

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di AGRONOMIA AMBIENTALE E PRODUZIONI VEGETALI

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE
CURRICULUM PRODUZIONI E DIFESA VEGETALI

TITOLO

***“La contaminazione salina nel margine della
Laguna di Venezia: l’influenza sulla produttività di
Zea mais L.”***

Relatore:

Prof. **ANTONIO BERTI**

Correlatore:

Dott. **ELIA SCUDIERO**

Laureando: **MATTEO PAPA**

Matricola n. **622483 TG**

ANNO ACCADEMICO 20011- 20012

Ringraziamenti

Sono ormai passati otto anni dal primo giorno in cui ho iniziato questa mia esperienza universitaria e tutt’ ora quel giorno sembra che fosse stato ieri. Ho superato vari ostacoli e ho conosciuto tante persone le quali hanno creduto nelle mie potenzialità. Applicherò e farò tesoro di tutte le conoscenze acquisite durante questa mia carriera scolastica al fine di essere fiero essere considerato un Dottore.

Con questo lavoro vorrei ringraziare tutti coloro che lavorano in dipartimento di Agronomia Ambientale e produzioni vegetali, in particolare il dottor Elia Scudiero che, con il suo immenso aiuto , il suo incoraggiamento e tutti i suoi consigli, sono riuscito portare questo lavoro al giorno della mia laurea.

Un grosso ringraziamento va anche al professor Berti Antonio che anche in questa occasione, dopo la tesi della laurea triennale, ha visto in me la passione per la scienza agronomica, dandomi l’occasione di eseguire dei lavori, i quali permettono il progredire dell’ attività agricole.

INDICE

	Riassunto/Abstract/keywords	pag	4
1	INTRODUZIONE	pag	7
1.1	La salinità nei suoli agrari	pag	7
1.1.1	Misurare la salinità	pag	9
1.1.2	Formazione dei suoli salini	pag	10
1.1.3	Intrusione salina nei mari	pag	14
1.1.4	Effetti della salinità sulla struttura del suolo	pag	17
1.2	Piante e stress	pag	19
1.2.1	Comportamento fisiologico nel tempo	pag	23
1.2.2	Meccanismi di tolleranza alla salinità	pag	27
1.3	L'intrusione salina nel margine meridionale della laguna di Venezia	pag	31
1.3.1	Inquadramento geografico	pag	31
1.3.2	Inquadramento idrologico	pag	32
1.3.3	L' introduzione salina	pag	34
1.4	Il progetto strategico	pag	36
1.5	Obiettivi	pag	38
2	MATERIALI E METODI	pag	39
2.1	L'area di studio	pag	39
2.2	L'esperimento di campo ed analisi di laboratorio	pag	45
2.2.1	Selezione dei punti di campionamento e caratteristiche chimico-fisiche dei loro suoli.	pag	50
2.3	Analisi statistica	pag	53
3	RISULTATI	pag	56
3.1	Resa	pag	56
3.2	La composizione chimica della parte aerea	pag	58
3.3	La risposta spettrale delle piante	pag	59
3.4	Matrici di correlazione	pag	61
3.5	Principal component analysis	pag	66
3.6	Scala di campo	pag	70
4	CONCLUSIONI	pag	79
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	pag	80

RIASSUNTO

L’accumulo di Sali nei suoli costieri è influenzato dalle dinamiche idrogeologiche dei sistemi d’acqua superficiali e dalle falde saturate ed insature. Gli eventi piovosi facilitano il dilavamento dei suoli contrastando il flusso verticale del sale dalle falde superficiali. Lo stato di salinizzazione e la produttività dei suoli dipendono dall’equilibrio finale tra questi due processi contrasranti. Questa dinamica è stata investigata in un terreno agrario al margine meridionale della Laguna di Venezia. Infatti, il bacino scolante della Laguna di Venezia è caratterizzato da un ambiente costiero molto precario soggetto sia a cambiamenti naturali. Inoltre una parte significativa ed importante per la sfera dell’economia agraria si trova sotto il livello medio del mare. In questo contesto idrogeologico, l’area meridionale della laguna è caratterizzata da un forte rischio di intrusione salina a causa del contesto idrogeomorfologico. La contaminazione salina è influenzata da: diverse idrovore che mantengono sotto bonifica il territorio, estrazioni dalle falde, irrigazione e altre perdite di acqua dolce durante i mesi estivi. Un progetto triennale è stato iniziato nel 2010 con lo scopo di valutare l’impatto dell’intrusione salina dai corpi idrici salini ai terreni agrari e le ripercussioni di tale fenomeni sulla qualità del suolo e sulla produttività agraria. Lo scopo del progetto, di cui questa tesi mostra solo i dati relativi all’anno 2010 sono: i) determinare se lo stress salino rappresenta il fattore principale che influenza la produzione di Zea mais L; ii) distinguere gli effetti dello stress salino sulla produzione di Zea mais L dai altri tipi di stress abiotici e biotici; e iii) individuare uno o più indicatori vegetali specifici che siano in grado di rilevare un possibile stato di stress dovuto alla elevata concentrazione di sali nel suolo. In un’area di studio di 25 ha situata a Ca’ Bianca, Chioggia, Venezia e coltivata a mais si sono effettuate le analisi su 120 campioni di suoli in diversi profili da 0 a 1.2 m: salinità del suolo (conducibilità elettrica 1:2), e le principali caratteristiche chimico fisiche (es. granulometria, analisi del contenuto organico, pH, capacità di scambio cationico ..). Sono state ottenute delle mappe di conducibilità elettrica apparente del suolo a tre profondità (0 - 0.75 m; 0-1.50 m; 0- 6.00 m) nell’aprile 2010 e nell’aprile e nel settembre 2011 con una tecnica ad induzione elettromagnetica (sonda CMD, GF Instruments accoppiata ad un DGPS). Durante il 2011, l’attività fisiologica delle piante è stata monitorata in tre date in 10 punti all’interno dell’area, analizzando:

potenziale fogliare, biometria, riflettanza (Spectrascan, Photoresarch) e contenuto ionico della parte aerea. Inoltre sono state ottenute delle mappe di NDVI con rilievi proximal sensing (CropCircle, Holland Scientific accoppiato ad un DGPS) in tre date. Infine, accoppiando un monitor di raccolta alla trebbiatrice, una mappa di resa è stata ottenuta per l’area di studio. I risultati mostrano una dipendenza della produzione dalla salinità del suolo e dalla tessitura del suolo. In un anno siccitoso come il 2011 le aree estremamente sabbiose hanno dato origine a fenomeni di stress idrico. I risultati mostrano che, anche a livello spaziale, la salinità e zone molto sabbiose hanno contribuito ad abbassare la resa. Gli indici radiometrici usati sono risultati utili per predire la resa di fine stagione ma non hanno aiutato nel discriminare i diversi tipi di stress a cui le piante erano soggette.

Abstract

Salt accumulation in coastal soils is strongly affected by water dynamics in unsaturated and saturated zones. Rainfall and irrigation promote salt leaching contrasting the effect of upward flux from saline groundwater. Salinization degree and soil productivity depend by the final equilibrium between these two contrasting processes. This dynamic has been investigated in a farmland close to the Venice Lagoon. Indeed, the Venice watershed includes a very precarious coastal environment subject to both natural and anthropogenic changes with a significant and economically important fraction of the coastal farmland presently below mean sea level. In the hydrogeological context of the Venice coastland, a large risk of saltwater contamination characterizes the southernmost area because of the geomorphological setting of the coastal plain. Salt contamination is influenced also by the activity of several pumping stations used to keep drained the area, groundwater withdrawals, irrigation and freshwater releases during summer dry months. A 3-years project was started in 2010 to evaluate the impact of salt intrusion from the salty water bodies on soil productivity. The aims of the project (this thesis only deals with data from the year 2011) are: i) to determine whether salinity is the main factor reducing maize yield; ii) to discriminate salinity stress from other sources of stress on maize; and iii) to find one or more vegetation indices able to detect crop stress deriving from high soil salinity. In a 25 ha basin cultivated with maize crop, soil salinity (electrical conductance

1:2) and the main physical-chemical properties (e.g. texture, organic carbon and exchangeable cations) were measured along the 1.5 m soil profile in 120 positions. Maps of apparent electrical conductivity (ECa) at three different investigation depths (0 - 0.75 m; 0-1.50 m; 0- 6.00 m) were also obtained in April 2010 with a CMD electromagnetic conductivity meter (GF Instruments) associated to a DGPS. During 2011 some physiological crop parameters, in particular leaf potential, SPAD, reflectance (i.e. Spectrascan, Photoressearch), leaf ions content were monitored in 10 scattered positions. Moreover, and maps of NDVI were obtained by proximal sensing (three dates) using an active spectral radiometer (Crop Circle, Holland Scientific). Finally, a map of the crop production was obtained by a yield mapping system mounted on a combine harvester. Results show a dependency of yield on soil salinity and soil texture. The year 2011 was such a dry year that crops developed significant water stress in areas with a high sand content. Results also show a spatial dependency of yield on sandy areas and saline areas. Proximal sensing indices could be used to predict yield but couldn't be used as tools for discriminating between the different abiotic stress sources affecting the area in 2011.

Keywords

Saltwater Intrusion; Soil Salinity; Venice Lagoon; Reflectance; NDVI; SRVI.

1. INTRODUZIONE

1.1 La salinità nei suoli agrari

Negli ultimi anni la ricerca si è sempre più orientata verso l'utilizzo di tecniche agronomiche che garantissero, non solo la quantità e qualità dei prodotti, ma soprattutto contribuissero alla sostenibilità dell'attività agricola, favorendo la conservazione delle risorse naturali e riducendo l'impatto ambientale. Uno degli aspetti più ampiamente studiati, soprattutto nelle regioni aride e semiaride del pianeta, rinvenibili in tutti e cinque i continenti e sia in Paesi sviluppati sia in quelli in via di sviluppo, ove le risorse idriche sono limitanti la produzione agricola, sia in termini quantitativi che qualitativi, è quello della salinizzazione delle terre irrigate.

Negli ultimi 60-70 anni, molte informazioni sono state raccolte su tale fenomeno, consentendo di comprendere molti degli aspetti ad esso connessi e di sviluppare tecnologie capaci di limitare l'entità delle problematiche risultanti. Sebbene molte cose siano note, restano, tuttavia, degli aspetti oscuri, sui quali tuttora si svolge un'intensa attività di ricerca.

Oltre alla notevole perdita di produzione agricola, la salinizzazione causa altri problemi quali danni alle **infrastrutture** e **contaminazione delle falde acquifere**. Infatti i suoli salini e sodici riducono valore e produttività di ampie aree di tutto il mondo e si stima che ogni minuto nel mondo si perdono tre ettari di terreni coltivabili a causa della salinizzazione (F.A.O. & A.G.L., 2000b).

Inoltre, a causa della cattiva gestione del suolo e delle acque, approssimativamente l'8 - 12% (circa 25 milioni di ettari) delle terre irrigate hanno registrato una diminuzione di produttività dovuta all'accumulo di sali e in più, altri 70 milioni di ettari sono moderatamente colpiti dal problema (Umali, 2003).

La salinizzazione è un problema diffuso in molteplici regioni del mondo. Ad esempio negli Stati Uniti si è valutato che il 28% delle aree irrigate è salinizzata; la Cina ha problemi di salinizzazione sul 23% delle terre, il Pakistan sul 21%, l'India sull'11% e il Messico sul 10%. Questa situazione non è statica, ed ogni anno circa 1,5 milioni di ettari in zone irrigate

vengono perse appunto a causa di questo fenomeno (Shannon, 1997; Goyal e Rains, 2003). Questa perdita di suoli dovuta alla salinizzazione è occorsa nel periodo 1950-1990, quando la domanda di acqua per l’irrigazione è raddoppiata. La competizione fra settore urbano e agricolo per l’uso dell’acqua ha creato ristrettezze ed animosità, che limitano di molto le scelte disponibili per gli agronomi nella gestione di tale risorsa, incluso l’utilizzo del dilavamento per combattere la salinizzazione. Specificatamente si stima che nel bacino Mediterraneo circa 16 milioni di ettari risultano a essere salinizzati (Shannon, 1997; Goyal e Rains, 2003).

Infatti nell’areale mediterraneo spesso la salinizzazione del franco di coltivazione è associata alla cattiva gestione delle acque irrigue e visto che la popolazione mondiale è in continua crescita, mentre il totale delle terre irrigate sembra stabile, la crescente domanda di cibo viene soddisfatta solamente con l’incremento di produttività per unità di terreno. Questo è permesso in quanto le terre irrigue producono il doppio rispetto a quelle non irrigue, di coprire così un terzo dell’intera domanda mondiale di cibo, sebbene l’irrigazione risulta ad essere una delle prime cause principali della salinizzazione (Szabolcs, 1984)

L’Italia è ricca di risorse idriche rinnovabili derivanti dagli apporti meteorici. La dotazione teorica è stimata in 175 miliardi di m³ acqua annui, valore superiore alla media dei Paesi europei, e le reali possibilità sono stimate in 51 miliardi di m³ acqua annui (Fagnano e Quaglietta, 2003). Nel bilancio totale nazionale non ci dovrebbero essere problemi di approvvigionamento, ma purtroppo tali quantitativi non sono distribuiti omogeneamente nell’arco dell’anno e sul territorio, anzi, al contrario, gli apporti sono concentrati proprio nel periodo in cui le richieste, soprattutto per l’irrigazione, sono più basse (autunno-inverno), ed a livello territoriale i prelievi sono **concentrati nel Nord Italia (65%)**.

