sia campagne durante gli eventi di acque biancastre guidati dalle immagini da satellite dei giorni precedenti. Purtroppo nell'arco temporale del progetto non siamo riusciti ad effettuare tempestivamente le misure in corrispondenza delle acque biancastre, perché gli eventi sono stati brevi, poco frequenti e di estensione ridotta. Le campagne sono state effettuate in aree che erano state interessate dalla presenza di acque biancastre in laguna centrale e nell'area tra il canale di Tessera e l'isola di Campalto (Figura 6). In ogni stazione sono stati misurati i seguenti parametri:

- Riflettanza alla superficie R_{rs} [sr^{-1}] con lo spettroradiometro WISP-3 (Water Insight) nel range di 400-800 nm;
- Profili di Temperatura [°C], Salinità [PSU] e Torbidità con sensore SeaPoint [FTU], con sonda IDRONAUT Ocean Seven 316Plus;
- Trasparenza dell'acqua con Disco Secchi [m].

Quando la strumentazione era disponibile sono stati effettuati anche:

- Profili di Temperatura [°C], Salinità [PSU] con sonda Sea-Bird SBE 19plus, equipaggiata con sensore di Torbidità OBS 3plus [NTU], sensore di Ossigeno SBE 43 [% saturazione] e [ml/l], sensore pH/Redox SBE27;
- misure di fluorescenza e di *backscattering* con ECO Triplet (WetLabs).

Inoltre sono stati raccolti campioni d'acqua superficiali per la determinazione delle concentrazioni di solidi sospesi (TSM) [mg/l] e clorofilla [$\mu\text{g/l}$].

