

CAPITOLO SECONDO

**LA VEGETAZIONE ALOFILA E
I FATTORI DELLA ZONAZIONE**

Le barene sono aree prevalentemente emerse che vengono inondate solo durante le alte maree. I suoli che le costituiscono sono caratterizzati dalla presenza di acque circolanti, ma dal momento che l'elevata pressione osmotica rende l'acqua di difficile assunzione, essi risultano fisiologicamente aridi. Inoltre il cloruro di sodio è presente in concentrazioni superiori all'1% e si tratta di un valore tossico per la maggior parte delle piante superiori, che in genere tollerano concentrazioni di NaCl inferiori allo 0,5-0,1%, limite al di sotto del quale il cloruro di sodio agisce invece come stimolatore della crescita.

Le barene sono in genere caratterizzate da terreni compatti, privi di porosità, condizione che impedisce il passaggio di aria nelle parti profonde. Si tratta quindi di un ambiente fortemente anossico, spesso con elevata presenza di solfuri, che ospita una vegetazione con apparati radicali superficiali; per questo motivo le piante non raggiungono mai altezze rilevanti. La vegetazione che colonizza tali strutture viene

definita *alofila*, in quanto compie l'intero ciclo vitale in suoli ad elevato contenuto salino, ma in realtà presenta ulteriori caratteristiche adattative che conferiscono resistenza anche ai diversi fattori di stress tipici di un ambiente a marea, come la carenza di ossigeno in condizioni di saturazione e la presenza di ioni fitotossici nel suolo. In Appendice vengono riportate le schede descrittive delle principali specie di alofite presenti in laguna di Venezia.

§2.1 Modello evolutivo delle barene e successione vegetale

Il processo di formazione delle barene (Pethick, 1984) prevede che le attuali strutture lagunari abbiano preso forma in seguito all'apporto di sedimenti su di un substrato paludoso più basso.

Sui dossi dei bassifondi l'onda di marea giunge con minor energia, favorendo la sedimentazione delle particelle trasportate dalla corrente; ciò provvede al conseguente aumento in altezza dei dossi stessi. Le superfici progressivamente emergono e, rispetto alle velme, sono sommerse meno frequentemente e per periodi di tempo più brevi; questa condizione favorisce l'insediamento di alghe, macroinvertebrati e vegetazione pioniera. Inoltre la presenza di microalghe ed in particolare di diatomee, con le loro secrezioni mucose, stabilizza le superfici fangose (Underwood, 1997).

Nella loro fase "giovanile" le barene si configurano come delle aree piatte ed uniformi, con bordi lievemente rialzati; con il passare del tempo il profilo della loro superficie cambia perché l'accumulo di sostanza organica e di sedimenti non è uniforme. Nelle zone più depresse delle barene, maggiormente soggette ai fenomeni di marea, le condizioni del suolo favoriscono l'insediamento delle prime piante vascolari, inizialmente la graminacea *Spartina* sp., più resistente di altre agli elevati livelli di salinità, ai periodi di sommersione, alla velocità della corrente e alla torbidità dell'acqua (Pethick, 1984). Le aree fangose della laguna ricoperte periodicamente dall'acqua salmastra vengono poi colonizzate da specie vegetali annuali dal fusto carnoso e dai fiori poco appariscenti, appartenenti alla famiglia delle Chenopodiacee e comunemente note come *Salicornie*. Le *Salicornie* sp. resistono a notevoli variazioni di salinità e formano popolamenti quasi puri dove l'acqua salmastra è sempre presente; inoltre sono anche importanti ricolonizzatrici dei fanghi che derivano dalle dragaggi e che riempiono le casse di colmata, crescendo preferibilmente nelle aree di barena embrionale.

L'associazione pioniera a *Spartina* e *Salicornia* spp. viene poi sostituita da mosaici di popolamenti che si differenziano in funzione delle caratteristiche del suolo¹.

Infatti, nelle aree dove le argille si disseccano almeno in alcuni periodi dell'anno, si instaura un tipo di vegetazione dominata dalle salicornie perenni (varie specie di *Arthrocnemum*). Sono associazioni più ricche di specie, nelle quali è facile trovare il limonio comune (*Limonium narbonense*), il gramignone marittimo (*Puccinellia palustris*), la sueda marittima e l'astro marino (*Aster tripolium*).

Nello stadio di maturità della barena, la colonizzazione da parte di piante superiori si fa più rilevante; gli effetti si manifestano nel consolidamento del suolo ad opera delle radici e nella resistenza ai principali agenti erosivi: foglie e fusti delle piante si comportano come uno schermo rispetto al flusso di marea, determinando la diminuzione della velocità di corrente e limitando la risospensione e il dilavamento delle particelle sedimentate. Alcune specie di alofite espellono sali dai loro tessuti e questo aumenta localmente i livelli di salinità, favorendo la flocculazione e incrementando i tassi di deposizione. Inoltre i residui organici vegetali vengono trasformati ad opera di funghi e batteri in materiale organico incorporato nei sedimenti². Le stazioni più evolute sono dominate da giunchi (*Juncus acutus*, *Juncus maritimus*) gramignone marittimo (varie specie di *Puccinellia*), limonio comune (*Limonium narbonense*) e astro marino (*Aster tripolium*).

Nella maturità le barene appaiono inoltre attraversate da canaletti di origine erosiva, i "ghebi", che drenano i suoli quando la marea si ritira e consentono la penetrazione dell'acqua nelle zone interne anche quando il colmo non supera la quota dei bordi della barena. I ghebi a volte attraversano la barena, ma più spesso terminano il loro tortuoso percorso in corrispondenza di specchi d'acqua salmastri poco profondi denominati "chiari". Una volta formati, i ghebi assorbono la maggior parte dell'energia di marea: l'acqua che deborda deposita per prime le sabbie grossolane formando argini rialzati, chiamati "gengive", mentre le zone più basse delle barene tendono a presentare una porzione più grande di limo e argilla. Quindi le caratteristiche del sedimento cambiano

¹ In base ad alcuni studi le barene sarebbero colonizzate da un numero di sottopopolazioni adattate a specifici microhabitat e realmente distinte l'una dall'altra; secondo altre ricerche, invece, nelle zone più depresse e ostili esisterebbe l'intero pool di variazioni genetiche, e da questo solo alcuni genotipi sarebbero selezionati dalle mutanti condizioni durante l'accrescimento della barena, permettendo la colonizzazione anche delle zone più elevate.

² Proprio per questa serie di motivi, legati all'attività biologica e quindi alla sua intensificazione nel periodo primaverile ed estivo, alcuni autori (Pethick, 1984) hanno avanzato l'ipotesi dell'esistenza di un ciclo annuale di accrescimento verticale delle barene, con un massimo nelle stagioni più calde ed un minimo durante la stagione invernale.

sia orizzontalmente che verticalmente, con i sedimenti più fini depositati più in basso dei sabbiosi, e ciò porta ad una modificazione del profilo di barena che prosegue durante l'intero processo di formazione.

Secondo tale schema di evoluzione, la successione della vegetazione dà luogo ad un andamento simile a quello presentato nella fig.2.1.