In particolare, laddove le risorse idriche sono già deficitarie rispetto ai fabbisogni, sta diventando sempre più pressante il problema della gestione delle acque, in relazione non solo alla loro quantità ma anche alla loro qualità, e della ripartizione delle risorse tra i diversi usi. In molte zone dell’Italia, soprattutto dove si è affermato e diffuso un comparto ortofloricolo, la disponibilità idrica è resa più precaria dall’elevata pressione demografica e dalla naturale maggiore domanda di evapotraspirazione dell’ambiente.

Ne sono derivati da un lato la cronica carenza d’acqua per usi civili e dall’altro l’exasperato ed incontrollato emungimento di acqua per l’irrigazione, con conseguente abbassamento ed impoverimento delle falde che, in non pochi casi, si è risolto mediante l’infiltrazioni di acqua marina. Per tali motivi le acque derivate da pozzi risultano spesso qualitativamente scadenti prevalentemente per elevate concentrazioni di cloruro di sodio (Barbieri e De Pascale, 1992)

1.1.1 Misurare la salinità

Dal momento che le piante assorbono la maggior parte dei sali tramite le radici risulta importante misurare e classificare la concentrazione dei sali nel suolo. La misura della salinità dell’acqua si esegue con relativa semplicità, mentre la misura della salinità del suolo è complicata a causa della forte influenza dell’umidità contenuta nello stesso. La salinità è una proprietà dinamica della zona radicale delle piante poiché essa dipende i) dalla concentrazione della soluzione del suolo, dovuta all’assorbimento radicale e all’evaporazione dalla superficie del suolo, e ii) dall’apporto di acqua al suolo, dovuto a pioggia, scioglimento delle nevi e/o irrigazione. Inoltre, i sali dissociati sono molto mobili lungo il profilo del suolo grazie alla diffusione chimica (mobilità ionica) e al trasporto dispersivo dell’acqua stessa.

Pertanto, le radici delle piante sono esposte a cambiamenti spaziali e temporali della salinità del mezzo, il che rende più difficile il loro adattamento.

Il metodo più comune per misurare la salinità del suolo è la determinazione della sua conducibilità elettrica utilizzando una estratto di pasta satura il quale non è altro che un suolo mescolato ad acqua distillata, EC_e) (Rhoades, 1999).

Un metodo più conveniente ed universale da prendere in considerazione è l’estratto 1:2. Il suolo viene prima essiccato e setacciato, successivamente si mescolano 20 ml di acqua deionizzata ad 10 g di suolo. La conducibilità elettrica della soluzione acquosa 1:2 ($EC_{1:2}$) viene poi misurata con un conduttivimetro. La EC del suolo può essere calcolata se il suo contenuto in acqua è noto al momento del campionamento. Alternativamente la misura può essere relazionata alla capacità di campo del suolo usando i seguenti fattori di conversione.

Un altro parametro importante per caratterizzare un suolo salino è la percentuale di sodio scambiabile (ESP) che si definisce come la proporzione fra il sodio scambiabile assorbito (quello che è legato all’argilla) e la capacità di scambio cationico del suolo:

$$\text{ESP} = ((\text{Sodio scambiabile (meq } 100\text{g}^{-1}) / \text{CSC (meq } 100\text{g}^{-1})) \times 100$$

Mediante tale formula si può intuire che all’aumentare del valore ESP, diminuisce la qualità del suolo riducendo così la crescita delle piante. Strettamente legata alla ESP, è da considerare anche il rapporto di assorbimento del sodio (SAR) il quale misura la preponderanza relativa del sodio nei confronti di calcio e magnesio che sono elementi specifici che moderano gli effetti negati del sodio (SAR e ESP sono considerate interscambiabili).

Tabella 1.1 gradi salinità a seconda di valori di $EC_{1:2}$

Classi	$EC_{1:2}$ $dS\ m^{-1}$
Non salino	0 - 0.4
Leggermente salino	0.4 - 1
Moderatamente salino	1 - 2
Molto salino	2 - 5
Estremamente salino	> 5

1.1.2 Formazione dei suoli salini.

I sali sono sempre presenti nei suoli anche se la loro origine può essere differente.

Generalmente, i sali sono composti ionici che formano cristalli e sono di solito solubili in acqua, dove si separano ioni positivi (cationi) e negativi (anioni) si separano. Generalmente la solubilità del solfato di calcio o gesso ($CaSO_4$) è usata come standard per comparare la solubilità. I sali che hanno maggior solubilità rispetto al gesso (Na_2SO_4 o $NaCl$) sono considerati “solubili” e causano salinità. Quelli meno solubili del gesso ($CaCO_3$) sono considerati insolubili e quindi non salinizzano.

La salinità del suolo è causata dai sali solubili dissociati nella soluzione circolante del suolo e la quantità e il tipo di sali dipendono dalle caratteristiche climatiche, morfologiche, pedologiche e idrologiche del suolo stesso. Per esempio il solfato di calcio o gesso è

frequente nelle zone desertiche o semi desertiche mentre i sali solubili (solfati, clorati, bicarbonati di calcio, sodio, potassio e magnesio) sono caratteristici dei suoli salini e alcalini (Sequi, 1989).

I principali ioni che causano salinizzazione sono il cloruro, il sodio, i solfati, i bicarbonati,, il potassio, il magnesio, il calcio e il boro (Rhoades 1999).

Ad eguale concentrazione (espressa in mg l^{-1} , g l^{-1} oppure in percentuale) di sali differenti corrispondono differenti livelli di salinizzazione e le principali cause della salinizzazione nel nostro ambiente sono legate alla redistribuzione dell’acqua e dei sali solubili, sia sopra che sotto il suolo. Nelle regioni umide, il dilavamento dovuto alla pioggia tende a rimuovere tali composti, prevenendo così la loro concentrazione negli strati superficiali del suolo. I problemi associati alla salinizzazione sono, invece, più acuti nelle zone aride e semi aride del mondo, dove sia processi naturali (evapotraspirazione) che attività umane (disboscamento, gestione delle risorse e irrigazione) giocano la loro parte nella concentrazione dei sali nelle acque e nei suoli .

La dinamica dell’accumulo dei sali può essere distinta in due cicli: *i)* salinizzazione primaria o naturale e *ii)* salinizzazione secondaria o antropogenica (indotta dall’uomo) (Munns, 1999; F.A.O. & A.G.L., 2000; Tanji, 2002)

Salinizzazione primaria o naturale

La formazione di suoli salini avviene quando l’acqua viene persa dal suolo essenzialmente per evaporazione e traspirazione in condizioni dove si crea una forte risalita capillare dei sali, piuttosto che per percolazione. Le piante, che assorbono l’acqua dalla soluzione circolante, provocano l’accumulo dei sali nel suolo, in quanto la falda continua la sua risalita e, quando raggiunge la superficie, l’acqua evapora o viene assorbito lasciando sali sulla superficie.

La salinizzazione generalmente avviene in suoli di regioni caratterizzati da piogge scarse, alto deficit d’acqua e scarso drenaggio. Infatti Tanji (2002) riporta che la salinità presente nei suoli è soggetta a fenomeni ciclici di concentrazione, dovuta alle perdite evapotraspirative della superficie, e di diluizione, dovuta a piogge e scioglimento delle nevi (precipitazioni atmosferiche). Visto che i suoli delle regioni aride hanno un alto valore del rapporto evaporazione/precipitazione, essi tendono ad essere salini, mentre i suoli delle

regioni umide hanno valori bassi del rapporto evaporazione/precipitazione e perciò tendono a non essere salinizzati

Altra causa di salinizzazione è il trasporto di sali dall’oceano a causa del vento e/o pioggia cioè mediante il cosiddetto aerosol marino. In linea generale l’acqua piovana contiene da 6 a 50 mg/kg di sale (Munns, 1999).

La quantità di sali presenti nei suoli varia anche in base al tipo di suolo (bassa per i suoli sabbiosi, alta per quelli argillosi derivato dal fatto che un terreno argilloso possiede una capacità di scambio cationico (CSC) molto elevato rispetto ad un terreno sciolto.

La salinità è anche inversamente correlata alla media annua di piovosità ovvero tanto più è minore la piovosità annua media, tanto più è elevata la salinità dei suoli. (Munns,1999)

I cambiamenti climatici costituiscono un’altra causa della salinizzazione primaria (aumento delle temperature, diminuzione dell’umidità) che nelle regioni secche possono dare un contributo sostanziale alla desertificazione. In alcune zone aride i depositi di acqua salmastra, lo scarso drenaggio e falde superficiali possono anche rafforzare la salinizzazione e promuovere quindi la formazione di orizzonti salini (o infiltrazioni saline). Tali infiltrazioni si formano quando l’acqua percolante incontra uno strato relativamente poco permeabile e roccioso. L’acqua inizia a scorrere verso le aree circostanti dove forma una piccola falda. Essa, senza un adeguato drenaggio, tende a risalire verso la superficie ed ad evaporare lasciando depositi salini nello strato di suolo (Munns,1999).

Salinizzazione secondaria o antropogenica (indotta dalle attività antropiche)

Le fonti saline nella salinizzazione secondaria sono costituite dai sali presenti nell’acqua di irrigazione e dai sali residui di ammendanti del suolo e dell’acqua (gesso, zolfo elementare, acidi), di deiezioni animali (letame e acque di lavaggio), di fertilizzanti chimici, e di fanghiglie di scarto (Tanji, 2002)

La salinizzazione secondaria è causata da una cattiva gestione dell’irrigazione (insufficienti volumi d’irrigazione, scarsa efficienza d’irrigazione, utilizzazione di acqua salina in suoli particolarmente sensibili alla salinizzazione come suoli sodici, improprie pratiche agronomiche), da una scarsa livellazione del terreno e da pratiche che, durante i periodi secchi, aumentano i movimenti di risalita capillare in presenza di falde superficiali (scorretto uso di macchine pesanti che causano la compattazione del suolo, eccessivo

dilavamento con scarso drenaggio, uso di rotazione improprie ed abbinamenti colturali non adatti).

La salinizzazione secondaria è dovuta dalle attività umane che espongono il suolo e l’acqua a contaminazioni varie (prodotti chimici tipo concimi di sintesi, antiparassitari, detersivi ecc) facendo, di conseguenza, cambiare il bilancio idrogeologico del suolo stesso tra acqua apportata (irrigazioni e/o piogge) e acqua utilizzata dalle colture (traspirazione).

La rottura dell’equilibrio dinamico fra acqua e sali ha seriamente colpito la produttività di biomassa. Infatti l’accantonamento delle piante con radici lunghe (ad esempio, piante erbacee perenni, alberi e arbusti) e la conseguente coltivazione su larga scala di specie annuali in monosuccessione su pianure alluvionali è forse una delle principali cause di salinizzazione secondaria e della conseguente degradazione del suolo (B.A.P., 2004).

Prima dell’attività antropica, nei climi aridi e semi-aridi, c’era un bilanciamento tra l’acqua usata dalla vegetazione spontanea e le piogge il quale era sufficiente a mantenere la falda acquifera sotto la superficie del suolo e quindi, in tale bilancio ecologico, la vegetazione era capace di utilizzare quasi tutta l’acqua piovana (B.A.P., 2004).

Invece l’eliminazione della vegetazione spontanea ad apparato radicale espanso e l’introduzione della pratica dell’irrigazione, ha modificato questo bilancio comportando di conseguenza l’accumulo di piogge e acqua d’irrigazione molto superiore rispetto alla quantità necessaria alle coltivazioni, causando la risalita della falda e la mobilitazione dei sali precedentemente accumulati nel sottosuolo. I sali mobilizzati possono anche muoversi lateralmente verso i corsi d’acqua, determinando un aumento della salinità anche nei corpi idrici superficiali. In condizioni irrigue, la più comune tecnica per ridurre la concentrazione di sali dalla zona radicale è quella che prevede l’applicazione di acqua non salina in quantità maggiore alle necessità evapotraspirative della coltura. Tuttavia, in molte zone irrigate si pone il problema riguardante la risalita della falda dovuto ad eccessivi volumi d’acqua d’irrigazione in condizioni di drenaggio insufficiente. La maggior parte dei progetti d’irrigazione su larga scala non prevedono sistemi di drenaggio, fino a che non sorgano problemi di ristagno idrico. La deviazione dell’acqua d’irrigazione dalle necessità superficiali e la percolazione profonda dell’acqua stessa (spesso associata a sovra-irrigazione), conducono a saturazione del bacino sotterraneo comportando la salinizzazione nei strati del terreno più profondi. Dopo decenni di irrigazione, la zona

sotterranea si satura e la falda si alza fino a raggiungere il franco di coltivazione, causando ristagno idrico.

Bisogna precisare inoltre che soprattutto nelle zone costiere, il prelievo di acque dolci dalle falde superficiali, aiuta la risalita del cuneo salino, impoverendo così gradualmente la qualità delle falde dolci, causandone quindi una graduale salinizzazione.

1.1.3 Intrusione salina dai mari

La salinità delle acque marine viene generalmente espressa come grammi di sali contenuti in 1000 grammi di acqua o in conducibilità elettrica (EC) in dS m^{-1} , perciò le acque marine nelle normali condizioni contengono in media 35 grammi di sali ogni 1000 grammi di acqua il che equivale a dire che in media la salinità è dell’ordine del 35 ‰ (EC circa 55 dS m^{-1}).