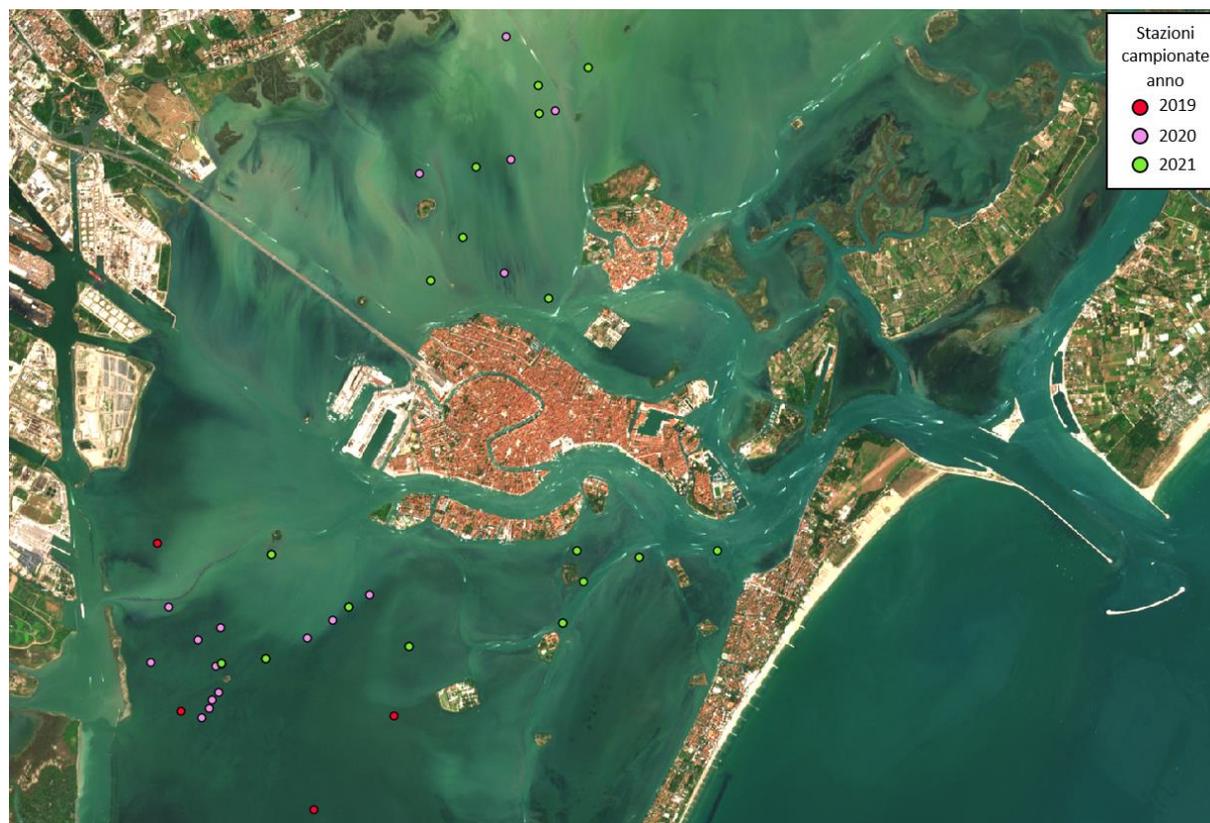


Figura 6. Stazioni effettuate durante le campagne di misura nel periodo 2019-2021. In rosso stazioni del 2019, in magenta stazioni del 2020 e in verde stazioni del 2021.

Per ovviare alla mancanza di misure in situ di proprietà ottiche inerenti (IOP) delle acque biancastre, i valori di assorbimento totale e di *backscattering* del particolato sono stati stimati a partire dalle riflettanze di *remote sensing* (Rrs), ottenute dalle immagini Sentinel-2 e Landsat 8, attraverso l'algoritmo QAA-RGB. Tutte le aree individuate dall'algoritmo BGRAA sono state suddivise in tre classi di intensità (*weak*, *moderate*, *intense*) attraverso dei valori di soglia. Per ciascuna classe sono stati estratti gli spettri di Rrs medi, per identificare le differenze spettrali tra le classi e i valori di IOP, ottenuti da QAA-RGB, per valutare il diverso comportamento ottico delle acque biancastre considerando anche altri *target* acquatici (acque torbide, vegetazione sommersa, acque profonde).

Per caratterizzare lo stato ambientale delle acque lagunari e valutare il loro andamento nel breve e medio periodo dal 2013 al 2021, sono state analizzate le serie temporali di dati in situ acquisiti dalla rete SAMANET del Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche per il Veneto, Trentino Alto Adige e Friuli Venezia Giulia (Ex Magistrato alle Acque – Venezia). Nello specifico per seguire la dinamica giornaliera dei processi di ipossia/anossia nelle aree di interesse della laguna abbiamo estratto e calcolato i valori di ossigeno disciolto (DO) in mg/l per le stazioni Ve-1 (Fusina), Ve-2 (Campalto), Ve-5 (Trezze) e li abbiamo confrontati con gli eventi di acque biancastre. Infine per definire lo stato ecologico delle aree interessate dalle acque biancastre, sono state prodotte e analizzate le mappe annuali di copertura di macrofite sommersa per il periodo tardo primaverile, derivate dalle immagini satellitari Landsat 8.

5. Risultati per attività

WP1.4.1 Raccolta ed analisi di immagini da satellite di archivio

Il presente WP ha portato alla realizzazione di due cataloghi di immagini *true color*, acquisite dai satelliti Landsat 8 e Sentinel-2A e B, e delle mappe ottenute dall'algoritmo BGRAA nel periodo 2013-2018. In ciascun catalogo sono state raccolte 58 immagini con anomalie di colore dell'acqua, potenzialmente riconducibili alla presenza di acque biancastre dovute al verificarsi di condizioni anossiche. Sono state incluse anche le immagini nelle quali non era chiaro ed evidente se le anomalie di colore dell'acqua fossero dovute alla presenza di acque biancastre oppure ad aree caratterizzate da acque torbide (ad esempio a causa di dragaggi, attività di pesca, traffico di natanti).

WP1.4.2 Acquisizione ed elaborazione rapida di nuove immagini da satellite

La mappatura delle acque biancastre con un'elevata risoluzione temporale e spaziale, utilizzando immagini da satellite, ha dimostrato di essere un metodo utile e con costi contenuti per identificare le aree interessate da questi eventi e/o per monitorarne l'evoluzione spaziale e temporale. Inoltre la disponibilità delle immagini dopo poche ore dall'acquisizione ha permesso di individuare gli eventi di acque biancastre in *near real time* e di attivare rapidamente le campagne di misura nelle aree interessate.