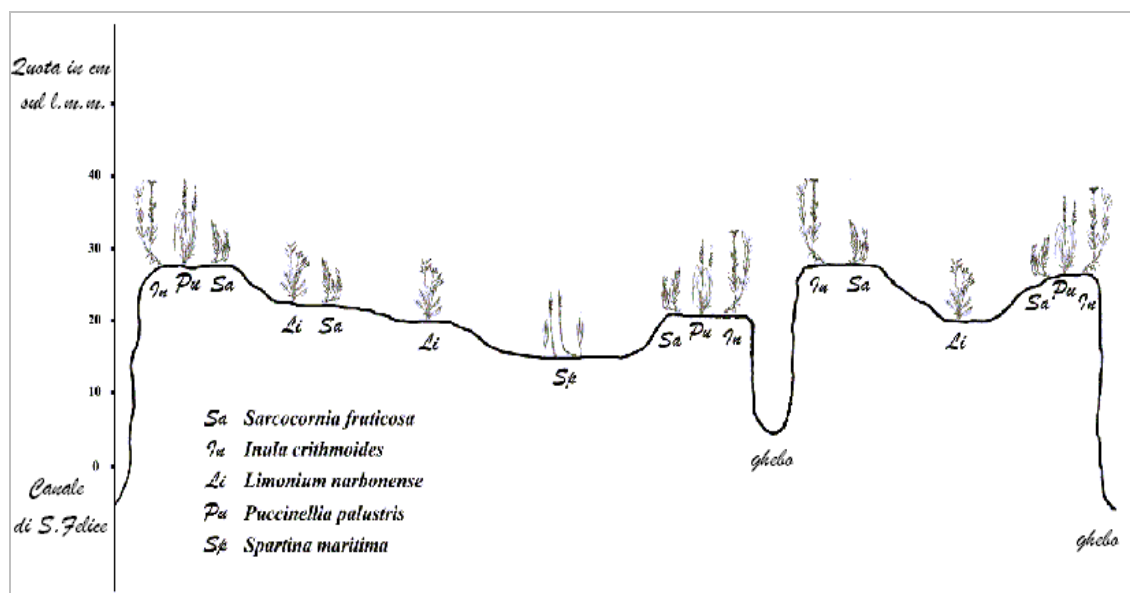


Fig.2.1 - Profilo, rilevato presso San Felice, che illustra la successione vegetale tipica di una barena allo stadio di maturità (modif. da Silvestri et al., 2000: *Vegetazione alofila e morfologia delle barene*, Atti IVSLA).

§2.2 Caratteristiche della zonazione

La vegetazione alofila, secondo lo schema di successione descritto, tende quindi a colonizzare prima i dossi dei bassifondi, lasciando poi il posto ad altre specie che consolidano a loro volta il suolo e facilitano la sedimentazione. Si instaura così un vero e proprio *feedback* tra morfologia e vegetazione, che prosegue fino allo stadio di stabilità detto *climax* (Odum, 1971).

Dal momento che le condizioni ecologiche si modificano piuttosto gradualmente in ristrette porzioni di barena, anche la copertura vegetale cambia in modo graduale: da superfici quasi perennemente coperte dall'acqua si passa a quelle inondate in modo periodico, per arrivare a quelle aree in cui la presenza dell'acqua salmastra è per lo più legata a fenomeni di imbibizione. Tutti questi ambienti sono dominati da una o poche specie e spesso la transizione da una comunità all'altra è data da variazioni quantitative nella copertura delle specie piuttosto che dalla loro presenza o assenza. Le associazioni di alofite più ricorrenti sono formate per lo più da *Puccinellia palustris*, *Limonium*

narbonense, *Arthrocnemum fruticosum*, *Aster tripolium*, *Salsola soda*, ecc. (Pignatti, 1966); nei terreni meno salati, in prossimità di acque salmastre o dolci, le tipiche alofite sfumano verso le associazioni igrofile dominate dalla presenza del giunco, come lo *Juncetum* e i canneti a *Phragmites* sp., che si ritrovano per lo più nelle aree di gronda e negli ambiti vallivi.

Osservando i popolamenti che crescono sulle barene, però, sembra che tali sfumature abbiano in realtà limiti piuttosto netti e che diano luogo ad una caratteristica



Fig.2.2 - Limite fra due aree monospecifiche a *Sarcocornia fruticosa* e *Limonium narbonense* presso S.Felice

disposizione a mosaico delle varie associazioni vegetali (v.figg.2.2 e 2.3).

In letteratura sono riportati diversi studi che hanno cercato di chiarire le ragioni di questo fenomeno, i cui risultati evidenziano che in effetti in tutte le zone a marea la distribuzione della vegetazione

non è casuale, ma organizzata a rispondere a fattori che

influenzano il ciclo vitale delle diverse piante in base alla loro fisiologia.

In particolare, questi studi sembrano suggerire che i suoli siano colonizzati da associazioni vegetali diverse a causa di lievi differenze legate al gradiente di salinità e alle sommersioni della superficie del suolo; a condizionare la dominanza di una specie sull'altra nell'ambito spaziale di qualche decina di centimetri sarebbero quindi la



Fig.2.3 - Saline: area omogenea a *Salicornia veneta*.

stretta relazione delle alofite con l'altezza e con la vicinanza a ghebi e canali.

Per proseguire nello studio di questa caratteristica diffusa, che accomuna la maggior parte della vegetazione delle zone umide, è quindi ragionevole mettere in

relazione lo sviluppo delle alofite con il cambiamento a piccola scala delle caratteristiche chimico-fisiche del suolo: negli ambienti di marea, infatti, dove tutte le specie sono adattate alle medesime condizioni avverse, si deve pensare che il fenomeno risulti più evidente dove maggiore è l'intensità di cambiamento di tali fattori di stress nello spazio di pochi centimetri.

Dal momento che la genesi morfologica di una barena procede di pari passo con la colonizzazione da parte di determinate specie vegetali, lo studio dei *fattori* della zonazione consente di interpretare i cambiamenti nella disposizione dei popolamenti vegetali come indicazioni di possibili modificazioni morfologiche in atto (De Leuw et al., 1993): le risposte adattative che le diverse specie o le associazioni manifestano sono quindi uno strumento per comprendere in che modo tali fattori discriminano la presenza e l'abbondanza delle varie alofite in funzione della morfologia della superficie di barena.

§2.3 Variazione delle condizioni microambientali con la morfologia suolo

Fra i fattori maggiormente responsabili dell'estrema variabilità degli ambienti a marea ci sono senza dubbio la frequenza e l'entità delle sommersioni, che sono direttamente correlate con l'elevazione delle superfici di barena; ma ci sono molti altri fattori che determinano gradienti di variazione più evidenti e che dipendono dall'elevazione, anche se non linearmente, come la salinità, l'aerazione del suolo, le caratteristiche di drenaggio e un complesso di altre caratteristiche indicate come maturità del suolo³ (Adam, 1990).

Secondo il modello di genesi delle barene comunemente adottato, le zone che vengono sommerse più spesso dalla marea presentano condizioni di salinità e umidità del suolo relativamente costanti (Jefferies, 1981); negli intervalli di quota più elevati, che si saturano raramente d'acqua, l'umidità e la salinità del suolo possono invece essere molto variabili e quindi cambiare non solo in risposta alla sommersione, ma anche per le condizioni climatiche. Nei periodi più umidi l'acqua piovana può considerevolmente ridurre la salinità del suolo, mentre in quelli più secchi

³ Contenuto in nutrienti, in calcio, in materia organica, ecc.

l'evapotraspirazione può far crescere la salinità anche a valori maggiori di quelli dell'acqua stessa (Adam, 1990).

L'ipersalinità persistente per lunghi intervalli di tempo conduce alla morte della vegetazione: il suolo, non essendo più consolidato dalla presenza delle radici, lascia libera l'azione alla marea che contribuisce alla formazione dei chiari e li approfondisce. La presenza di chiari e ghebi nella barena ormai matura crea a sua volta una serie di habitat differenziati responsabili di gradienti locali che si riflettono sul tipico mosaico di comunità vegetali, tanto che studi recenti affermano che la distribuzione delle varie specie può essere dedotta agevolmente dalle relative distanze dalla rete dei canali e dagli specchi d'acqua (Sanderson et al., 2001).

Da quanto detto, risulta che l'elevazione contribuisce a determinare la distribuzione delle comunità alofile in quanto influenza essenzialmente le tolleranze tipiche delle diverse specie ai cambiamenti fisici e chimici associati alla sommersione; tuttavia, tra i fattori che concorrono alla zonazione non vanno trascurate anche le interazioni tra le specie, che possono manifestare una parziale sovrapposizione di tolleranze e quindi competere per le nicchie meno esposte ai fattori di stress.