Tuttavia ,come meglio vedremo in seguito, la salinità è soggetta a notevoli variazioni nel tempo e nello spazio. L'acqua di mare deve il suo sapore salato ed amaro ai diversi sali in essa disciolti, dei quali il più abbondante è il cloruro di sodio detto comunemente sale di cucina. Però tale sale non è l’unico ad essere disciolto nell’acqua in quanto l’ambiente marino contiene anche solfati di calcio, magnesio e potassio (Laura Carbognin e Luigi Tosi ,2003). Siccome i sali risultano completamente dissociati in acqua, normalmente si usa esprimere i costituenti dell’acqua marina sotto forma di ioni (atomi dotati di cariche positive o negative). Gli ioni maggiormente presenti nelle acque marine sono il cloruro (Cl^- , 55%), il sodio (Na^+ , 30.6%), il solfato (SO_4^{2-} , 7.7%), il magnesio (Mg^{2+} , 3.7%), il calcio (Ca^{2+} , 1.5%) ed il potassio (K^+ , 1.5%).

L’origine dei sali è attribuita prevalentemente ai composti minerali contenuti nelle rocce che vengono parzialmente disciolti ad opera delle acque continentali che scorrono in superficie. Altre possibili cause sono attribuite all’attività vulcanica dei fondali sottomarini (in particolare lungo i margini attivi delle placche oceaniche) ed alla decomposizione di organismi marini con rilascio in acqua di sali minerali.

In generale il problema dell’intrusione salina è tipico delle falde costiere ove l’acqua del mare si infiltra spiazzando l’acqua dolce degli acquiferi freatici. Questo fenomeno prende il nome di intrusione salina.

Negli acquiferi l’acqua dolce, per la minor densità ed il maggior carico idraulico rispetto all’acqua salata, “galleggia” senza mescolarsi, stabilendo una superficie di separazione che prende il nome di interfaccia. Considerando il fenomeno essenzialmente dal punto di vista statico, la legge che regola l’equilibrio al contatto tra le due acque è quella di Ghyben-Herzberg (Laura Carbognin e Luigi Tosi ,2003):

$$H_i p_m = H_p p_d + H_i p_d$$

dove **H_i** è la profondità dell’interfaccia dal livello medio del mare, H_p è l’altezza del livello di falda sul livello del mare, p_m è la densità dell’acqua di mare (mediamente di 1027 kg/m³, con circa 42 g/l di contenuto salino (Laura Carbognin e Luigi Tosi ,2003) e p_d è la densità dell’acqua dolce di falda (circa 1000 kg/m³).

Da essa si deduce che la profondità dell’interfaccia (H_i) dipende dall’altezza della superficie di falda sul livello medio del mare e dalle densità relative dei due liquidi.

Considerando i valori di densità sopracitati, si ottiene che H_m sia pari a 37 H_p; questo significa che, per un’elevazione della falda freatica di 1 m sul livello medio del mare, si ottiene un approfondimento dell’interfaccia di circa 37 m. Questo viene mostrato nella figura sottostante (Fig. 1.1).

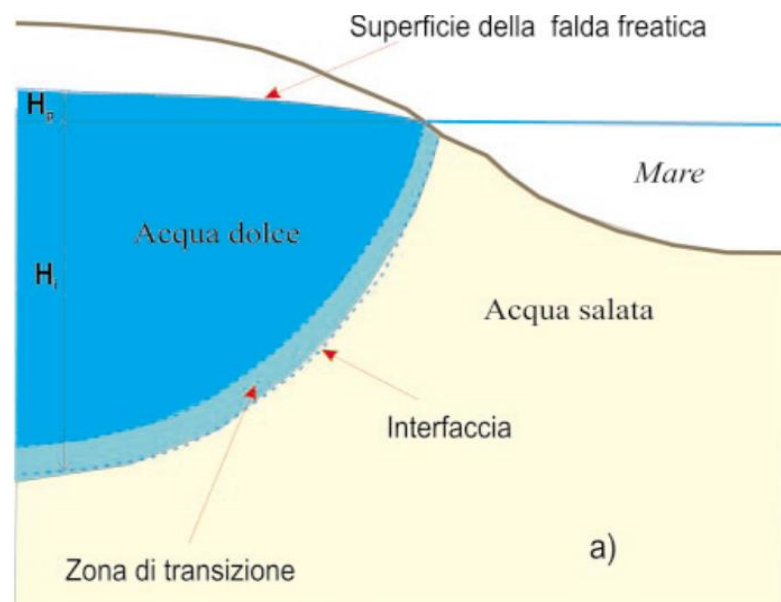


Figura 1.1 : profondità dell' interfaccia tra acqua salata e acqua dolce in accordo con la legge di Ghyben-Herzberg

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

In realtà, l’interfaccia si trova a profondità maggiori per effetto del deflusso della falda. Infatti le frequenti eterogeneità degli acquiferi comportano l’esistenza di diverse velocità di deflusso all’interno della stessa falda, che provocano numerose irregolarità sull’andamento dell’interfaccia stessa. Inoltre il limite acqua dolce - acqua salata non è netto, ma avviene in maniera graduale attraverso una zona di diffusione o di transizione, a salinità decrescente dal basso verso l’alto come è dimostrato nella figura sotto riportata. (Fig. 1.2).

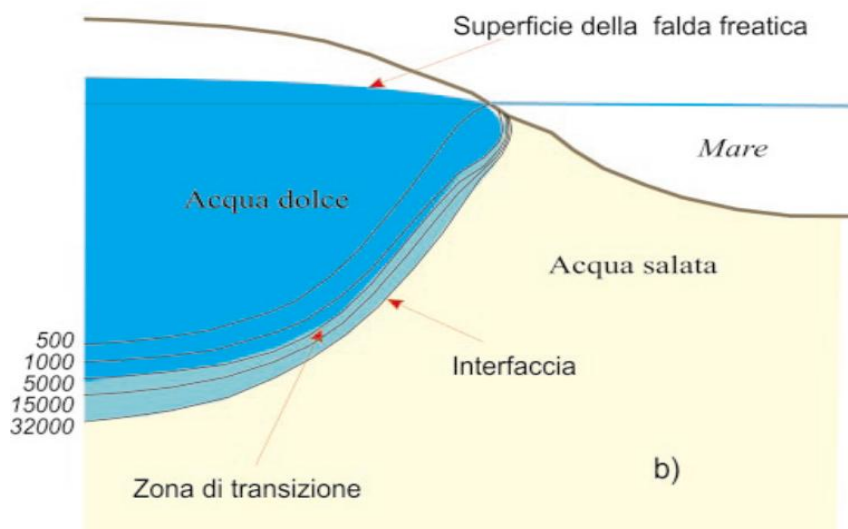


Figura 1.2: Schema teorico dei rapporti tra acqua dolce e acqua salata negli acquiferi costieri e variazione del tenore salino ($\mu\text{S}/\text{cm}$) nella zona di transizione

Questa superficie presenta una inclinazione che varia a seconda delle condizioni idrogeologiche e fa assumere alla falda salata la geometria di un cuneo, definito appunto “cuneo salino”.

Quando la superficie della falda si abbassa, o per mezzo di pompaggi o per altre cause, avviene l’ingresso di acqua marina che, entrando nell’acquifero per via sottomarina, si sostituisce all’acqua dolce. Quest’ ultima comunque copre ancora quella salata, e quindi continua ad esistere tra di esse una interfaccia che può variare da 50 cm a oltre 100 m di spessore e la cui forma è regolata dalle relazioni idrodinamiche tra flusso dolce e flusso salato (Laura Carbognin e Luigi Tosi ,2003).

Il processo dell’intrusione salina è spesso concomitante all’emungimento di acqua da una falda costiera che, modificando l’equilibrio esistente, “richiama” l’acqua salata in direzione

del prelievo. Oltre all’emungimento a intermittenza dell’acquifero, anche il pompaggio continuo o l’ubicazione sbagliata di pozzi di estrazione possono risultare fattori innescanti l’intrusione di acqua salata. Infatti, poiché l’interfaccia acqua dolce - acqua salata è il risultato di un equilibrio dinamico, quando il naturale deflusso di acqua dolce verso il mare viene ridimensionato o interrotto si verifica l’intrusione salina.

E’ evidente che l’emungimento in continuo è il peggior sistema di sfruttamento dell’acquifero, in quanto l’acqua salina, essendo più densa dell’acqua dolce, può tornare a livelli più bassi dell’acquifero solo in caso di cessazione dei pompaggi.

L’intrusione salina è un problema grave non solo per l’inquinamento delle acque sotterranee ma anche perché può innescare, con la salinizzazione dei sedimenti, un collasso delle argille superficiali per la variazione del chimismo delle loro acque interstiziali e quindi una ulteriore subsidenza ovvero il lento abbassamento della superficie terrestre (Teatini et al, 2007).

1.1.4 Effetti salinità sulla struttura del suolo

La struttura del suolo riflette come le particelle inorganiche e organiche sono combinate tra loro in aggregati. Essa ha un ruolo fondamentale, in quanto ne influenza la porosità, l’idrologia, la lavorabilità, la resistenza all’erosione e la disponibilità di nutrienti (Sequi, 1989; Piccolo e Mbagwu, 1999). Si riconoscono differenti classi di struttura dei suoli. La struttura granulare è molto comune negli strati superficiali che normalmente mostrano un alto contenuto di sostanza organica e un’attività biologica intensa. Strutture a blocchi sono comuni nei sottosuoli ma si trova anche in suoli superficiali di prateria che hanno un alto contenuto in argilla. Una buona struttura del suolo può essere espressa dalla stabilità degli aggregati in acqua che è influenzata principalmente dalla qualità e quantità di sostanza organica (soil organic carbon, SOC), dal tipo di argilla e dalla popolazione microbica. Nello specifico la salinità può generare flocculazione poiché essa porta le particelle fini a legarsi insieme formando aggregati. Elevate concentrazioni di sali nella soluzione circolante del suolo promuovono aggregazioni delle particelle argillose e danno luogo a suoli maggiormente permeabili. Di conseguenza, i suoli sono meno portati a divenire o rimanere intrisi d’acqua dopo delle piogge rispetto a suoli non flocculati. Questa spinta all’aggregazione pur essendo benefica nei confronti dell’aerazione del suolo,

penetrazione e crescita delle radici, porta spesso alla formazione di crepe anche molto profonde nel terreno che favoriscono un rapido ruscellamento delle precipitazioni (o acqua irrigua) verso la falda, lasciando di fatto immutato il contenuto idrico del suolo superficiale (Warrence, 2002). La flocculazione è rafforzata generalmente quando la salinità della soluzione del suolo è approssimativamente superiore a 1.5 dS m^{-1} o la salinità dell’acqua di irrigazione è maggiore di 0.5 dS m^{-1} (Walinga et al., 1995; Warren et al. 2002).

Un secondo processo piuttosto reversibile associato alla saturazione di sodio è il rigonfiamento degli aggregati e degli strati il quale porta a un disgregamento della struttura del suolo riducendo la permeabilità, soprattutto dei suoli in cui predomina la montmorillonite, e generando crosta superficiale nei suoli limosi (Warrence, 2002).

Una bassa permeabilità diminuisce la mobilità dell’aria (ossigeno e anidride carbonica) e dell’acqua attraverso il profilo pedologico. Infatti si crea uno strato denso, chiamato crosta argillosa, la quale si forma alla superficie oppure nelle sue vicinanze, e questo rappresenta una barriera per lo sviluppo delle radici.

Poiché i movimenti dell’acqua, dei nutrienti e dei gas sono troppo lenti attraverso la crosta argillosa (Seeling, 2000) l’infiltrazione e la conduttività idraulica del suolo risultano ridotte. Quindi tali fenomeni risultano compromessi quando nel suolo vi siano grandi concentrazioni di sodio, determinando la formazione di ristagno idrico il quale spesso comporta delle condizioni anaerobiche.

Tali condizioni riducono o impediscono la crescita delle piante diminuendo la percentuale di decomposizione della materia organica ad opera dei microrganismi aerobi e, tale diminuzione della decomposizione, favorisce la formazione di suoli ricchi in materia organica, di colore nero o marrone scuro, i così detti terreni torbosi.

Al crescere della salinità del suolo aumenta anche il potenziale osmotico della soluzione circolante e quindi, a seguito della salinizzazione, le piante devono spendere più energia per assorbire l’acqua dal suolo compromettendo seriamente la loro crescita e il loro sviluppo delle piante.

1.2 Piante e stress

L’effetto più evidente dell’eccesso di salinità è la riduzione dei processi di crescita delle piante. Un aumento dei sali nella soluzione circolante comporta un abbassamento del suo potenziale osmotico, il che si traduce in una maggiore difficoltà delle piante ad assorbire acqua (effetto osmotico), con conseguente riduzione del turgore cellulare, e rallentamento dei processi di crescita; inoltre, se una eccessiva quantità di sali entra nella pianta, ci saranno danni alle cellule (effetto fitotossico). Lo stress idrico e salino agirebbero pertanto in modo simile nel limitare la traspirazione e la crescita vegetale (Munns,2002a).