L'attività di analisi in *quasi real time* condotta nel periodo primaverile-estivo dal 2019 al 2021 ha permesso l'osservazione e l'identificazione delle acque biancastre nelle immagini a colori reali e nelle mappe ottenute attraverso l'applicazione dell'algoritmo denominato BGRAA. Questo ha reso possibile l'identificazione di alcuni eventi anche se, brevi, poco frequenti e di estensione ridotta guidando in ogni caso l'organizzazione delle campagne di misura nei siti di interesse.

WP1.4.3 Attività di calibrazione e validazione per la caratterizzazione degli eventi di anossia

Durante il progetto, le campagne di misura sono state effettuate nelle zone di interesse in laguna centrale e nell'area tra il canale di Tessera e l'isola di Campalto, ma non hanno catturato né la presenza di acque biancastre, né eventi di ipossia o anossia. Sono stati misurati valori relativamente bassi di saturazione di ossigeno disciolto (DO), tra il 40 e il 50%, solo in due stazioni vicine all'Isola di Sant'Angelo della Polvere, il 21 agosto 2020. La relazione tra pH e potenziale redox ha permesso di distinguere le stazioni con valori di DO più bassi: questo è probabilmente giustificato dal fatto che i processi che consumano ossigeno generalmente liberano anidride carbonica e abbassano il pH. Per gli altri dati acquisiti non si segnalano valori anomali o condizioni critiche.

Riguardo all'analisi delle IOP delle acque biancastre ottenute con l'algoritmo QAA-RGB, si osserva in Figura 7 come le 3 classi "weak", "moderate", "intense", abbiano valori simili di assorbimento totale a 560 nm (a_{560}), mentre la classe Intense ha valori più alti di *backscattering* a 665 nm (bb_{665}): questo è dovuto probabilmente ad una concentrazione più alta di zolfo colloidale in sospensione che causa una maggiore riflessione della radiazione solare. Mentre i due target vegetazione sommersa (*Vegetation*) e acque costiere (clear water) hanno valori molto bassi di bb_{665} perché le acque erano più trasparenti e caratterizzate da basse concentrazioni di solidi sospesi, le acque molto torbide (*turbid*) hanno valori più simili alle acque biancastre.

