



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGROALIMENTARI,  
AMBIENTALI E ANIMALI**

---

Corso di Laurea in Scienze per l'Ambiente e la Natura

Tesi di Laurea triennale

**Effetti della sommersione sul contenuto di pigmenti in *Salicornia fruticosa L.*:  
*upscaling* della risposta eco-fisiologica delle specie di barena ai cambiamenti  
globali**

Relatore:  
Dott. Francesco Boscutti

Laureando:  
Marco Bertè

Correlatori:  
Dott. ssa Dora Scarpin  
Dott. Marco Vuerich

---

ANNO ACCADEMICO 2021/2022



## Riassunto

L'aumento delle temperature globali è una delle principali cause dell'innalzamento del livello del mare, il quale porta ad un continuo incremento di eventi di sommersione e della loro durata nelle zone costiere, incluse le lagune. Le oscillazioni tidali e dunque la sommersione sono i fattori principali che caratterizzano gli ambienti di barena lagunare, influenzando su un elevato numero di fattori ambientali biotici e abiotici (apporto di nutrienti, salinità, fattori edafici). La sommersione agisce come importante filtro ecologico per la sopravvivenza e distribuzione delle specie vegetali. L'innalzamento del livello del mare rappresenta la principale minaccia per gli ambienti costieri, influenzando i numerosi servizi ecosistemici che forniscono alla società. Agli ecosistemi barenicoli è attribuita la definizione di "ecosistemi sentinella" in quanto sono in grado di fornire informazioni sulle mutazioni climatiche a scala regionale e globale. In tal senso, l'analisi e il monitoraggio della risposta della vegetazione a futuri aumenti del tasso di innalzamento del livello del mare risulta essere un'operazione fondamentale con lo scopo finale di rilevare la tendenza evolutiva di questi ecosistemi scongiurando un cambiamento irreversibile. I tratti funzionali (functional traits) della specie chiave presa in studio (*Salicornia fruticosa*) presentano un diverso comportamento nei confronti della sommersione e dei parametri dei fattori edafici. Il progresso della tecnologia con le promettenti tecnologie di telerilevamento (remote sensing) e i processi di *upscaling* hanno permesso di raggiungere oggi una estrema precisione nelle misurazioni sul terreno. La capacità di coprire da remoto vaste aree della superficie terrestre è, di fatto, un passo importante nel monitoraggio delle risposte ecosistemiche anche in ambienti dinamici e spesso difficilmente raggiungibili come quelli lagunari. Attraverso questo lavoro si propone di valutare la capacità di rilevazione delle modificazioni funzionali della specie chiave *Salicornia fruticosa* con dati di telerilevamento multispettrale ad alta risoluzione. La raccolta dei dati è avvenuta su nove barene situate nella Laguna di Grado in aree caratterizzate da diversi livelli di sommersione. I campioni sono stati sottoposti ad analisi dei pigmenti fotosintetici (clorofilla A e B, carotenoidi, feofitina) e non fotosintetici (betacianine, flavonoidi). I pigmenti in questo elaborato svolgono la funzione di indicatori dello stress da sommersione. Seguendo protocolli di estrazione dei pigmenti sono stati rilevati i valori di assorbanza tramite spettroscopia e analisi della fluorescenza. In conclusione, con questo studio è stato possibile sottolineare l'efficacia delle tecnologie di remote sensing e l'applicazione dell'*upscaling* come importante strumento di studio della complessità e variabilità ambientale in ambienti barenicoli come 'ecosistemi sentinella' ed ha evidenziato l'opportunità di utilizzo dei medesimi strumenti su un ampio range di sistemi ecosistemici.

**Parole chiave:** sommersione; pigmenti; barene; remote-sensing; *upscaling*.

# Sommario

1. INTRODUZIONE.....	4
1.1 Valore e fragilità ecologica degli ambienti costieri e lagune .....	4
1.2 Stress da sommersione di acqua salina.....	6
1.3 Barene: ecosistemi sentinella .....	8
1.4 Pigmenti come risposta allo stress in particolare di sommersione .....	10
1.5 Telerilevamento e <i>upscaling</i> nuovi metodi di monitoraggio in ecologia .....	12
2. SCOPO DEL LAVORO .....	15
3. MATERIALI E METODI .....	16
3.1 Area di studio .....	16
3.2 Inquadramento climatico .....	18
3.3 Inquadramento geologico .....	18
3.4 Barene: laguna di Grado e Marano, aspetti vegetazionali .....	19
3.5 Specie alofila chiave: <i>Salicornia fruticosa</i> .....	21
3.6 Disegno sperimentale .....	22
3.7 Raccolta dati .....	23
3.7.1 Quantificazione della sommersione.....	23
3.7.2 Acquisizione ed elaborazione immagini multispettrali .....	24
3.7.3 Raccolta campioni vegetali e analisi dei tratti funzionali ( <i>functional traits</i> ).....	27
3.7.4 Caratterizzazione granulometrica dei sedimenti.....	30
3.7.5 Analisi statistica.....	31
4. RISULTATI.....	33
4.1 Risposta delle comunità vegetali di barena al gradiente di sommersione e alla granulometria del substrato.....	33
4.2 Risposta di <i>Salicornia fruticosa</i> al gradiente di sommersione e alla granulometria del substrato .....	33

4.3 Upscaling della risposta funzionale della comunità vegetale e di <i>S. fruticosa</i> con indici multispettrali da telerilevamento .....	39
5. DISCUSSIONE .....	42
5.1 Risposta della comunità vegetale ai gradienti di sommersione e granulometria del suolo .....	42
5.2 Risposta della specie chiave <i>S. fruticosa</i> ai gradienti di sommersione e granulometria del suolo .....	43
5.2.1 Crescita della pianta.....	43
5.2.2 Fisiologia della pianta.....	45
5.3 Prospettiva dell'upscaling .....	45
6. CONCLUSIONI .....	48
7. BIBLIOGRAFIA .....	51

# 1.INTRODUZIONE

## 1.1 Valore e fragilità ecologica degli ambienti costieri e lagune

Gli ambienti costieri, ecosistemi situati lungo i margini continentali dove la terra incontra il mare, comprendono una molteplicità di habitat marini e di transizione alle terre emerse. Barriere coralline, praterie di fanerogame, foreste di alghe e di mangrovie, saline, estuari e lagune sono alcuni degli ambienti costieri che forniscono all'uomo numerosi servizi ecosistemici come il sequestro del carbonio, la regolazione del ciclo di elementi e nutrienti, l'acquacoltura, la produzione di fertilizzanti, farmaceutica, cosmetica, materiali di costruzione e servizi ricreativi. Gli ecosistemi costieri sono, pertanto, ambienti altamente produttivi e dinamici. Questi sistemi vengono considerati come dei regolatori dei flussi dei nutrienti, dei processi biologici, chimici ed edafici e delle loro trasformazioni. Svolgono la funzione di elaborare in maniera efficace le emissioni antropiche della terra prima che raggiungano il mare aperto. Ciononostante, i sistemi di costa sono sottoposti a grandi cambiamenti e sono minacciati da continue pressioni antropiche come l'eutrofizzazione, la diffusione di specie aliene, la pesca estensiva e il cambiamento climatico. Queste modifiche dell'ambiente originale causano alterazioni alle funzioni ecologiche, pertanto gli ambienti costieri necessitano di un'attenzione adeguata e di obiettivi con lo scopo conservare i mari e le loro risorse per uno sviluppo sostenibile. Il D. Lgs.152/2006 definisce, riprendendo quanto indicato dalla Direttiva 2000/60, le acque di transizione come "corpi idrici superficiali in prossimità di una foce di un fiume, che sono parzialmente di natura salina a causa della loro vicinanza alle acque costiere, ma sostanzialmente influenzati dai flussi di acqua dolce" (ARPAV 2019).

Le zone di transizione sono ambienti naturali nei quali avviene la mescolanza delle acque dolci provenienti dall'entroterra, con l'acqua di mare. Le lagune costiere sono catalogate nelle zone di transizione caratterizzate da una notevole ricchezza naturalistica, ecologica, socioeconomica e paesaggistica; sono corpi idrici interni, spesso orientati parallelamente alla costa. Questi ambienti sono in parte separati dal mare da un cordone di natura sedimentaria e che comunicano con esso in maniera intermittente attraverso una o più insenature chiamate bocche lagunari e hanno una batimetria che raramente supera qualche metro (Kjerfve 1994). Le lagune rappresentano per molte specie un habitat adatto alla sopravvivenza, per alcune di esse una fonte essenziale di nutrienti. Tali caratteristiche hanno reso tali aree di interesse produttivo per l'uomo per attività come caccia, pesca ed allevamento (Lenzi 2021). Gli ambienti lagunari subiscono un'importante influenza dai corpi fluviali, sono continuamente sottoposti a fenomeni di stress. Le principali fonti di stress sono le maree e la sommersione, il bilancio delle precipitazioni e i fenomeni di evaporazione. Ad ogni tipologia di

disturbo rispondono in maniera differente. Gli equilibri idrici e salini, la qualità dell'acqua lagunare e l'eutrofizzazione dipendono in modo critico dalla circolazione lagunare, dalla dispersione di sale e materiale, dallo scambio d'acqua attraverso i canali marini e dai tempi di ricambio, residenza o scarico (Kjerfve 1994). Per la pianificazione e l'attuazione di strategie di tutela e di gestione delle lagune costiere, è pertanto importante lo studio e la comprensione delle dinamiche ecologiche, chimiche, fisiche e geologiche.

Le lagune hanno una profondità della colonna d'acqua che raramente supera alcuni metri (Carrasco, Ferreira, e Roelvink 2016). La loro dimensione può variare notevolmente e rappresentano il 13% di tutte le linee di costa presenti sul Pianeta, ne sono state segnalate quasi 32.000. Di questa stima percentuale gli ambienti lagunari sono stati rilevati in proporzioni del 17,6% per il Nord America, 12,2% per il Sud America, 5,3% per l'Europa, 17,9% per l'Africa, 13,8% per l'Asia e 11,4% per l'Australia (Barnes 1980).

Gli ambienti di laguna costiera rappresentano gli ecosistemi più produttivi della Terra. Le dimensioni della laguna, la numerosità e l'abbondanza di fattori che favoriscono la pesca, rendono gli ambienti lagunari un habitat di notevole rilievo per l'uomo (Barnes, 1980) e particolarmente ideali per l'acquacoltura, motivo per il quale sono sistemi sottoposti a continue attività umane e quindi ad elevato stress antropico (Kjerfve, 1994).

Dal punto di vista fisico gli ambienti lagunari sono caratterizzati da un ampio range di caratteristiche geomorfologiche e idrologiche, sagomati da fattori climatici, maree, influenze dai corsi fluviali (Cingano 2021) e dalla presenza di numerose zone di transizione, tra le quali; il passaggio dalla terraferma all'acqua, dall'acqua ai depositi sedimentari, dalle acque salmastre ad acque dolci e dalle acque lagunari all'acqua del mare aperto. Ognuna di queste zone di transizione è sottoposta a gradienti fisici che li rende sistemi dinamici e caratterizzati da continui disturbi e fluttuazioni ambientali. (Barnes, 1980; Cingano, 2021). Le morfologie caratteristiche degli ambienti di laguna dell'alto Adriatico vengono raggruppate in tre classi in base alla loro posizione rispetto al livello delle maree: barene, isole, cordoni litorali e la costa interna della laguna situate sopra il livello medio delle alte maree; canali principali, ghebbi, bocche lagunari, valli da pesca posizionate sotto il livello medio delle basse maree; piane di marea, morfologie situate tra il livello medio delle basse maree e quello delle alte maree (Moro 2019).

Non esiste una vera definizione di regione costiera. Alcuni autori l'hanno definita "quella parte di terra maggiormente interessata dalla sua vicinanza al mare e quella parte dell'oceano maggiormente interessata dalla sua vicinanza alla terraferma". Poiché le zone di costa sono suddivise in base a caratteristiche fisiche piuttosto che biologiche, includono un ampio spettro di regioni costiere terrestri, intertidali, bentoniche e pelagiche. Ambienti tra di loro diversi e altamente dinamici spesso

coesistono, pertanto è difficile identificare posizioni ed estensioni esatte o delineare netti confini tra di loro (Burke et al. 2001). I fondali lagunari sono quasi totalmente costituiti dalle piane di marea, emergendo solo durante i periodi di bassa marea. La costa lagunare che si affaccia verso la terraferma è costituita dall'originaria pianura alluvionale, mentre quella prossima al mare aperto è solitamente costituita da materiale che, depositatosi con l'azione del vento, è reso stabile dalla vegetazione presente. Entrambe le coste sono conformate dall'azione delle maree e sono interessate da canali stretti e tortuosi, detti i "ghebbi" (Lenzi, 2021).

Il loro alto valore ecologico è stato riconosciuto dalla Legislazione europea inserendo i sistemi lagunari all'interno della Direttiva Habitat della Rete Natura 2000 (Loureiro, Newton, e Icely 2006). Così la Direttiva Quadro sulle acque (2000/60/CE) classifica gli ambienti lagunari di costa come "acque di transizione" che li definisce "corpi idrici superficiali in prossimità delle foci dei fiumi che hanno un carattere parzialmente salino a causa della loro vicinanza alle acque costiere, ma che sono sostanzialmente influenzati dai flussi d'acqua dolce" (Direttiva 2000/60/CE).

## **1.2 Stress da sommersione di acqua salina**

Il tasso di innalzamento del livello del mare è in continua crescita. Dalla seconda metà dell'Ottocento il livello medio globale è in continuo aumento. Durante il Novecento è stato registrato un tasso di innalzamento del livello del mare di 14-17 centimetri (De Lucia et al., 2021). Secondo le proiezioni climatiche dell'IPCC (2001, 2007, 2014) del 5° Rapporto di Valutazione (*5th Assessment Report*, AR5) in uno scenario di emissioni elevate si prevede un aumento globale di 52–98 cm entro la fine di questo secolo (Pellegrini et al. 2022)(Carrasco et al., 2016), rappresentante una seria minaccia per la sopravvivenza di molte città costiere. La causa principale dell'innalzamento del livello del mare che vediamo oggi è il riscaldamento globale (De Lucia et al., 2021). Il continuo aumento delle temperature causa lo scioglimento delle masse glaciali nell'Artico e in Antartide. Inoltre, un ulteriore problema che causa la sommersione della linea di costa è il fenomeno della subsidenza (De Lucia et al., 2021), cioè l'abbassamento del suolo che esaspera l'effetto dell'aumento del livello del mare in alcune zone più che in altre.

L'aumento del livello del mare è fonte di grossi cambiamenti per gli ambienti di transizione agendo sul livello di stress ambientale, con particolare riguardo a quello da sommersione.

Gli ambienti di laguna costiera, aree modellate dalle interazioni tra la terraferma e il mare, sono considerati come un habitat modello per lo studio delle caratteristiche di acclimatamento e delle interazioni tra le varie specie vegetali in risposta a stress abiotici grazie alla bassa ricchezza di specie che li caratterizza e per la loro notevole capacità di risposta ai disturbi biotici ed abiotici (Pellegrini

et al., 2022). Essi costituiscono un ottimo esempio di ambienti in cui vari fattori di stress agiscono sulle comunità locali (Veldhuis et al. 2019). Nelle lagune costiere la sommersione varia in intensità e durata in funzioni delle condizioni di marea, dell'altitudine e della micro-morfologia variabile delle diverse barene (Elisa Pellegrini et al. 2018a). La sommersione di acqua salina è un fattore abiotico determinante in quanto regola i processi e le condizioni chiave per la sopravvivenza e distribuzione della vegetazione e quindi, per la dinamica dell'intero ambiente barenicolo (Lan et al. 2021). La composizione delle specie vegetali segue un tipico schema di zonazione lungo il gradiente di elevazione ((Eleuterius e Eleuterius 1979); (Olf, Bakker, e Fresco 1988); (Brewer, Levine, e Bertness 1997) la quale determina la frequenza e la durata delle inondazioni: le zone basse intertidali della laguna vengono allagate quotidianamente mentre le zone alte intertidali si allagano solo poche volte all'anno (Veldhuis et al. 2019).

Negli ambienti di barena i fattori edafici, il ristagno idrico, il potenziale redox, il pH, la salinità e la disponibilità dei nutrienti dipendono dalla sommersione ((Bockelmann et al. 2002); (Cott et al. 2013)(Pennings e Callaway 1992)). L'alternanza dei periodi di alta marea e di sommersione porta alla formazione di un'ampia variabilità delle condizioni del suolo dovute all'apporto di salinità ed all'ipossia nel suolo. Come conseguenza si possono avere effetti sul potenziale redox del suolo (il flusso di O<sub>2</sub> nel suolo saturo d'acqua è 320000 volte minore rispetto alle condizioni normali) (Cott et al. 2013) e di sostanze potenzialmente tossiche e allo stato ridotto (Cingano, 2021). La disponibilità di ossigeno è più bassa nella zona bassa intertidale, poiché è inondata più spesso, e aumenta gradualmente verso la zona alta intertidale. I meristemi apicali della radice soffrono di carenza di ossigeno (Veldhuis et al., 2019), questo implica che in ambienti anossici la risposta allo stress sia più elevata. Il grado di salinità è più alto nella zona bassa intertidale e diminuisce verso la zona alta intertidale. Le piante hanno sviluppato diversi adattamenti per far fronte a salinità elevate, ma la maggior parte di questi sono piuttosto dispendiosi dal punto di vista energetico (Veldhuis et al., 2019). Nonostante ciò, esistono piante che si adattano perfettamente all'ambiente barenicolo. Le alofite sono una categoria di piante capaci di sopravvivere e riprodursi in ambienti salini. Convenzionalmente, si definisce alofita qualsiasi pianta capace di crescere su suoli con salinità maggiore di 20 mS/cm. Gran parte delle alofite possiede meccanismi cellulari negli apparati radicali capaci di filtrare l'acqua impedendone l'assorbimento dei sali nei tessuti della pianta. Una loro peculiarità è che molte specie producono più biomassa in presenza di elevati livelli di salinità. Un'ulteriore caratteristica delle piante acquatiche è la produzione di etilene come strategia di fuga. Quest'ultimo, un gas idrocarburico saturo (alchene), è il primo gas noto ad agire come ormone naturale. Esso stimola o regola la maturazione dei frutti, l'apertura dei fiori, l'abscissione (perdita) delle foglie e, nelle specie acquatiche, svolge la

funzione di ormone per la “strategia di fuga” dalla sommersione favorendo un rapido allungamento di fusti o foglie (Yang et al. 1984).

Le risposte all’aumento dello stress da sommersione da parte delle piante rappresentano un termine di riferimento importante per comprendere la resilienza ecosistemica delle barene, data l’attitudine della vegetazione di modificare l’ambiente fisico e creare nuovi scenari per il monitoraggio a diverse scale di un ecosistema gravemente minacciato e in rapido cambiamento (Cingano, 2021).