L’effetto dei sali sulle piante è un risultato combinato fra diversi processi di adattamento morfologico, fisiologico e biochimico allo stress. La più comune risposta della pianta allo stress salino è una diminuzione generale di crescita e produzione. Infatti elevati livelli di sali nell’umidità del suolo (conducibilità elettrica della soluzione circolante $-EC_p- >4 \text{ dS m}^{-1}$) inibiscono la germinazione e la crescita della maggior parte delle colture commerciali riducendo significativamente la produzione di biomassa, la resa economica e la totale sopravvivenza della pianta. Nei suoli salini, la riduzione della crescita e della produzione sono i risultati della combinazione dei problemi nutrizionali (sbilancio ionico o deficienza di nutrienti) e delle compromesse proprietà fisiche del suolo (diminuita permeabilità all’acqua e all’aria). Alcuni autori riportano che la diminuzione della crescita in condizioni di salinità dipende da *i)* gli effetti del sale all’esterno delle radici, e *ii)* gli effetti del sale all’interno della pianta.

Il primo effetto della salinizzazione avviene all’esterno delle radici (potenziale osmotico) il quale consiste nella riduzione del potenziale dell’acqua nella soluzione del suolo limitando così l’assorbimento radicale e causando, in stato di avanzata salinizzazione, lo stress osmotico e la disidratazione della coltura. Le piante, quindi sono incapaci di rimpiazzare l’acqua persa attraverso la traspirazione e quindi avvizziscono, come avviene in caso di stress idrico.

L’associata diminuzione del potenziale di turgore riduce la conduttanza stomatica, che determina una ridotta traspirazione e un aumento della temperatura delle foglie.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

Infatti la chiusura degli stomi, indotta dallo stress salino e poi idrico come risposta di difesa della pianta, riduce l’entrata di CO_2 nelle foglie limitando conseguentemente l’attività fotosintetica.

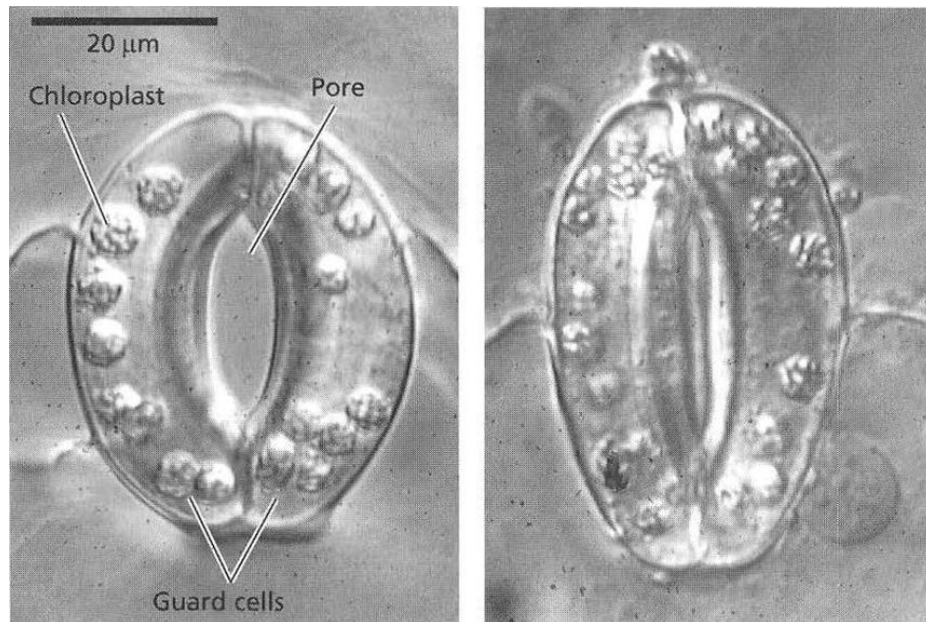


Figura 1.3: Apertura e chiusura di uno stoma in seguito a variazioni del turgore (Beeg and Turner, 1976).

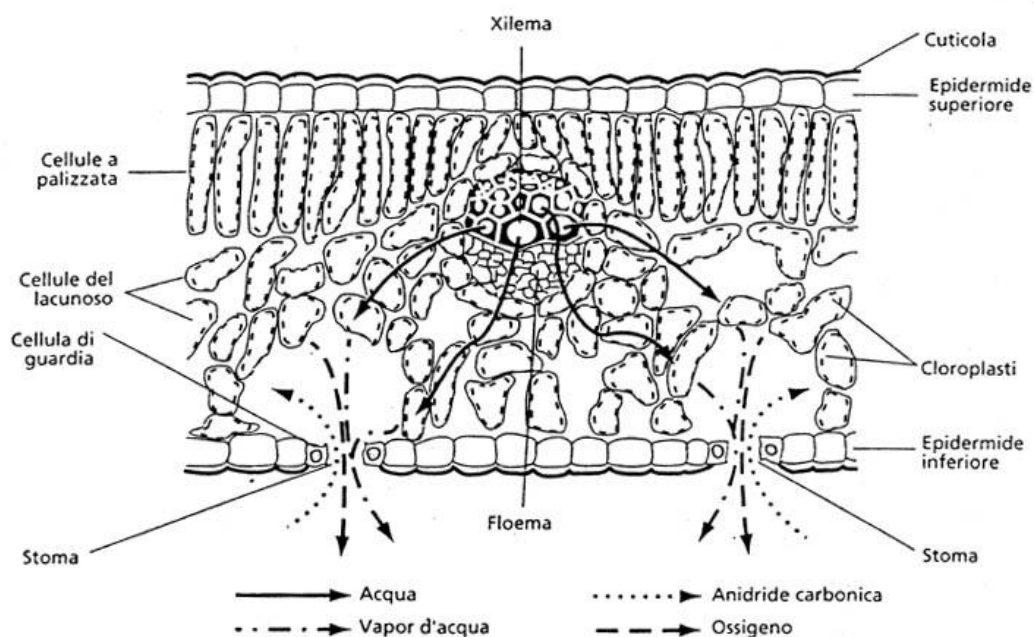


Figura 1.4 Funzionalità dello stoma (preso da google images Giancarlo Dessi; 2006 (UTC))

L'eccesso di sali fuori e dentro la pianta può causare specifiche carenze nutrizionali e accumulo di ioni tossici. La tossicità può derivare dall'incapacità delle piante di escludere gli ioni dannosi al di fuori delle radici e/o compartimentalizzarli all'interno dei vacuoli delle foglie vecchie accelerandone la senescenza (Munns (1999).

Infatti, in condizioni di normalità, le piante accumulano i sali nei tessuti più vecchi per evitare la morte delle foglie attive sia nella traspirazione sia nel processo fotosintetico. Se questo non accadesse, il continuo trasporto di ioni nelle foglie traspiranti a lungo andare comporterebbe una concentrazione elevata sia di Na^+ sia di Cl^- e quindi alla loro morte. Il ritmo di senescenza delle foglie è fondamentale per la sopravvivenza della pianta ovvero se le nuove foglie sono continuamente prodotte ad una velocità superiore a quelle che senescono, la pianta riesce a mantenere la sua efficienza fotosintetica costante al fine di produrre fiori e semi; in caso contrario, essa non potrà raggiungere la piena produzione.

La riduzione dell'attività fotosintetica in seguito a stress salino e stress idrico è inizialmente dovuta ai meccanismi della chiusura stomatica, che, come detto prima, è messa in atto dalla pianta per ridurre e prevenire la perdita di acqua per traspirazione. Però questo porta, come conseguenza, alla riduzione della disponibilità di CO_2 a livello dei cloroplasti (Rawson, 1986; Sharma e Hall, 1991; Belkhodja et al., 1999).

Nel caso in cui l'esposizione allo stress salino progredisce nel tempo, la scarsità di acqua disponibile per la pianta aumenta determinando la riduzione repentina dell'attività fotosintetica mediante, non solo alla sola chiusura stomatica, ma anche ad una riduzione dell'efficienza del fotosistema II (PSII) (Rawson, 1986; Sharma e Hall, 1991; Belkhodja et al., 1999. E' stato ulteriormente osservato che nelle piante stressate, rispetto a quelle sane, la fotosintesi si satura a livelli più bassi di densità di flusso dei fotoni utili per la fotosintesi stessa (PPFD- photosynthetic photon flux density) (Lawlor, 1995). Inoltre, quando si verificano elevati livelli di PPFD, in concomitanza con fenomeni di stress, le piante possono trovarsi esposte ad eccessi di energia di eccitazione con conseguenti rischi di danni al sistema fotosintetico (Powles, 1984).

La salinità della soluzione circolante può inoltre causare una serie di disordini fisiologici, assimilabili spesso alle fisiopatie da stress idrico, a livello delle parti eduli di numerosi ortaggi causando un peggioramento qualitativo il quale può compromettere la commerciabilità. (Sifola et al., 1995; DePascale e Barbieri, 2000; De Pascale et al., 2003(c)).

A fini di ottenere una maggior comprensione sui effetti che la salinità induce alla pianta risulta opportuno riassumerli e confrontarli con le alterazioni provocati dalla semplice carenza idrica anche se molte volte entrambi possono determinare delle sintomatologie simili.

Lo *stress idrico* generalmente e provoca:

- Chiusura stomatica (Schulze e Hall, 1982)
- Riduzione del potenziale di turgore della pianta dovuto dall’ incidenza dello stress idrico sull’ espansione e sullo sviluppo delle cellule (Karthikeyan et al., 2007; Jaleel et al., 2007)
- Riduzione dell’ efficienza fotosintetica in quanto si interrompe mediante la chiusura stomatica lo scambio gassoso tra foglia e ambiente esterno. Questo è associato al fatto che la pianta mette in atto la chiusura stomatica al fine di limitare il più possibile la traspirazione (Morales et al., 2008)
- Decremento del ritmo dello sviluppo vegetale con il mancato raggiungimento di un LAI elevato (Shao et al., 2008)

Lo *stress salino* invece induce

- Carenze nutritive alla pianta; dovuto principalmente al grado di competizione che si instaura tra Na^+ e K^+ oppure tra Na^+ e Ca^{++} (B.A.P., 2004);
- Danni alle cellule con conseguente incapacità della pianta di escludere gli ioni tossici al di fuori delle radici (B.A.P., 2004)
- Riduzione della crescita vegetale e della produzione finale (semi e biomassa) (Maas, 1996)
- Inibizione della germinazione dei semi (Maas e Grattan, 1999)
- Abbassamento del potenziale osmotico della pianta (simile a quanto accade con lo stress idrico) (Seeling, 2000; Muuns, 2002; De Pascale et al., 2003 (a), 2003 (b))
- Alterazione della fotosintesi clorofilliana dovuto ad un eccesso nel centro di reazione della clorofilla di energia di eccitazione la quale porta ad una fotoinibizione del processo fotosintetico (Rawson, 1986; Sharma e Hall, 1991; Belkhodja et al., 1999)

- Induzione alla cellula vegetale fenomeni di stress ossidativi mediante l’ inibizione dell’ attività perossidasi la quale comporta un accumulo eccessivo di perossido di idrogeno intracellulare (Mishra et al., 1993; Gueta-Dahan et al., 1997; Gómez et al., 1999)
- Accelera la senescenza vegetale al fine di preservare l’ integrità e la funzionalità delle foglie più giovane (Mugnai, 2004)
- Comparsa di necrosi fogliari sul bordo della foglia dovuto ad un eccessiva concentrazione di Na⁺.Elevate concentrazioni di Cl⁻ invece determinano la comparsa di aree necrotiche che, partendo dall’ apice della foglia, si espandono verso il picciolo o il ramo sul quale è inserita la foglia (Fagnano e Quaglietta Chiarandà, 2003)

1.2.1 Comportamento fisiologico nel tempo

In laboratorio, quando le piante sono esposte alla salinità, si assiste a un calo rapido e temporaneo del loro tasso di crescita seguita da una graduale ripresa del loro accrescimento.

Gli effetti temporanei sono chiaramente dovuti ai cambiamenti rapidi e spesso transitori nelle relazioni tra acqua e pianta.

Le modifiche del tasso di crescita e gli eventi molecolari metabolici non sono così facilmente attribuiti a uno stress idrico ottenuto all’ effetto della salinità nel suolo.

Come avvengono tali cambiamenti fisiologici nel tempo?

Minuti

Come è stato accennato prima, dopo qualche minuto di esposizione della pianta allo stress salino, si assistono, a livello fogliare, a dei cambiamenti rapidi e transitori del tasso di crescita della pianta, dovuto ad una variazione della concentrazione di salinità presente nel substrato di coltivazione.

Dopo alcuni minuti dalla riduzione si può osservare successivamente a una leggera ripresa della crescita della pianta fino a raggiungere un nuovo tasso che, a parità di tutti i fattori esterni, arriva e permane ad un livello costante. Il tempo necessario per raggiungere tale

tasso di accrescimento costante dipende soprattutto dalla concentrazione del sale e dalla disponibilità di acqua presente nel suolo.

Tutto questo è stato confermato da Passioura e Munns (2000) mediante la tecnica di pressurizzazione la quale prevede il mantenimento delle piante alla capacità idrica massima coltivandole però un suolo altamente salino.

Anche a livello dell'apparato radicale esistono delle rapide riduzioni di accrescimento dopo un improvviso aumento della concentrazione di composti salini (NaCl, KCl o mannitolo). Però a differenza delle foglie, le radici hanno un tempo di recupero della crescita molto più rapida; infatti Frensch e Hsiao 1994 hanno stimato tale periodo di recupero in mais è pari a 1 ora.