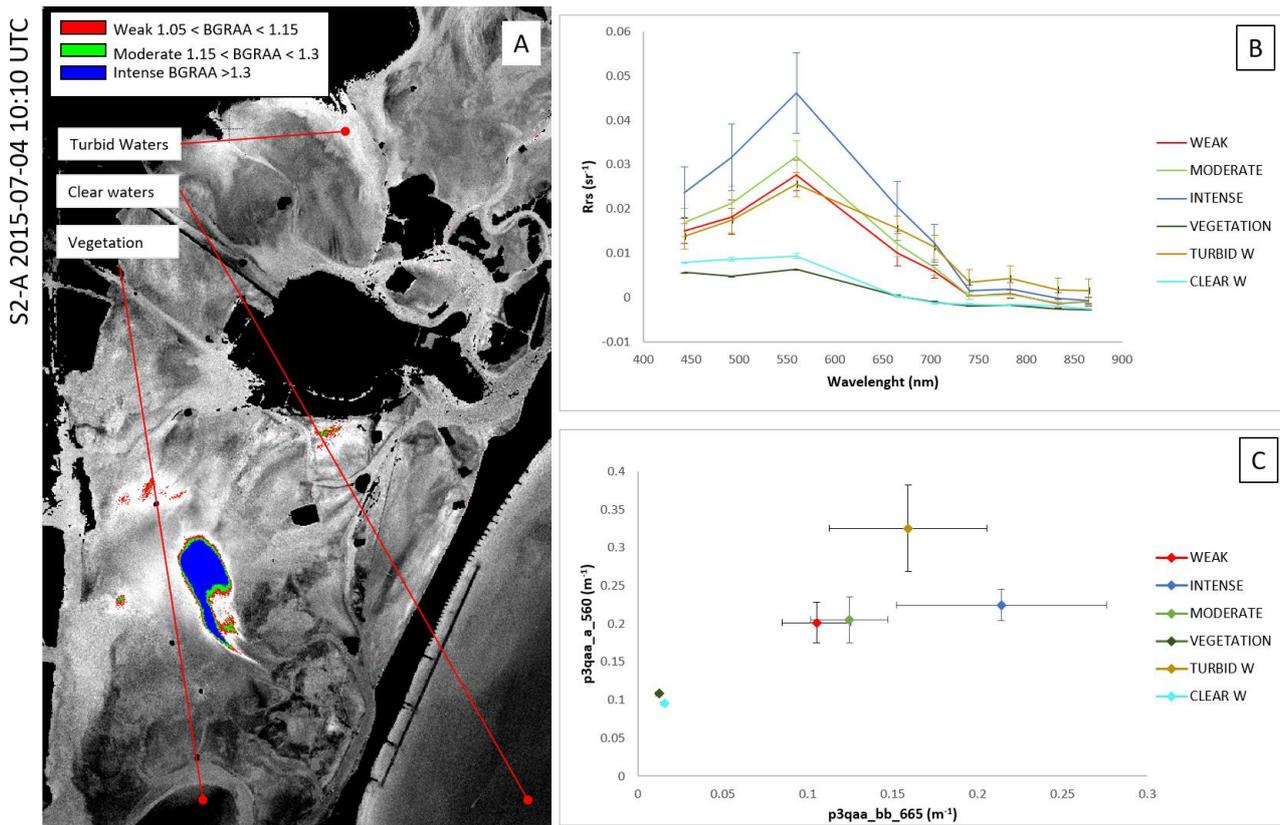


Figura 7. Immagine acquisita dal satellite Sentinel 2 in data 4 Luglio 2015: A) mappa ottenuta dall’algoritmo BGRAA nella quale sono state individuate le tre classi (*weak*, *moderate*, *intense*) riferite alla presenza di acque biancastre e derivate dall’applicazione di valori di soglia. B) firme spettrali medie e deviazioni standard delle diverse classi e per gli altri target acquatici considerati. C) *scatterplot* dei valori medi di *backscattering* a 665 nm (*bb_665*) e assorbimento totale a 560 nm (*a_560*) e deviazioni standard delle diverse classi e per gli altri target acquatici ottenuti con QAA-RGB.

La distribuzione annuale delle immagini del periodo 2013- 2021, in cui sono presenti le acque biancastre, ha evidenziato che gli eventi sono visibili soprattutto nei mesi di luglio (19 immagini) e agosto (14 immagini); tuttavia sono state osservate alcune tracce anche in 6 immagini di giugno. Nel 2014 e nel 2019 non ci sono stati eventi rilevati dalle immagini da satellite. Gli anni con un numero maggiore di eventi visibili dalle immagini da satellite sono il 2013 e il periodo 2015-2017. È importante segnalare che per il 2013 e il 2014 erano disponibili solo i dati Landsat 8 con frequenza di 7-9 giorni, mentre a partire da luglio 2015 si sono aggiunti i dati Sentinel-2A con acquisizioni ogni 3-7 giorni. Dal 2017, il lancio di Sentinel-2B con frequenza di 3-7 giorni alternata di 5 giorni rispetto a Sentinel-2A, ha portato ad una risoluzione temporale di Sentinel-2 ogni 2-3 giorni, ai quali si aggiungono i dati acquisiti da Landsat-8.

Da ciascuna mappa ottenuta con l’algoritmo BGRAA sono state individuate ed estratte le aree che corrispondono alla presenza di acque biancastre *Weak*, *Moderate* e *Intense*. Queste aree sono state riportate nella mappa della laguna e plottate come *trend* giornaliero per descrivere le dinamiche temporali e spaziali delle acque biancastre osservate da satellite in laguna di Venezia. Un esempio riferito al 2015 è riportato in Figura 8. L’analisi spaziale e temporale ha mostrato grandi variazioni interannuali nel periodo 2013-2021. In particolare, dal 2013 al 2017 (escludendo il 2014) sono stati identificati sia eventi di durata prolungata oppure brevi e ricorrenti nella stessa zona, sia eventi distinti osservabili in varie zone della laguna. Nel periodo successivo (2018-2021) ci sono stati pochi eventi con estensione limitata e di breve durata. Gli eventi con aree più estese, includendo le 3 classi *Weak*, *Moderate* e *Intense*, si sono verificati tra luglio e agosto, mentre quelli “Intense” sono stati principalmente nel mese di luglio. L’area massima totale occupata dalle acque biancastre (5.48 km²) si è verificata il 3 agosto 2013, mentre l’area massima “Intense” (2.54 km²) è stata misurata il 15 giugno 2015, seguita dal 24 luglio 2015 con 2.40 km². Sulla base degli eventi osservati, è stato