### **1.3 Barene: ecosistemi sentinella**

Le barene sono isole che si formano a causa di attività sedimentaria in zone in cui, masse d’acqua, provenienti da due foci lagunari tra loro vicine, convergono. Pertanto, costituiscono una sorta di spartiacque lagunare. Le barene (*salt marshes*), vengono definite come corpi sedimentari composti da materiali fini (argilla e silt), trasportati dalle correnti e stabilizzati dalla vegetazione alofita, tipica delle aree intertidali. Un’ulteriore efficace definizione viene data da Bonometto e collaboratori (2019) che le identifica come veri e propri fondali lagunari corrispondenti alla fascia intertidale superiore, nei quali i caratteri morfologici, strutturali e funzionali sono condizionati dalle variabili legate alla sommersione periodica (Bonometto et al. 2019). A livello geomorfologico, le barene rappresentano una tra le forme più diffuse dei bacini di marea presenti lungo le coste a bassa energia. Questi ambienti sono caratterizzati da continue fluttuazioni dell’azione della marea, che rappresentano il principale fattore di controllo del regime sedimentario. Per questo motivo ciò che contraddistingue l’ambiente di barena è una forte dinamicità. Esse coprono vaste aree di ambienti di estuario e delta a latitudini medio-alte e ospitano diversi tipi di vegetazione, e mostrano anche diversi tassi di sommersione e rilascio di sedimenti sospesi (Carrasco, Ferreira, e Roelvink 2016). Sono habitat per numerosi organismi, molti dei quali si sono adattati in modo unico a condizioni di stress, offrendo importanti informazioni per la paleoecologia, icnologia e tutela ambientale (Davis 2012). La sommersione, lo stress da acqua salata e il conseguente sviluppo di specie alofile, sono quindi le condizioni principali per lo sviluppo di una barena. La stabilizzazione della struttura della barena è il ruolo principale della vegetazione. Fusti e foglie delle piante hanno la funzione di rallentare la propagazione del flusso di marea e la velocità dell’avanzamento d’onda e inoltre favoriscono la cattura e la sedimentazione del materiale sospeso. Le radici rivestono un ruolo fondamentale nel trattenimento del sedimento, ne impediscono il ritorno in sospensione e quindi l’erosione. Le barene, dunque, svolgono un ruolo importante per la prevenzione dell’erosione costiera e per contrastare eventi di inondazione, poiché in grado di dissipare efficacemente l’energia delle onde del vento e delle maree (Tonelli, Fagherazzi, e Petti 2010).

Il tasso di sommersione relativo all'innalzamento del livello del mare, il regime delle maree, il moto ondoso, l'azione eolica, l'apporto di sedimenti e lo sviluppo di una copertura vegetale sono fattori determinanti per la loro evoluzione (Tonelli, Fagherazzi, e Petti 2010).

Le barene sono raramente stabili per lunghi periodi e la loro morfologia cambia in maniera considerevole nel tempo. Esse sono zonizzate in base alla loro posizione tidale. La zona intertidale alta viene sommersa dall'acqua salata solo durante l'alta marea e rimane asciutta per lunghi periodi. La zona intertidale bassa è sottoposta a sommersione continua, tranne in periodi di maree eccezionalmente basse. La zona intertidale media ha caratteristiche intermedie tra la zona intertidale alta e la zona intertidale bassa. Molte variabili influenzano la distribuzione di queste zone, ma il fattore principale è la quantità di area soggetta a sommersione regolata dalla marea. Oltre a ciò, la morfologia delle barene è un prodotto della topografia, dell'intervallo di marea e della lunghezza o durata del processo di sedimentazione, nonché la stabilità della zona costiera (Fox e Davis 1978).

Recentemente agli ecosistemi costieri come le mangrovie, le praterie di fanerogame e così pure le barene, è stato attribuito il ruolo di essere importanti depositi di carbonio, avendo capacità di sequestro del carbonio a tassi notevolmente più elevati rispetto alle foreste terrestri per unità di superficie (Bertram et al. 2021). Così nel 2009 Nelleman ha coniato il termine di "*blue carbon*", indicando il carbonio sequestrato dagli ecosistemi costieri vegetati. Questi ambienti vengono definiti "*Blue Carbon Ecosystems*" (BCE) (Nellemann e Corcoran 2009).

L'IPCC, il principale organismo internazionale per la valutazione dei cambiamenti climatici, nell'ultimo decennio ha preso in esame la valutazione del pericolo dell'innalzamento del livello del mare a scala globale. Il risultato dello studio ha rafforzato l'ipotesi degli imminenti eventi di sommersione, inondazione ed erosione (perdita di costa) dei sistemi di costa e delle zone pianeggianti. Un gran numero di studi ((Siegert et al. 2020); (F. Antonioli et al. 2017); (Gehrels 2010)) ha confermato questa teoria e addirittura ipotizza scenari ancor più allarmanti di quelli proposti dall'IPCC. Le prime aree colpite da questi eventi di sommersione ed erosione saranno senz'altro i sistemi di costa. In uno studio condotto da Fontolan nel 2012, è stata osservata una forte riduzione della superficie delle barene, con un progressivo ritiro dei margini fangosi e un aumento dell'ampiezza dei bacini d'acqua salmastra (Fontolan et al. 2012). Oltre a questi cambiamenti è stata osservata una perdita della vegetazione bassa, sostituita da specie di taglia medio-alta. Una possibile motivazione è insita nella componente naturale dell'evoluzione della morfologia lagunare, che essendo un sistema dinamico sottoposto all'interazione del sistema marino e del sistema fluviale, si ha un continuo apporto di sedimento e dunque una conseguente erosione. Inoltre, i fattori a livello

locale legati ad eventi di subsidenza ed a scala globale all'eustatismo contribuiscono alla continua trasformazione di questi ambienti. Tuttavia, l'impatto dell'innalzamento del livello dei mari, legati al cambiamento climatico, ne accelera notevolmente i processi naturali. In uno studio, nel quale sono stati valutati gli scenari possibili previsti per la fine del secolo (2100) svolto da Antonioli et al. (2017), è stato previsto che sono ben 33 le zone di costa italiane che diventeranno ad elevato rischio di inondazione e che subiranno un aumento significativo del tasso di erosione. Quanto appena detto è stato esaminato da Reed nel 1990, in una sua pubblicazione ha determinato che la risposta delle morfologie delle barene all'innalzamento del mare dipenderà dalla loro attitudine a mantenere l'elevazione (Reed 1990). L'elevazione delle barene dipende dal tasso di apporto di sedimenti dovuto all'azione dei fiumi e quindi: zone nelle quali il tasso di sedimentazione è superiore a quello dell'innalzamento del livello del mare, avranno un bilancio positivo; nel caso contrario, zone con tasso di apporto sedimenti inferiore all'aumento del livello del mare, saranno soggette a processi erosivi e dunque le inondazioni saranno inevitabili (Moro, 2019).

## **1.4 Pigmenti come risposta allo stress in particolare di sommersione**

Numerosi studi si sono concentrati sulla valutazione della capacità dei pigmenti vegetali di fornire una risposta metabolica alle condizioni di stress ((Aghaleh et al. 2009); (Akcin e Yalcin 2016); (Zhou et al. 2021); Taibi et al., 2016). Di recente, gli effetti del *waterlogging* (ristagno idrico), condizioni di ipossia e anossia causate dalla sommersione di acqua salina sulle concentrazioni dei pigmenti sono stati studiati in maniera approfondita.

È risultato che livelli di stress salino possono indurre mutazioni nei processi fisiologici, biochimici e metabolici sia a livello cellulare che a livello di individuo e comunità (Akcin e Yalcin 2016). Secondo uno studio effettuato da Sudhir e Murthy (2004), lo stress salino causa una riduzione nella crescita e nella produttività della pianta andando a disturbare processi fisiologici, soprattutto la fotosintesi (Sudhir e Murthy 2004). L'accumulo di iodio a livello intracellulare destabilizza il rapporto potassio-sodio (K:Na), inibendo i processi bioenergetici della fotosintesi. Lo stress salino agisce modificando molti aspetti fisiologici nelle piante, come ad esempio un aumento del tasso di respirazione, modifiche nella crescita, nella distribuzione minerale, causa instabilità nelle membrane cellulari e di conseguenza diminuisce l'efficienza della fotosintesi. Un altro effetto notevole sul metabolismo vegetale causato da eccessiva salinità è un'inibizione da parte delle funzioni osmotiche radicali che causerebbe (Yildirim, Turan, e Guvenc 2008) drastiche riduzioni di crescita.

Le specie alofile, alofite, sono conosciute per la loro caratteristica capacità di adattarsi a condizioni di stress tipico di ambienti salini. Sono piante che offrono un'ottima opportunità per lo studio dei

meccanismi per la difesa dallo stress da sommersione di acqua salina. Spesso le condizioni di stress causano danni a livello ossidativo nelle piante (Aghaleh et al. 2009). Le alofite sono piante che alterano il proprio metabolismo come risposta alle condizioni di stress. In risposta alle condizioni di eccessiva salinità, le piante, hanno sviluppato una serie di sistemi enzimatici (perossidasi, catalasi) e non enzimatici (carotenoidi, flavonoidi) di detossificazione per limitare i danni da ossidazione (Taibi et al., 2016), come ad esempio l'accumulo di carotenoidi, pigmenti fotosintetizzanti, coinvolti nella risposta dei meccanismi di difesa da eventi ossidativi.

Studiare i meccanismi fisiologici e biochimici è fondamentale per la comprensione delle problematiche causate dallo stress da sommersione di acqua salata. In condizioni di sommersione prolungata, le attività degli enzimi legati alla fotosintesi vengono inibite. Diminuisce la capacità di sintesi della clorofilla (Chl) nelle foglie portandole a senescenza, ingiallimento e desquamazione. Viene bloccata la formazione di nuove foglie con un conseguente calo del tasso fotosintetico, portando infine alla morte delle piante (Voeselek et al. 2006).

È apparso in recenti studi sulle colture del riso, che oltre allo stress da anossia dato dalla sommersione, le piante subiscono un ulteriore danno da stress nel periodo immediatamente successivo. La riossigenazione è stata riconosciuta come uno stress abiotico strettamente legato allo stress da sommersione (Fukao et al. 2019). Sempre da questo studio è apparso che piante di riso riemerse dopo un periodo di 7 giorni di inondazioni, hanno espresso danni a livello ossidativo, accumulando anione superossido ( $H_2O_2$ ) nelle foglie e una conseguente disidratazione. La sommersione, dunque causerebbe oltre allo stress da anossia, un ulteriore danno da riossigenazione e da disidratazione. L'inibizione della respirazione radicale e l'accumulo di sostanze tossiche durante eventi di *waterlogging*, hanno effetti non solo sulla crescita, ma anche sulla riproduzione ed eventualmente comporterebbe gravi perdite in produzione e fallimento dei raccolti. In combinazione con alti livelli di salinità, è quindi una problematica da non sottovalutare. Lo stress causato da elevate quantità di sale, causa diminuzione dell'assorbimento di anidride carbonica  $CO_2$  (Yildirim, Turan, e Guvenc 2008) e di conseguenza (Akcin e Yalcin 2016) cala anche la capacità di fissazione della  $CO_2$ . Akcin e Yalcin (2016) hanno osservato che in due specie alofile, *Salicornia prostrata* e *Sueda prostrata*, parallelamente ad un incremento di salinità c'è stata una considerevole diminuzione in contenuto di clorofilla e carotenoidi in entrambe le specie. Nella specie *Salicornia prostrata* il livello dei pigmenti fotosintetici era ancora inferiore rispetto alla specie *Sueda prostrata*. Un'osservazione data da uno studio condotto da Ribeiro et al. (2011) ha aggiunto che oltre ad avere un calo di pigmenti fotosintetici, vi è stato un incremento nella sintesi di betacianine e nell'attività di enzimi antiossidanti nelle foglie e nelle radici (Ribeiro 2011).

Le betacianine sono pigmenti azotati idrosolubili facenti parte delle betalaine. Sono presenti solo in certe specie dell'ordine delle *Caryophyllales*, nel quale rappresentano pigmenti sostitutivi delle antocianine (Zhou et al. 2021). Sono ampiamente utilizzate come additivi alimentari e farmaceutici grazie alla loro natura antiossidante e alla comprovata assenza di sostanze tossiche (Ribeiro 2011). Vari studi condotti per migliorarne la produzione e dunque l'estrazione, hanno evidenziato che a sollecitarne la produzione sono proprio le condizioni di stress. Altri studi condotti da Zhou et al. (2021), riguardanti la risposta metabolica allo stress salino, hanno mostrato un rilevante incremento nella sopravvivenza delle foglie in piante mature di *Nicotiana tabacum*, modificate geneticamente introducendo betacianine biosintetiche. Avendo subito questo trattamento, si è osservata una minore perdita di carotenoidi e un tasso di degradazione della clorofilla più lento (Zhou et al. 2021). Questo esperimento mostra il ruolo delle betacianine come meccanismo chiave nella risposta fisiologica da stress.

I flavonoidi appartengono a un gruppo di sostanze naturali con variabili strutture fenoliche e si trovano maggiormente in frutta, verdura, cereali, nella corteccia, nelle radici, in fusti, fiori, nel tè e nel vino. I flavonoidi si esprimono frequentemente in condizioni di stress e promuovono i meccanismi di difesa nelle piante. Vari flavonoidi agiscono come potenziali inibitori dell'enzima lipossigenasi che converte acidi grassi polinsaturi in derivati ossigenati (Nijveldt et al. 2001). Questi composti, accumulati nei tessuti vegetali, hanno la funzione di protezione e di inibizione della perossidazione dei lipidi in piante sottoposte a stress (Taïbi et al. 2016). In relazione allo stress salino, in una ricerca condotta da Ma et al. (2020), è stato osservato un incremento a livello di produzione di flavonoidi come risposta fisiologica allo stress. A moderate quantità di sale si ha avuto un accumulo di flavonoidi maggiore rispetto a condizioni severe di stress. Questa scoperta (Ma, Dias, e Freitas 2020) potrebbe fornire informazioni fondamentali alla ricerca futura e al miglioramento dell'agricoltura.

## **1.5 Telerilevamento e *upscaling* nuovi metodi di monitoraggio in ecologia**

Il telerilevamento (*remote sensing*) è l'insieme delle tecnologie che consentono l'acquisizione, elaborazione e interpretazione di immagini e dati correlati, da mezzi aerei e satelliti, che registrano l'interazione tra materia ed energia elettromagnetica (Sabins 1999). Sono tecnologie che consentono, dunque, di ottenere informazioni e dati da oggetti al suolo senza entrare in contatto diretto con essi (Cingano 2021).

Negli ultimi decenni il telerilevamento ha trovato ampi utilizzi nella ricerca scientifica, nella pianificazione urbana, nel rilevamento dei rischi naturali, nel monitoraggio ambientale, nella mappatura della vegetazione e l'individuazione di oggetti geospaziali (Cheng et al. 2020).

L'ampia gamma dei sistemi di rilevamento, la varietà delle applicazioni e le diversità degli stessi, si sono considerevolmente evolute nel corso dell'ultimo secolo. Al giorno d'oggi, la qualità dei dati ottenuti da remoto, con l'ausilio di queste nuove tecnologie, varia ampiamente rispetto alle fotografie aeree che catturano immagini simili a quelle osservate dall'occhio umano. Le immagini acquisite dai sistemi di telerilevamento odierni possono includere dati ed elementi invisibili all'occhio umano, come ad esempio la stratigrafia o la composizione chimica della superficie (Lechner, Foody, e Boyd 2020).

Possiamo distinguere tecnologie di *remote sensing* passive, capaci di rilevare la radiazione luminosa solare riflessa dai corpi, oppure attive, ovvero dispositivi in grado di emettere radiazioni a diverse lunghezze d'onda che successivamente acquisiscono la componente riflessa dai corpi. Il telerilevamento, quindi, utilizza la radiazione emessa dai corpi (riflettanza) in funzione delle condizioni, lunghezze d'onda incidenti e delle caratteristiche fisiche. Le immagini ottenute, dunque, hanno la funzione di fornire una visuale, con una definizione e una ricchezza di dati, tale da poter consentire la localizzazione, l'identificazione, l'estensione e caratterizzazione della superficie terrestre. Un'aggiuntiva capacità di questa tecnologia è la possibilità di acquisire immagini ripetute nel tempo. Pertanto, le tecnologie di telerilevamento sono utilizzate da un ampio spettro di applicazioni, dalla gestione forestale nell'analisi della deforestazione, alla mappatura delle specie invasive, al monitoraggio dei cambiamenti di copertura del suolo, etc., offrendo un enorme contributo nella stima delle proprietà biofisiche e biochimiche di diversi habitat (Lechner, Foody, e Boyd 2020).

Noto che, la vegetazione assorba la luce blu e rossa e rifletta il verde e l'infrarosso vicino (NIR), è possibile ottenere un gran numero di informazioni acquisendo valori di riflettanza tramite telerilevamento e il successivo calcolo di indici multispettrali. Il *normalized difference vegetation index* (NDVI) è uno degli indici più efficienti e più utilizzati per il monitoraggio della vegetazione. L'NDVI non è una grandezza fisica intrinseca e va messo in correlazione con altre proprietà fisiche della vegetazione come il grado di copertura, l'indice LAI, le condizioni della vegetazione e la biomassa (Toby N. Carlson e Ripley 1997). Pertanto, l'utilizzo dell'indice NDVI si è dimostrato efficace in varie tipologie di ecosistemi, fornendo dati accurati riguardo la produzione di biomassa e lo stato fitosanitario della vegetazione relativi all'effetto diretto delle condizioni climatiche (Pettorelli et al. 2005). Grazie alla sua rapidità di calcolo è, dunque, possibile ottenere informazioni sugli effetti

di feedback del clima locale sulla vegetazione e dati riguardo l'abbondanza di distribuzione e attività fotosintetica (Cingano 2021) con relativa semplicità.

Le emergenti tecniche di *upscaling* vengono utilizzate in analisi a livello ecosistemico con lo scopo di collegare le varie scale ecologiche (Cingano 2021). È un sistema sempre più utilizzato nello studio ecosistemico. Con il termine di *upscaling* si intende il processo di osservazione di caratteristiche da una scala specifica al sito di studio, dalla quale si estrapolano le relazioni teoriche per espanderle, successivamente, a modelli su scala più ampia, anche globale (Harvey 2000). Questi consentono di estrapolare dati da aree campione più vaste, riducono i costi e le risorse necessarie per lo studio in campo, nonché semplificano il lavoro agli operatori fornendo un sistema più pratico per analisi in ambienti difficilmente praticabili come le barene di laguna.

## 2. SCOPO DEL LAVORO

L'obiettivo che il seguente lavoro di tesi si pone è lo studio della risposta da sommersione da parte delle specie alofile rappresentative degli ambienti lagunari e la possibilità di utilizzare il *remote sensing* come metodo di rilevamento potenzialmente utile in ambienti difficilmente raggiungibili come le barene.

Si assume che la sommersione eserciti un'influenza negativa sulla crescita e lo sviluppo di *Salicornia fruticosa*, che si ripercuote sulla composizione della biomassa e conseguentemente influenzi la struttura della barena e quindi dell'ambiente lagunare stesso.

Lo studio viene effettuato attraverso la misurazione e l'analisi dei tratti funzionali della specie bersaglio *Salicornia fruticosa*, nonché la quantificazione del contenuto di pigmenti (i.e. clorofille, carotenoidi, flavonoidi, betacianine) tramite tecniche di spettro-fotometria e fluorimetria. Perseguendo un approccio di *upscaling*, sono stati ottenuti indici multispettrali vegetazionali al fine di valutare le possibili relazioni tra questi indici e lo stato della specie chiave e della comunità.