Nel 1986 Cramer & Lauchli studiarono l'effetto che si scarica sulla pianta quando questa vive in condizioni di stress salino. Tale effetto si tratta della carenza di calcio indotta dalla salinità del suolo. Tale fenomeno risulta particolarmente preoccupante soprattutto per quei genotipi che hanno difficoltà nel assorbire il Ca^{2+} dal suolo.

Per esempio in mais l'accrescimento della radice non viene compromesso quando il calcio viene rifornito mediante le concimazioni, seppur vivendo in concentrazioni di salinità elevate; mentre quando il terreno risulta carente del nutriente allora si può riscontrare la sintomatologia dovuta dalla carenza di calcio.

Giorni

L'accrescimento fogliare è spesso molto ridotto rispetto alla crescita radicale soprattutto se la pianta viene coltivata su terreni secchi.

Questo fenomeno può derivare da diversi fattori, i quali sono associati principalmente allo stress idrico e/o alla concentrazione di sale nel suolo.

Alcuni ricercatori hanno potuto constatare che in genere Na^+ e Cl^- si trovano ad una concentrazione che, pur essendo bassa, risulta molto tossica per la crescita della cellula; tanto vero che ad esempio il grano, esposto a una concentrazione di 120 mM di NaCl, ha un tasso di accrescimento del 25% in meno rispetto a quando viene coltivato in assenza di salinità Hu & Schmidhalter (1998). In genere lo stato idrico della pianta, i segnali ormonali, e la capacità fotosintetica rappresentano i fattori che controllano la crescita della pianta quando essa viene coltivata su un terreno asciutto e salino.

Infatti tali ricercatori (Munns et al. 2000) hanno potuto osservare che una pianta, a seconda del suo grado di tolleranza alla salinità, può manifestare palesemente gli effetti anche dopo un certo periodo di tempo; per esempio se la concentrazione salina nel suolo fosse molto elevata, e la pianta non avessero dei meccanismi fisiologici che le consentono di tollerare tale fattore, la sintomatologia (lesioni) si scaricherebbe anche nel giro di un giorno interessando soprattutto le foglie vecchie le quali verrebbero portati via via alla morte.

Dal punto di vista fisiologico i danni da sale sono dovuti dall’accumulo eccessivo di ioni Na^+ e Cl^- a livello delle foglie traspiranti in quanto tali ioni, presenti in elevata quantità, non vengono compartimentati totalmente all’interno del vacuolo e quindi l’esubero viene depositato a livello della citoplasma.

In conseguenza a questo continuo accumulo di queste specie chimiche nella citoplasma, il protoplasto della cellula stessa comincia a ritirarsi, diminuendo sempre più il suo diametro mediante la perdita esuberante di acqua. Quindi questo fatto porta ad un aumento di concentrazione dei soluti all’interno del citoplasma i quali portano inevitabilmente all’inibizione dell’attività enzimatica e alla disidratazione completa della cellula.

Un fattore che influenza positivamente la concentrazione di ioni salini nel citoplasma o nel vacuolo è rappresentato dalla velocità con cui avviene tale accumulo. Infatti la velocità di deposito di Na^+ e Cl^- nel citoplasma è molto più elevate rispetto a quella del vacuolo in quanto il volume di quest’ultimo comparto è molto più elevato. Questo purtroppo comporta un accumulo eccessivo di ioni salini nel citoplasma causando gli effetti visti prima.

Settimane

Molte volte gli effetti della salinità possono essere evidenti anche nel giro di qualche settimana, soprattutto se le piante possiedono una certa tolleranza alla sostanza. Questo comunque dipende dal tasso di assorbimento della pianta stessa e quindi dalla sua

possibilità di riuscire ad accumulare il sale nel vacuolo oppure dalla capacità propria di escludere tali ioni all’esterno della radice. Normalmente il danno provocato da un eccesso

di salinità può essere palese come un ingiallimento fogliare o, in casi estremi, la morte progressiva delle foglie più vecchie. Infatti la sopravvivenza di una pianta sensibile alla

salinità, come è stato descritto nel paragrafo precedente, dipende dalla velocità e dall'intensità con cui le foglie vecchie morte vengono rimpiazzate con quelle giovani; ovvero se la perdita delle foglie vecchie è inferiore rispetto alla sua fillocronia (il tempo che intercorre tra la formazione di una foglia e quella successiva), la pianta riesce a compensare il danno subito; in caso contrario l'intera pianta comincia a sopperire non riuscendo ad affrontare l'ontogenesi e non producendo quella quantità di assimilati organici indispensabili per affrontare la restante fenologia.

Mesi

Durante il trascorrere del mese di sperimentazione i diversi ricercatori e botanici hanno osservato una progressiva riduzione della vitalità della pianta quando essa viene continuamente sottoposta alla salinità. Nel complesso la sopravvivenza dell'intero organismo vegetale dipende:

- dalla sua abilità nell'evitare che il sale raggiunga delle concentrazioni tossiche a livello delle foglie giovani;
- dalla sua capacità di esclusione del sale;
- abilità di compartimentare il sale a livello del vacuolo;
- dalla fillocronia della pianta;
- Dal potenziale idrico del suolo.

In molte specie la presenza di un'elevata salinità influisce anche la formazione e la vitalità dei organi riproduttivi.

Per esempio la maggior concentrazione di ioni Na^+ e Cl^- riduce il numero di fiori, alterando nel tempo la loro maturità e tutta la fisiologia riproduttiva della specie, portando alla fine ad una minor fecondità e produzione dei semi (e.g. Munns & Rawson 1999).

Comunque è stato accertato (Munns & Rawson 1999) che tale effetto negativo non risulta solo dovuto dall'esposizione della pianta alla salinità, tanto è vero che a livello dei primordi fiorali la concentrazione dei ioni Na^+ e Cl^- non è sufficiente per compromettere il loro metabolismo. Per esempio le sperimentazioni fatte su orzo hanno dimostrato che,

dalla fenofase di orecchiette di topo a quella dell’emissione della spiga, il Na^+ aumenta fino ad arrivare a 50mM; mentre Cl^- rimane a livelli di 10-15 mM. Quindi a livello dei organi riproduttivi i fattori che determinano la riduzione della loro funzionalità sono da attribuire non solo allo stress salino, ma anche allo stress idrico.

1.2.2 Meccanismi di tolleranza alla salinità

Generalmente le piante possiedono due tipologie di meccanismi di tolleranza alla salinità. Queste sono *i)* minimizzazione dell’assorbimento del sale presente nel suolo e *ii)* minimizzazione della concentrazione degli ioni salini all’interno del citoplasma.

Le alofite, piante che si adattano a vivere su suoli tendenzialmente salini (fasce costiere), possiedono entrambi i meccanismi di tolleranza (Greenway & Osmond 1972). Quindi esse, concentrando gli ioni Na^+ e Cl^- nei loro vacuoli, possono vivere, entro certi limiti, anche in presenza di alti livelli di salinità nel suolo. Invece le piante, che vivono prevalentemente su suoli non salini (glicofite), hanno sia una scarsa capacità di escludere l’eccessiva salinità mediante le radici, sia una scarsa abilità di compartimentare gli ioni nei vacuoli cellulari.

Esclusione del sale

Il processo chiamato “Salt exclusion” rappresenta l’abilità di una pianta di ridurre la velocità di assorbimento del sale dal suolo, evitando di concentrarlo a livelli tossici nelle foglie traspiranti. In presenza di sale, le piante traspirano circa il 30-70% in più di acqua rispetto alla normalità e questi valori dipendono essenzialmente dalle condizioni ambientali Greenway& Munns (1980), Läuchli 1984), Storey & Walker (1999).

Nel caso delle alofite, non si assiste a questo aumento della traspirazione perché esse sono in grado di attivare i meccanismi di difesa visti prima. Non è facile riconoscere il grado di resistenza di una pianta allo stress in quanto la resistenza dipende da molteplici fattori: individuo, specie, varietà, durata e velocità dello stress. Tuttavia possiamo considerare i seguenti aspetti (Greenway& Munns (1980), Läuchli (1984), Storey & Walker (1999):

- 1) Esclusione dello stress. Necessita di meccanismi capaci di evitare un deficit idrico interno. Il flusso di Na^+ dal mezzo esterno verso le cellule avviene per mezzo di movimento

passivo lungo un gradiente elettrochimico dello ione stesso e quindi lo stress da sale può essere evitato con i seguenti meccanismi:

a) estrusione passiva – la resistenza dipende dalla capacità della pianta di mantenere l'impermeabilità della membrana al sale esterno quando questo si trova ad elevati livelli di concentrazione.

Per esempio nelle glicofite l'esclusione rappresenta la strategia dominante;

b) estrusione attiva, escrezione, secrezione (ghiandole del sale);

c) diluizione – La diluizione del succo cellulare, dovuta all'assorbimento di acqua, può prevenire l'aumento della concentrazione dei sali nei tessuti, mentre la chiusura stomatica, che può avvenire in condizioni di salinità, contribuisce all'effetto diluizione.

2) Tolleranza allo stress – richiede lo sviluppo di specifici adattamenti fisiologici ed è considerato un meccanismo più evoluto del precedente. Le piante riescono a tollerare i danni primari della salinità, attuando delle strategie di difesa:

a) per escrezione dei sali nel vacuolo, analogo a quello della tolleranza allo stress osmotico;

b) tolleranza dell'alterazione del bilancio ionico: richiede che composti e organelli siano capaci di mantenere le normali proprietà della cellula anche in situazione alterata;

c) tolleranza indiretta: si verifica per mezzo di un rapido cambiamento del metabolismo della pianta;

d) tolleranza diretta: coinvolge le proprietà delle membrane, in particolare dei lipidi e proteine.

Compartimentazione intracellulare degli ioni.

Come è stato detto all'inizio, gli ioni Na^+ e Cl^- , una volta raggiunti alla cellula, devono essere compartimentati nel vacuolo al fine di mantenere inalterate le attività enzimatiche che avvengono al suo interno. Infatti se Na^+ e Cl^- venissero sequestrati dal vacuolo, nel citoplasma si accumulerebbero altre sostanze come ad esempio il potassio e acidi organici (prolina, glicina e betaina) i quali controbilanciano, con la loro concentrazione, la pressione esercitata dall'accumulo dei ioni salini presenti nel vacuolo (Hasegawa et al.

2000). Generalmente tale accumulo di soluti organici e K^+ sono presenti a concentrazione elevata quando la pianta vive in ambienti asciutti e salini (Wyn Jones & Storey 1978a).

Regolazione osmotica, costi energetici e crescita

Bisogna ora capire quali sono i costi energetici che vengono sostenuti dalla pianta per regolare l’esclusione e la compartimentazione intracellulare dei sali, nonché il costo energetico per secernere le sostanze organiche in grado di bilanciare il potenziale osmotico intracellulare. In genere il numero di moli di ATP necessario per controllare e utilizzare una mole di NaCl è di 4 nelle cellule radicali, e 7 nelle cellule fogliari (Yeo 1983; Raven 1985).

Questa spesa energetica tende ad aumentare quando la pianta ha la possibilità di liberare i soluti organici nel citoplasma.

La domanda di ATP per la sintesi o l’accumulo di soluti nelle foglie è stata stimata su valori di (Raven 1985):

- 3.5 per il Na
- 34 per il mannitolo
- 41 per la prolina e glicina
- 50 betaina
- 52 per il saccarosio

Shock osmotico e plasmolisi

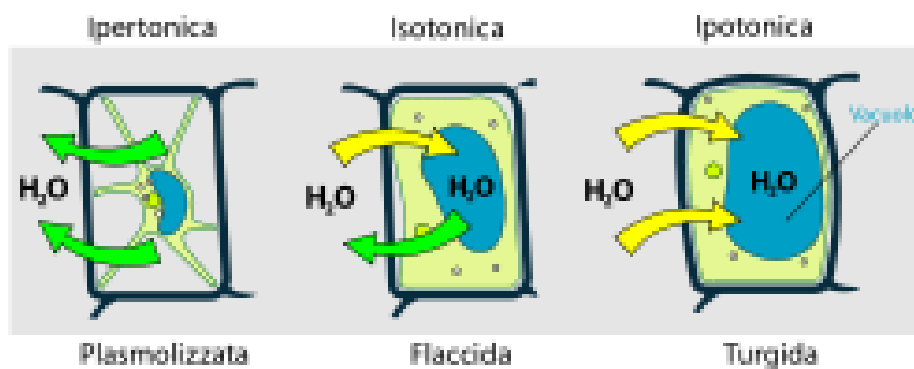


Figura 1.5 Comportamento della cellula vegetale quando entra in contatto con elevate concentrazione di sale

La plasmolisi rappresenta una contrazione del citoplasma e suo conseguente distacco dalla parete cellulare nelle cellule vegetali vive, in seguito a sottrazione di acqua provocata da una soluzione ipertonica (di saccarosio, nitrati ecc.) presente in una cellula o in un tessuto. Si parla di plasmoschisi quando in una cellula vegetale la contrazione riguarda le regioni che circondano i vacuoli e di plasmoptisi quando nella cellula, immersa in soluzioni ipotoniche, si rompe la membrana e si ha fuoriuscita violenta del plasma. La parete cellulare, all’inizio della plasmolisi, si contrae con conseguente perdita del turgore; diventando permeabile all’acqua e ai soluti, mentre la membrana diventa più semipermeabile (De Pascale et al. 1997).