possibile distinguere un *trend* nella distribuzione spaziale delle acque biancastre nei mesi estivi: nel periodo giugno-prima metà di luglio, gli eventi si sono verificati principalmente nell'area più a nord-ovest, tra San Giuliano e il canale di Tessera, mentre tra luglio e agosto le acque biancastre sono state identificate soprattutto nell'area della laguna centrale.

La relazione tra i dati di ossigeno disciolto (DO) misurati in continuo in 3 stazioni della rete SAMANET e gli eventi di acque biancastre ha indicato che le aree identificate da satellite corrispondono o sono immediatamente successivi ai giorni in cui si sono verificati eventi di ipossia (DO < 3 mg/l) della durata di diverse ore, confermando che lo zolfo colloidale si è formato in condizioni anossiche, come riportato in letteratura. Un esempio riferito al 2015 è riportato in Figura 8. Il confronto tra la distribuzione spaziale degli eventi di acque biancastre e la copertura di macrofite sommerse ha mostrato che la maggior parte delle acque biancastre si riscontra nelle aree con vegetazione densa (cioè con copertura maggiore del 75%), in particolare con macroalghe appartenenti alle specie *Ulva* spp. Un esempio riferito al 2015 è riportato in Figura 9. Il processo di formazione delle acque biancastre è legato alla rapida degradazione della biomassa macroalgale da parte dei batteri aerobici eterotrofi, che porta a condizioni anossiche favorendo il metabolismo dei batteri anaerobici (solfato-riduttori) con produzione di solfuri, successivamente ri-ossidati a zolfo colloidale nella colonna d'acqua. La densità di copertura di Ulvacee è probabilmente il fattore più importante per il verificarsi di eventi di acque biancastre negli anni 2013-2017. Come riportato negli anni successivi, dal 2018 al 2021, le macroalghe dominanti sono cambiate da Ulvacee a Gracilariacee o altre Rodoficee. Le Gracilariaceae, ad esempio, sono molto più resistenti delle Ulvaceae alle alte temperature e difficilmente possono creare condizioni distrofiche.