## 3. MATERIALI E METODI

### 3.1 Area di studio

La laguna di Marano e Grado rappresenta il tratto più orientale del sistema deltizio-lagunare nell'ambito della costa nord-adriatica che ha origine a Ravenna in corrispondenza della foce del fiume Po e termina a Monfalcone con la foce del fiume Isonzo (Tomasella et al. 2007). La laguna ha avuto origine dai depositi fluviali del Tagliamento e dell'Isonzo ed è di fatto compresa tra i delta di questi due fiumi. I fenomeni di subsidenza e i depositi di limo e sabbia trasportati dalle correnti marine, sono ulteriori fattori che hanno contribuito alla formazione di questo ambiente. Fa parte del grande sistema lagunare veneziano ed insieme, questi corpi idrici, formano l'unica vera area lagunare in Italia. L'elevato input di acqua fluviale dolce che sfocia nel bacino, viene controbilanciato da significativi flussi di acqua di mare. L'escursione media di marea è di circa 65 cm ma può addirittura superare il metro. Le fluttuazioni del livello del mare, registrate in questo ambiente, sono tra le più ampie nell'intero Mediterraneo. In termini geomorfologici, nella laguna di Marano e Grado si possono delineare tre zonazioni primarie: un cordone litorale, rappresentato dalle isole che delimitano la parte meridionale della laguna dalla restante parte del sistema marino; una complessa rete di barene che si estende dall'ambiente di retroduna, comprendendo l'ambiente acquatico sommerso da acqua salmastra, fino all'argine perilagunare; infine si identifica il sistema deltizio dei tre fiumi di risorgiva, lo Stella, il Cormor e il Turgnano che qui vi sfociano (Tomasella et al. 2007). Le foci del Natissa e del Tiel-Mondine sono gli unici fiumi che sfociano nella laguna di Grado, per questo motivo quest'ultima presenta delle caratteristiche decisamente più marine. Oltre a quanto appena detto, la laguna di Grado possiede una ricchezza maggiore di isole e barene ed è proprio per questo motivo che è stata scelta come area oggetto di studio nel seguente elaborato di tesi.

L'area della laguna di Marano e Grado (Fig. 1) ricade all'interno dei confini amministrativi della Regione Autonoma Friuli Venezia-Giulia. È localizzata lungo la costa più settentrionale del Mar Adriatico, denominata la costa dell'Alto Adriatico e rappresenta, dal punto di vista ecologico, (Cingano 2021) uno degli ambienti di transizione meglio conservati nel Mediterraneo. Quest'area è rappresentata dal contatto fra due sistemi ecosistemici: il sistema friulano-veneto, che è compreso tra le foci del Tagliamento e del Timavo ed è situato nella costa sedimentaria ad occidente, e il sistema istro-dalmato, nella parte estrema orientale, dato dalla costa rocciosa e alta. Il territorio costiero di quest'area non è molto esteso, si sviluppa su una superficie di 160km<sup>2</sup>, di cui 70km<sup>2</sup> appartengono al bacino di Grado. L'ambiente lagunare, in relazione alla posizione rispetto al livello del mare, viene

diviso in tre zone. Una prima zona, rappresentata dalle barene, i cordoni litorali e le coste, è caratterizzata, dunque, da morfologie collocate al di sopra del livello medio delle alte maree. La seconda zona è riscontrabile in aree posizionate tra i livelli medi delle alte e basse maree. Qui si osservano i canali secondari, di larghezza intorno agli 8 m e di profondità di 1,5 m approssimativi, che defluiscono nei canali primari. I canali secondari attraversano le piane di marea (velme) con un andamento meandriforme. Le piane di marea sono aree pianeggianti che si raccordano con le barene. Infine, la terza zona comprende le aree che sono sempre soggette a sommersione, sono quindi poste al di sotto del livello medio delle basse maree. Le morfologie lagunari che rappresentano questa zona sono le bocche lagunari, i canali principali (anche artificiali) e le paludi (ARPA FVG, 2020). La laguna di Grado (le cui coordinate sono: 45°42'28.8"N 13°21'07.2"E) è divisa in un settore orientale (Palù de sopra) ed uno occidentale (Palù de soto) e ad ovest è collegata alla laguna di Marano. La laguna di Marano e Grado, in quanto Zona di Protezione Speciale (direttiva 79/409 CEE) e Sito di Importanza Comunitario (direttiva 43/92 CEE), è interessata da due riserve regionali (Tomasella, 2007): le riserve naturali di Valle Canal Novo e delle Foci dello Stella.



Figura 1- Localizzazione delle aree oggetto di studio (Laguna di Grado, Friuli-Venezia Giulia, Alto Adriatico). In rosso la posizione delle barene prese in studio.

## 3.2 Inquadramento climatico

La Laguna di Marano e Grado è collocata in un settore in cui si presentano delle condizioni climatiche sub-mediterranee. Presenta, dunque, un clima temperato, intermedio tra quello continentale e quello mediterraneo. Le escursioni termiche, di media ampiezza, sono influenzate da un marcato regime di brezze. Le temperature medie oscillano da un valore medio massimo di 17,7°C, ad un valore medio minimo di circa 9°C, per cui il valore di temperatura media annua si aggira intorno ai 12°C. Il valore medio massimo di temperatura viene raggiunto nel mese di agosto, durante il quale si registrano temperature di 28-30°C, mentre raramente la temperatura scende sotto lo zero nel periodo invernale. L'area della laguna e la fascia costiera, a causa dei bassi fondali e della loro limitata capacità termica di regolazione della temperatura, sono abbastanza simili. Gli estremi di temperatura nel periodo estivo ed invernale vengono regolate dal regime delle brezze, insieme ai venti come il Libeccio, lo Scirocco e la Bora, che può insistere per periodi prolungati (Stefanuto 2003). I venti dominanti (57%) del settore provengono soprattutto da settentrione e da est (N, N-E, E), ovvero la bora, tramontana e levante. Da non trascurare sono i venti provenienti da meridione (S, S-E), lo scirocco, il libeccio e l'ostro. Per ciò che riguarda le precipitazioni medie annue, stimate in un arco di tempo di 40 anni, in accordo con le caratteristiche di clima temperato, superano di poco i 1000 mm. (Regione FVG 2008). Nei mesi invernali, da dicembre a febbraio si contano dai 6 ai 7 giorni di precipitazioni medie mensili. Il valore della frequenza cresce nei mesi di marzo, ottobre e novembre e raggiunge un valore massimo nel mese di giugno, quando si contano, sulla costa, 9 giornate piovose (OSMER 2020).

## 3.3 Inquadramento geologico

La laguna di Marano e Grado si estende sulla zona pianiziale della Bassa Pianura friulana con depositi che evidenziano una diminuzione granulometrica sia lungo gradiente orizzontale che verticale. Dominano dunque i sedimenti fini di sabbia, limo e argilla, rispetto agli orizzonti di ghiaiosi e sabbiosi presenti verso settentrione. Il substrato frequentemente osservato nei primi metri di profondità nelle zone lagunari è costituito soprattutto da depositi di limo e argilla e in maniera più modesta si osserva anche la presenza di torba, sabbia e raramente anche di orizzonti ghiaiosi. In quest'area si riscontra la presenza di falde artesiane, che nella zona di Grado, ha contribuito al trasporto di deposito fino alla profondità di 250 metri. Il contributo degli apporti terrigeni è in massima parte opera del trasporto di sedimento svolto dal fiume Isonzo. Pertanto, la costa tra il delta del fiume Isonzo e quello del Tagliamento è bassa e formata prevalentemente da sabbie pelitiche fine (frazione granulometrica < 0,062 mm). Internamente alla laguna, oltre alle predominanti zone di espansione delle sabbie formanti

le bocche lagunari, si riscontra maggiormente la presenza di fanghi a granulometria fine di origine pelitica e sabbie pelitiche (Regione FVG 2008).

Nella laguna di Marano e Grado la granulometria dei sedimenti è di natura differente: procedendo da ovest verso est, si ha un passaggio da substrati limoso-argillosi verso terreni a granulometria maggiore. Questa variazione è osservabile anche dalla zona più interna della laguna alla zona marginale, verso i cordoni litoranei. Il terreno, nei primi metri all'interno della laguna, è formato in maniera dominante da depositi limoso-argillosi e soltanto in piccola parte da substrati a maggiore granulometria come ad esempio sabbia, torba e ghiaia. L'area della costa, tra le foci dell'Isonzo e del Tagliamento, presenta un'elevazione bassa e contiene prevalentemente sedimenti fini di fanghi e sabbie pelitiche, trasportate in sede soprattutto dall'Isonzo, poiché il Tagliamento rilascia il suo carico solido nell'area verso ovest, in direzione di Caorle (Moro 2019). L'apporto sedimentario attuato dai fiumi non risulta essere sufficiente a mitigare l'innalzamento del mare e la conseguente erosione, la sommersione e la progressiva scomparsa delle barene è dunque un fenomeno che potrebbe accentuarsi. Il sistema barenicolo, tuttavia, presenta un'elevata resilienza e un'ottima capacità di risposta ai fattori di erosione. Si è osservato, in alcuni bacini della laguna di Marano e Grado, un input positivo di deposizione di sedimenti (Moro 2019).

### **3.4 Barene: laguna di Grado e Marano, aspetti vegetazionali**

La distribuzione spaziale della vegetazione nelle barene (Fig. 2) è organizzata in relazione al notevole gradiente ambientale dato dalla sommersione. Nella distribuzione delle specie vegetali nelle barene è dunque osservabile il fenomeno della zonazione. La vegetazione delle barene è rappresentata dalle alofite, piante macrofite adatte a completare l'intero ciclo vitale in ambienti con alto grado di salinità. Uno studio condotto da Tilman (1985), spiega come gli eventi di successione della vegetazione siano correlati alla zonazione e dunque alla distribuzione delle specie vegetali nello spazio (Tilman 1985). Le particelle di sedimento depositate promuovono l'accrezione della piana tidale, che subisce una minore influenza da parte delle fluttuazioni di marea, di una minor frequenza di inondazione e dunque di un minor asporto di materiale. Queste condizioni sono favorevoli all'insediamento di microalghe e diatomee che sono in grado di fornire un primo consolidamento delle superfici fangose. La vegetazione degli ambienti barenicoli svolge un ruolo importante nella formazione degli stessi, poiché in grado di intercettare e trattenere ulteriori particelle di sedimento, che nell'arco del tempo si depositeranno a formare il substrato della barena. Pertanto, dopo una prima colonizzazione delle specie alofile, il substrato delle barene risulta essere più stabilizzato (Silvestri, Defina, e Marani 2005).



Figura 2 – La distribuzione spaziale delle specie alofile. In foto la barena di Nassacon, (foto di Marco Bertè, 2021).

La distribuzione nello spazio delle specie alofile di barena è definita dall'elevazione della stessa (Moro, 2019). Questo lavoro di tesi si concentra su zone morfologicamente intermedie. Nelle barene di Grado in concordanza con la classificazione vegetazionale proposta da Poldini e collaboratori (1999), si reperiscono (Poldini, Vidali, e Fabiani 1999):

- Classe *Spartinetea maritimae* (R. Tx. 1961) Beeft., Géhu, Ohba et R. Tx. 1971, in terreni composti da sabbia e argilla, sottoposti a continua sommersione, si ha una vegetazione pioniera perenne a *Sporobolus maritimus* (*Spartina maritima*);
- Classe *Thero-Salicornietea* Pignatti ex Tx. in Tx. et Oberdorfer 1958, ritrovata spesso in compresenza della classe *Spartinetea maritimae*, essendo anche questa una classe pioniera di suoli salmastri frequentemente sommersi. È caratterizzata da popolamenti di vegetazione pioniera diffusa su suoli sabbioso-limosi, poveri di sostanza organica. Specie dominanti: *Salicornia veneta*, *Salicornia perennans*, *Sueda maritima*;

- Classe *Arthrocnemetea* Br. -Bl. Et R. Tx. 1943, diffusa sul piano morfologico barenicolo intermedio. Rappresentata da una vegetazione formata da nanofanerofite e camefite succulente: *Puciniella crithmoides*, *Limbarda crithmoides*, *Halimione portulacoides*, *Limonium narbonense* e infine da *Salicornia fruticosa*;

- Classe *Juncetea maritimi* Br. -Bl. 1931, diffusa sul piano morfologico più elevato, sottoposto a inondazioni meno frequenti. Le specie dominanti compongono praterie salmastre rappresentate da emicriptofite quali: *Juncus maritimus*, *Aster tripolium* e altre specie precedentemente elencate.

Il seguente lavoro di tesi si è concentrato sul piano morfologico barenicolo intermedio, rappresentato quindi dalla classe *Arthrocnemetea*. In particolare, si è svolto in barene oggetto di studio con diffusi popolamenti di *Limonium narbonense* e *Salicornia fruticosa* (*Arthrocnemum fruticosum* (L.) Moq.), considerando quest'ultima come specie chiave per lo studio.

### **3.5 Specie alofila chiave: *Salicornia fruticosa***

*Salicornia fruticosa* (L.) L. syns. *Arthrocnemum fruticosum* (L.) Moq. (Fig. 3) è una pianta suffruticosa succulenta perenne, appartenente all'ordine delle *Caryophyllales* Juss. ex Bercht. & J.Presl e alla famiglia delle *Amaranthaceae* Juss. È stata utilizzata come specie alofita bersaglio in numerosi studi ((Ragab et al. 2020); (Vitti et al. 2020); (Akcin e Yalcin 2016)) data la sua marcata diffusione sia negli ambienti di costa che negli ambienti di barene lagunari dell'Europa occidentale e meridionale. Un'ulteriore caratteristica che questa specie possiede, e che dimostra una notevole importanza nello studio delle previsioni future date dal cambiamento climatico, è la sua capacità di tolleranza allo stress abiotico. Il cambiamento a livello dei tratti funzionali della specie *Salicornia fruticosa* è già stato evidenziato da uno studio effettuato da Pellegrini et al. (2018). Nel seguente elaborato si mettono in relazione i tratti funzionali della specie bersaglio *S. fruticosa* con le innovative tecniche di *upscaling* fornite dalle promettenti tecnologie di telerilevamento. Pertanto, lo scopo finale di questo lavoro di tesi è lo studio della specie modello *Salicornia fruticosa* per comprenderne particolari aspetti vegetazionali e biologici, con il presupposto che le informazioni acquisite dallo studio di quest'ultima possano offrire informazioni e dati anche su altri organismi.



Figura 3 - La specie alofita chiave *Salicornia fruticosa* (L.) L. *syns. Arthrocnemum fruticosum* (L.) Moq.

### 3.6 Disegno sperimentale

In questo studio, per la raccolta dei dati sono state scelte 9 barene facenti parte dell'area della laguna di Grado. 7 di queste sono localizzate nella zona a ovest, nella zona Primero, mentre le restanti 3 sono situate nella zona a est confinante con la laguna di Marano. La selezione del territorio da analizzare è stata fatta in seguito all'osservazione della diffusione dei popolamenti vegetazionali, che risultano uniformi ed ognuna delle barene presenta dominanza della specie alofita bersaglio *Salicornia fruticosa*.

Per ogni barena sono stati individuati tre punti di campionamento (totale di 27 punti) caratterizzati da un diverso livello di sommersione da acqua salina in grado quindi di esprimere la diversa intensità di stress da sommersione (*waterlogging*). Su ogni barena, pertanto, sono state individuate tre categorie di punti:

- Basso (B): zona soggetta a minore intensità e durata di sommersione quindi da un basso gradiente di stress. Dal punto di vista della vegetazione presenta una maggioranza di diffusione da *Juncus maritimus*, spesso osservata lungo i margini più elevati confinanti con i ghebi e canali di laguna, pertanto, in termini di morfologia, questo è il punto più elevato;
- Medio (M): punto in cui si osservano caratteristiche morfologiche e vegetazionali intermedie, di conseguenza anche un grado di sommersione interposto ai due punti;

- Alto (A): zona soggetta a maggiore intensità e durata e quindi da un alto livello di stress da sommersione. Le specie vegetali dominanti sono composte da *Salicornia perennans* e *Sporobolus maritimus*. Si tratta di un punto con morfologia inferiore, comunemente osservabile nella zona della barena che sia affaccia alla piana tidale (velma).

Per i tre punti, in ciascuna barena, sono state scelte due aree di saggio (*plot*). Un *plot* di 4 m<sup>2</sup> (2 x 2 m) (Fig. 4), costruito attorno al punto in osservazione e un *plot* interno di 0,16 m<sup>2</sup> (0,4 x 0,4 m). La posizione del *plot* interno è stata scelta in maniera tale da circoscrivere un'area in cui ci fosse unicamente la specie bersaglio *Salicornia fruticosa*. L'area di saggio maggiore presentava delle piastre bianche segnaletiche, montate all'estremità di una diagonale, in modo da permettere la geolocalizzazione delle aree di saggio per la successiva elaborazione delle immagini multispettrali.

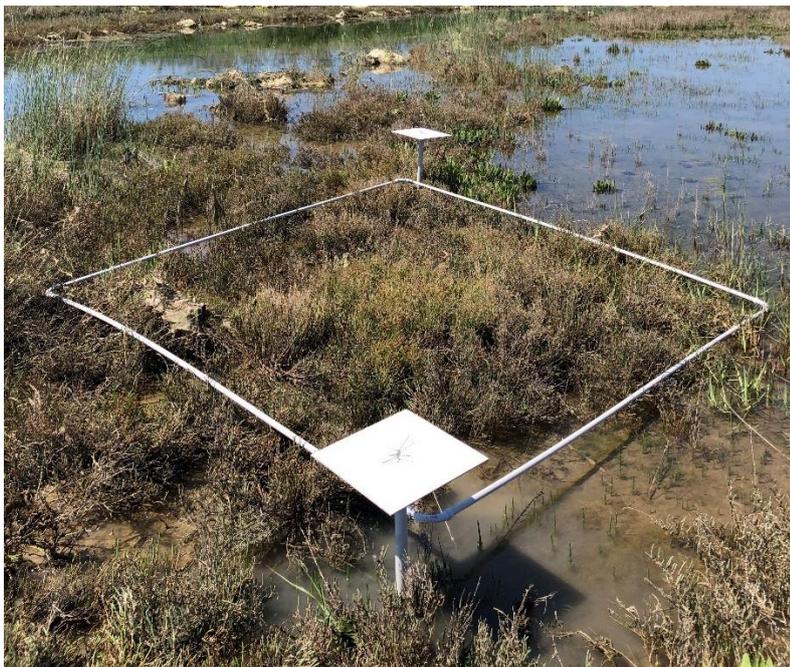


Figura 4 – Area di saggio di 4m<sup>2</sup> con piastre segnaletiche posizionate, (foto di Marco Bertè, 2021)

## 3.7 Raccolta dati

### 3.7.1 Quantificazione della sommersione

La raccolta dei dati è stata eseguita nel periodo compreso tra aprile e giugno 2021.

La raccolta dei dati di sommersione delle diverse barene, è avvenuto in periodi a pari condizioni meteorologiche al fine di garantire l'uniformità di condizioni. Ulteriormente sono state consultate le

tavole di marea astronomica, al fine di condurre le operazioni in campo in periodi con le stesse condizioni lunari.

La raccolta dei dati di sommersione è avvenuta in tre turni non contemporanei che prevedevano, ciascuno, lo studio di tre barene. Sono stati scelti tre periodi bisettimanali che si trovavano in condizione sigiziale (massima escursione di marea) a inizio e fine turno e hanno compreso, tra i due periodi, una condizione di quadratura (minima escursione di marea). In questa maniera il campionamento ha potuto registrare un ampio numero di condizioni ed escursioni tidali.

In ciascuna barena, nel punto scelto per la misurazione del livello di sommersione (secondo identificazione del gradiente vegetazionale ed ipsometrico osservato), sono stati posizionati a terra tre sensori (*datalogger*) appartenenti alla classe dei trasduttori di pressione (Cingano 2021). I dati di pressione vengono raccolti dai *datalogger* con un intervallo di misura di un minuto e sono stati lasciati in posizione per un periodo di due settimane. I *datalogger* HOBO® U-20L-01 della ONSET sono in grado di registrare, in un dato intervallo di tempo, la pressione assoluta (tramite rilevamento del liquido sovrastante e pressione atmosferica), grazie ad un sensore di pressione in ceramica.