Tale processo è, entro certi limiti, reversibile, e ciò permette alle piante, soprattutto quelle erbacee, di superare periodi di carenza idrica. Lo studio della forma, del tempo e delle modalità con cui avviene la plasmolisi fornisce elementi sullo stato di viscosità del plasma e del suo grado di idratazione, e quindi fa trarre delle deduzioni che interessano svariate funzioni cellulari.

1.3 L’intrusione salina nel margine meridionale della laguna di Venezia

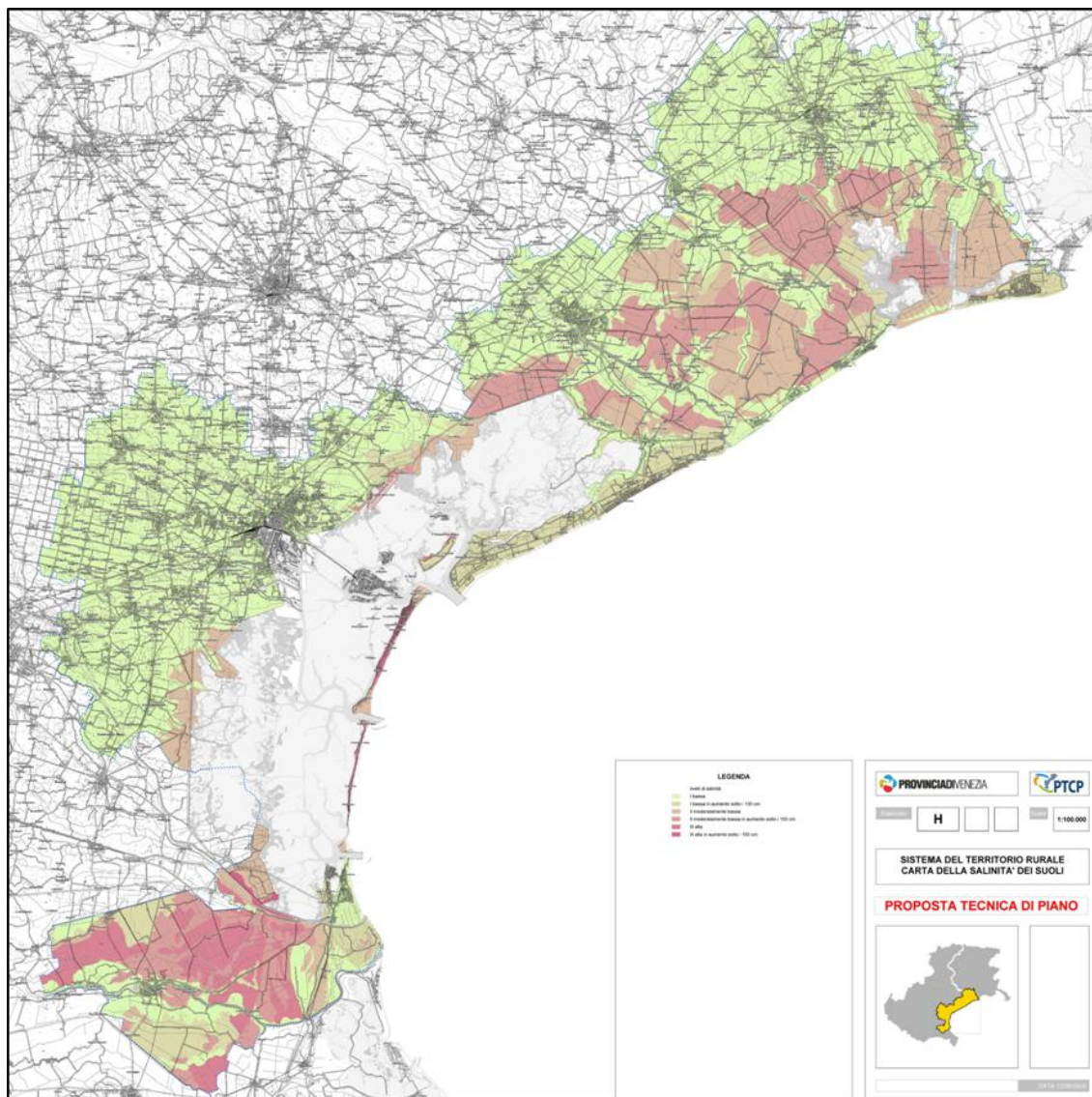


Figura 1.6 :Carta della salinità dei suoli (PTCP della provincia di Venezia)

1.3.1 Inquadramento geografico

I limiti geografici sono ben definibili (Fig. 1.6) in quanto coincidono: a nord e ad est con il margine di contaminazione lagunare e con la linea di costa che separa il lido di Sottomarina ed il litorale compreso tra le foci dei fiumi Brenta ed Adige dal Mare Adriatico, a sud con il tratto terminale dell’Adige, mentre ad ovest l’area termina in corrispondenza di un’ipotetica linea passante per Lova, Corte, Piove di Sacco, Pontelongo,

Cona, Rottanova e Anguillara Veneta. Quasi tutto il settore centro-settentrionale appartiene dunque al territorio della provincia di Padova, mentre quello meridionale, più esteso, ed un limitato lembo posto a nord, nei pressi di Lova, fanno parte della provincia di Venezia (Fig. 1.6).

Attualmente vaste aree giacciono sotto il livello del mare; solo nel settore orientale si riscontrano quote ad esso superiori. Questi territori sono utilizzati per fini prevalentemente agricoli, e nelle aree depresse lo smaltimento delle acque è garantito da una fitta rete di canali di scolo e di bonifica, chiaviche ed impianti idrovori, tra i quali, quelli più conosciuti sono: il Canale Novissimo (che segue il margine lagunare ed entra nelle Valli di Chioggia), il Canale Barbegara (che scorre a sud del Bacchiglione), il Canale Rebosola che in parte coincide con il confine provinciale, il Canale dei Cuori (che giunge da Agna e prosegue in direzione O-E), il Canale Gorzone (che da Rottanova scorre verso Punta Gorzone, dove poi confluisce nel Brenta), il Canale di Valle (che da Cavanella d’Adige si dirige a nord fino a confluire nel Brenta nei pressi di Punta Gorzone) (Fig. 1.6). Il territorio è oggi attraversato da due importanti fiumi, il Brenta ed il Bacchiglione. Il primo scorre in direzione NO-SE fino al margine meridionale della Laguna di Venezia e proseguendo verso est, sfocia nel Mare Adriatico in corrispondenza del Porto di Brondolo; il secondo, più meridionale, è affluente di destra del Brenta, entro il quale confluisce nei pressi di Ca’ Bianca, dopo avere seguito un percorso orientato ONO-ESE.

1.3.2 Inquadramento idrologico

La coltre quaternaria è costituita prevalentemente da sedimenti continentali con intercalati depositi marini, che riflettono il succedersi delle fasi regressive e trasgressive del mare (Laura Carbognin e Luigi Tosi Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse Consiglio Nazionale delle Ricerche Venezia 2003). Questa complessità stratigrafica dà origine ad irregolari variazioni laterali di facies che si riflettono sulla situazione idrogeologica, condizionando quindi l’andamento spaziale degli acquiferi ed i loro reciproci rapporti (Laura Carbognin e Luigi tosi et al; 2003).

Il sistema acquifero presente nel bacino meridionale, che si sviluppa fino a circa 230 m di profondità, è stato tracciato lungo una sezione schematica con orientazione ONO-ESE

(direttrice Codevigo-Chioggia) il quale può essere descritto come segue (Laura Carbognin e Luigi Tosi et al; 2003):

1° acquifero: rappresenta un orizzonte poco potente e non ben delineato, di spessore più o meno costante in tutte le direzioni;

2° acquifero: costituisce probabilmente, più a nord, un’unica falda con il precedente dal quale tende a separarsi nettamente procedendo verso SE. Potente in genere circa 50 m, esso si assottiglia nei pressi dell’Adige fino a 20 m, includendo un orizzonte di argilla di circa 10 m;

3° acquifero: risulta composto da più livelli produttivi che sono stati raggruppati in un’unica unità idrologica per analogia con la situazione veneziana. In prossimità del mare Adriatico e del fiume Adige, esso tende probabilmente a congiungersi con quello sottostante andando a formare una sola falda di notevole spessore;

4° acquifero: è la falda più potente e, benché vi siano presenti varie lenti di argilla, risulta essere la più produttiva e di conseguenza è, ed è stata in già in passato, la più sfruttata del sistema multistrato;

5° acquifero: orizzonte ben delineato solamente nella parte centro-settentrionale dell’area dove presenta uno spessore costante di circa 20 m.

Con base a circa 260 m di profondità esisterebbe un sesto acquifero che, a causa della scarsità di dati al suo riguardo, è descritto solo in modo sommario. Le falde su definite risultano separate da diaframmi impermeabili di argilla ed argille-limose, con potenza variabile tra i 10 e 20 m, non sempre ben delineati o continui.

Gli orizzonti sabbiosi non sono quasi mai dei termini puri e quindi presentano una varia composizione granulometrica che ne condiziona la permeabilità e di conseguenza la produttività. Non sono presenti strati ghiaiosi, neppure in banchi di piccolo spessore, mentre è più diffusa la presenza di torba sia in orizzonti ben definiti che frammista da altri sedimenti. Intorno ai - 350 m si trova una interfaccia di acqua dolce-acqua salata, il cui tenore salino ne pregiudica l’utilizzo in agricoltura.

1.3.3 L’ introduzione salina

In generale il problema dell’intrusione di acqua salata è un fenomeno che avviene spontaneamente nelle falde sotterranee costiere. Nel caso della Laguna di Venezia l'intrusione marina nei terreni superficiali coinvolge tutta l'area di gronda lagunare espandendosi verso l'entroterra da qualche centinaio di metri a qualche chilometro, raramente oltre una decina di chilometri (settori settentrionale e meridionale) (Carbognin e Tosi, 2003).

L'intrusione salina, anche se non è particolarmente estesa in termini spaziali, comporta notevoli problemi ambientali soprattutto quelli in prossimità dei margini lagunari ove è sviluppata una intensa attività agricola e orticola che necessita, a seconda delle coltivazioni, di una determinata qualità dell'acqua di imbibizione dei terreni e di quella di irrigazione.

La salinizzazione delle falde è principalmente dovuta all'intrusione di acqua dal mare e dalla laguna, spesso favorita dall'altimetria del terreno nelle aree di bonifica che è anche di 3-4 metri inferiore al livello medio del mare. Può avvenire anche per dispersione dai fiumi e dai canali in condizioni di magra e/o di marea crescente, o quando l'acqua marina risale e si insinua sotto quella fluviale.

L'intrusione salina coinvolge, anche se con modalità diverse, sia gli orizzonti superficiali sia quelli profondi. Infatti, mentre i primi (fino a profondità di 70-100 m) sono soggetti all'intrusione di acqua marina e lagunare, quelli profondi (sotto i 400 m) risentono del richiamo laterale o della risalita verticale di acque fossili salate.

L'approvvigionamento idrico, per uso irriguo di queste zone, è fornito, nella maggior parte dei casi, dalle acque provenienti dai canali presenti nella zona i quali molto spesso sono sfruttabili solo quando sussistono condizioni di marea calante.

Questo avviene perché, una volta che l’acqua dolce dei canali viene contaminata da quella marina, tale apporto idrico si rivela non sufficientemente idonea all’alimentazione idrica della coltura. Una possibile strategia d’irrigazione potrebbe essere data dall'utilizzo occasionale di acque dolci sotterranee che, se esse vengono regolarmente gestite, non comporti un impatto ambientale negativo evitando così l'intrusione salina per richiamo laterale e verticale di tali acque, aggravando alla fine la già critica situazione altimetrica del territorio.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

Il problema della contaminazione salina del sottosuolo è stato affrontato già da alcuni decenni (Carbognin e Tosi, 2003). Le prime indagini di questo problema risalgono agli anni '70 e furono condotte su incarico del Ministero dei Lavori pubblici con lo scopo di valutare se, dove e come la contaminazione salina fosse presente. Dalle indagini condotte fu evidenziato che l'intrusione salina interessava gran parte della pianura costiera veneziana per una profondità massima di circa 20 metri ed osservabile lungo tutto il margine interno della laguna. Ne venne tracciato uno spaccato geoelettrico rappresentato nella figura sottostante (figura 1.7).

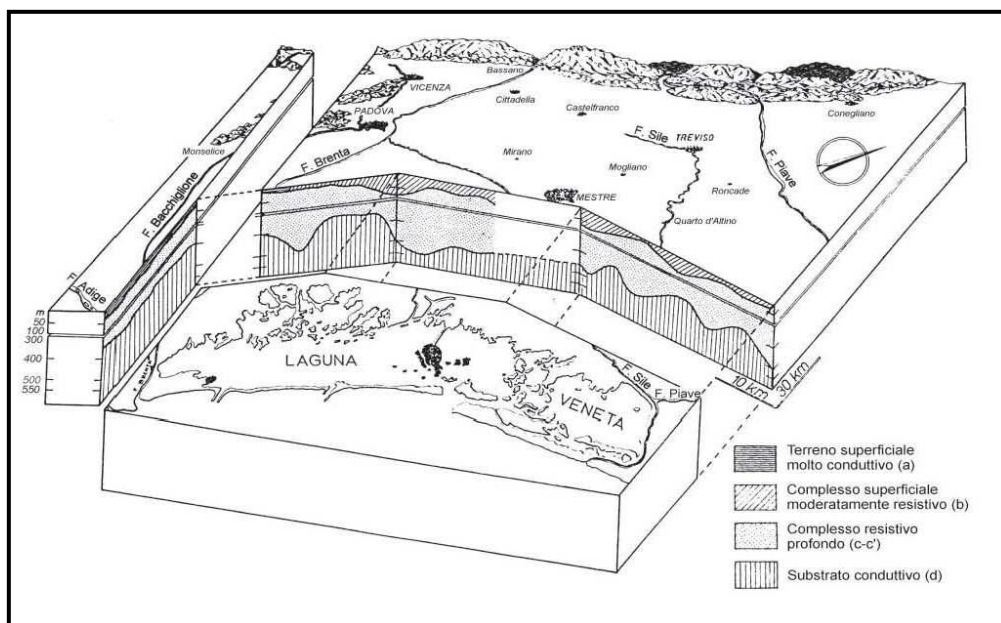


Figura 1.7; Modello elettrostratigrafico dell' intrusione salina per il settore cicumlagunare.