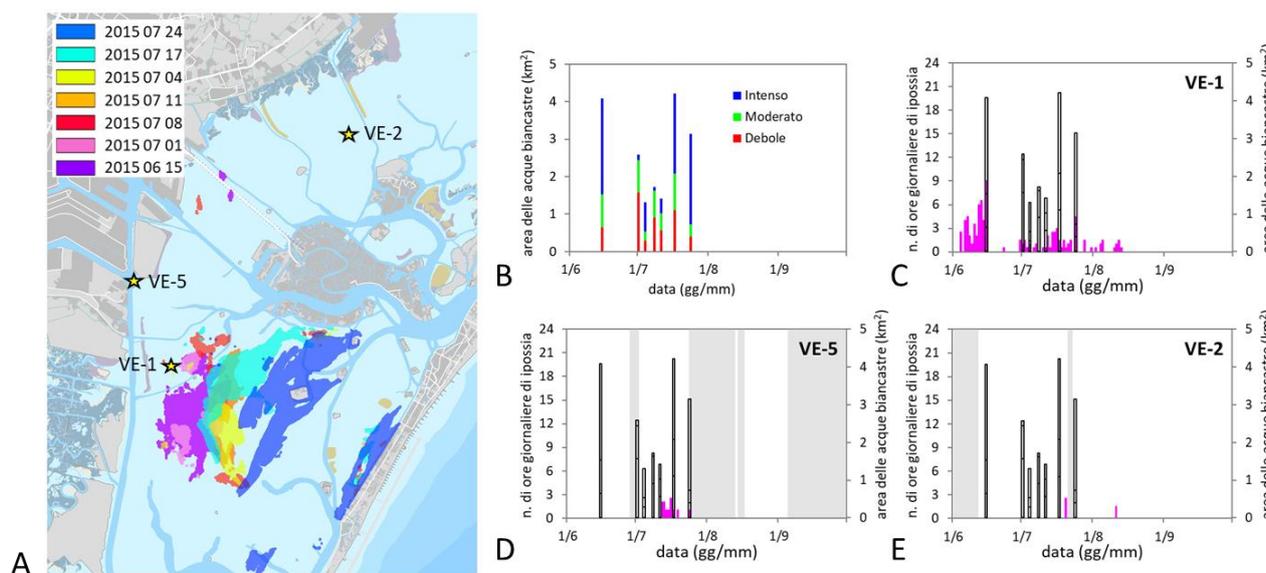


Figura 8. A) Mappa della laguna di Venezia in cui sono riportate le aree corrispondenti alla somma delle classi "Moderato" e "Intenso", individuate con l'algoritmo BGRAA. B) Distribuzione temporale delle aree delle diverse classi. C), D) e E) Eventi di ipossia misurati in 3 stazioni della rete SAMANET. In magenta è riportato il numero di ore giornaliere in cui i dati di DO sono inferiori a 3 mg/l. Le aree in grigio indicano i periodi in cui non sono disponibili i dati in situ. In nero sono riportate le aree totali di acque biancastre derivate dalle immagini. L'anno a cui si riferiscono i dati è il 2015.

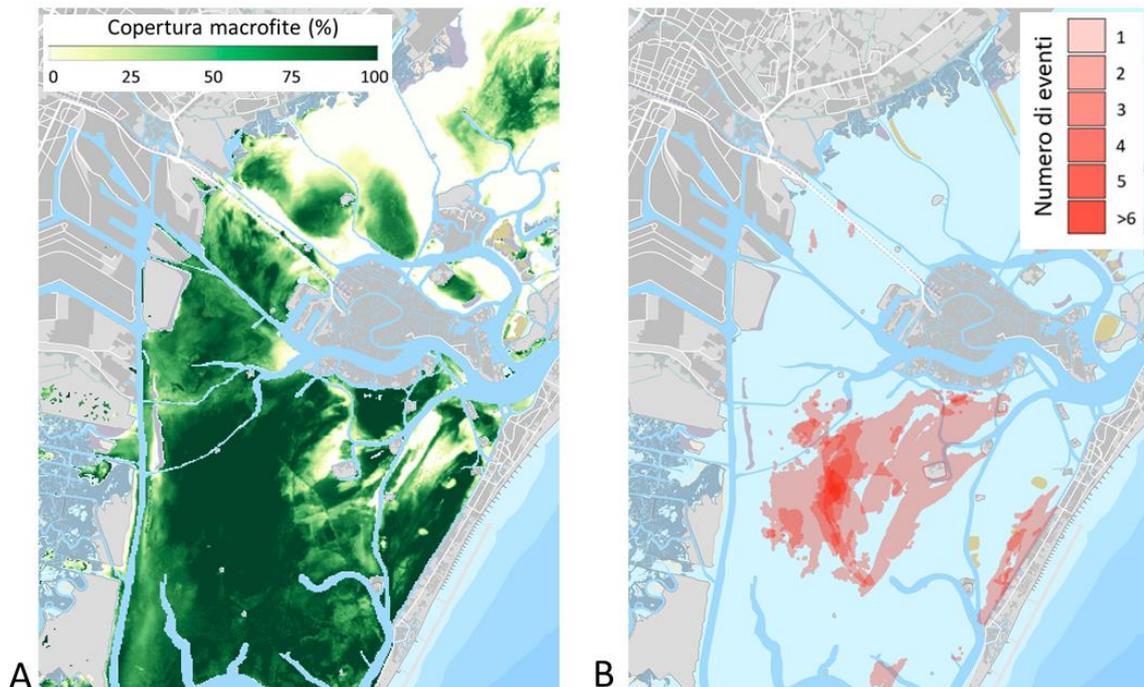


Figura 9. A) Mappa di copertura di macrofite (in percentuale) ottenuta dall'immagine Landsat 8 del 14 maggio 2015. B) Numero di eventi di acque biancastre identificati nel periodo giugno-settembre del 2015. Le aree includono le classi "Intenso" e "Moderato".