Questi sensori sono una tipologia di strumenti utilizzata per rilevare le variazioni del livello dell'acqua in molteplici ecosistemi. Nel caso dell'ambiente di barena, le fluttuazioni di marea consentono al sensore di registrare la pressione assoluta in maniera ottimale. Alla crescita della marea il punto in analisi è sommerso e il sensore acquisisce dati relativi alla pressione dell'acqua soprastante, mentre quando è in condizioni di bassa marea, registra la pressione atmosferica. Un fattore limitante per l'utilizzo di questi sensori sono le variabilità della pressione atmosferica date dalle condizioni meteorologiche locali, che possono infatti causare errori di calcolo. Per questo potenziale imprevisto è stato utilizzato un ulteriore *datalogger* come riferimento barometrico (*reference*) (Cingano 2021), che è risultato fondamentale nel calcolo del dato corretto in altezza (cm) dell'acqua e tempo di durata della sommersione. Una volta raccolti i dati e studiati i valori, è stato ricavato l'indice di sommersione che è stato utilizzato per confermare i punti di diverso livello di sommersione ( $A - M - B$ ). Secondo uno studio effettuato recentemente da Veronese (2019) questo indice rappresenta la sommersione come media oraria dell'altezza del livello dell'acqua nel periodo di misura (Veronese 2019).

### **3.7.2 Acquisizione ed elaborazione immagini multispettrali**

L'acquisizione delle immagini multispettrali è stata effettuata con il drone Zephyr Exos (Fig. 5), aeromobile alimentato a batteria, dotato di sei rotori, due ad ogni braccio che gli conferiscono un ottimo assetto durante il volo e con sistema GPS incorporato. Sul drone è stata montata una telecamera multispettrale Parrot Sequoia montata su uno stabilizzatore giroscopico. La telecamera multispettrale è dotata di una fotocamera RGB (16 MP) e un sensore multispettrale con 4 obiettivi, in più presenta

un sensore di luminosità che rileva l'intensità di luce solare nelle 4 bande spettrali utilizzate. Gli obiettivi monocromatici (risoluzione 1,2 MP) acquisiscono la luce riflessa dal soggetto nelle bande del verde (550 nm– larghezza di banda 40 nm), rosso (660 nm– larghezza di banda 40 nm), red-edge (735 nm - larghezza di banda 10 nm), infrarosso vicino (NIR) (790 – larghezza di banda 40 nm). Il drone ha sorvolato tutte e nove le barene prese in studio, soffermandosi su tutti i plot (27) precedentemente posizionati ed ha registrato i dati.



*Figura 5 - Il drone Zephyr Exos utilizzato per la raccolta delle immagini multispettrali, (foto di Marco Bertè, 2021).*

Le piastre segnaletiche montate in ogni plot (Fig. 4) hanno permesso, tramite fotointerpretazione, la creazione di un file vettoriale contenente le aree di studio (plot) di area 4m<sup>2</sup>. Per ogni plot è poi stato attribuito un valore NDVI medio successivamente elaborando le immagini in formato raster (Fig. 6) con il software QGIS.

Per questo elaborato, successivamente alla creazione degli ortomosaici per ogni banda tramite il software PIX4Dmapper, sono stati calcolati ed utilizzati diversi tipi di indici multispettrali NDVI,

LCI, RGRI, ARI. Questa scelta è stata fatta per approfondire lo studio fisionomico strutturale della vegetazione presente nelle diverse aree di studio prese in analisi.

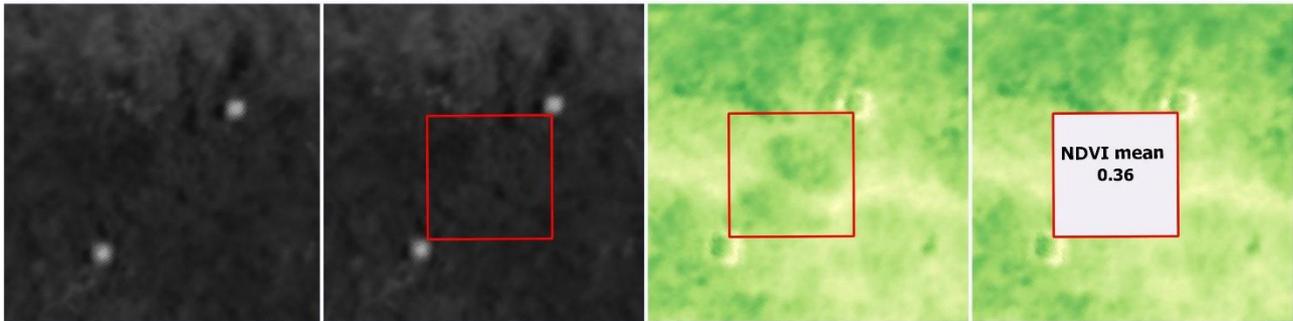


Figura 6 - Fasi che hanno permesso l'ottenimento del valore medio di NDVI per ciascun plot. Le prime due immagini raffigurano la banda NIR utilizzata per individuare le piastre segnaletiche e dunque le aree di studio.

## NDVI

L'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) descrive il livello di vigoria della vegetazione e viene calcolato come il rapporto tra la differenza e la somma delle radiazioni riflesse nella banda del vicino infrarosso (NIR) e nella banda del rosso (RED), ossia come:

$$(NIR-RED) / (NIR+RED)$$

I valori dell'indice cadono all'interno di un intervallo che va da -1 a +1. Valore di NDVI vicini a 1 indicano stato di vigoria della vegetazione molto alta.

## LCI

L'indice LCI (*Leaf Chlorophyll Index*) stima la quantità di clorofilla presente sull'apparato fogliare delle specie vegetali ed è stato utilizzato come indice multispettrale, alternativo all'NDVI, per la stima della crescita e dello stato di salute della pianta, viene utilizzato spesso per determinare la presenza di malattie e dell'invecchiamento. L'indice LCI viene espresso tramite dati che vengono raccolti nella banda dell'infrarosso vicino (NIR), del REDEEDGE e nella banda del rosso (RED). L'ottenimento di questo indice prevede la seguente formula:

$$LCI = (NIR - REDEEDGE) / (NIR + RED)$$

## RGRI

Questo indice (Gamon e Surfus 1999), il *Red Green Ratio Index*, è un indice della misurazione della riflettanza che indica l'arrossamento delle foglie causato dalle antocianine, in contrasto con la pigmentazione verde data dalla clorofilla. È stato utilizzato come indicatore di stress da sommersione, in quanto in grado di stimare lo stato di salute dell'apparato fogliare in molteplici varietà vegetali.

Secondo Gamon e Surfus (1999), questo indice è importante nello studio della fenologia, nella individuazione di fattori di stress e nella previsione della produzione in agricoltura. Le immagini vengono raccolte in tutta la banda del rosso (RED) e divise dall'intera banda del verde (GREEN). Viene calcolato dalla seguente formula:

$$\text{RGRI} = \text{RED} / \text{GREEN}$$

Il valore si esprime in un intervallo tra 0,1 a valori anche maggiori di 8, mentre l'intervallo in una vegetazione che esprime la sola pigmentazione verde presenta valori che oscillano da 0,7 ad un massimo di 3.

### **ARI**

L'indice ARI (*Anthocyanin Reflectance Index*) è un ulteriore indice per la determinazione della risposta da stress nelle specie vegetali. Ne esistono due tipologie; ARI1 e ARI2 in cui la differenza è una migliore capacità di identificazione delle antocianine nella vegetazione. In questo elaborato è stata stimata una media di entrambe le misurazioni. Utilizza le misurazioni nella banda dello spettro del visibile e le formule utilizzate per il calcolo di un valore ARI sono:

$$\text{ARI1} = (1/\rho_{550}) - (1/\rho_{700})$$

$$\text{ARI2} = \rho_{800} \times [(1/\rho_{550}) - (1/\rho_{700})]$$

I valori sono espressi in un intervallo tra 0 e 1. L'aumentare del valore indica cambiamenti nella vegetazione che possono indicare nuova crescita fogliare o deiscenza.

### **3.7.3 Raccolta campioni vegetali e analisi dei tratti funzionali (*functional traits*)**

Prima di iniziare la raccolta dei campioni e della biomassa, in ciascuna area di studio (*plot*) di area 4 m<sup>2</sup> (Fig. 4) è stato eseguito un rilievo vegetazionale. Per ogni *plot*, dunque è stato attribuito un valore percentuale di copertura per ciascuna specie presente. Nel *plot* interno, di area inferiore (0,16 m<sup>2</sup>) e dominato esclusivamente da *S. fruticosa*, è stata misurata l'altezza di 5 piante con cui calcolare l'altezza media della comunità, e successivamente è stata eseguita l'asportazione della biomassa epigea totale tramite taglio a raso terra, successivamente il prodotto è stato raccolto in buste di plastica e pesato in campo con dinamometro per ottenerne il relativo peso fresco (FW – *Fresh Weight*). Di questi campioni è stato successivamente prelevato un numero di 10 getti annuali apicali, inseriti in fiale (*Falcon*<sup>TM</sup>) numerate e siglate con il numero della barena e la sigla del punto del livello di sommersione corrispondenti. Nelle 9 barene prese in analisi, contenenti ciascuna 3 aree di studio, nelle quali sono stati raccolti 3 campioni di getti annuali di *S. fruticosa* per ogni punto di livello di

sommersione, per un totale dunque di 81 fiale totali. I campioni sono stati successivamente portati in laboratorio per l'analisi.

La biomassa dopo il prelievo e il campione è stato portato in laboratorio e successivamente seccato in stufa a 70° C per 72 ore. Una volta seccato, il materiale è stato pesato nuovamente per l'ottenimento del peso secco (DW – *Dry Weight*). Si è quindi proceduto con la stima del DMC (*Dry Matter Content* - contenuto di sostanza secca), calcolato tramite rapporto tra DW (mg) e FW (g). Il DMC esprime in termini percentuali la quantità di sostanza secca presente nel campione di pianta (Pérez-Harguindeguy et al. 2016).

Per l'analisi dei tratti funzionali di crescita di *Salicornia fruticosa* sono stati impiegati i 10 getti annuali apicali prelevati in precedenza per ottenere i dati relativi alla lunghezza dei getti (cm) tramite scansione ed analisi ottenuta attraverso il software ImageJ.

Le 81 fiale contenenti i getti annuali apicali, sono state anch'esse portate in laboratorio per essere successivamente poste in congelatore (-80°C) e quindi preparate per l'analisi dei campioni. Il procedimento di estrazione dei pigmenti fotosintetici, delle betacianine e dei flavonoidi, è stato eseguito seguendo dei protocolli di estrazione già utilizzati per diversi studi riadattati alle esigenze del caso.

Per lo studio della risposta fisiologica data dai pigmenti fotosintetici (Chl a, Chl b, carotenoidi e feofitina) e delle betacianine si è proceduto con l'analisi dell'assorbanza, mentre la risposta data dai flavonoidi è stata analizzata tramite analisi della fluorescenza.

Le analisi sono state svolte nel laboratorio di Biologia vegetale dell'ateneo di Udine.

Per la preparazione dei campioni e l'estrazione dei pigmenti fotosintetici (Chl a, Chl b, carotenoidi, feofitina) è stato seguito il protocollo di Marchiol e collaboratori (2019) parzialmente modificato (Marchiol et al. 2019). Il procedimento è iniziato estraendo le fiale *Falcon*<sup>TM</sup> dal congelatore e ponendole in cilindri metallici riempiti precedentemente con l'azoto liquido. La temperatura dell'azoto liquido (~ -200°C) ha permesso di rendere la consistenza dei campioni adatta alla riduzione in polvere con l'utilizzo di un mortaio in ceramica. Sono stati pesati circa 20 mg di ciascun campione fogliare all'interno di provette in polipropilene *Eppendorf*<sup>®</sup> nelle quali sono stati successivamente aggiunti 0,5 ml di acetone 90% (v/v) contenente 0,01 N di ammonio idrossido (NH<sub>4</sub>OH). Sono stati successivamente aggiunti 0,5 ml di acetone 80% (v/v), omogenizzando il contenuto di ciascuna provetta dopo l'aggiunta di ognuno dei due solventi. Tutto il procedimento è stato effettuato in banco freddo, congelando anche le provette con azoto liquido. Si è poi proceduto alla centrifugazione delle provette, opportunamente bilanciate, a 14.000 g per 12 minuti con lo scopo di separare il surnatante

dalla parte solida dell'emulsione. Il surnatante è stato prelevato da ciascuna provetta, tramite l'utilizzo di una pipetta, per essere utilizzato per la determinazione dell'assorbanza mediante analisi spettrofotometrica. La composizione finale per ogni saggio consisteva in 500 µl di surnatante in 2 ml di acetone 80% v/v.

I valori di assorbanza dei vari pigmenti fotosintetici sono stati rilevati per via spettrofotometrica (spettrofotometro *UV-Visibile 8453, Agilent Technologies*), ed applicati ai seguenti algoritmi (Wellburn 1994):

$$\text{Chl a } (\mu\text{g/ml}) = [12,21(A_{663}) - 2,81(A_{646})]$$

$$\text{Chl b } (\mu\text{g/ml}) = [20,13(A_{646}) - 5,03(A_{663})]$$

$$\text{Carotenoidi } (\mu\text{g/ml}) = [1000(A_{470}) - 3,27\text{Chl a} - 104\text{Chl b}] / 198$$

Le concentrazioni sono state successivamente convertite in µg per mg di peso fresco.

Il contenuto di feofitina è stato stimato indirettamente come percentuale rispetto alla clorofilla (Mobin e Khan 2007):

$$\text{PheO } (\%) = (A_{553}/A_{665}) * 100$$

Anche per quanto riguarda l'analisi delle betacianine i campioni sono stati ridotti in polvere ed omogeneizzati in un mortaio in ceramica in presenza di azoto liquido, facendo però attenzione a limitare il contatto diretto della luce, poiché ha la tendenza a degradare la molecola. Quindi sono stati pesati circa 100 mg di ogni campione al quale sono stati aggiunti, previa consultazione di uno studio condotto da Duarte et al. (2013), 1,5 ml di una soluzione 80% di metanolo e 50 mM di acido ascorbico. Tutto il procedimento è stato eseguito in banco freddo, congelando le provette *Eppendorf®* con azoto liquido prima dell'inserimento del campione pesato. Un'ulteriore disgregazione del campione è stata ottenuta mediante bagno a ultrasuoni freddo (con acqua e ghiaccio) per 2 minuti. L'estrazione è stata completata incubando i campioni al buio per 30 minuti a -20°C (Duarte et al. 2013). La successiva centrifugazione, necessaria a separare il surnatante dal materiale solido, è stata effettuata a 15.000 g per 10 minuti a 25°C.

Dopo la centrifugazione sono stati prelevati 0,5 ml di surnatante che è stato diluito con 0,5 ml di acqua (V finale cuvetta: 1 ml) ed è stato determinato l'intervallo di assorbanza a 538 nm.

Per la determinazione delle betacianine si usa la formula seguente (Priatni e Pradita 2015):

$$\mu\text{g}_{\text{betacy}} / 100 \text{ g FW} = ((A * \text{MW} * V * \text{DF} * 1000) / (E * L * W)) * 100$$

A= assorbanza (absorbance) a 538 nm;

L= lunghezza del percorso dei fotoni (path length) - 1 cm;

DF= fattore di diluizione (dilution factor);

V= volume estratto in ml (volume extract);

W= peso fresco del materiale in grammi (fresh weight).

E= coefficiente di estinzione molare per le betanine (mean molar absorptivity),  $6.5 \cdot 10^4$  L/mol cm in H<sub>2</sub>O;

MW= peso molecolare (Molecular Weight), 550 g/mol.

Come per entrambi i protocolli precedenti, così per l'analisi dei flavonoidi il procedimento prevedeva la polverizzazione del materiale vegetale con l'ausilio dell'azoto liquido e del mortaio ed eseguendo tutte le operazioni in banco freddo. Sono stati pesati circa 50 mg di polvere fogliare. Per l'estrazione è stato applicato il metodo di Filippi e collaboratori (2021) con parziali modifiche: ai campioni sono stati aggiunti inizialmente 300 µl di metanolo, per poi essere centrifugati per 5 min a 16.000 g. A 100 µl di surnatante sono stati aggiunti 50 µl di DPBA all' 1% in etanolo. Il preparato è stato prelevato con una pipetta multicanale e versato nei pozzetti di una piastra per la lettura allo spettrofotometro a fluorescenza (*VICTOR3 Multilabel Plate Reader 1420-011, Perkin Elmer*) (Filippi et al. 2021).

I risultati sono stati espressi come quercetina-equivalenti (QC-eq): per fare ciò è stata necessaria la costruzione di una retta di taratura della quercetina (QC) a partire da una soluzione madre (200 mM di QC in DMSO) che è stata successivamente diluita con metanolo per ottenere i punti di taratura necessari. Nei pozzetti della piastra per lo spettrofotometro a fluorescenza, si è dunque replicato quanto fatto precedentemente per i campioni, utilizzando 100 µl di soluzioni di quercetina mescolati a 50 µl di DPBA all'1% in etanolo.

### **3.7.4 Caratterizzazione granulometrica dei sedimenti**

La raccolta dei dati dei sedimenti è stata effettuata in tutte e 9 le barene interessate da questo studio. Una volta determinate le varie aree con i punti caratterizzanti i vari livelli di sommersione, citati precedentemente in questo elaborato, si è proceduto con il prelievo di campioni di sedimento. I sedimenti presi in analisi sono i seguenti: sabbia, silt, argilla (dell'ordine di grandezza 4µm e 2 µm). Le analisi granulometriche sono state condotte su campioni di sedimento fresco e per eseguire l'analisi strumentale su ogni campione sono state svolte le seguenti operazioni preliminari:

- pulizia delle impurità (alghe, conchiglie e polverina derivante dal taglio del liner);

- trattamento per 48 ore a temperatura ambiente con perossido di idrogeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) al 3% e acqua distillata in rapporto 1:4;
- filtrazione mediante setaccio con maglie di 1000 µm , e inserimento della frazione minore di 1000 µm in acqua distillata per poi analizzarla.

L'analisi è stata effettuata con il granulometro laser (*Malvern Mastersizer 2000*) che sfrutta la tecnica della diffrazione laser, detta anche *Laser Light Scattering*, la cui misura primaria è la cattura di tutta la luce diffusa dalle particelle che si stanno analizzando. Il principio base di questa tecnica consiste nel fatto che, nel momento in cui le particelle vengono illuminate da un fascio laser, diffondono luce con un angolo inversamente proporzionale alla dimensione della particella investita. Pertanto, particelle di dimensioni elevate diffonderanno la luce con angoli stretti e ad alta intensità, mentre quelle aventi dimensioni ridotte forniranno una diffusione con angoli di ampiezza maggiore, e a bassa intensità. In altre parole, al diminuire della dimensione delle particelle, l'angolo di diffusione (o di *scattering*) osservato aumenta in modo logaritmico.

Il *Malvern Mastersizer 2000* è uno strumento caratterizzato da elevatissima risoluzione e sensibilità, ed è in grado di eseguire automaticamente e rapidamente le analisi sulle particelle di sedimento aventi diametro compreso tra 0,02 µm e 2 mm. Generalmente le analisi si eseguono su 2 ml di campione, prelevato con una pipetta da una soluzione dello stesso, che viene mantenuta in sospensione attraverso un agitatore meccanico, e che viene sottoposta a ultrasuoni. Una volta inserito il campione nello strumento, un raggio laser attraversa la sospensione, e un rilevatore registra la distribuzione angolare della luce diffratta che aumenta al diminuire delle particelle restituendo una curva di distribuzione di frequenza semplice, e curva cumulativa.