In merito ai rapporti di competizione tra le alofite le opinioni in letteratura sono diverse: secondo alcuni autori, in assenza di modificazioni nella salinità o nel livello dell'acqua la vegetazione delle barene non subirebbe cambiamenti sostanziali; Adam (1990) sostiene d'altra parte che le interrelazioni tra le alofite condiziona fortemente la successione tra specie mediante la competizione, tanto da poter definire la disposizione delle piante come:

- *random*, se le risorse sono ugualmente disponibili per tutte le piante;
- *uniforme* o *regolare*, se la disposizione dipende da interazioni negative come la competizione tra differenti individui di una stessa comunità⁴;
- *contagiosa* o *a macchie*, quando le condizioni sono così limitanti che tendono a essere favorevoli solo in porzioni piccole come nicchie, o quando la propagazione è vegetativa e quindi legata a brevi distanze, o quando le piante che concludono il loro ciclo vitale offrono un substrato idoneo su cui le nuove pianticelle possono attecchire.

⁴ Questi ambienti sono in genere occupati da una singola specie.

Nel paragrafo successivo vengono discussi in dettaglio i principali fattori che condizionano la risposta della vegetazione e che quindi contribuiscono a regolare la dinamica dei popolamenti vegetali sulle barene.

§2.4 I fattori della zonazione

§2.4.1 La salinità

Le alofite sono piante capaci di svilupparsi e riprodursi in ambienti in cui la concentrazione di NaCl è almeno pari o superiore all'1-2%.

Uno dei primi tentativi di classificazione delle alofite risale al 1939 ed è dovuto a Tsopa, che ne diede una definizione sulla base della loro risposta positiva alla salinità: le alofite *obbligate* richiedono condizioni saline durante tutta la loro vita; le alofite *preferenziali* mostrano una crescita ottimale in ambienti salati, nonostante compaiano anche in ambienti non salati; le *tolleranti* sono capaci di crescere anche se le salinità sono alte; le *occasional* sono raramente presenti in ambienti salini.

Dal diverso grado di tolleranza alla salinità deriva anche un sistema negativo di classificazione proposto da Waisel nel 1972, basato sugli espedienti escogitati dalle piante per resistere a differenti concentrazioni di sale.

Sono tre le ragioni che giustificano l'avversità di una salinità elevata: effetto diretto tossico del sodio e del cloro; interferenza con l'assunzione dei nutrienti essenziali; impatto sulla riduzione dell'energia potenziale dell'acqua esterna.

La tossicità derivante da concentrazioni eccessive di cloro e sodio può influire sia sulla funzionalità di membrana, alterando la permeabilità ed il trasporto, sia sulle attività enzimatiche, danneggiando processi metabolici quali fotosintesi e respirazione; lo stress nutrizionale, invece, è dovuto alla competizione ionica nei processi di assorbimento radicale; i danni osmotici, legati al basso potenziale idrico del terreno, sono dovuti ad una riduzione del turgore cellulare che comporta alterazione dei processi metabolici ed inibizione della crescita. In condizioni di estrema salinità le piante possono andare incontro ad una regolazione endogena dei potenziali osmotici, mantenendo in questo modo la capacità di assorbimento idrico radicale in presenza di concentrazioni saline eccessive nella soluzione circolante.

Alcuni studi hanno tuttavia mostrato che, oltre un livello soglia di salinità del terreno, nelle piante compaiono sintomi di stress dovuti all'incapacità di aumentare ulteriormente l'osmolarità, e che la risposta alla diminuzione del potenziale dell'acqua

esterna si differenzia a seconda della specie considerata: le strategie sviluppate dalle diverse alofite per il mantenimento della pressione osmotica delle cellule possono quindi fornire informazioni utili sulle ragioni della loro tipica distribuzione sulle superfici di barena (Adam, 1990).

Le alofite vengono suddivise in osmoconformiste (iper e iposmotiche) e osmoregolatrici (isosmotiche) a seconda che vi sia o meno una spesa energetica nel meccanismo di regolazione della pressione osmotica. Non si conosce ancora molto a proposito delle due strategie, ma da studi condotti da Jefferies nel 1981 pare che ci sia una correlazione tra strategia adottata e profondità delle radici: le specie che hanno radici più profonde sono per lo più osmoconformiste, in quanto cambiamenti di salinità in profondità sono generalmente molto lenti e stagionali, quindi la regolazione della pressione osmotica può essere graduale; le piante che hanno apparato radicale superficiale devono invece fronteggiare cambiamenti repentini di salinità, e la regolazione attiva della pressione osmotica sembra essere la più appropriata per affrontare tali fluttuazioni.

In letteratura sono riportati numerosi meccanismi attraverso i quali il livello del sale nella pianta può essere regolato. L'importanza relativa delle diverse strategie varia tra le differenti alofite e non c'è un singolo meccanismo in grado di apportare un vantaggio speciale selettivo alle specie che l'adottano. Adam (1990) considera cinque strategie fondamentali: sviluppo di succulenza, nelle *eualofite*; esclusione, nelle *glicolofite*⁵; secrezione, nelle *crinoalofite*⁶; perdita delle foglie; riduzione della traspirazione.

Le varie capacità adattative mostrano che le diverse specie possiedono sistemi differenti per far fronte alle condizioni di stress, e che tali strategie emergono in relazione alla diversa granulometria dei suoli (composizione in sabbia, limo e argilla), alla durata di emersione e alla concentrazione di cloruro di sodio nell'acqua circolante. I popolamenti vegetali tendono di conseguenza a disporsi in aree e ad altezze distinte sulla superficie delle barene: il Salicornieto, che ha come specie caratteristiche *Salicornia fruticosa*, *Halimione portulacoides* e *Puccinellia festucaeformis*, è

⁵ L'esclusione è più pronunciata in quelle specie in cui manca la capacità dell'escrezione.

⁶ Nelle ghiandole il sale viene eliminato mediante una vera e propria secrezione, mentre nei pili, costituiti da due cellule sovrapposte, la superiore funge da vescicola durante la vita della pianta e, quando raggiunge il limite di capacità, muore e viene o rilasciata dalla foglia, oppure scoppia lasciando che il sale venga liberato fuori dalla foglia. L'accumulo di peli morti e di sale sulla foglia incrementa la riflettività e questo può sostanzialmente ridurre il surriscaldamento dell'intera pianta. Specializzata in tale adattamento è *Halimione portulacoides*.

un'associazione tipica di suoli argillosi e compatti soggetti alle escursioni di marea, e nei quali la concentrazione del cloruro di sodio raggiunge nel periodo estivo valori prossimi al 10%; i suoli sabbiosi più elevati sul livello delle acque e sempre emersi sono per lo più occupati da Agropireti e *Inula crithmoides*, che tollerano salinità inferiori a quelle del Salicornieto. Molti dossi, poi, presentano delle depressioni interne occupate da acque ferme, dove intensi processi respiratori di batteri anaerobi liberano quantità notevoli di acido solfidrico: ai margini di questi stagni è presente un'associazione dominata da *Salicornia herbacea* (Salicornieto erbaceo) con presenza frequente di *Aster tripolium* e *Puccinellia palustris*.

§2.4.2 Carenza di ossigeno e potenziale di ossidoriduzione

La saturazione del suolo che si verifica normalmente in ambienti a marea ha diverse conseguenze sulla vegetazione: shock termici, cambiamenti nel fotoperiodo⁷, effetti meccanici dovuti alle correnti, deposizione di sedimenti sulla superficie delle foglie (Adam, 1990). Tali fattori agiscono in ugual misura sulla vegetazione che colonizza questi ambienti, quindi si potrebbe ritenere che i loro effetti non siano in grado di motivare la tendenza della vegetazione a formare mosaici di popolamenti monospecifici. Tuttavia studi condotti nel 2002 (Bockelman et al.) e nel 1996 (Sanchez et al.), suggeriscono che la zonazione delle piante possa essere messa in stretta relazione con la frequenza e la durata delle sommersioni, e quindi indirettamente con l'altitudine del suolo.

I fattori di stress legati alla saturazione si manifestano in una carenza di ossigeno nel suolo che ha essenzialmente due effetti: uno diretto (la mancanza di O₂ per le radici) e uno indiretto (la formazione di fitotossine nella rizosfera).