Successivamente (Carbognin e Tosi, 2003), a parte alcuni sporadici rilevamenti, il problema è stato oggetto di maggiore attenzione solo nell'ultimo decennio perché a seguito delle continue evoluzioni degli eventi climatici, che sempre più portano a delle variazioni del livello marino e dei processi di desertificazione, avrebbero potuto portare una minor disponibilità delle risorse idriche sotterranee nelle zone costiere causato in generale dai processi di contaminazione salina delle falde. Sotto la spinta di queste nuove minacce, il problema venne riconsiderato nell'ambito del Progetto Strategico “Ambiente e

Territorio” del CNR e del successivo Progetto “Cuneo salino nel comune di Chioggia” della Provincia di Venezia .

L’analisi del rischio d’intrusione salina fu analizzato con simulazioni numeriche per diversi scenari di pompaggio e i risultati ottenuti permisero di affermare la trascurabilità del problema negli acquiferi profondi ma non negli acquiferi superficiali, i quali sono fortemente interessati al rischio di salinizzazione. In particolare si è visto che tale fenomeno risulta essere più esteso nel bacino meridionale a causa delle caratteristiche geomorfologiche differenti dell’area. Preso atto della gravità dell’impatto ambientale e socio-economico, nel 2002-2003 è stato finanziato un programma di indagini finalizzato a identificare i punti critici, alla determinazione dell’estensione del fenomeno ed alla zonizzazione della sua criticità in relazione alle attività economiche dell’aera, principalmente di tipo agricolo-orticolo (Carbognin e Tosi, 2003). Per le modalità con cui il processo si applica sarebbe opportuno sostituire il termine di intrusione salina con quello di contaminazione salina poiché non si parla solo di ingresso di acqua marina negli acquiferi costieri ma il processo dipende anche dalla quota critica del territorio (fino a -4 m s.l.m.). Quindi la subsidenza, ovvero il lento e progressivo abbassamento verticale del fondo di un comprensorio e l’innalzamento del livello del mare, sono strettamente collegati alla contaminazione salina. Attualmente sono in corso ricerche per approfondire la dinamica della salinizzazione dei suoli, individuare le relazioni causa effetto, per poi studiare possibile misure di contrasto e di mitigazione del processo di desertificazione della pianura costiera.

1.4 Il progetto strategico

A partire dal gennaio 2010, l’Università di Padova ha cominciato ad interessarsi degli effetti dell’intrusione salina nell’area meridionale della laguna di Venezia, finanziando un importante progetto di ricerca chiamato “EFFETTI SPAZIO TEMPORALI DELL’INTRUSIONE SALINA SULLA QUALITÀ DEL SUOLO E SULLA PRODUTTIVITÀ DI Zea mais L.”. Questo progetto è gestito dai dipartimenti di *“Agronomia Ambientale e Produzioni Vegetali”* e di *“Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate”* in collaborazione con il CNR di Venezia (Istituto di Scienze Marine) ed il dipartimento di Geoscienze.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

Il progetto è patrocinato dall’Università di Padova ed è inserito all’interno di uno studio sulle acque sotterranee che riguarda tutta la regione Veneto, chiamato “Progetto Strategico: **GEO RISKS** ovvero “*Processi Geologici, Morfologici ed Idrogeologici: Monitoraggio, Modellazione ed Impatto nell’Italia Nord-Orientale*”.

L’area meridionale della laguna di Venezia è ben conosciuta come una delle aree con i suoli più salini di tutta Italia. Su questa base, è stata scelta un’area di studio di circa 25 Ha localizzata a Ca’ Bianca, una piccola frazione di Chioggia (VE) presso i possedimenti della Soc. Agricola DELLA ROCCA S.p.A.

L’area è soggetta a una rilevante intrusione salina. Si presume che la salinità dei suoli di quest’area abbia un forte impatto sul mais, che qui è coltivato a granello per nutrire i vitelli da carne di proprietà della Società Agricola DELLA ROCCA.

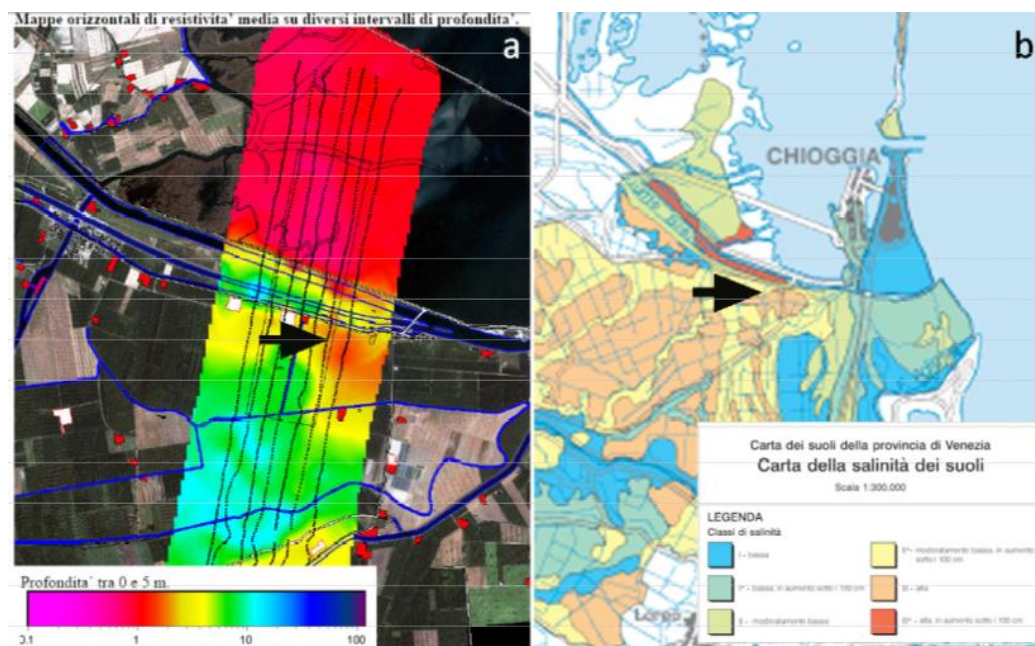


Figura 1.8 - L’area di studio in due differenti mappe: a) Resistività media nell’intervallo di profondità 0-5 m, rilevata grazie allo SkyTEM system (Viezzoli, A. et al., 2010); b) Mappa ARPAV per la salinità dei suoli della provincia di Venezia

Il progetto GEORISK ha i seguenti obiettivi:

- i) stimare l’impatto spaziale dell’intrusione salina sul mais e più in generale sulla qualità dei suoli agrari;

- ii) definire i principali parametri idrogeologici del sito prescelto e caratterizzare l'intrusione salina dalla laguna e dai vari corpi idrici che in essa confluiscono;
- iii) modellare le proprietà e le dinamiche fisiche e chimiche del suolo con analisi in sito e di laboratorio, utilizzando metodi geostatistici;
- iv) prevedere possibili panorami futuri dovuti al cambiamento delle condizioni ambientali di contorno, quali: livello del mare (es. un possibile innalzamento dovuto ai cambiamenti climatici), impoverimento della falda di acqua dolce e subsidenza del suolo;
- v) suggerire e magari testare alcune strategie alternative per un uso sostenibile delle zone costiere venete volte ad attenuare o fermare il processo di impoverimento dei suoli.

1.5 Obiettivi del lavoro di tesi

Questa tesi si pone all'interno del progetto strategico GEO RISK. In questa tesi vengono presentati alcuni dati relativi alla sperimentazione di campo nell'area di studio di Ca' Bianca, Chioggia, relativi all'anno 2011. La sperimentazione in campo e, di conseguenza, questa tesi hanno i principali obiettivi di:

- 1 Determinare se lo stress salino rappresenta il fattore principale che influenza la produzione di *Zea mais*. L;
- 2 Distinguere gli effetti dello stress salino sulla produzione di *Zea mais*. L da altri tipi di stress abiotici e biotici;
- 3 Individuare uno o più indicatori vegetali specifici che siano in grado di rilevare un possibile stato di stress dovuto alla elevata concentrazione di sali nel suolo.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Area di studio

L’area di studio, presa in considerazione in questa tesi, è localizzata a Cà Bianca di Chioggia in provincia di Venezia (**12°13'55.218"E; 45°10'57.862"N**) la quale dista a circa 5 Km a ovest dal mar Adriatico.

Essendo situata tra 2 e i 4 m sotto il livello del mare, l’area di studio risulta fortemente influenzata dalla contaminazione salina, che raggiunge anche i 20 m di profondità, la quale deriva, come detto nella parte generale, dall’intrusione dell’acqua del mare nelle falde sotterranee e dai aerosol di salsedine trasportati dalle correnti d’aria.

Infatti il primo acquifero confinato di acqua dolce, si trova dai 45 ai 50 m di profondità sotto il livello del mare (de Franco et al., 2009).

Prima del 1900 questa zona era totalmente paludosa e quindi l’attività agricola non poteva essere praticata. Successivamente grazie agli interventi di bonifica svolti nel 1900 il territorio di Cà Bianca divenne coltivabile permettendo così anche in quella zona di svolgere l’attività della mais cultura e l’attività agricola generiche.

Grazie a indagini geomorfologiche a scala di bacino, sono stati notati dei depositi sabbiosi affioranti, ovvero i cosiddetti “paleoalvei”, costituiti da sedimentazioni dovuti al trasporto e all’accumulo di materiale fluviale o a carattere deltizio.

Nella figura sottostante viene illustrato il campo sperimentale sul quale sono state fatte le analisi indispensabili per il lavoro di tesi.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

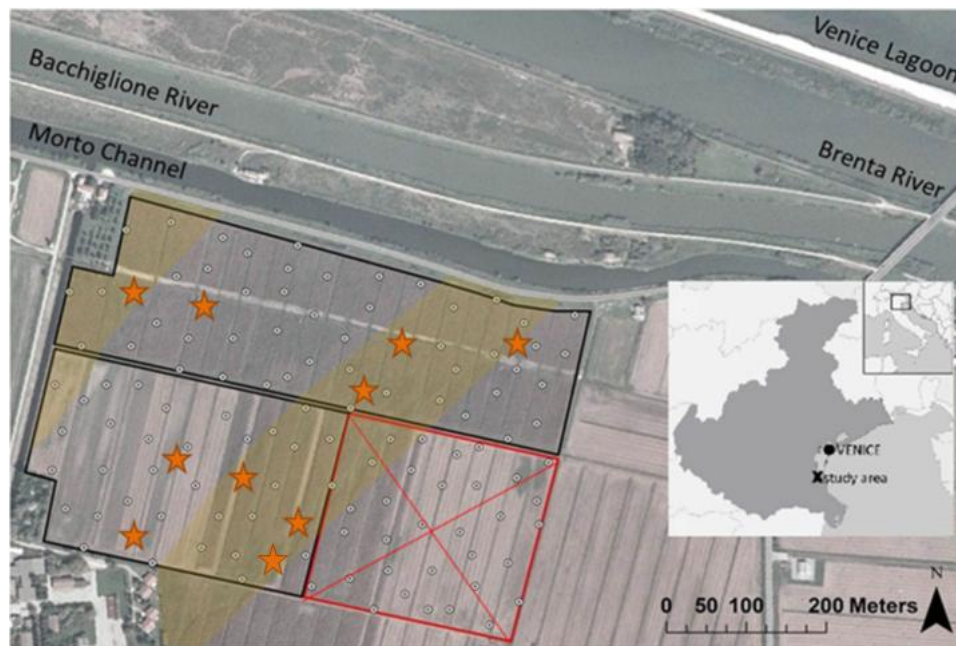


Figura 2.1 - L'area di studio è quella con evidenziati i punti dove è stato campionato il suolo. Per i punti dell'area in basso a destra, contornata in rosso, non sono state eseguite analisi in questo lavoro di tesi. Due paleovalvei superficiali che attraversano l'area di studio sono evidenziati in giallo. Le stelle indicano i punti di campionamento del mais durante la sperimentazione.

Come stabilito dal progetto dell' università degli studi di Padova, durante l' anno 2010 il suolo è stato campionato in 120 punti considerando quattro strati di profondità diversi (**0-15; 15-45; 45-80; 80- 120 cm**). Lo schema di campionamento è stato ottimizzato mediante l'uso dell'algoritmo geostatistico ***“Simulated Spatial Annealing” (SSA)***, utilizzando come informazione ausiliare la conducibilità elettrica apparente del suolo (ECa).