Per le analisi è stata utilizzata la percentuale di argilla (dell'ordine di misura di 4µm e 2µm) presente in ogni carota.

### **3.7.5 Analisi statistica**

Per l'analisi statistica si è proceduto con l'applicazione di Modelli lineari misti (*Linear Mixed-Effects Models* - LMM) per studiare gli effetti della sommersione sulle variabili misurate e l'interazione con la tipologia di substrato (argilla) in relazione con gli indici multispettrali utilizzati per questo studio di tesi. Dunque, gli LMM sono stati utilizzati per la valutazione dei caratteri funzionali in risposta allo stress da condizioni anossiche causato da sommersione e contenuto di argilla nel substrato. È stato inoltre applicato il test ANOVA (*Analysis Of VAriance* – analisi della varianza) per la verifica della significatività delle interazioni statistiche degli indici in termini di sommersione e contenuto di

argilla (clay content). I caratteri funzionali espressi in risposta allo stress, ovvero, i fattori presi in considerazione per questo studio sono: l'altezza della pianta (plant height), quantità di sostanza secca totale (total DW), accrescimento della gemma apicale annuale (shoot length), contenuto di carotenoidi e betacianine. Al fine di valutare il contributo da parte delle variabili della comunità vegetale (i.e. Altezza pianta, Peso secco (DW) totale) e di *S. fruticosa* (Lunghezza getto annuale, Carotenoidi, Betacianine) alla spiegazione della varianza degli indici multispettrali presi in considerazione sono stati testati modelli misti lineari (GLMM) con il pacchetto R "partR2" (Stoffel, Nakagawa, e Schielzeth 2021).

## 4. RISULTATI

### 4.1 Risposta delle comunità vegetali di barena al gradiente di sommersione e alla granulometria del substrato

L'altezza delle comunità vegetali e il peso secco (DW - *Dry Weight*) sono stati notevolmente influenzati dal gradiente di sommersione (*waterlogging*), ma non dal contenuto di argilla nel substrato (Tab. 1), rappresentando il 28,8% e il 26,3% della varianza totale. Ad alti livelli di sommersione, le comunità vegetali sono di dimensioni ridotte in termini di altezza della pianta (fig. 7) e mostrano un valore di biomassa epigea totale bassa, espressa dal DW totale (fig. 8). Il contenuto di sostanza secca (DMC – *Dry Matter Content*) non ha espresso alcuna relazione statisticamente significativa con la sommersione e nemmeno con il contenuto di argilla nel substrato (Tab.1). Infine, la diversità vegetale, espressa dall'indice di Shannon, diminuisce in rapporto al gradiente di sommersione ma non dimostra alcuna relazione con il contenuto di argilla nel substrato (Tab. 1).

### 4.2 Risposta di *Salicornia fruticosa* al gradiente di sommersione e alla granulometria del substrato

La risposta funzionale della specie alofita chiave di questo studio *S. fruticosa* è stata principalmente condizionata dal gradiente di sommersione e dall'interazione di quest'ultimo con la composizione granulometrica del substrato, ovvero con il contenuto di argilla (Tab. 1). Il valore del DW dei getti annuali apicali di *S. fruticosa* ha dimostrato una marcata diminuzione in relazione all'aumento del gradiente di sommersione (Tab. 1, fig. 9). Il valore medio del peso secco dei getti annuali apicali è stato di 27 mg (min= 17 mg; max= 51 mg), mentre il valore del contenuto di betacianine registrato si aggira tra i 2.9 e i 60.6  $\mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$  del peso fresco (FW - *Fresh Weight*), con un valore medio di 24.3  $\mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$  FW. La lunghezza dei getti annuali apicali e il contenuto di carotenoidi in *S. fruticosa* sono stati influenzati dall'interazione reciproca del gradiente di sommersione e del contenuto di argilla nei sedimenti (Tab. 1, fig. 10 e fig. 11 risp.). In particolare, in terreni con alto contenuto di argilla, la lunghezza dei getti ha subito un brusco calo all'aumento della sommersione, viceversa in terreni poveri in termini di contenuto di argilla (i.e. terreni con un contenuto di sabbia maggiore), al crescere del gradiente di sommersione si è osservata un lieve aumento nella lunghezza dei getti annuali apicali di *S. fruticosa*. Un cospicuo contenuto di carotenoidi nel fusto è stato evidenziato in condizioni di livelli elevati di sommersione e in presenza di substrati con alta percentuale di argilla, ma al contrario, in condizioni di substrati sabbiosi, meno soggetti a sommersione, si è registrato un basso contenuto

di carotenoidi. Per quanto riguarda il contenuto di sostanza secca (DMC) dei getti annuali, come è stato dimostrato anche dalla DMC totale della comunità vegetale, non vi è stata alcuna correlazione con i gradienti di sommersione e di contenuto di argilla nei sedimenti.

	<b>Fattore</b>	<b>Df</b>	<b>Valore F</b>	<b>Valore p</b>
<i>Altezza pianta</i>				
	Sommersione	1,16	31.1	<b>&lt;0.0001</b>
	Contenuto argilla	1,16	0.1	0.739
<i>Peso secco totale (DW)</i>				
	Sommersione	1,16	7.0	<b>0.018</b>
	Contenuto argilla	1,16	1.7	0.217
<i>Contenuto sostanza secca totale (DMC)</i>				
	Sommersione	1,16	0.1	0.801
	Contenuto argilla	1,16	1.1	0.318
<i>Indice di Shannon</i>				
	Sommersione	1,16	3.5	<b>0.081</b>
	Contenuto argilla	1,16	0.9	0.370
<i>log(peso secco (DW) getto annuale)</i>				
	Sommersione	1,16	5.0	<b>0.042</b>
	Contenuto argilla	1,16	1.1	0.313
<i>Contenuto sostanza secca (DMC) getto annuale</i>				
	Sommersione	1,16	0.2	0.702
	Contenuto argilla	1,16	0.0	0.958

<i>Lunghezza getto annuale</i>				
	Sommersione	1,14	8.2	<b>0.012</b>
	Contenuto argilla	1,14	15.3	<b>0.002</b>
	Sommersione*Contenuto argilla	1,14	7.4	<b>0.015</b>
<i>Clorofilla</i>				
	Sommersione	1,16	0.1	0.912
	Contenuto argilla	1,16	1.2	0.290
<i>Carotenoidi</i>				
	Sommersione	1,12	1.1	0.318
	Contenuto argilla	1,12	0.3	0.629
	Sommersione*Contenuto argilla	1,12	4.9	<b>0.046</b>
<i>Flavonoidi</i>				
	Sommersione	1,16	0.0	0.931
	Contenuto argilla	1,16	1.6	0.225
<i>Betacianine</i>				
	Sommersione	1,16	2.3	0.147
	Contenuto argilla	1,16	4.1	<b>0.060</b>

Tabella 1 - Test ANOVA applicato ai modelli lineari misti calcolati per l'NDVI in funzione delle variabili della comunità vegetale e in funzione dei tratti funzionali di *S. fruticosa*, e nella loro interazione con il gradiente di sommersione e il contenuto di argilla nei sedimenti.

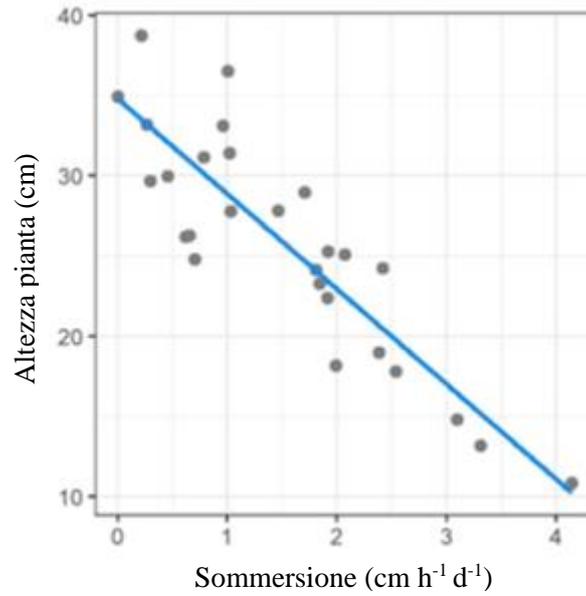


Figura 7 - Relazione tra altezza delle piante appartenenti alla comunità vegetale e gradiente di sommersione. Si osserva marcata diminuzione dell'altezza delle piante in relazione all'aumento del valore del gradiente di sommersione.

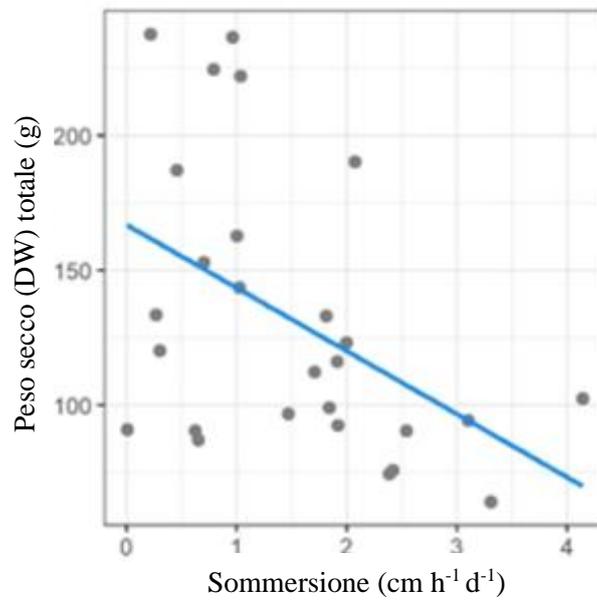


Figura 8 - Relazione tra peso secco (DW) totale della biomassa epigea bassa della comunità vegetale e gradiente di sommersione. Si osserva relazione negativa tra l'aumento del gradiente di sommersione e il valore relativo al peso secco (DW) totale.

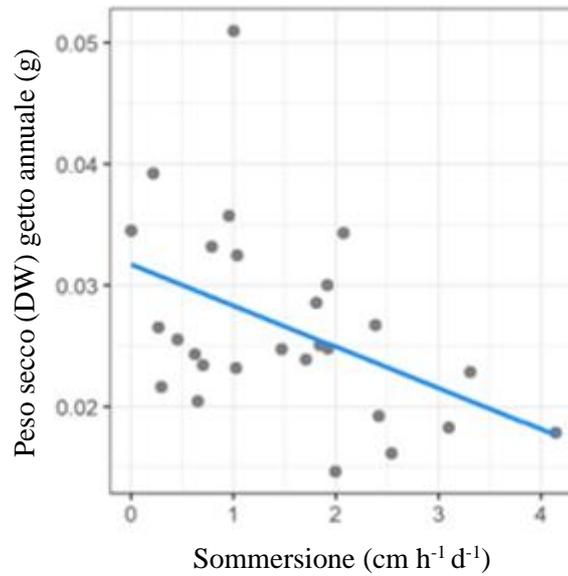


Figura 9 - Relazione tra peso secco (DW) del getto annuale apicale di *S. fruticosa* e gradiente di sommersione. Si osserva una diminuzione del valore del peso secco della biomassa del getto annuale apicale di *S. fruticosa* in relazione all'aumento del grado di sommersione.

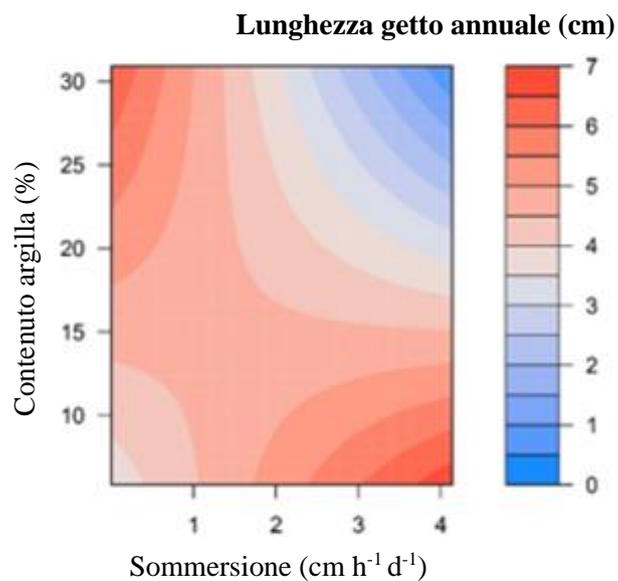


Figura 10 – Relazione tra la lunghezza del getto annuale apicali di *S. fruticosa* e l'interazione reciproca tra il gradiente di sommersione e il contenuto di argilla nei sedimenti. Si osserva una diminuzione della lunghezza dei getti apicali in relazione ad un elevato contenuto di argilla nel terreno e ad un elevato grado di sommersione. Viceversa, si nota un aumento della lunghezza dei getti apicali in condizioni di elevato grado di sommersione e basso contenuto di argilla nei sedimenti.

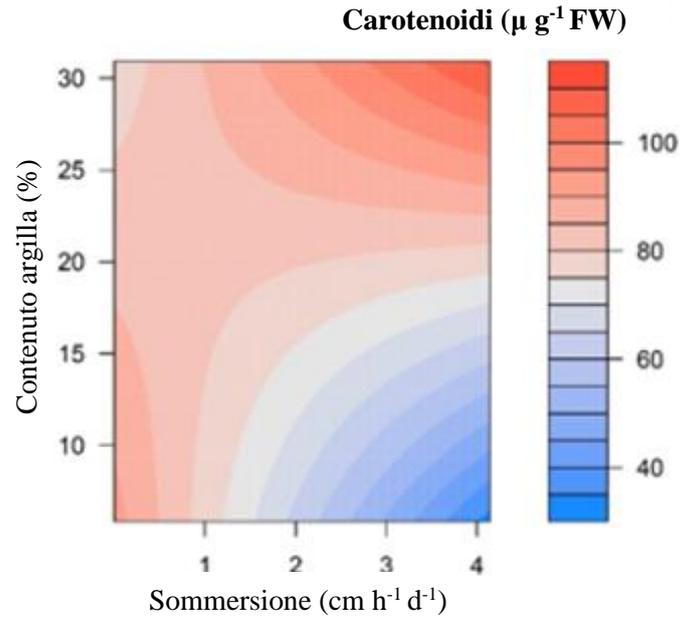


Figura 11 – Relazione tra il contenuto di carotenoidi nel fusto di *S. fruticosus* e l'interazione reciproca tra il gradiente di sommersione e il contenuto di argilla nei sedimenti. Si osserva un elevato contenuto di carotenoidi in condizioni di elevato livello di sommersione e alta percentuale di argilla nei sedimenti. Si nota, nel caso contrario, una bassa concentrazione di carotenoidi in substrati privi di argilla e in condizioni di elevato grado di sommersione.

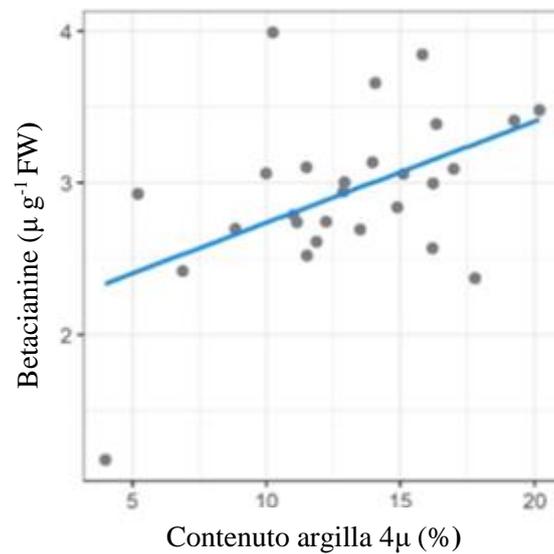


Figura 12 - Relazione tra contenuto di betacianine nel fusto di *S. fruticosus* e contenuto di argilla di granulometria  $4\mu\text{m}$ . Si osserva relazione positiva tra l'aumento di argilla  $4\mu\text{m}$  e l'aumento di contenuto di betacianine.

### **4.3 Upscaling della risposta funzionale della comunità vegetale e di *S. fruticosa* con indici multispettrali da telerilevamento**

Secondo l'analisi con l'indice NDVI i caratteri vegetazionali delle piante, prese come singole, corrispondono al 27% della varianza totale (CI = [0.17 – 0.60]), mentre i caratteri vegetazionali della comunità vegetale (la DW totale e l'altezza) non contribuiscono all'analisi (Fig. 13). La lunghezza del getto annuale apicale (part  $R^2$  0.10, CI = [0.00 – 0.23]) e il contenuto di betacianine in essi (part  $R^2$  0.08, CI = [0.00 – 0.22]) sono invece i caratteri vegetazionali che maggiormente esprimono la varianza totale (Fig. 7) dell'indice considerato.

L'analisi svolta con l'indice LCI, ha dimostrato che i caratteri vegetazionali esprimono il 23% della varianza totale (CI = [0.13 – 0.44]). Il carattere 'lunghezza del getto annuale' è il carattere più significativo nell'espressione della varianza (part  $R^2$  0.12, CI = [0.00 – 0.23]), seguono il contenuto di carotenoidi (part  $R^2$  0.06, CI = [0.04 – 0.28]) e il contenuto di betacianine ( $R^2$  0.05, CI = [0.03 – 0.28]) (Fig. 13).

La lunghezza dei getti annuali, il contenuto di carotenoidi e di betacianine spiegano equamente la varianza secondo l'indice RGRI (rispettivamente part  $R^2$  0.12, CI = [0.05 – 0.34]; part  $R^2$  0.10, CI [0.04 – 0.32]; part  $R^2$  0.010, CI = [0.04 – 0.33]), mentre l'altezza della comunità vegetale e il peso secco (DW) totale hanno contribuito alla varianza solo marginalmente (Fig. 13).

Secondo l'indice ARI la varianza è dimostrata solamente dai caratteri della comunità vegetale e dai caratteri espressi da *S. fruticosa* (CI = [0.16 – 0.39]), per una percentuale del 23% della varianza totale. Il maggior contributo al calcolo della varianza lo hanno espresso le variabili 'peso secco (DW) della comunità vegetale' e 'contenuto di carotenoidi nei getti annuali' (entrambi part  $R^2$  0.06, CI = [0.04 – 0.19]). L'altezza della comunità vegetale ha contribuito al calcolo della varianza totale con una percentuale del 3% (CI = [0.01 – 0.15]), mentre i caratteri 'lunghezza del getto annuale' e 'contenuto di betacianine' non hanno in alcun modo influito su questo indice (Fig 13).