Quando sono sommersi, i suoli di barena vanno incontro a condizioni di anossia, da un lato perché la locale topografia di queste strutture lagunari non consente un rapido drenaggio, dall'altro perché la tessitura del suolo presenta una bassa conducibilità idraulica. Alcuni autori suggeriscono che durante la sommersione permanga uno strato

⁷ La riduzione del fotoperiodo varia da luogo a luogo e in relazione all'altezza della barena: quando le maree massime cadono alla mattina o alla sera, le piante non risentono particolarmente degli effetti legati alla riduzione dell'illuminazione, mentre quando le maree più alte si manifestano durante il periodo di maggior intensità solare, si può ritenere che la porzione di luce sottratta alla fotosintesi sia maggiore e che gli effetti della torbidità dell'acqua marina siano più pronunciati, soprattutto per le alofite delle aree più depresse delle barene.

aerato nel suolo, ma secondo recenti ricerche (Armstrong, 1985) sembra che questo strato non sia una caratteristica generale, ma sia localizzato e transitorio.

Studi successivi relativi agli adattamenti delle alofite alla carenza di ossigeno hanno messo in luce non soltanto che alcune specie hanno la capacità di sviluppare una rete di spazi intercellulari che connette il tessuto delle radici alle parti aeree della pianta e agli stomi aperti all'atmosfera (aerenchyma), ma anche che l'abilità nel formare tale tessuto dipende dalla specie e dal grado di anaerobiosi. Adam (1990) ha cercato di motivare la zonazione vegetale tipica degli ambienti a marea mediante una relazione tra la porosità delle radici delle varie specie e l'effettivo sviluppo dell'aerenchyma, dimostrando che le piante che non riescono a formarlo, come *Suaeda maritima* o *Halimione portulacoides*, la cui porosità radicale non supera il 5%, sono costrette nella parte superiore delle barene.

Se il suolo si impoverisce di ossigeno, e la velocità di diffusione del gas è inadeguata a mantenere la respirazione aerobica, si sviluppano varie popolazioni di batteri che usano altri accettori di elettroni piuttosto che l'ossigeno per la respirazione; di conseguenza, una serie di sostanze organiche e inorganiche vengono ridotte producendo un abbassamento del potenziale redox del suolo.

L'importanza di questo parametro risiede nel fatto che lo stato ridotto di molti ioni metallici è più tossico e quindi il potenziale redox, oltre ad essere in relazione con lo stato di ossidazione del suolo, è anche un indice della presenza di ioni fitotossici: i microrganismi presenti nel suolo, infatti, in condizioni anaerobiche trasformano specie inorganiche come NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} in ioni NH_4^+ , Mn^{2+} , Fe^{2+} , S^{2-} , fitotossici e limitanti la crescita (Rogel et al., 2001). Secondo recenti studi sembra che lo stress dovuto alle condizioni anaerobiche sia aggravato dalla chiusura degli stomi in risposta alla presenza di ioni tossici nel sedimento e ciò comporterebbe una riduzione dell'attività fotosintetica (Castillo et al., 2000); inoltre le periodiche saturazioni del suolo possono abbassare il pH e aumentare la disponibilità dello zinco assimilabile, che viene accumulato nel tessuto delle piante. In tali condizioni, anche le forme di manganese e ferro divengono solubili e manifestano la loro tossicità per le piante (Pezeshki, 2001).

Allo scopo di approfondire l'indagine relativa al ruolo del potenziale redox come possibile causa della zonazione, durante i rilevamenti effettuati in campo nei mesi di maggio e giugno 2002 in laguna Nord sono state acquisite delle misure di potenziale del

suolo mediante impiego di una sonda multiparametrica WTW 340i, con elettrodo SentixORP (figg.2.4 e 2.5), le cui specifiche sono riportate in Tab.II.I.

temperatura d'uso	da 0 a 100°C
elettrolita di riferimento	KCl 3 mol/l
materiale sensore	platino
materiale membrana	ceramica
materiale sonda	vetro
lunghezza totale sonda	120±1 mm
diametro sonda	12±0,5 mm
unità di misura	mV
range di misura	da -1999 a +1999 mV
precisione	± 1 mV

Tab.II.I - Tabella riassuntiva delle caratteristiche dell'elettrodo SentixORP.

Gli unici studi relativi al potenziale redox del suolo in ambienti a marea risalgono ad Armstrong che tra il 1979 e il 1985 effettuò alcune misurazioni a diversa profondità presso l'estuario di Humber, in Inghilterra; l'indagine però non proseguì per l'insorgere di problemi tecnici di procedura e ad ogni modo non furono raccolte informazioni sulla risposta delle

diverse specie vegetali ai cambiamenti di potenziale del suolo (Adam, 1990).

Il riferimento bibliografico più recente che ha fornito indicazioni sul tipo di sonda da utilizzare e sulla metodologia di misurazione è un lavoro di Sanchez, Otero e Izco, del 1998, dalle cui conclusioni emerge che la zonazione della vegetazione è fortemente condizionata dalla conducibilità e dal potenziale redox del suolo, la cui variazione dipende dalla profondità locale della falda.



Fig.2.4 - Sonda multiparametrica WTW



Fig.2.5 - Modalità di misurazione

Essendo un parametro strettamente collegato alla saturazione del suolo, è quindi importante che le misure di potenziale siano acquisite in condizioni di marea simili: fra i dati raccolti, solamente quelli relativi ai giorni 15 e 22 maggio e 20 giugno sono risultati

utili per l'analisi in quanto registrati in condizioni di marea se non identiche quantomeno paragonabili. In fig.2.6 si riportano le curve di marea registrate dal mareografo di Treporti, posizionato in prossimità del canale di San Felice, dove l'onda di marea giunge attenuata e con un tempo medio di ritardo di 1 ora e 17 minuti rispetto all'onda registrata alla bocca di Lido: si nota come nelle tre giornate di misurazione, e in particolare durante le ore di attività (dalle 10.30 alle 16.30 circa), lo scarto massimo fra i valori di marea è di circa trenta centimetri, quindi si può ipotizzare che le misurazioni siano state condotte in condizioni di saturazione abbastanza simili da consentire considerazioni se non altro qualitative sull'andamento del potenziale redox del suolo.

Le misurazioni sono state eseguite praticando dei piccoli fori della profondità di circa 10cm in prossimità dell'apparato radicale di diverse piante (v.fig.2.5); dal momento che la sonda richiede qualche minuto per stabilizzare la risposta, si è preferito cambiare foro dopo ogni misurazione per evitare di registrare valori falsati dalla parziale ossidazione del sedimento esposto all'aria.

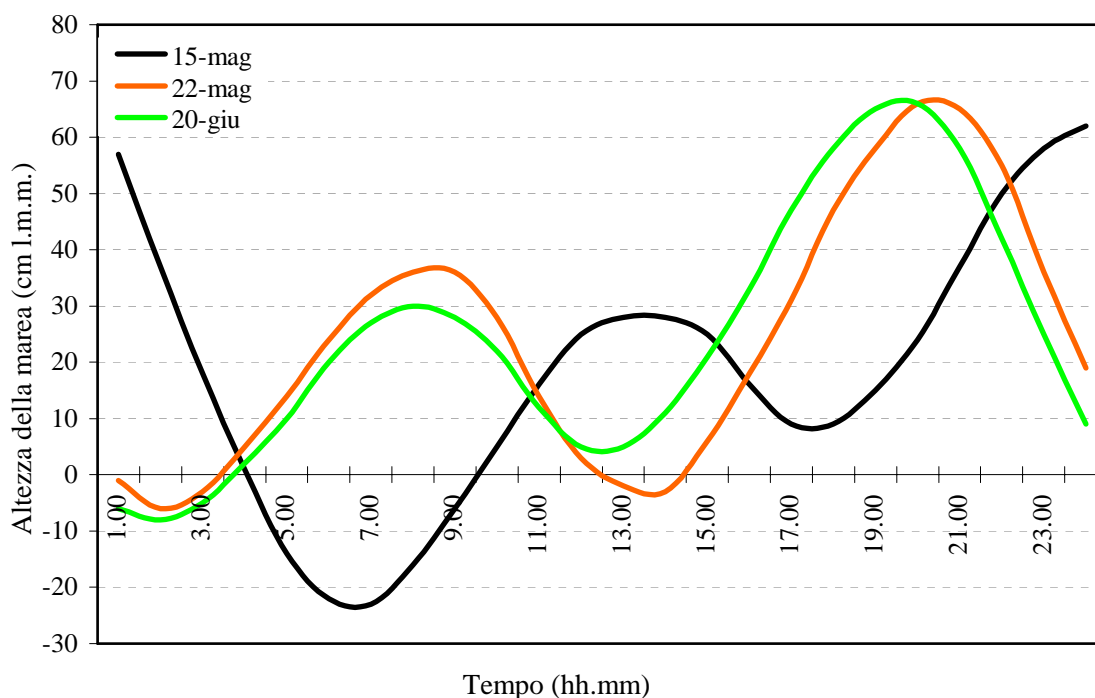


Fig.2.6 - Curve di marea relative alle giornate del 15, 22 maggio e 20 giugno, registrate dal mareografo di Treporti.