6. Obiettivi prefissati e raggiunti

L'obiettivo generale della Linea 1.4 era l'implementazione di una metodologia, basata su tecniche di *remote sensing*, per mappare le zone interessate dalla presenza di acque biancastre nelle immagini di archivio per il periodo 2013-2018 e per identificare eventi in *near real time* durante il progetto (2019-2021). Nel corso del progetto, abbiamo testato le potenzialità delle immagini satellitari Landsat 8 e Sentinel-2 per individuare e monitorare qualitativamente le acque biancastre in laguna di Venezia. L'obiettivo prefissato è stato raggiunto, ma non è stato possibile ottenere una stima quantitativa delle acque biancastre, a causa del numero limitato di eventi durante il progetto.

La formazione di zolfo colloidale in condizioni ipo-anossiche nella colonna d'acqua è un fenomeno noto, ma non era ancora stato monitorato in laguna di Venezia. Nel contesto delle sfide e degli obiettivi di Venezia2021, la mappatura delle acque biancastre derivata dalle immagini da satellite e con un'elevata risoluzione temporale e spaziale ha dimostrato di essere un metodo molto utile e con costi contenuti per identificare in modo sinottico le aree interessate da questi eventi e/o per monitorarne l'evoluzione spaziale e temporale. Le informazioni prodotte sono fondamentali perché rappresentano un nuovo dato di riferimento nel quadro conoscitivo dei processi ecologici lagunari e nella salvaguardia dei servizi ecosistemici, soprattutto considerando il possibile impatto delle acque biancastre sulla fauna acquatica.

L'analisi spaziale e temporale delle mappe ottenute dalle immagini satellitari ha rivelato che eventi multipli di acque biancastre sono stati registrati nella laguna di Venezia durante la maggior parte degli anni nel periodo 2013-2021. La durata annuale degli eventi era limitata al periodo giugno-agosto e variava da uno o pochi giorni (nel 2018 e nel 2021) a più settimane consecutive. Abbiamo osservato che gli eventi di acque biancastre si verificano soprattutto nelle aree in cui la copertura di macrofite, ottenuta dalle immagini satellitari, è più densa (cioè con copertura maggiore del 75%), in particolare dove sono abbondanti le macroalghe appartenenti alle specie *Ulva* spp. Infatti, l'eccessiva biomassa macroalgale, che viene rapidamente degradata da batteri aerobici eterotrofi, portando a condizioni anossiche che favoriscono il metabolismo dei batteri solfato-riduttori con produzione di solfuri, causando gravi crisi distrofiche. Di

conseguenza, la gestione e il monitoraggio della biomassa macroalgale nel periodo tardo primaverile è un aspetto chiave per evitare il verificarsi di crisi ipossiche/anossiche e quindi l'insorgere di condizioni critiche per l'ecosistema.

Alla luce di queste considerazioni, i risultati emersi possono supportare gli strumenti di gestione, in quanto l'operatività del MOSE potrebbe favorire le condizioni che portano alla formazione delle acque biancastre. Secondo i dati forniti dal Centro Maree, durante il periodo estivo ci sono stati solo 3 eventi con maree superiori a + 110 cm a partire dal 1872, tutti avvenuti nel mese di giugno negli ultimi 20 anni. Tuttavia, nel quadro dei cambiamenti climatici globali e dei loro effetti a scala locale, l'utilizzo del MOSE sarà sempre più frequente, con possibili conseguenze sullo stato ecologico dell'ecosistema lagunare. Per valutare i possibili scenari e le relazioni tra eventi di acque biancastre e chiusura delle barriere mobili, le mutate condizioni idrodinamiche dovute alla regolazione dei flussi alle bocche di porto dovranno essere prese in considerazione non solo per i mesi estivi (che è il periodo in cui si verificano gli eventi), ma anche per il periodo primaverile, durante il quale si ha lo sviluppo e l'espansione della biomassa macroalgale.

Gruppo di lavoro

Federica Braga, Gian Marco Scarpa, Giorgia Manfè, Giuliano Lorenzetti (CNR-ISMAR), Luca Zaggia (CNR-IGG)