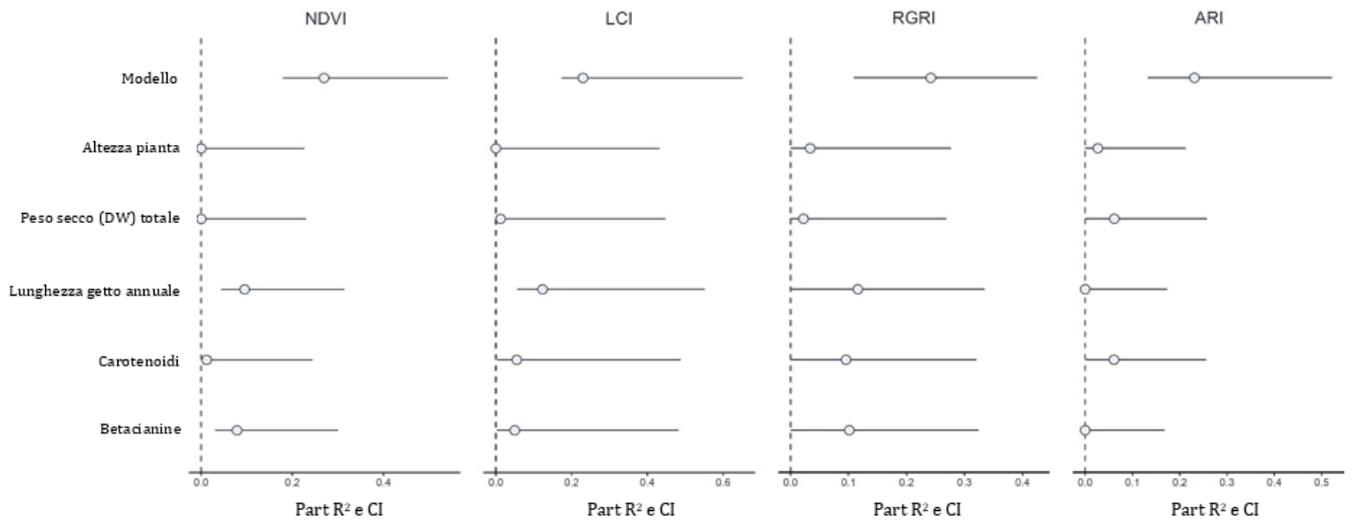


Figura 13 – Contributo delle variabili della comunità vegetale (Altezza pianta, Peso secco (DW) totale) e di *S. fruticosa* (Lunghezza getto annuale, Carotenoidi, Betacianine) alla spiegazione della varianza degli indici multispettrali (NDVI, LCI, RGRI, ARI). I punti rappresentano l' $R^2$  parziale mentre le linee l'intervallo di confidenza (CI) al 95%.

Variabile dipendente	Variabili indipendenti	Df	Valore t	Valore p	Part-R <sup>2</sup>
NDVI	Altezza pianta	1,11	0.78	0.448	0
	Peso secco (DW) totale	1,11	-0.76	0.456	0
	Lunghezza getto annuale	1,11	2.83	<b>0.014</b>	0.10
	Carotenoidi	1,11	1.30	0.212	0.01
	Betacianine	1,11	-2.33	<b>0.036</b>	0.08
LCI	Altezza pianta	1,12	0.22	0.828	0.00
	Peso secco (DW) totale	1,12	-1.86	0.085	0.01
	Lunghezza getto annuale	1,12	2.94	<b>0.011</b>	0.12
	Carotenoidi	1,12	2.04	0.062	0.06
	Betacianine	1,12	-1.81	<b>0.093</b>	0.05
RGRI	Altezza pianta	1,11	0.54	0.592	0.03
	Peso secco (DW) totale	1,11	-0.47	0.644	0.02

	Lunghezza getto annuale	1,11	-1.99	<b>0.068</b>	0.12
	Carotenoidi	1,11	-1.91	<b>0.079</b>	0.10
	Betacianine	1,11	1.57	0.140	0.10
<hr/>					
ARI	Altezza pianta	1,11	0.82	0.424	0.03
	Peso secco (DW) totale	1,11	-2.34	<b>0.036</b>	0.06
	Lunghezza getto annuale	1,11	2.24	<b>0.043</b>	0.00
	Carotenoidi	1,11	-1.61	0.162	0.06
	Betacianine	1,11	-0.75	0.467	0.00

*Tabella 2 – Report dell'analisi della spiegazione della varianza degli indici multispettrali considerati imputabile alle singole variabili indipendenti (i.e. altezza pianta, peso secco totale, lunghezza getto annuale, carotenoidi, betacianine).*

## 5. DISCUSSIONE

I risultati di questa ricerca hanno permesso di confermare che il fattore di sommersione è determinante nella modifica delle comunità vegetali negli ambienti di barena lagunare, inoltre, si è osservata la forte interazione con la granulometria del substrato, ovvero con il contenuto di argilla nel terreno. Il livello di stress abiotico è, dunque, determinato non solo dalla sommersione ma anche dalla capacità del suolo di trattenere l'acqua, creando quindi fenomeni di anossia (Elisa Pellegrini et al. 2022). L'effetto della sommersione ha mostrato effetti significativi sulle principali comunità vegetali, agendo come fattore di variazione della biomassa vegetale, dell'altezza delle piante e della loro diversità, tuttavia, nella risposta funzionale della dominante specie chiave *S. fruticosa*, ha mostrato forte interazione con il contenuto di argilla presente nei sedimenti (lunghezza del getto annuale apicale, contenuto di carotenoidi). Sia i fattori di crescita che le caratteristiche fisiologiche di *S. fruticosa* hanno dimostrato sensibilità al gradiente abiotico considerato, seppure, in certi casi, il contenuto di argilla nel terreno (a cui segue una maggiore stagnazione dell'acqua) ha dimostrato di essere un fattore maggiormente selettivo rispetto all'effetto della sommersione. L'analisi dell'interrelazione tra le caratteristiche della comunità vegetale e i tratti funzionali di *S. fruticosa*, con l'ausilio degli indici multispettrali ottenuti con le tecnologie ad alta risoluzione di telerilevamento, ha consentito di determinare che le caratteristiche della specie chiave siano aspetti più efficaci nella creazione di un modello di *upscaling* in ambiente barenicolo. In particolare, il fattore di crescita di *S. fruticosa* (lunghezza del fusto) e i tratti fisiologici (contenuto di betacianine e carotenoidi) sono risultati come i principali fattori legati agli indici multispettrali. Noto che le specie chiave siano determinanti nella modulazione di risposte ecosistemiche ai cambiamenti globali, questa ricerca ha confermato che nello studio dello stress abiotico causato dalla sommersione, è inevitabile considerarne la risposta, che può essere elevata a scala di intero ecosistema ((Pellegrini et al., 2018), (Boscutti et al. 2018)).

### 5.1 Risposta della comunità vegetale ai gradienti di sommersione e granulometria del suolo

L'incremento del gradiente di sommersione ha prodotto una significativa perdita di diversità delle specie vegetali, una diminuzione della biomassa e dell'altezza delle piante presenti. A causa di condizioni ecologiche peculiari e limitanti, le barene di laguna sono considerate come un ambiente di bassa diversità di specie nelle comunità vegetali, ambiente dove le specie con caratteristiche di adattabilità migliori sono dominanti e lasciano spazio a poche altre ((Casanova e Brock 2000); (Kunza

e Pennings 2008), (Vitti et al. 2020)). Tuttavia, diversi studi hanno dimostrato la capacità delle specie chiave di contribuire indirettamente alla diversità di specie delle comunità modellando le risposte delle piante alle caratteristiche del suolo ((Elisa Pellegrini et al. 2018b); (Redelstein et al. 2018)) e conseguentemente modificando le interazioni tra le piante presenti nella comunità ((Elisa Pellegrini et al. 2022)). La sommersione ha un effetto significativo sulla produzione primaria ecosistemica influenzando la biomassa della comunità delle specie vegetali (peso secco totale), dunque influenzando sulla produttività delle specie di barena modificando un ampio spettro di fattori che ne regolano la crescita (Janousek e Mayo 2013). In questo contesto, la sostanziale perdita di biomassa lungo il gradiente potrebbe essere causata da una riduzione del tasso di crescita delle specie e/o dalla copertura vegetale (Buffington et al. 2020). Si è osservata una discontinuità nella copertura vegetale in relazione alla densità dei popolamenti e del relativo livello di stress (Moreno, Alonso, e Juan 2020), dimostrando che alcune specie presentano un limite di tolleranza ai livelli di sommersione, superato il quale, si nota una rapida caduta nella produttività (Janousek e Mayo 2013).

Il contenuto di argilla nei sedimenti non ha mostrato effetti diretti sulle comunità vegetali, mentre ha contribuito alla risposta funzionale dell'alofita chiave *S. fruticosa* che ha generato un effetto indiretto secondario sulla risposta a livello della comunità. È stato già stato dimostrato che *S. fruticosa* si comporta come specie competitiva o facilitatrice verso le altre specie a seconda del livello sommersione e dell'interazione con il contenuto di argilla nel terreno (Elisa Pellegrini et al. 2022).

Il contenuto di sostanza secca (DMC – *Dry Matter Content*) della popolazione vegetale non è stato influenzato da nessuno dei due fattori di stress abiotico. Infine, la diversità di specie (secondo l'indice di Shannon) ha mostrato una riduzione lungo il gradiente di sommersione, ma non ha dimostrato reciprocità alcuna con il contenuto di argilla nei sedimenti.

## **5.2 Risposta della specie chiave *S. fruticosa* ai gradienti di sommersione e granulometria del suolo**

### **5.2.1 Crescita della pianta**

Come precedentemente ipotizzato, la sommersione ha influenzato significativamente la crescita e la risposta fisiologica di *S. fruticosa*, tuttavia, è stata spesso osservata un'interazione con la granulometria del substrato, più precisamente, con il contenuto di argilla nei sedimenti.

In termini di biomassa, ad elevati livelli di sommersione, la pianta ha mostrato un basso tasso di incremento annuale (peso secco del getto annuale apicale), mentre l'allungamento, considerato come 'lunghezza getto annuale' (Tab. 1) è stata osservata una interazione tra lo stress abiotico causato dalla

sommersione e quello generato dal contenuto di argilla nel terreno, dimostrando valori minimi nei siti caratterizzati da un elevato livello di sommersione e da un'elevata presenza di argilla. In termini di allungamento delle piante, sedimenti composti da granulometrie maggiori, come i terreni sabbiosi, ad esempio, permettono l'allungamento della pianta, utilizzato da questa come meccanismo di fuga. Nel caso contrario, in condizione di anossia, caratterizzata dalla presenza di un suolo a granulometria fine (terreno argilloso), la crescita delle piante viene notevolmente limitata, in maniera particolare in termini di allungamento dei getti annuali apicali.

L'origine di questi processi fisiologici risiede nella variazione di diversi parametri come (i) la limitata diffusione dei gas O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> che porta ad un rallentamento dell'attività metabolica (Geigenberger 2003), (ii) l'aumento della presenza di sostanze tossiche in terreni in condizioni di ambiente (terreno) ridotto (Colmer e Voeselek 2009), (iii) la limitata disponibilità e capacità di assunzione di nutrienti (Koch, Mendelsohn, e McKee 1990), e infine (iv) un incremento dello stress osmotico causato dal continuo apporto di sali. In linea generale la sommersione esercita un impatto negativo sulla produzione di biomassa, tuttavia recenti studi suggeriscono il contrario. Secondo delle ricerche condotte da Lan et al. (2021) e da Reents et al. (2021), periodi di sommersione possono migliorare certi aspetti nella crescita delle piante a seconda delle caratteristiche genotipiche e fenotipiche delle specie ((Lan et al. 2021), (Reents et al. 2021)).

L'allungamento del getto annuale apicale di *S. fruticosa* potrebbe rappresentare, secondo le osservazioni sopracitate, una strategia di fuga dalla sommersione condivisa con altre specie di barena (Lou et al. 2016). Un'ulteriore conferma di quanto appena descritto la propone un esperimento in laboratorio su *S. fruticosa* eseguito da Pellegrini et al. (2017), durante il quale si è osservato uno sviluppo rapido di sottili articolazioni con la funzione di *snorkel* in condizioni di sommersione completa della pianta (Pellegrini 2017). È stato precedentemente confermato che l'aumento delle condizioni di stress da anossia sia correlato all'interazione tra le caratteristiche del substrato e la sommersione, che quindi generano delle risposte contrastanti nelle caratteristiche del tasso di crescita delle piante (Elisa Pellegrini et al. 2022). Di fatto, l'incremento annuale di produzione di biomassa rappresenta un effetto diretto delle limitazioni causate dalla sommersione. Dunque, con queste ulteriori informazioni, si può affermare che l'allungamento delle articolazioni di *S. fruticosa* sia causato da condizioni di prolungata sommersione, in siti nei quali il substrato (sabbioso) permetta il drenaggio dell'acqua. Quanto appena descritto viene riferito a periodi di bassa marea, che favoriscono la riduzione del tempo di esposizione della pianta a condizioni di anossia (Bradley e Morris 1990). Siti in cui il contenuto di argilla è elevato non permettono alla pianta di allungarsi; questa tuttavia è in grado, probabilmente, di ricollocare le risorse e di aumentare la produzione della biomassa (Elisa Pellegrini et al. 2018b).

## 5.2.2 Fisiologia della pianta

La sommersione ha stimolato la produzione di pigmenti secondari (carotenoidi) in *S. fruticosa*, confermando le ipotesi e le previsioni precedentemente stipulate, non ha però influenzato il contenuto della clorofilla dei fusti fotosintetici. La produzione di pigmenti è stata precedentemente correlata allo stress abiotico, poiché in vari studi ha mostrato di essere un efficace meccanismo di controllo delle attività metaboliche in specie sottoposte a continue sollecitazioni da parte di fattori abiotici (salinità, concentrazione di particolari ioni) e biotici (patogeni) ((Duarte et al. 2013); (Ibraheem, Al-Zahrani, e Mosa 2022)). Questo studio ha rivelato che il contenuto di carotenoidi raggiunge valori massimi in casi in cui gli effetti della sommersione siano rafforzati dalla presenza di argilla nei sedimenti, mentre nel caso contrario, in siti dove la presenza di argilla presentava scarse concentrazioni e prevaleva una composizione granulometrica maggiore in termini di particelle, le condizioni di anossia erano minime ed è stato rilevato un contenuto irrilevante di carotenoidi nei getti annuali di *S. fruticosa*. In suoli con buone caratteristiche di permeabilità la sommersione ha causato una diminuzione nella produzione dei carotenoidi.

L'effetto della sommersione non ha influito sulla produzione di flavonoidi, mentre è stato osservato che l'alofita chiave *S. fruticosa*, è stata stimolata a produrre un maggior quantitativo di betacianine in siti con un maggior contenuto di argilla nel terreno in condizioni di sommersione. I flavonoidi sono pigmenti spesso utilizzati dalle piante in risposta a stress abiotici (i.e. temperatura, luce) e biotici (i.e. erbivori, patogeni) (Filippi et al. 2021).

Le betacianine, pigmenti inclusi nel gruppo delle betalaine, si riscontrano comunemente in certe famiglie dell'ordine delle *Caryophyllales* come sostitute delle antocianine. L'accumulo di tali pigmenti negli organi vegetativi fa parte dei meccanismi di risposta della pianta a stress ambientali, tra cui la salinità, la radiazione UV e la siccità ((Duarte et al. 2013); (Hayakawa e Agarie 2010)) in specie sensibili alla presenza di ossigeno e hanno proprietà fotoprotettrici ((Jain e Gould 2015); (Li et al. 2018); (Ibraheem, Al-Zahrani, e Mosa 2022)).

## 5.3 Prospettiva dell'upscaling

Dai risultati ottenuti dalle immagini multispettrali acquisite con il telerilevamento è stato osservato che gli indici multispettrali consentono di fornire utili informazioni per discriminare diversi livelli di sommersione. Gli indici multispettrali sono stati applicati ad ambienti di barena lagunare in diversi studi con lo scopo di valutare lo stato della vegetazione ((Sun, Fagherazzi, e Liu 2018); (Yeo et al. 2020)) e per l'identificazione della distribuzione ed estensione di determinate popolazioni di specie alofite (Zhang et al. 2020). L'analisi con l'indice NDVI ha dunque dimostrato di essere una tecnica

attendibile nell'identificazione diretta ed indiretta dei diversi livelli di sommersione. Il concetto viene ribadito in quanto, ad esempio, la mappatura della vegetazione con l'ausilio di questo indice, possa implicitamente fornire identificazioni indirette del gradiente di sommersione (Yeo et al. 2020).

I risultati dimostrano che la riduzione della produzione di biomassa, da parte di *S. fruticosa*, sia una risposta della comunità vegetale allo stress abiotico della sommersione. Questa informazione potrebbe suggerire una possibile correlazione, in termini di *upscaling*, tra la risposta delle specie prese in studio e quella dell'intero ecosistema, a prescindere dal livello di sommersione considerato. L'NDVI è considerato un indice affidabile, in una moltitudine di ambienti differenti, per l'identificazione della tipologia delle comunità vegetali, della produzione di biomassa (Peciña et al. 2021), della fenologia e della capacità fotosintetica della vegetazione (Rocchini et al. 2021) e così anche nell'ambiente di barena (Sun, Fagherazzi, e Liu 2018).

Con questo studio è stata confermata l'efficacia degli indici multispettrali utilizzati nell'analisi del gradiente di stress, in grado inoltre di fornire una buona prospettiva sull'interazione tra la sommersione e in contenuto di argilla nei sedimenti. Le caratteristiche vegetazionali, in particolar modo incentrate sulla crescita di *S. fruticosa* (i.e., lunghezza del fusto) e i tratti fisiologici (i.e. contenuto di betacianine e carotenoidi), rappresentano dunque, dopo l'analisi dei risultati di questo studio, le caratteristiche che maggiormente influiscono sulla risposta multispettrale. Vari autori di ricerche svolte precedentemente hanno dimostrato la validità in termini di corrispondenza degli indici nella risposta della comunità vegetazionale alla sommersione, proponendo, appunto, l'NDVI come indice per la quantificazione della biomassa e per altre caratteristiche ecosistemiche ((Rocchini et al. 2021); (Sun, Fagherazzi, e Liu 2018); (Peciña et al. 2021)). In questo studio, si è compreso che le risposte individuali da parte della specie alofita chiave *S. fruticosa* siano di maggior importanza nella determinazione dei segnali multispettrali della vegetazione. Dai risultati è emerso che la risposta dallo stress di sommersione (i.e. biomassa, diversità di specie) da parte della comunità vegetale sia legata alla riduzione nella produzione di biomassa da parte della specie chiave *S. fruticosa*, suggerendo una possibilità di estendere la risposta da parte della specie presa in considerazione alla risposta dell'intero ecosistema, a prescindere dal livello di sommersione considerato. È dunque possibile applicare un modello di *upscaling*.