I risultati riportati in fig.2.7 sembrano confermare l'ipotesi che il valore del potenziale redox del suolo sia in realtà strettamente correlato alla morfologia locale della superficie, in particolare all'altezza sul l.m.m.: i valori maggiori si registrano per le specie di bordo (*Inula*, *Halimione* e *Puccinellia* spp.), tipiche delle aree più elevate di

barena, mentre *Sarcocornia* e *Limonium* spp. presentano valori di potenziale compresi fra i 300 e i 400mV, corrispondenti ad una quota di crescita medio-alta; l'unica specie a far registrare valori piuttosto bassi e a volte negativi per la forte anaerobiosi è *Spartina* sp., che infatti è la prima ad essere invasa dall'acqua nella fase di crescita della marea, occupando le regioni più depresse delle barene. Il potenziale relativo alla specie *Juncus maritimus* è stata rilevata solamente in una stazione, e si è quindi preferito escluderla dall'elaborazione dei dati.

Dal momento che le misure raccolte non sono in numero sufficiente per consentire analisi più approfondite, i risultati ottenuti vanno considerati con cautela: ad ogni modo, le prime stime effettuate mostrano che in corrispondenza di specie diverse si registrano effettivamente sostanziali differenze di potenziale, e quindi lo studio di questa variabile come fattore della zonazione merita di essere approfondito.

In particolare, si prevede di mettere a punto un sistema di misurazione che consenta di raccogliere un maggior numero di dati in condizioni di marea simili e a diverse profondità nel suolo, in modo da ottenere ulteriori informazioni riguardo l'andamento del potenziale redox a differenti livelli di saturazione e metterlo in relazione con la dinamica dei popolamenti vegetali di barena.

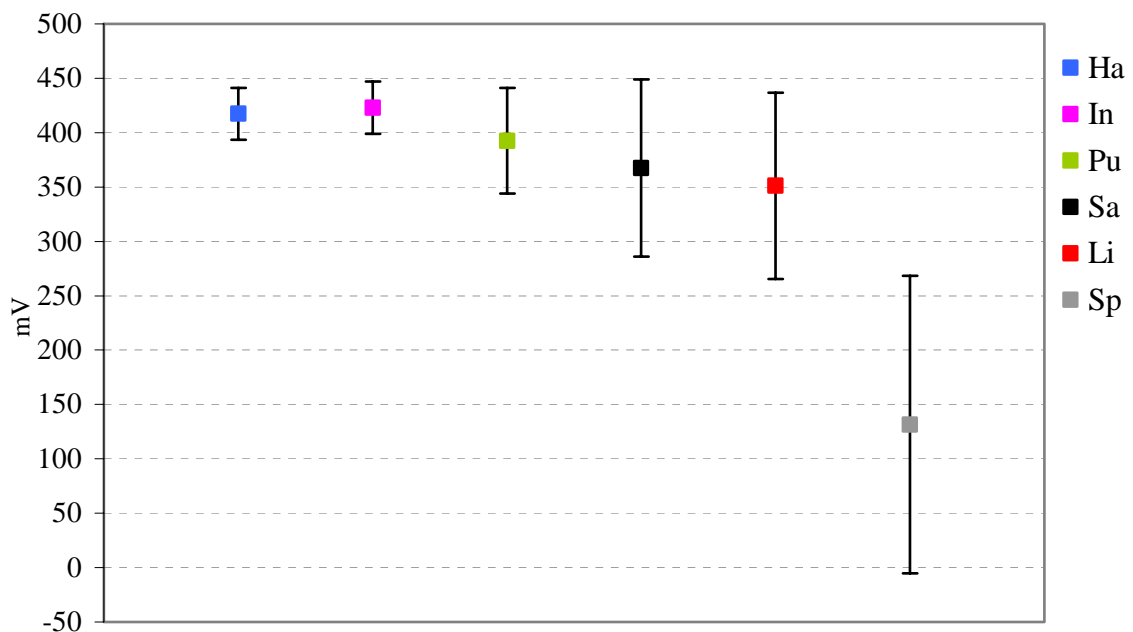


Fig.2.7 - Valori di potenziale di ossidoriduzione misurati presso la barena di S.Felice (Ha=Halimione portulacoides; In=Inula crithmoides; Pu=Puccinellia maritima; Sa=Sarcocornia fruticosa; Li=Limonium narbonense; Sp=Spartina maritima)

Da quanto detto finora, gli effetti di tossicità non possono certo essere l'unico fattore che induce la disposizione delle alofite sulle barene, anche se una selettività nell'assorbimento, accoppiata con una possibile escrezione di sodio, può promuovere variazioni di concentrazione ionica nell'immediata rizosfera.

Tuttavia, le condizioni di anaerobiosi e la tossicità dei solfuri presenti possono limitare l'assunzione di alcuni ioni dal suolo, come l'azoto, e questo può avere effetti importanti per le alofite per le quali l'accumulo di ioni è un fattore essenziale nel mantenere l'equilibrio osmotico delle cellule. Sebbene la quantità di azoto immediatamente disponibile per le piante non sembri differire a seconda che ci si trovi nella parte superiore o inferiore di un barena (Adam, 1990), nel suolo immediatamente adiacente ai ghebi sembra essercene in misura maggiore, e il fatto che *Halimione portulacoides* preferisca colonizzare le rive dei ghebi, oltre che essere un fatto legato alle migliori condizioni di aerazione del suolo, può essere legato ad un aumento della disponibilità locale di nutrienti.

§2.4.3 L'abbondanza di specie in quota e la competizione

Una delle caratteristiche comuni della vegetazione degli ambienti a marea è di essere povera in specie e questa impressione si ha a maggior ragione considerando che solo alcune fra le poche specie adattate a questi ambienti così ostili sono in realtà dominanti.

Secondo alcuni autori, la presenza e l'abbondanza di specie alle quote inferiori sono regolate essenzialmente dalla tolleranza fisiologica all'acqua salata (Snow e Vince, 1984). Se da una parte il numero e la durata delle sommersioni possono condizionare la disposizione della vegetazione presente nelle zone più depresse delle barene, dall'altra le specie che si incontrano alle quote superiori devono tollerare valori più elevati di salinità, dovuti a fenomeni di risalita capillare e di evaporazione dell'acqua dalla superficie del suolo; quindi, se la tolleranza al sale fosse davvero il fattore principale nella regolazione della ricchezza in specie, ci si dovrebbe attendere una minor varietà nelle zone più elevate.

Studi condotti da Zedler et al. nel 1999 sul fenomeno della zonazione lungo le coste della California, sembrano smentire tale ipotesi mostrando che con l'altezza si ha un aumento della ricchezza in specie, mentre nelle zone più basse la varietà vegetale si

riduce notevolmente, quindi il gradiente di diversità tende a mantenersi dalle zone inferiori alle superiori.

Alle quote più elevate, quindi, la distribuzione della vegetazione è probabilmente condizionata da fattori diversi dalla tolleranza fisiologica allo stress salino; a tal proposito Snow e Vince (1984) suggeriscono che l'abbondanza e la ricchezza in specie siano regolate da interazioni intra e interspecifiche e, in particolare, la competizione può riguardare la disponibilità di nutrienti (Levine et al., 1998) o l'esposizione alla luce (Adam, 1990) nel caso in cui i nutrienti siano presenti in quantità non limitate.

In letteratura non compaiono riferimenti a eventuali interazioni positive fra specie diverse, nonostante Bertness e Leonard nel 1997 abbiano eseguito alcuni test per il calcolo della densità fra aree di vegetazione diverse, allo scopo di studiare il ruolo delle interazioni positive nella dinamica delle comunità vegetali alofile.

Allo scopo di evidenziare la ricchezza e l'abbondanza in specie in funzione della quota, durante le campagne di misura effettuate nel primo anno di ricerca sono stati rilevati i dati di copertura percentuale e l'altezza media di un numero considerevole di aree di vegetazione presso le barene di San Felice, Pagliaga, Saline e Palude Maggiore, situate in laguna Nord. Complessivamente sono state individuate 72 aree di vegetazione: la descrizione della metodologia adottata e l'elaborazione dei dati acquisiti vengono riportati in maggior dettaglio nei capitoli IV e V.

I diagrammi nelle figg.2.8÷2.11 illustrano l'abbondanza di ciascuna specie rispetto alle altre in un particolare intervallo di quota, e sono stati ottenuti sommando le percentuali di copertura della specie nell'intervallo scelto e successivamente dividendo il risultato per il numero totale di misure effettuate in quell'intervallo.

Presso le Saline (v.fig.2.8), fra 0 e 10cm sono state rilevate due sole specie; tra 10 e 20cm tre e tra 20 e 30cm cinque specie diverse più una varietà di vegetazione mista di bordo costituita da un'associazione di varie specie presenti in percentuale molto bassa. L'istogramma mostra quindi che la varietà vegetale nelle popolazioni di barena aumenta con la quota e inoltre fornisce informazioni relative alla presenza di particolari specie che compaiono solo a determinate altezze, come *Salicornia* sp., che è presente nei primi dieci centimetri di quota, e *Inula crithmoides* e *Arthrocnemum macrostachyum*, che sono osservabili esclusivamente alle quote più alte della barena. La voce relativa alla percentuale di copertura di suolo mostra anche come la superficie non vegetata diminuisca linearmente man mano che la quota aumenta, indicando che le

condizioni generali per la presenza di vegetazione divengono più favorevoli ad altezze più elevate.

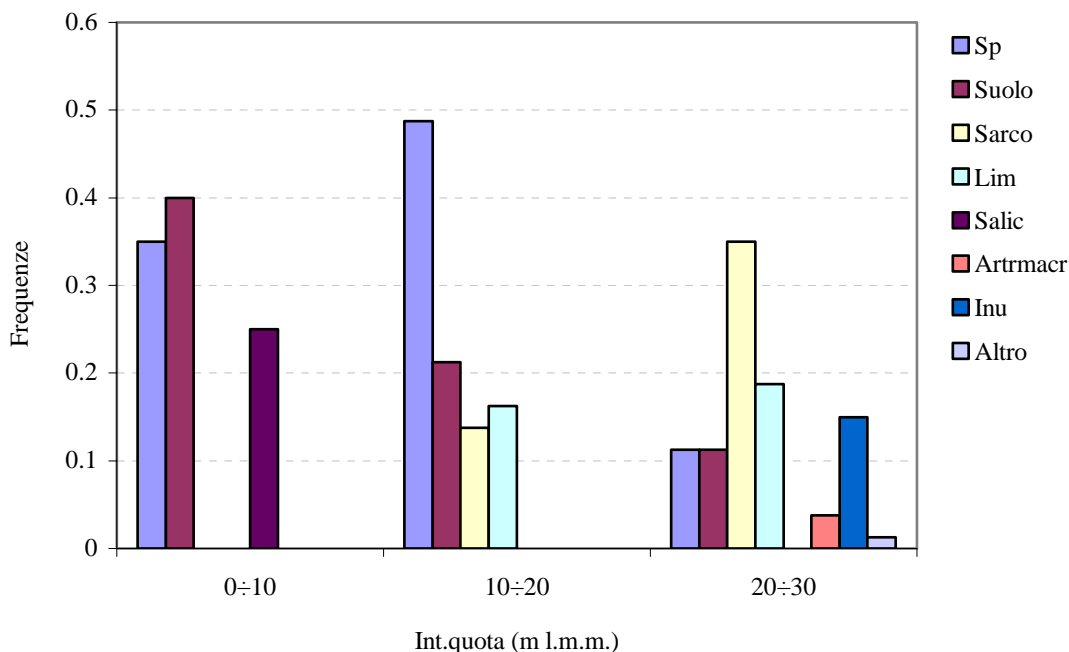


Fig.2.8 - Abbondanza di ciascuna specie negli intervalli di quota normalizzata rispetto al numero di osservazioni effettuate nell'intervallo: barene di Saline (Sp=Spartina maritima; Sa=Sarcocornia fruticosa; Li=Limonium narbonense; Sal=Salicornia veneta; Art.mac.= Arthrocnemum macrostachyum; In=Inula crithmoides; Altro=vegetazione mista di bordo)

Nella barena di San Felice (v.fig.2.9) l'abbondanza in specie segue grosso modo lo stesso andamento crescente con la quota, ma con alcune differenze: si passa da un'unica specie presente tra i 10 e i 20cm, a ben sei specie nell'intervallo successivo, ma poi la varietà diminuisce gradatamente e si trovano comunità di quattro componenti e di due componenti nei due intervalli che coprono il range tra i 30 e i 50cm di quota⁸. Inoltre la copertura di suolo risulta quasi identica a qualsiasi quota, e la vegetazione mista di bordo è presente a partire da quote leggermente maggiori di quelle registrate presso le Saline.

Il numero di aree di vegetazione osservate a palude Maggiore e a Pagliaga è piuttosto ridotto, quindi le considerazioni che vengono riportate dovrebbero essere confermate da indagini più approfondite presso questi siti; ad ogni modo dalla fig.2.10 si nota che anche a Palude Maggiore la diversità in specie sembra aumentare con la quota, lasciando progressivamente meno spazio al suolo nudo; presso Pagliaga le specie

⁸ Il numero di specie comprende anche la varietà di vegetazione mista di bordo, che è presente in aree ben distinguibili soprattutto sotto forma di strette fasce osservabili lungo ghebi e canali.

passano da due a tre nei due intervalli di quota considerati, e il suolo nudo è stato rilevato in misura considerevole solo fra i 20 e i 30 cm di altezza.