Le specie chiave di barena si sono dimostrate, in vari studi, di essere in grado di influire sulla risposta della comunità vegetale attraverso interazioni tra le caratteristiche vegetali ed edafiche ((Elisa Pellegrini et al. 2018b), (Elisa Pellegrini et al. 2022)). Le interazioni appena citate, secondo questo studio, sono il punto cardine che permette di confermare una correlazione tra il telerilevamento della vegetazione e il monitoraggio delle proprietà a scala di ecosistema. L'NDVI è uno degli indici maggiormente utilizzati nelle tecniche di *upscaling*. Per lo svolgimento di questo studio, sono stati

utilizzati ulteriori indici multispettrali: LCI, RGRI, ARI (Tab. 7). Tali indici si sono rivelati utili nell'approfondimento dello studio delle tecniche di *upscaling* nella risposta alla sommersione da parte dell'ambiente di barena. L'indice LCI è stato influenzato principalmente nello studio delle caratteristiche di crescita della specie chiave *S. fruticosa* ed è stato spiegato, seppure solo secondariamente, dal contenuto di carotenoidi e betacianine. L'LCI è un indice altamente sensibile nella valutazione del contenuto di clorofilla e nella determinazione della distribuzione degli apparati fogliari in specie vegetali; dunque, il suo utilizzo viene in genere attribuito allo studio di tali caratteristiche della vegetazione. Nei siti considerati in questo studio è stato utilizzato, per una ulteriore rappresentazione dello stato generale di *S. fruticosa*, in modo analogo l'indice RGRI la cui varianza è stata spiegata dai tratti fisiologici e di crescita. L'RGRI trova spesso applicazione nell'individuazione dei fattori di stress fornendo dati utili in termini di produzione in agricoltura. L'indice ARI è stato utile nell'acquisizione della maggior parte dei segnali espressi dai carotenoidi presenti nella specie chiave, mostrando valori inferiori a concentrazioni maggiori di questo pigmento. L'indice multispettrale ARI viene spesso utilizzato nell'acquisizione di dati riguardanti il contenuto di antocianine (Gitelson, Merzlyak, e Chivkunova 2007), tuttavia in questo studio ha dimostrato di essere un ottimo strumento per una migliore testimonianza dei cambiamenti in termini di contenuto di carotenoidi e di variazioni della produzione di biomassa da parte della comunità vegetale. Quanto descritto precedentemente potrebbe essere legato ad una scarsa interrelazione tra le antocianine (non prese in analisi) e i carotenoidi, oppure potrebbe essere correlato a una variazione specie-specifica nella riflettanza a causa della tipica morfologia succulenta che contraddistingue la specie chiave *S. fruticosa*. Inoltre, i risultati ottenuti potrebbero stimolare ulteriori indagini nelle interrelazioni tra i gradienti di stress e i cambiamenti della firma spettrale nello studio delle specie vegetali. È stato precedentemente dimostrato come lo stress sia in grado di causare variazioni nella risposta spettrale ((de Jong et al. 2012); (Sanches, Souza Filho, e Kokaly 2014)). Nelle specie alofite di barena, l'accumulo di pigmenti, come di altri metaboliti, potrebbe rappresentare un parametro fondamentale nello studio del cromatismo vegetale ((Marchesini et al. 2016); (E. Pellegrini et al. 2020)). Questo studio ha permesso un'analisi solo parziale di una risposta fisiologica altamente complessa, per la quale, in un futuro prossimo sarà, con alta probabilità, possibile migliorarne le prospettive di *upscaling* dell'adattamento eco fisiologico allo stress abiotico.

## 6. CONCLUSIONI

I risultati di questo studio confermano l'ipotesi dell'influenza negativa che i fattori di crescita delle piante alofite subiscono a causa della sommersione. In maniera particolarmente apprezzabile, questo studio ha dimostrato come lo stress abiotico da sommersione abbia la capacità di regolare i meccanismi morfologici e fisiologici delle comunità vegetali, in termini di produzione di biomassa e dei vari tratti funzionali, presi in analisi nello studio della specie chiave considerata, confermando i risultati di studi precedentemente effettuati ((Buffington et al. 2020); (Pan et al. 2021); (Woo e Takekawa 2012)). Dagli scenari previsti per un futuro prossimo, in particolar modo incentrati sull'innalzamento del livello del mare (Fabrizio Antonioli et al. 2020), si prevede una probabile maggiore presenza di aree soggette a inondazioni nelle quali l'effetto della sommersione causerà una progressiva riduzione della copertura vegetale, un drastico calo nella produzione di biomassa, assieme ad una diminuzione dell'altezza delle popolazioni stesse. Come conseguenza a questi cambiamenti, è stata già ipotizzata una possibile alterazione nei processi di modellamento e crescita delle barene causata dalla stabilizzazione del materiale sedimentario intercettate dalle piante alofite presenti in questi ambienti ((Janousek e Mayo 2013); (Reef et al. 2018)). La combinazione caratterizzata da una scarsa copertura vegetale assieme alla presenza di individui di dimensioni ridotte, porta inevitabilmente ad una minore capacità da parte delle specie di intercettare, trattenere e dunque di depositare nuove particelle di sedimento (Voss et al. 2006). La conseguenza di quanto appena descritto, è una riduzione, quindi, della possibilità della vegetazione di portare le morfologie lagunari a condizioni di equilibrio a pari passo con il tasso di innalzamento del livello del mare.

Dai risultati ottenuti con le tecniche di telerilevamento, questo studio ha permesso di evidenziare l'efficienza dell'applicazione di indici semplici, quali l'NDVI, nell'analisi della risposta della comunità vegetale, grazie alle tecnologie che permettono un'indagine approfondita sulle diverse bande multispettrali. Tuttavia, nel monitoraggio delle aree più critiche (con livelli di sommersione elevati), nelle quali (i) la risposta della vegetazione svolge un ruolo fondamentale nella sopravvivenza dell'intero ecosistema (Ferronato et al. 2018) e (ii) nella quale sono presenti numerosi fattori in grado di alterare i valori di riflettanza, potrebbe essere appropriato prestare una maggiore attenzione alla considerazione delle variazioni specifiche della firma spettrale espressa dalle specie alofite. L'analisi di certi meccanismi, come ad esempio l'accumulo di pigmenti e dei metaboliti secondari in relazione all'aumento del livello di stress, sono da considerare come fattori fondamentali negli studi futuri di monitoraggio tramite tecniche di telerilevamento. La raccolta e la conservazione dei campioni prelevati sul campo, nella fase sperimentale di questo studio, rappresenta un'opportunità per le

ricerche future. Così sono promettenti anche le applicazioni di nuovi indici vegetazionali, sviluppati e approvati nel corso di varie ricerche, capaci di rappresentare gli aspetti vegetazionali considerati (Marchesini et al. 2016). I metodi di *upscaling* negli "ecosistemi sentinella", come per l'appunto le barene, o in ambienti capaci di fornire tempestivamente informazioni riguardanti i cambiamenti regionali o globali, verranno, in un futuro prossimo, considerati fondamentali nello studio e nel monitoraggio delle dinamiche di tali ecosistemi, dando risposte rapide e continue nel tempo.

La ridotta capacità di crescita delle piante osservata in questo studio potrebbe causare una moltitudine di conseguenze nella funzione e nella struttura delle barene in vista ai futuri scenari di innalzamento del livello del mare. Una prima conseguenza di quanto appena detto, potrebbe essere una limitata disponibilità di nutrienti nelle reti alimentari di questi ambienti. Un'altra conseguenza alla riduzione della capacità di crescita della vegetazione è una limitata capacità di contrastare i fenomeni erosivi che limitano, dunque, la possibilità delle barene di accrescere, scongiurando gli effetti dell'innalzamento del mare. Ad una riduzione nella dimensione delle piante e una minore densità di vegetazione consegue una minore capacità di cattura e deposito di sedimenti trasportati dalle maree, che causa un minor apporto di minerali nei suoli di barene lagunari (Voss et al. 2006, 20). Una diminuzione dei nutrienti nel suolo crea condizioni avverse alla crescita radicale della vegetazione (Nyman et al. 2006): questa condizione provoca un indebolimento strutturale delle barene, rendendole maggiormente suscettibili a fenomeni erosivi (Deegan et al. 2012).

Le limitazioni alla crescita della specie chiave *S. fruticosa*, imposte dallo stress abiotico, sono causate, in prevalenza, dall'interazione tra il gradiente di sommersione e le caratteristiche edafiche (i.e., contenuto di argilla nei sedimenti). La ridotta capacità di crescita è una caratteristica ridondante sugli aspetti fenotipici e sul rendimento fisiologico della pianta, che sono anche gli aspetti chiave nella lettura della variazione degli indici acquisiti tramite telerilevamento. La sommersione è stata inoltre agente di notevoli effetti anche sulle proprietà della comunità vegetale, riducendone la diversità di specie e diminuendo il tasso di produttività (i.e. peso secco). Gli indici derivati dal telerilevamento si sono dimostrati strumenti vantaggiosi nell'*upscaling* degli effetti causati dallo stress abiotico in ambiente di barena, dimostrando un'ottima capacità di acquisizione dei segnali di risposta da parte della specie chiave e dell'intera comunità vegetale presente. Quanto appena descritto dimostra, dunque, l'efficacia del telerilevamento come strumento capace di fornire una visione chiara sulle diverse scale ecologiche, dimostrandosi come metodo vantaggioso nell'analisi della distribuzione spaziale, capace inoltre di fornire previsioni riguardanti i cambiamenti nella vegetazione causati dal gradiente di stress abiotico. I risultati di questa ricerca potrebbero rappresentare una novità nel campo della valutazione e monitoraggio degli impatti causati dal corrente innalzamento del livello del mare nelle aree di laguna. Con questo studio si è evidenziata la problematica della progressiva riduzione

della copertura vegetale e della produzione di biomassa, la diminuzione dell'altezza dei popolamenti e l'aumento delle superfici soggette ad alto grado di sommersione, a causa del continuo e progressivo aumento del livello del mare. È stato inoltre sottolineato, sempre secondo questo studio, il ruolo dei processi fisiologici, quale l'accumulo di pigmenti e metaboliti secondari in relazione all'aumento del livello di stress, che potrebbe dimostrarsi fondamentale in future operazioni di monitoraggio tramite telerilevamento e successiva applicazione dell'*upscaling*. In conclusione, le prospettive di *upscaling* applicate agli "ecosistemi sentinella", come le barene, potrebbero svolgere il ruolo di campanello d'allarme anticipando gli eventi dei cambiamenti globali o regionali, fornendo inoltre un'ampia visione sugli scenari futuri dell'intero sistema costiero.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Aghaleh, M., V. Niknam, H. Ebrahimzadeh, e K. Razavi. 2009. «Salt stress effects on growth, pigments, proteins and lipid peroxidation in *Salicornia persica* and *S. europaea*». *Biologia plantarum* 53 (2): 243–48. <https://doi.org/10.1007/s10535-009-0046-7>.
- Akcin, Adnan, e Erkan Yalcin. 2016. «Effect of Salinity Stress on Chlorophyll, Carotenoid Content, and Proline in *Salicornia Prostrata* Pall. and *Suaeda Prostrata* Pall. Subsp. *Prostrata* (Amaranthaceae)». *Brazilian Journal of Botany* 39 (1): 101–6. <https://doi.org/10.1007/s40415-015-0218-y>.
- Antonioli, F., M. Anzidei, A. Amorosi, V. Lo Presti, G. Mastronuzzi, G. Deiana, G. De Falco, et al. 2017. «Sea-Level Rise and Potential Drowning of the Italian Coastal Plains: Flooding Risk Scenarios for 2100». *Quaternary Science Reviews* 158 (febbraio): 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.12.021>.
- Antonioli, Fabrizio, Giovanni De Falco, Valeria Lo Presti, Lorenzo Moretti, Giovanni Scardino, Marco Anzidei, Davide Bonaldo, et al. 2020. «Relative Sea-Level Rise and Potential Submersion Risk for 2100 on 16 Coastal Plains of the Mediterranean Sea». *Water* 12 (8): 2173. <https://doi.org/10.3390/w12082173>.
- ARPA FVG. 2020. «Inquadramento geomorfologico e idrologico delle lagune di Marano e di Grado». 2020. [http://cmsarpa.regione.fvg.it/cms/tema/acqua/acque-marino-costiere-e-lagunari/II\\_territorio/Inquadramento-geomorfologico-e-idrologico-delle-lagune-di-Marano-e-di-Grado.html](http://cmsarpa.regione.fvg.it/cms/tema/acqua/acque-marino-costiere-e-lagunari/II_territorio/Inquadramento-geomorfologico-e-idrologico-delle-lagune-di-Marano-e-di-Grado.html).
- ARPAV. 2019. «Decreto Legislativo 152/2006 — Arpa Veneto». 2019. [https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/rifiuti/file-e-allegati/normativa/DLGS\\_152\\_3\\_aprile\\_2006.pdf/view](https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/rifiuti/file-e-allegati/normativa/DLGS_152_3_aprile_2006.pdf/view).
- Barnes, R. S. K. 1980. *Coastal Lagoons*. CUP Archive.
- Bockelmann, Anna-C, Jan P Bakker, Reimert Neuhaus, e Jochim Lage. 2002. «The Relation between Vegetation Zonation, Elevation and Inundation Frequency in a Wadden Sea Salt Marsh». *Aquatic Botany* 73 (3): 211–21. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(02\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00022-0).
- Bonometto, A., A. Feola, F. Rampazzo, C. Gion, D. Berto, E. Ponis, e R. Boscolo Brusà. 2019. «Factors Controlling Sediment and Nutrient Fluxes in a Small Microtidal Salt Marsh within the Venice Lagoon». *Science of The Total Environment* 650 (febbraio): 1832–45. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.142>.

- Boscutti, Francesco, Valentino Casolo, Paola Beraldo, Enrico Braidot, Marco Zancani, e Christian Rixen. 2018. «Shrub Growth and Plant Diversity along an Elevation Gradient: Evidence of Indirect Effects of Climate on Alpine Ecosystems». *PLOS ONE* 13 (4): e0196653. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196653>.
- Bradley, Pm, e Jt Morris. 1990. «Physical Characteristics of Salt Marsh Sediments: Ecological Implications». *Marine Ecology Progress Series* 61: 245–52. <https://doi.org/10.3354/meps061245>.
- Brewer, J. Stephen, Jonathan M. Levine, e Mark D. Bertness. 1997. «Effects of Biomass Removal and Elevation on Species Richness in a New England Salt Marsh». *Oikos* 80 (2): 333. <https://doi.org/10.2307/3546601>.
- Buffington, Kevin J., Arianna C. Goodman, Chase M. Freeman, e Karen M. Thorne. 2020. «Testing the Interactive Effects of Flooding and Salinity on Tidal Marsh Plant Productivity». *Aquatic Botany* 164 (maggio): 103231. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2020.103231>.
- Burke et al. 2001. «Coastal Ecosystems», 93.
- Carrasco, A.R., Ó. Ferreira, e D. Roelvink. 2016. «Coastal Lagoons and Rising Sea Level: A Review». *Earth-Science Reviews* 154 (marzo): 356–68. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.007>.
- Casanova, Michelle T., e Margaret A. Brock. 2000. «How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities?» *Plant Ecology* 147 (2): 237–50. <https://doi.org/10.1023/A:1009875226637>.
- Cheng, Gong, Xingxing Xie, Junwei Han, Lei Guo, e Gui-Song Xia. 2020. «Remote Sensing Image Scene Classification Meets Deep Learning: Challenges, Methods, Benchmarks, and Opportunities». *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13: 3735–56. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3005403>.
- Cingano. 2021. «Effetti dello stress da sommersione sulle alofite di barena: nuove prospettive di upscaling».
- Colmer, T. D., e L. A. C. J. Voesenek. 2009. «Flooding Tolerance: Suites of Plant Traits in Variable Environments». *Functional Plant Biology* 36 (8): 665. <https://doi.org/10.1071/FP09144>.
- Cott, Grace M., Darren T. Reidy, Deborah V. Chapman, e Marcel A.K. Jansen. 2013. «Waterlogging Affects the Distribution of the Saltmarsh Plant *Atriplex Portulacoides* (L.) Aellen». *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 208 (5–6): 336–42. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2013.04.006>.
- Davis, R. A. Jr. 2012. *Coastal Sedimentary Environments*. Springer Science & Business Media.

- Deegan, Linda A., David Samuel Johnson, R. Scott Warren, Bruce J. Peterson, John W. Fleeger, Sergio Fagherazzi, e Wilfred M. Wollheim. 2012. «Coastal Eutrophication as a Driver of Salt Marsh Loss». *Nature* 490 (7420): 388–92. <https://doi.org/10.1038/nature11533>.
- Duarte, B., D. Santos, J.C. Marques, e I. Caçador. 2013. «Ecophysiological Adaptations of Two Halophytes to Salt Stress: Photosynthesis, PS II Photochemistry and Anti-Oxidant Feedback – Implications for Resilience in Climate Change». *Plant Physiology and Biochemistry* 67 (giugno): 178–88. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.03.004>.
- Eleuterius e Eleuterius. 1979. «Tide levels and salt marsh zonation».
- Ferronato, Chiara, Maria Speranza, Lucia Ferroni, Alessandro Buscaroli, Gilmo Vianello, e Livia Vittori Antisari. 2018. «Vegetation Response to Soil Salinity and Waterlogging in Three Saltmarsh Hydrosequences through Macronutrients Distribution». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 200 (gennaio): 131–40. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.10.019>.
- Filippi, A., E. Braidot, E. Petrusa, M. Fabro, M. Vuerich, e F. Boscutti. 2021. «Plant Growth Shapes the Effects of Elevation on the Content and Variability of Flavonoids in Subalpine Bilberry Stands». A cura di D Byers. *Plant Biology* 23 (2): 241–49. <https://doi.org/10.1111/plb.13194>.
- Fontolan, Giorgio, Simone Pillon, Annelore Bezzi, Renato Villalta, Marco Lipizer, Antonella Triches, e Alessandro D’Aietti. 2012. «Human Impact and the Historical Transformation of Saltmarshes in the Marano and Grado Lagoon, Northern Adriatic Sea». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 113 (novembre): 41–56. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.02.007>.
- Fukao, Takeshi, Blanca Estela Barrera-Figueroa, Piyada Juntawong, e Julián Mario Peña-Castro. 2019. «Submergence and Waterlogging Stress in Plants: A Review Highlighting Research Opportunities and Understudied Aspects». *Frontiers in Plant Science* 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00340>.
- Gamon, J. A., e J. S. Surfus. 1999. «Assessing Leaf Pigment Content and Activity with a Reflectometer». *New Phytologist* 143 (1): 105–17. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00424.x>.
- Gehrels, Roland. 2010. «Sea-Level Changes since the Last Glacial Maximum: An Appraisal of the IPCC Fourth Assessment Report: SEA-LEVEL CHANGES SINCE THE LAST GLACIAL MAXIMUM». *Journal of Quaternary Science* 25 (1): 26–38. <https://doi.org/10.1002/jqs.1273>.
- Geigenberger, Peter. 2003. «Response of Plant Metabolism to Too Little Oxygen». *Current Opinion in Plant Biology* 6 (3): 247–56. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00038-4](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00038-4).
- Gitelson, Anatoly A., Mark N. Merzlyak, e Olga B. Chivkunova. 2007. «Optical Properties and Nondestructive Estimation of Anthocyanin Content in Plant Leaves¶». *Photochemistry and*

- Photobiology* 74 (1): 38–45. [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2001\)0740038OPANEO2.0.CO2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2001)0740038OPANEO2.0.CO2).
- Harvey, L.D. Danny. 2000. «Upscaling in Global Change Research». *Climatic Change* 44 (3): 225–63. <https://doi.org/10.1023/A:1005543907412>.
- Hayakawa, Keisuke, e Sakae Agarie. 2010. «Physiological Roles of Betacyanin in a Halophyte, *Suaeda Japonica* Makino». *Plant Production Science* 13 (4): 351–59. <https://doi.org/10.1626/pps.13.351>.
- Ibraheem, Farag, Ateeq Al-Zahrani, e Ahmed Mosa. 2022. «Physiological Adaptation of Three Wild Halophytic Suaeda Species: Salt Tolerance Strategies and Metal Accumulation Capacity». *Plants* 11 (4): 537. <https://doi.org/10.3390/plants11040537>.
- Jain, Gagandeep, e Kevin S Gould. 2015. «Are Betalain Pigments the Functional Homologues of Anthocyanins in Plants?» *Environmental and Experimental Botany* 119 (novembre): 48–53. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.06.002>.
- Janousek, Christopher N., e Cara Mayo. 2013. «Plant Responses to Increased Inundation and Salt Exposure: Interactive Effects on Tidal Marsh Productivity». *Plant Ecology* 214 (7): 917–28. <https://doi.org/10.1007/s11258-013-0218-6>.
- Jong, Steven M. de, Elisabeth A. Addink, Priscilla Hoogenboom, e Wiebe Nijland. 2012. «The Spectral Response of *Buxus Sempervirens* to Different Types of Environmental Stress – A Laboratory Experiment». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 74 (novembre): 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.08.005>.
- Kjerfve, Björn. 1994. «Chapter 1 Coastal Lagoons». In *Elsevier Oceanography Series*, 60:1–8. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70006-0](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70006-0).
- Koch, Marguerite S., Irving A. Mendelssohn, e Karen L. McKee. 1990. «Mechanism for the Hydrogen Sulfide-Induced Growth Limitation in Wetland Macrophytes». *Limnology and Oceanography* 35 (2): 399–408. <https://doi.org/10.4319/lo.1990.35.2.0399>.
- Kunza, Amy E., e Steven C. Pennings. 2008. «Patterns of Plant Diversity in Georgia and Texas Salt Marshes». *Estuaries and Coasts* 31 (4): 673–81. <https://doi.org/10.1007/s12237-008-9058-3>.
- Lan, Zhichun, Yasong Chen, Ruichang Shen, Yongjiu Cai, Hao Luo, Binsong Jin, e Jiakuan Chen. 2021. «Effects of Flooding Duration on Wetland Plant Biomass: The Importance of Soil Nutrients and Season». *Freshwater Biology* 66 (2): 211–22. <https://doi.org/10.1111/fwb.13630>.
- Lechner, Alex M., Giles M. Foody, e Doreen S. Boyd. 2020. «Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management». *One Earth* 2 (5): 405–12. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.001>.