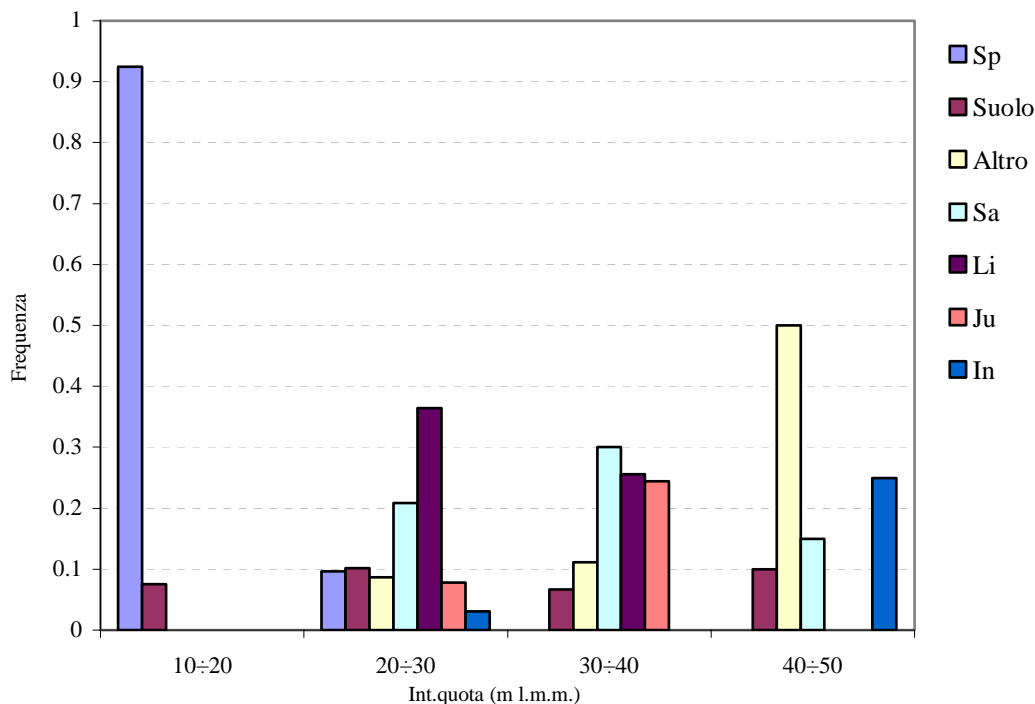


Fig.2.9 - Abbondanza di ciascuna specie negli intervalli di quota normalizzata rispetto al numero di osservazioni effettuate nell'intervallo: barena di San Felice (Sp=Spartina maritima; Sa=Sarcocornia fruticosa; Li=Limonium narbonneuse; In=Inula crithmoides; Altro=vegetazione mista di bordo; Ju=Juncus maritimus)

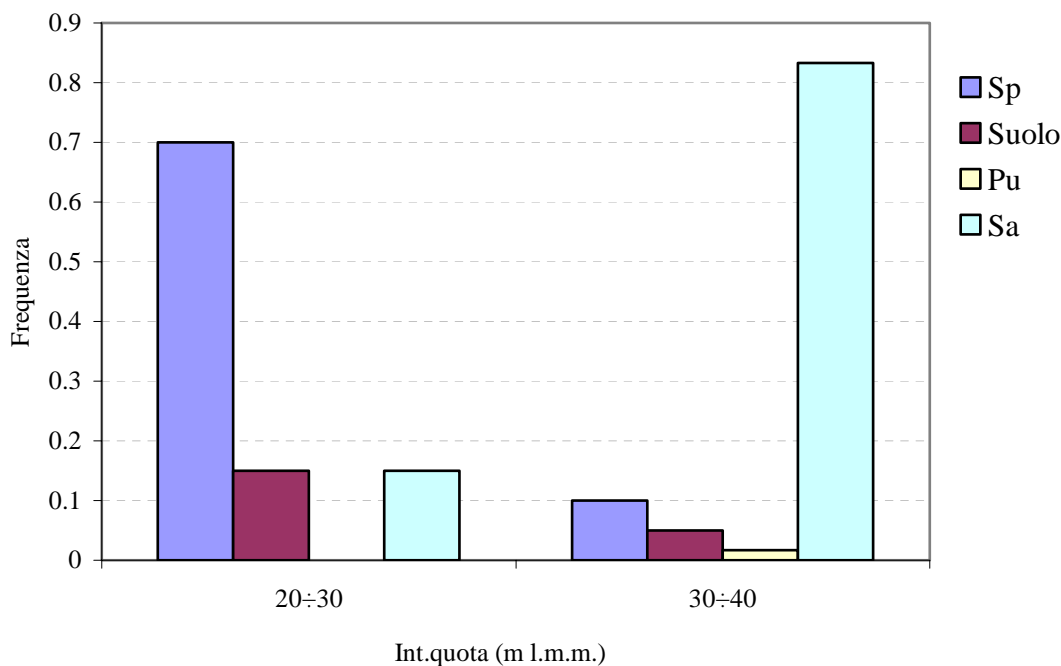


Fig.2.10 - Abbondanza di ciascuna specie negli intervalli di quota normalizzata rispetto al numero di osservazioni effettuate nell'intervallo: barena di Palude Maggiore (Sp=Spartina maritima; Sa=Sarcocornia fruticosa; Pu=Puccinellia palustris)

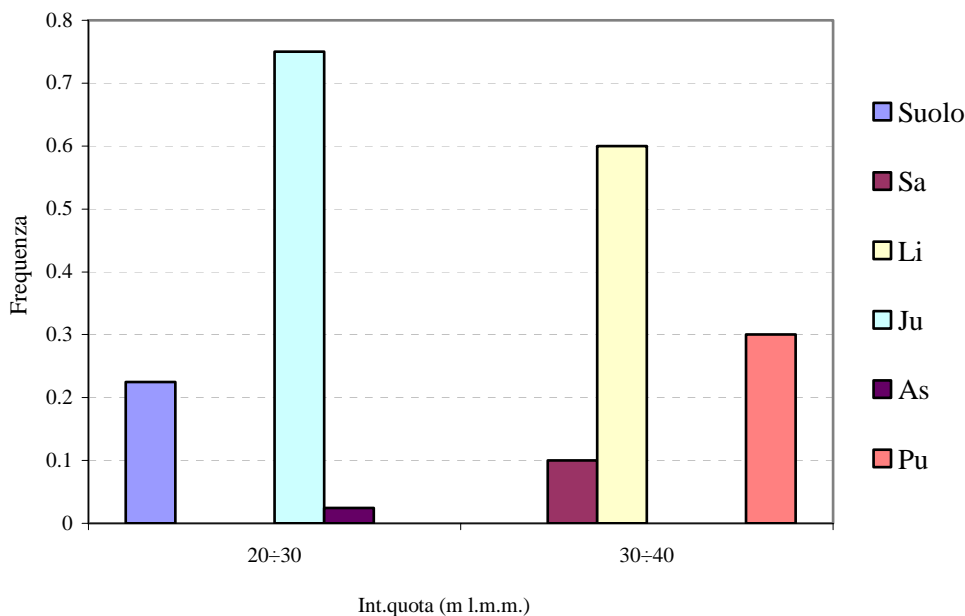


Fig.2.11 - Abbondanza di ciascuna specie negli intervalli di quota normalizzata rispetto al numero di osservazioni effettuate nell'intervallo: barena di Pagliaga (Sa=Sarcocornia fruticosa; Li=Limonium narbonense; As=Aster tripolium; Ju=Juncus maritimus; Pu=Puccinellia palustris)

Per quanto riguarda l'abbondanza delle specie, dai diagrammi si nota che presso le Saline *Spartina* sp. predomina fino ai 20cm di quota, mentre ad altezze più elevate la vegetazione più abbondante in copertura percentuale è quella mista che si ritrova sul bordo di ghebi e canali, seguita dal *Limonium* che già dai 10cm si ritrova abbondante sulla superficie di barena (v.fig.2.11).

A San Felice la specie decisamente più presente alle quote inferiori è *Spartina maritima*, mentre tra i 20 e i 40cm di altezza le associazioni di gran lunga più frequenti sono formate da *Limonium* e *Sarcocornia* spp.; *Juncus* e *Inula* spp. sono presenti e abbondanti rispettivamente tra i 30 e i 40 cm e tra i 40 e i 50 cm l.m.m, mentre specie come *Aster*, *Suaeda*, *Artemisia* e *Puccinellia* spp. sono presenti in coperture ridottissime e sono quindi considerate vegetazione mista di bordo.

I due intervalli di quota individuati a palude Maggiore vedono la predominanza di *Spartina maritima* nelle zone più basse e di *Sarcocornia fruticosa* in quelle superiori, mentre a Pagliaga è *Juncus maritimus* ad essere nettamente la specie più abbondante entro i 30cm di altezza, mentre a quote leggermente più elevate la copertura maggiore è dovuta a *Limonium* sp. e in minima parte a *Puccinellia* sp. che qui risulta presente e particolarmente abbondante.

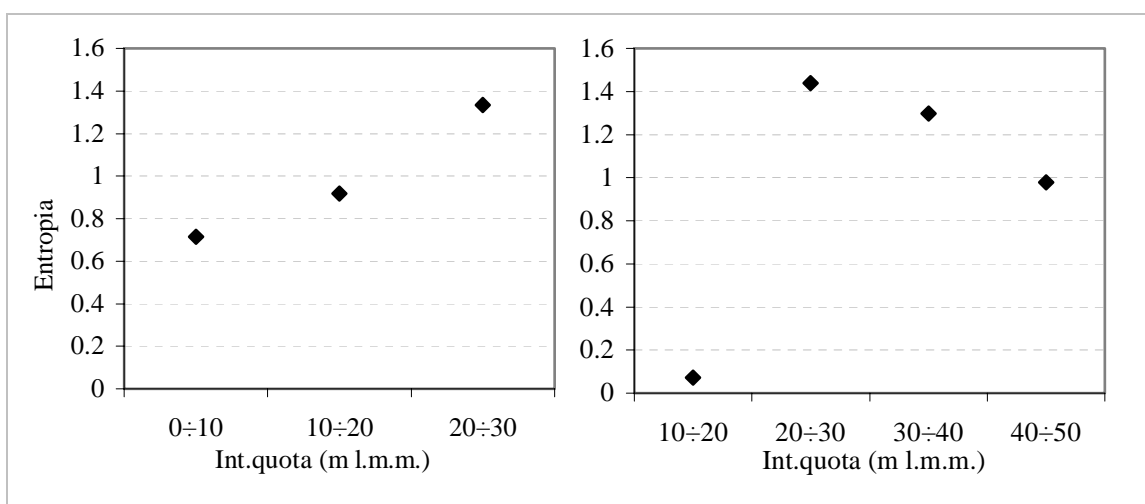
Tali risultati possono essere riassunti considerando l'andamento dell'entropia di Shannon, definita dalla funzione [1] la cui formulazione comprende la stima sia della ricchezza in specie che dell'omogeneità di copertura:

$$S(z) = -\sum_{i=1}^N P_i(z) \ln P_i(z) \quad [1]$$

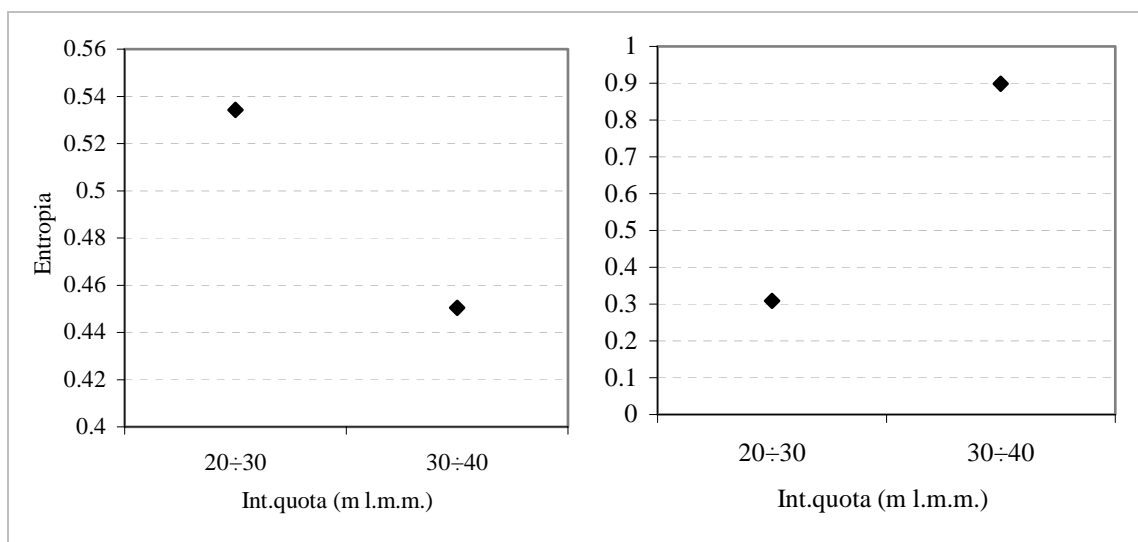
dove: z è la quota, $P_i(z)$ è la probabilità (o frequenza) con cui la specie i -esima compare nell'intervallo di quota compreso tra z e $z+\Delta z$ e N è il numero totale di specie presenti sulla barena.

L'andamento della funzione $S(z)$ per le barene Saline e San Felice è mostrato nelle figg.2.12 e 2.13. Come si nota, il valore dell'entropia, e quindi la diversità, tende a crescere con la quota presso le Saline, mentre a San Felice cresce fino ad altezze medio-elevate (tra i 20 e i 30cm) per poi diminuire linearmente salendo con la quota.

La funzione $S(z)$ è stata calcolata anche per le barene di Palude Maggiore e Pagliaga, ma, a causa dell'esiguo numero di aree finora rilevate, i risultati non possono fornire considerazioni generali sul comportamento della vegetazione presso queste barene. Ad ogni modo si riscontrano variazioni notevoli del valore di entropia in un range di quota di soli venti centimetri, ed è quindi probabile che continuando nella raccolta di dati presso questi siti emergano ulteriori informazioni sulla varietà e sull'abbondanza relativa delle specie vegetali (figg.2.14 e 2.15).



Figg.2.12 e 2.13 - Andamento dell'entropia di Shannon presso le barene Saline e San Felice in funzione della quota di osservazione.



Figg.2.14 e 2.15 - Andamento dell'entropia di Shannon presso Palude Maggiore e Pagliaga in funzione della quota di osservazione.

I risultati ottenuti mostrano che la maggior parte delle variazioni nella composizione vegetale alle quote più elevate può essere giustificata dall'estrema eterogeneità di tale ambiente di transizione, che presenta forti gradienti e considerevole variabilità temporale. Simili modificazioni si trovano anche nella parte più depressa delle barene, ma spesso si riflettono con meno evidenza nei cambiamenti della copertura vegetale. Se da una parte questa può essere una conseguenza della povertà in specie riscontrata delle zone più basse, dall'altra suggerisce che la frequenza di sommersione possa in realtà mascherare in larga misura l'influenza delle variazioni puntuali nel microambiente.

§2.5 Considerazioni

Dai risultati ottenuti e dagli studi riportati in letteratura emerge che esiste una relazione stretta tra la topografia irregolare delle superficie di barena e l'andamento di alcune caratteristiche del suolo, come l'ossigenazione, la porosità, la frequenza e la durata delle sommersioni, la presenza più o meno abbondante di nutrienti e l'eventuale formazione di ioni tossici nel suolo.

In particolare sembra che il potenziale di ossidoriduzione del suolo, misurato in condizioni di saturazione simili, assuma valori differenti in corrispondenza delle diverse alofite presenti sulle barene, risultando più elevato dove si osservano le specie tipiche delle aree meno depresse. È necessario comunque proseguire in questa indagine

raccogliendo un maggior numero di dati e mettendo a punto un metodo sistematico di misurazione.

Inoltre, se si esaminano macchie di vegetazione presenti a diversi intervalli di quota si osserva che in genere l'abbondanza totale in specie è massima alle quote medio-alte, mentre si riduce notevolmente nelle aree inferiori e nelle zone più elevate.

Un aspetto interessante per interpretare il fenomeno della zonazione potrebbe essere l'esistenza di interazioni positive tra le specie: l'osservazione di popolamenti ricorrenti e di vasta copertura può infatti fornire informazioni utili circa l'eventuale vantaggio reciproco ottenuto dalle specie che vi partecipano.

La dinamicità della copertura vegetale alofila rappresenta in sintesi una risposta dettata da cambiamenti legati all'evoluzione complessiva delle barene stesse: una volta compresi i meccanismi che regolano la zonazione, il mosaico di popolamenti diventa un'utile "interfaccia" che consente di osservare la tendenza evolutiva in atto semplicemente mediante l'interpretazione di mappe della copertura vegetale delle aree stesse, riducendo considerevolmente la frequenza delle indagini dirette in campo.

Per acquisire informazioni sull'ecosistema lagunare il progetto TIDE ha previsto l'impiego della tecnica del **telerilevamento**: in questo modo le osservazioni possono coprire scale spaziali e temporali molto diverse, da un lato consentendo di discriminare nel dettaglio il mosaico di popolamenti vegetali presenti, dall'altro rendendo possibile l'organizzazione di frequenti monitoraggi per lo studio dell'evoluzione complessiva dell'ambiente lagunare.