- Lenzi, Mauro. 2021. *LAGUNE 2021*.
- Li, Youzhi, Lijuan Cui, Xin Yao, Xiaohui Ding, Xu Pan, Manyin Zhang, Wei Li, e Xiaoming Kang. 2018. «Trade-off between leaf chlorophyll and betacyanins in *Suaeda salsa* in the Liaohe estuary wetland in northeast China». *Journal of Plant Ecology* 11 (4): 569–75. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtx025>.
- Lou, Yanjing, Yanwen Pan, Chuanyu Gao, Ming Jiang, Xianguo Lu, e Y. Jun Xu. 2016. «Response of Plant Height, Species Richness and Aboveground Biomass to Flooding Gradient along Vegetation Zones in Floodplain Wetlands, Northeast China». *PLOS ONE* 11 (4): e0153972. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153972>.
- Loureiro, Sofia, Alice Newton, e John Icelly. 2006. «Boundary Conditions for the European Water Framework Directive in the Ria Formosa Lagoon, Portugal (Physico-Chemical and Phytoplankton Quality Elements)». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 67 (3): 382–98. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.11.029>.
- Ma, Ying, Maria Celeste Dias, e Helena Freitas. 2020. «Drought and Salinity Stress Responses and Microbe-Induced Tolerance in Plants». *Frontiers in Plant Science* 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.591911>.
- Marchesini, Victoria A., Juan P. Guerschman, Ralf M. Schweiggert, Timothy D. Colmer, e Erik J. Veneklaas. 2016. «Spectral Detection of Stress-Related Pigments in Salt-Lake Succulent Halophytic Shrubs». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52 (ottobre): 457–63. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.002>.
- Marchiol, Luca, Antonio Filippi, Alessio Adamiano, Lorenzo Degli Esposti, Michele Iafisco, Alessandro Mattiello, Elisa Petrusa, e Enrico Braidot. 2019. «Influence of Hydroxyapatite Nanoparticles on Germination and Plant Metabolism of Tomato (*Solanum Lycopersicum* L.): Preliminary Evidence». *Agronomy* 9 (4): 161. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040161>.
- Mobin, Mohammad, e Nafees A. Khan. 2007. «Photosynthetic Activity, Pigment Composition and Antioxidative Response of Two Mustard (*Brassica Juncea*) Cultivars Differing in Photosynthetic Capacity Subjected to Cadmium Stress». *Journal of Plant Physiology* 164 (5): 601–10. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2006.03.003>.
- Moreno, Joaquín, María Ángeles Alonso, e Ana Juan. 2020. «Functional Diversity Turnover in the Western Mediterranean Saltmarshes: Effects of Edaphic Features and Biotic Processes on the Plant Functional Structure». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 235 (aprile): 106572. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106572>.
- Moro. 2019. «Interazione tra *Limonium narbonense* Mill. - *Salicornia fruticosa* (L.) L. lungo un gradiente di sommersione in ambiente salmastro».

- Nellemann, C., e Emily Corcoran. 2009. *Blue Carbon: The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon : A Rapid Response Assessment*. UNEP/Earthprint.
- Nijveldt, Robert J, Els van Nood, Danny EC van Hoorn, Petra G Boelens, Klaske van Norren, e Paul AM van Leeuwen. 2001. «Flavonoids: a review of probable mechanisms of action and potential applications». *The American Journal of Clinical Nutrition* 74 (4): 418–25. <https://doi.org/10.1093/ajcn/74.4.418>.
- Nyman, John A., Russel J. Walters, Ronald D. Delaune, e William H. Patrick. 2006. «Marsh Vertical Accretion via Vegetative Growth». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 69 (3–4): 370–80. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.05.041>.
- Olf, H., J. P. Bakker, e L. F. M. Fresco. 1988. «The Effect of Fluctuations in Tidal Inundation Frequency on a Salt-Marsh Vegetation». *Vegetatio* 78 (1–2): 13–19. <https://doi.org/10.1007/BF00045634>.
- OSMER. 2020. «Il clima del Friuli Venezia Giulia». 2020. [https://www.meteo.fvg.it/clima/clima\\_fvg/02\\_documenti\\_descrittivi\\_report\\_e\\_approfondimenti/01\\_Il\\_clima\\_del\\_Friuli\\_Venezia\\_Giulia/clima\\_fvg-divulgativo.pdf](https://www.meteo.fvg.it/clima/clima_fvg/02_documenti_descrittivi_report_e_approfondimenti/01_Il_clima_del_Friuli_Venezia_Giulia/clima_fvg-divulgativo.pdf).
- Pan, Jiawei, Rahat Sharif, Xuewen Xu, e Xuehao Chen. 2021. «Mechanisms of Waterlogging Tolerance in Plants: Research Progress and Prospects». *Frontiers in Plant Science* 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.627331>.
- Peciña, M. Villoslada, T.F. Bergamo, R.D. Ward, C.B. Joyce, e K. Sepp. 2021. «A Novel UAV-Based Approach for Biomass Prediction and Grassland Structure Assessment in Coastal Meadows». *Ecological Indicators* 122 (marzo): 107227. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107227>.
- Pellegrini. 2017. «Interactions between soil and plants in halophile systems. Plant zonation and effects on pedogenesis».
- Pellegrini, E., G. Forlani, F. Boscutti, e V. Casolo. 2020. «Evidence of Non-Structural Carbohydrates-Mediated Response to Flooding and Salinity in Limonium Narbonense and Salicornia Fruticosa». *Aquatic Botany* 166 (agosto): 103265. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2020.103265>.
- Pellegrini, Elisa, Francesco Boscutti, Maria De Nobili, e Valentino Casolo. 2018a. «Plant Traits Shape the Effects of Tidal Flooding on Soil and Plant Communities in Saltmarshes». *Plant Ecology* 219 (7): 823–35. <https://doi.org/10.1007/s11258-018-0837-z>.
- . 2018b. «Plant Traits Shape the Effects of Tidal Flooding on Soil and Plant Communities in Saltmarshes». *Plant Ecology* 219 (7): 823–35. <https://doi.org/10.1007/s11258-018-0837-z>.

- Pellegrini, Elisa, Guido Incerti, Ole Pedersen, Natasha Moro, Alessandro Foscari, Valentino Casolo, Marco Contin, e Francesco Boscutti. 2022. «Flooding and Soil Properties Control Plant Intra- and Interspecific Interactions in Salt Marshes». *Plants* 11 (15): 1940. <https://doi.org/10.3390/plants11151940>.
- Pennings, Steven C., e Ragan M. Callaway. 1992. «Salt Marsh Plant Zonation: The Relative Importance of Competition and Physical Factors». *Ecology* 73 (2): 681–90. <https://doi.org/10.2307/1940774>.
- Pérez-Harguindeguy, N., S. Díaz, E. Garnier, S. Lavorel, H. Poorter, P. Jaureguiberry, M. S. Bret-Harte, et al. 2016. «Corrigendum to: New Handbook for Standardised Measurement of Plant Functional Traits Worldwide». *Australian Journal of Botany* 64 (8): 715. [https://doi.org/10.1071/BT12225\\_CO](https://doi.org/10.1071/BT12225_CO).
- Pettorelli, Nathalie, Jon Olav Vik, Atle Myrsetrud, Jean-Michel Gaillard, Compton J. Tucker, e Nils Chr. Stenseth. 2005. «Using the Satellite-Derived NDVI to Assess Ecological Responses to Environmental Change». *Trends in Ecology & Evolution* 20 (9): 503–10. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>.
- Poldini, Vidali, e Fabiani. 1999. «La vegetazione del litorale sedimentario del Friuli Venezia Giulia (NE Italia) con riferimenti alla regione Alto-adriatica». 1999. [https://www.openstarts.units.it/bitstream/10077/15296/1/POLDINI\\_VIDALI\\_FABIANI\\_3-68.pdf](https://www.openstarts.units.it/bitstream/10077/15296/1/POLDINI_VIDALI_FABIANI_3-68.pdf).
- Priatni, Sri, e Aulia Pradita. 2015. «Stability Study of Betacyanin Extract from Red Dragon Fruit (*Hylocereus Polyrhizus*) Peels». *Procedia Chemistry* 16: 438–44. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.12.076>.
- Ragab, Sanad, Mohamed Kamel, Ahmed Bream, e Mohamed Moursy. 2020. «*Baldratia salicorniae* – *Salicornia fruticosa* Interaction and Modeling of Their Habitat in Egypt By Using Maxent Technique». *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, E. Medical Entomology & Parasitology* 12 (luglio): 27–41. <https://doi.org/10.21608/eajbse.2020.108298>.
- Redelstein, Regine, Thomas Dinter, Dietrich Hertel, e Christoph Leuschner. 2018. «Effects of Inundation, Nutrient Availability and Plant Species Diversity on Fine Root Mass and Morphology Across a Saltmarsh Flooding Gradient». *Frontiers in Plant Science* 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.00098>.
- Reed, Denise J. 1990. «The Impact of Sea-Level Rise on Coastal Salt Marshes». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 14 (4): 465–81. <https://doi.org/10.1177/030913339001400403>.

- Reef, Ruth, Mark Schuerch, Elizabeth K. Christie, Iris Möller, e Tom Spencer. 2018. «The Effect of Vegetation Height and Biomass on the Sediment Budget of a European Saltmarsh». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 202 (marzo): 125–33. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.12.016>.
- Reents, Svenja, Peter Mueller, Hao Tang, Kai Jensen, e Stefanie Nolte. 2021. «Plant Genotype Determines Biomass Response to Flooding Frequency in Tidal Wetlands». *Biogeosciences* 18 (2): 403–11. <https://doi.org/10.5194/bg-18-403-2021>.
- Regione FVG. 2008. «S.A.R.A. Sistema aree regionali ambientali Costituzione Sistema regionale delle aree naturali». 2008. [https://www.regione.fvg.it/rafvig/export/sites/default/RAFVG/ambiente-territorio/tutela-ambiente-gestione-risorse-naturali/FOGLIA203/allegati/documenti\\_tecnici/PdG\\_Laguna\\_testo.pdf](https://www.regione.fvg.it/rafvig/export/sites/default/RAFVG/ambiente-territorio/tutela-ambiente-gestione-risorse-naturali/FOGLIA203/allegati/documenti_tecnici/PdG_Laguna_testo.pdf).
- Ribeiro, Márcia Vaz. 2011. «Elicitores abióticos no estresse oxidativo e na expressão de gene da rota de betacianina em *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.», ottobre. <http://repositorio.ufpel.edu.br:8080/handle/123456789/2051>.
- Rocchini, Duccio, Nicole Salvatori, Carl Beierkuhnlein, Alessandro Chiarucci, Florian de Boissieu, Michael Förster, Carol X. Garzon-Lopez, et al. 2021. «From Local Spectral Species to Global Spectral Communities: A Benchmark for Ecosystem Diversity Estimate by Remote Sensing». *Ecological Informatics* 61 (marzo): 101195. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101195>.
- Sabins, Floyd F. 1999. «Remote Sensing for Mineral Exploration». *Ore Geology Reviews* 14 (3–4): 157–83. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4).
- Sanches, Ieda Del'Arco, Carlos Roberto Souza Filho, e Raymond Floyd Kokaly. 2014. «Spectroscopic Remote Sensing of Plant Stress at Leaf and Canopy Levels Using the Chlorophyll 680nm Absorption Feature with Continuum Removal». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 97 (novembre): 111–22. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.015>.
- Siegert, Martin, Richard B. Alley, Eric Rignot, John Englander, e Robert Corell. 2020. «Twenty-First Century Sea-Level Rise Could Exceed IPCC Projections for Strong-Warming Futures». *One Earth* 3 (6): 691–703. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.11.002>.
- Silvestri, Sonia, Andrea Defina, e Marco Marani. 2005. «Tidal Regime, Salinity and Salt Marsh Plant Zonation». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 62 (1–2): 119–30. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.08.010>.
- Stefanuto. 2003. «Il CLIMA del Friuli-Venezia Giulia», 25.

- Stoffel, Martin A., Shinichi Nakagawa, e Holger Schielzeth. 2021. «PartR2: Partitioning R2 in Generalized Linear Mixed Models». *PeerJ* 9 (maggio): e11414. <https://doi.org/10.7717/peerj.11414>.
- Sudhir, P., e S.D.S. Murthy. 2004. «Effects of salt stress on basic processes of photosynthesis». *Photosynthetica* 42 (4): 481–86. <https://doi.org/10.1007/S11099-005-0001-6>.
- Sun, Chao, Sergio Fagherazzi, e Yongxue Liu. 2018. «Classification Mapping of Salt Marsh Vegetation by Flexible Monthly NDVI Time-Series Using Landsat Imagery». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 213 (novembre): 61–80. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.08.007>.
- Taïbi, Khaled, Fadhila Taïbi, Leila Ait Abderrahim, Amel Ennajah, Moulay Belkhodja, e José Miguel Mulet. 2016. «Effect of Salt Stress on Growth, Chlorophyll Content, Lipid Peroxidation and Antioxidant Defence Systems in Phaseolus Vulgaris L.». *South African Journal of Botany* 105 (luglio): 306–12. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.03.011>.
- Tilman, David. 1985. «The Resource-Ratio Hypothesis of Plant Succession». *The American Naturalist* 125 (6): 827–52. <https://doi.org/10.1086/284382>.
- Toby N. Carlson, e David A. Ripley. 1997. «On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index». *Remote Sensing of Environment* 62 (3): 241–52. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1).
- Tomasella, M, M Vidali, G Oriolo, L Poldini, S Comin, e R Giorgi. 2007. «Valutazione della qualità degli habitat della costa sedimentaria (Laguna di Marano e Grado) e della costa a falesie (Costiera triestina): applicazione del metodo EsAmbI», 15.
- Tonelli, Mara, Sergio Fagherazzi, e Marco Petti. 2010. «Modeling Wave Impact on Salt Marsh Boundaries». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 115 (C9). <https://doi.org/10.1029/2009JC006026>.
- Veldhuis, Erik R., Maarten Schrama, Marten Staal, e J. Theo M. Elzenga. 2019. «Plant Stress-Tolerance Traits Predict Salt Marsh Vegetation Patterning». *Frontiers in Marine Science* 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2018.00501>.
- Veronese. 2019. «Misurazione ed effetti del gradiente di sommersione su suoli barenicoli nella Laguna di Grado e Marano».
- Vitti, Stefano, Elisa Pellegrini, Valentino Casolo, Giacomo Trotta, e Francesco Boscutti. 2020. «Contrasting responses of native and alien plant species to soil properties shed new light on the invasion of dune systems». *Journal of Plant Ecology* 13 (6): 667–75. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtaa052>.

- Voesenek, L. a. C. J., T. D. Colmer, R. Pierik, F. F. Millenaar, e A. J. M. Peeters. 2006. «How Plants Cope with Complete Submergence». *New Phytologist* 170 (2): 213–26. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01692.x>.
- Voss, Mauricio Rodriguez-Lanetty, Elisha M. Wood-Charlson, Lea L. Hollingsworth, Dave A. Krupp, e Virginia M. Weis. 2006. «Temporal and Spatial Infection Dynamics Indicate Recognition Events in the Early Hours of a Dinoflagellate/Coral Symbiosis». *Marine Biology* 149 (4): 713–19. <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0272-x>.
- Wellburn, Alan R. 1994. «The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as Well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution». *Journal of Plant Physiology* 144 (3): 307–13. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2).
- Woo, I., e J.Y. Takekawa. 2012. «Will Inundation and Salinity Levels Associated with Projected Sea Level Rise Reduce the Survival, Growth, and Reproductive Capacity of *Sarcocornia Pacifica* (Pickleweed)?» *Aquatic Botany* 102 (ottobre): 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2012.03.014>.
- Yang et al. 1984. «Etilene Come Ormone Vegetale - Read Italiano». 1984. [https://readitaliano.com/wiki/it/Ethylene\\_as\\_a\\_plant\\_hormone](https://readitaliano.com/wiki/it/Ethylene_as_a_plant_hormone).
- Yeo, Samantha, Virginie Lafon, Didier Alard, Cécile Curti, Aurélie Dehouck, e Marie-Lise Benot. 2020. «Classification and Mapping of Saltmarsh Vegetation Combining Multispectral Images with Field Data». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 236 (maggio): 106643. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106643>.
- Yildirim, Ertan, Metin Turan, e Ismail Guvenc. 2008. «Effect of Foliar Salicylic Acid Applications on Growth, Chlorophyll, and Mineral Content of Cucumber Grown Under Salt Stress». *Journal of Plant Nutrition* 31 (3): 593–612. <https://doi.org/10.1080/01904160801895118>.
- Zhang, Songlin, Xilu Ni, Muhammad Arif, Zhongxun Yuan, Lijuan Li, e Changxiao Li. 2020. «Salinity Influences Cd Accumulation and Distribution Characteristics in Two Contrasting Halophytes, *Suaeda Glauca* and *Limonium Aureum*». *Ecotoxicology and Environmental Safety* 191 (marzo): 110230. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110230>.
- Zhou, Yanfei, Tanja Karl, David H. Lewis, Tony K. McGhie, Steve Arathoon, Kevin M. Davies, Ken G. Ryan, Kevin S. Gould, e Kathy E. Schwinn. 2021. «Production of Betacyanins in Transgenic *Nicotiana tabacum* Increases Tolerance to Salinity». *Frontiers in Plant Science* 12. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.653147>.

## RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento particolare va al professore Francesco Boscutti per avermi guidato con infinita pazienza e disponibilità nella fase più importante del mio percorso accademico. Ringrazio inoltre per i preziosi consigli e le conoscenze trasmesse lungo tutto il percorso di stesura dell'elaborato.

Un sentito grazie ai miei correlatori Dora Scarpin e Marco Vuerich per il loro indispensabile aiuto, la professionalità e per la loro simpatia che ha reso più piacevole il raggiungimento di questo mio traguardo importante.

Ringrazio infinitamente la mia famiglia che mi ha sempre sostenuto e incoraggiato fin dalla scelta del mio percorso di studi. Grazie per esserci stati sempre, soprattutto nei momenti di sconforto.

Infine ringrazio i miei amici, per avermi aiutato a sdrammatizzare i momenti difficili, per le battute e per il loro affetto.