I valori di ECa sono stati rilevati nel mese di aprile 2010 tramite uno strumento a induzione elettromagnetica, chiamato **sonda CMD-1 (GF Instruments, Repubblica Ceca)**, il quale ha rilevato i dati a una profondità del terreno da 0 a 75 cm e da 0 a 150 cm. Successivamente mediante un procedimento articolato in più fasi, il metodo del SSA ha portato alla distribuzione di 40 punti in modo uniforme nell'area, e infine, ha assegnato altri 80 punti nelle zone dove i valori di ECa si diversificavano con maggior rilievo rispetto a luoghi limitrofi.

Questa metodologia, utilizzata per determinare gli schemi di campionamento, è stata adottata per semplificare l'interpolazione spaziale delle variabili di studio, riducendone così la varianza dell'interpolatore (Van Groeningen et al., 1999).

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

L’ analisi del suolo di Cà Bianca ci ha permesso di determinare i seguenti parametri:

- **La tessitura**, ottenuta tramite una procedura chiamata “ *granulometria laser*” (Mastersizer 2000, Malvern Instruments);
- **La salinità presente nel suolo** (conducibilità elettrica estratto suolo-acqua pari a 1:2; Rhoades et al. 1999);
- **il pH** (ottenuto su un estratto suolo-acqua pari a 1:2; Ministero per le Politiche Agricole, 1999);
- il contenuto di **C totale ed organico**, e al **contenuto totale di N e S** tramite analizzatore elementare *CNS* (Vario Macro, Elementar) il cui funzionamento si basa sul metodo Dumas (1831).

Dalle analisi svolte si può notare che i suoli di Cà Bianca, presi in considerazione per questo lavoro, sono caratterizzati da un elevata eterogeneità spaziale, la quale è riscontrata mediante la grande differenza che esiste tra i valori massimi e i valori minimi rilevati di ciascun fattore.

Tabella 2.1 : proprietà chimiche e fisiche del suolo di Ca’ Bianca, a varie profondità

	Sabbia	Limo	Argilla	C totale	N Totale	S Totale	CaCO3	C organico	C:N	EC _{1:2}	pH
	----- % -----										
MEDIA 0-85 cm											
Media	44.35	40.15	15.50	11.18	0.77	0.51	10.34	10.01	17.93	1.28	6.72
Mediana	43.18	41.57	14.90	9.71	0.69	0.46	8.67	8.32	12.73	0.70	7.17
Massimo	92.09	62.51	35.09	30.51	1.74	1.64	32.22	26.99	156.72	8.42	8.50
Minimo	11.89	7.06	0.32	2.20	0.07	0.04	0.24	0.10	0.96	0.18	3.75
0-15 cm											
Media	44.49	39.43	16.08	11.11	0.80	0.44	11.61	9.82	18.20	0.72	7.09
Mediana	46.27	39.75	14.30	10.21	0.74	0.44	10.40	8.66	12.48	0.66	7.39
Massimo	87.02	59.62	32.36	22.39	1.56	0.94	32.22	22.34	125.37	2.18	8.50
Minimo	15.39	12.66	0.32	4.36	0.17	0.08	0.37	1.29	6.64	0.21	4.99
15-45 cm											
Media	37.03	45.67	17.30	10.61	0.76	0.43	10.36	9.36	17.62	0.64	6.65
Mediana	34.74	47.15	16.40	9.28	0.65	0.40	8.67	7.41	12.01	0.52	7.25
Massimo	82.93	62.51	34.26	22.22	1.54	0.90	25.16	22.19	121.40	2.58	8.19
Minimo	11.89	14.54	2.53	4.43	0.17	0.10	0.24	1.41	7.58	0.20	4.19
45-80 cm											
Media	54.24	33.52	12.24	11.81	0.76	0.66	9.16	10.85	17.98	2.50	6.40
Mediana	53.67	34.78	11.22	10.08	0.69	0.56	7.92	9.99	14.38	2.38	6.67
Massimo	92.09	56.62	35.09	30.51	1.74	1.64	29.33	26.99	156.72	8.42	8.32
Minimo	12.95	7.06	0.85	2.20	0.07	0.04	0.33	0.10	0.96	0.18	3.75

Ora, dalla tabella 2.1 sopra esposta, prendiamo in considerazione le principali caratteristiche chimico fisiche dell’ area di studio, facendo poi delle considerazioni al fine di descrivere in maniera puntigliosa l’ ambiente pedologico.

- **Tessitura:** Mediamente la granulometria del terreno è caratterizzata da un valore medio di sabbia limo e argilla tali da definire, in modo generico, il suolo di tipo *grana media* (Agronomia generale, ambientale e aziendale L. Giardini)

Se si osserva la tabella, notiamo che mediamente il valore medio della sabbia si aggira sui 44,35% con la tendenza di diminuire nel secondo strato (37,03%) e aumentare nello strato più profondo (54,24%).

La frazione limosa invece si mantiene su un rang medio attorno a 33,52%÷45,67% (lungo la profondità) con valori massimi che si aggirano da 56,62 % nella zona 45-80 cm; 62,51% nella zona 15-45cm ; e con valori minimi che si aggirano da 7,06% (45-80 cm) a 14,54% (15-45cm).

Si può tranquillamente riscontrare piccole percentuali di argilla che lungo il profilo ha un valore medio del 15,5% e valori massimi (35,09%), nello strato profondo, e valori minimi (0,32%) negli strati superficiali.

- **Conducibilità elettrica (1:2 dS m⁻¹) :** Dalla tabella esposta (tab 2.1) soprastante si può notare che il valore medio della conducibilità elettrica è sui **1,8 dS m⁻¹** con valori di minimo di **0.18 dS m⁻¹** e un valore massimo di **8,42 dS m⁻¹**. Questo significa che il nostro terreno è caratterizzato in media da una moderata salinità, con zone altamente saline , soprattutto nei strati più profondi, giustificando il fatto che le area giace nelle vicinanze del mare e in particolare in una zona lagunare il che presenta il problema della coltivazione delle colture sensibili alla salinità (glicofite). Infatti comparando i valori limiti di classificazione dei suoli in base alla salinità, notiamo che i valori ricavate dall’ analisi sono superiori a quelli della tabella sotto riportata

pH: Dalla tabella riassuntiva (tab 2.1) si può riscontrare che il pH medio del suolo è debolmente neutro (6.72) con valori massimi e valori minimi molto discostanti l’ uno con l’ altro. Questo può darsi che sia dovuto dalla presenza dei carbonati presenti nel suolo o meglio ancora dalla quantità di sostanza organica ivi presente che ,grazie alla loro capacità di tampone, riescono a controllare, chi più e chi meno, il grado di reazione del suolo nelle diverse zone.

- **Carbonio totale:** Come si può vedere nella tabella riassuntiva (tab 2.1) , la quantità di carbonio totale lungo il profilo è abbastanza stabile. Esso si aggira intorno ai 10-11%; con valori di massimi e minimi molto eterogenei (da 2,20% a 30%).
- **Azoto totale:** Riferendoci a questo parametro notiamo che l’ appezzamento, sul quale sono state svolte le analisi, presenta un quantitativo di azoto totale molto basso (0.77 %) con valori minimi e massimi molto distanti l’ uno dall’ altro (0.07%÷ 1.74%).
- **Zolfo totale :** Lo zolfo, che nel terreno lo si può trovare sia in forma minerale sia in forma organica, non è presente in grandi quantità visto che normalmente in un terreno, considerato altamente dotato, deve possedere una quantità di zolfo che arriva ai 1-2%. (agronomia generale ambientale e aziendale L. Giardini).

Come si può notare la quantità di zolfo, presente lungo il profilo, è abbastanza stabile sia in termini di valori medi sia di valori massimi e valori minimi, evidenziando solamente un quantitativo leggermente superiore nei starti più profondi (45-80 cm). Probabilmente questo potrebbe essere dovuto dal fatto che in profondità è presente un’ quantità di sostanza organica o di torba alta (C.orgánico) la quale, trovandosi in ambiente riducente le reazioni ossidative sono totalmente inibite determinando così la produzione di solfuri.

- **Carbonato di calcio:** Dal punto di vista di questo fattore (CaCO_3) il terreno è ben dotato di calcare in quanto la quantità media si aggira attorno ai 10,34%. In questo caso, non si evidenzia elevata eterogeneità dal punto di vista spaziale, visto che lungo il profilo si sono registrati valori massimi e minimi che vanno dai 0,24-0,30%÷ 0,25-0,33%
- **Carbonio organico:** Come è stato precisato all’ inizio del capitolo il suolo fu bonificato nel 1900 in quanto prima era talmente sommerso dalle acque.

Quindi è per questo motivo che i valori di carbonio organico, ottenuti dalle analisi, sono elevati soprattutto nella zona più profonda(45-80cm) riscontrando valori medi di 10,85% e valori minimi e massimi che vanno dai 0,10%÷27%. **C/N** : In linea generale si può notare che il rapporto C/N, mediamente riscontrato, è molto elevato (17.93) e questo viene giustificato appunto dalla grossa dotazione di carbonio organico, vista prima, e dalla scarsità di azoto totale presente.

Dal punto di vista nutrizionale questa situazione non risulta ideale per le piante, in quanto tutti i processi microbiologici, che determinano la trasformazione della sostanza

organica in elementi nutritivi (mineralizzazione), sono praticamente inibiti a causa della carenza di azoto indispensabile per il metabolismo microbico.

Infatti un equilibrato rapporto C/N, che sia indispensabile per tutte le trasformazioni della sostanza organica utili per le piante, si dovrebbe aggirare su valori di 11-12.

I dati della tabella sopra esposta sono stati confrontati con le tabelle di classificazione riportate dal libro Giardini L., 2002. **Agronomia generale**. Patron editore, Bologna

Interventi colturali

L’area sperimentale ha un estensione di circa **25 ha**, ed è stata coltivata con una varietà di mais da granella generalmente resistente a vari stress abiotici (**PR32P26, Pioneer Hi-Bred**).

Il mais è stato seminato il **4 aprile 2011** e mietuto il **2 settembre 2011**. E’ da precisare che nella zona sud est dell’area (in rosso nella fig. 2.1), non è stata eseguita la semina nel 2010 a causa dell’ impossibilità di accesso delle macchine dovuto alle frequenti piogge avvenute in quell’ anno. Di conseguenza, anche nel 2011 l’area non è stata considerata ai fini del progetto strategico **GEORISK**.

In fase di presemina l’area è stata fertilizzata con fertilizzante composto **NPK (46, 48 e 6 %; 1 q ha⁻¹)** e trattata con **1.2 L ha⁻¹ di glifosate**. In fase di semina è stato distribuito **1 q ha⁻¹ di fertilizzante NPK (18, 46 e 36%)**. Durante il ciclo colturale il mais è stato sarchiato e concimato con **4 q ha⁻¹ di urea (al 46%)** e successivamente , è stato applicato del nicosulfuron in concentrazione pari a **1.3 L ha⁻¹** al fine di contenere le infestazioni di malerbe cresciute.

Inoltre per l’anno 2011 sono disponibili i dati meteo forniti dal centro meteorologico di Teolo (PD), riferiti alla stazione di Chioggia, Sant’Anna (circa 2 km dall’area di studio), i quali riguardano: *piovosità, radiazione, umidità relativa dell’aria e vento a 2 m d’altezza*.

Durante la stagione estiva l’attività fisiologica del mais è stata monitorata su scala locale (su 10 punti) e su scala di campo, in tre date, come descritto nel paragrafo seguente.

2.2 L’esperimento in campo ed analisi di laboratorio

Durante il ciclo di sviluppo della coltura, sono state eseguite le seguenti analisi.

Analisi su scala puntuale:

Queste analisi sono state svolte sui 10 punti, ovvero quelli indicati nella figura 2.1 con delle stelle.

In ogni punto sono state campionate 3 piante che rappresentano tutte le altre situate in un area di 2x2 m in tre date. Le date sono:

- **27 giugno 2011**
- **14 luglio 2011**
- **3 agosto 2011**

Su queste piante sono state fatte le seguenti analisi e i seguenti rilievi:

- ***I Rilievi biometrici*** mediante i quali sono state misurate *l’ altezza delle piante, i numero nodi, il numero di fogli;* ed è stato *descritta la fenofase ed eventuali osservazioni riscontrate al momento del rilievo,* come ad esempio attacchi da insetti, presenza di rosure sulle foglie, ect);
- ***Il Potenziale osmotico delle foglie con psicrometro*** (WP4, Decagon Devices, USA);
- ***la Riflettanza delle piante con spettroradiometro da 380 a 780 nm*** (PR-650 SpectraScan, PhotoResearch, USA);
- ***indici vegetazionali:*** Nella fase dell’ elaborazione dei dati sono stati presi in esame alcuni indici di vegetazione che risultano particolarmente correlati (come si vedrà in dettaglio più avanti) con i fattori che descrivono le caratteristiche chimico-fisiche del suolo, le caratteristiche morfologiche o biometriche della pianta e la concentrazione di ioni e cationi accumulati nella parte aerea della coltura.

Tali indici sono:

- **NDVI** (*Normalized Difference Vegetation Index*)
- **SRVI** (*Simple Ratio Vegetation Index*)
- **PRI** (*Physiological Reflectance Index*)
- **CI** (*Clorofil Index*)

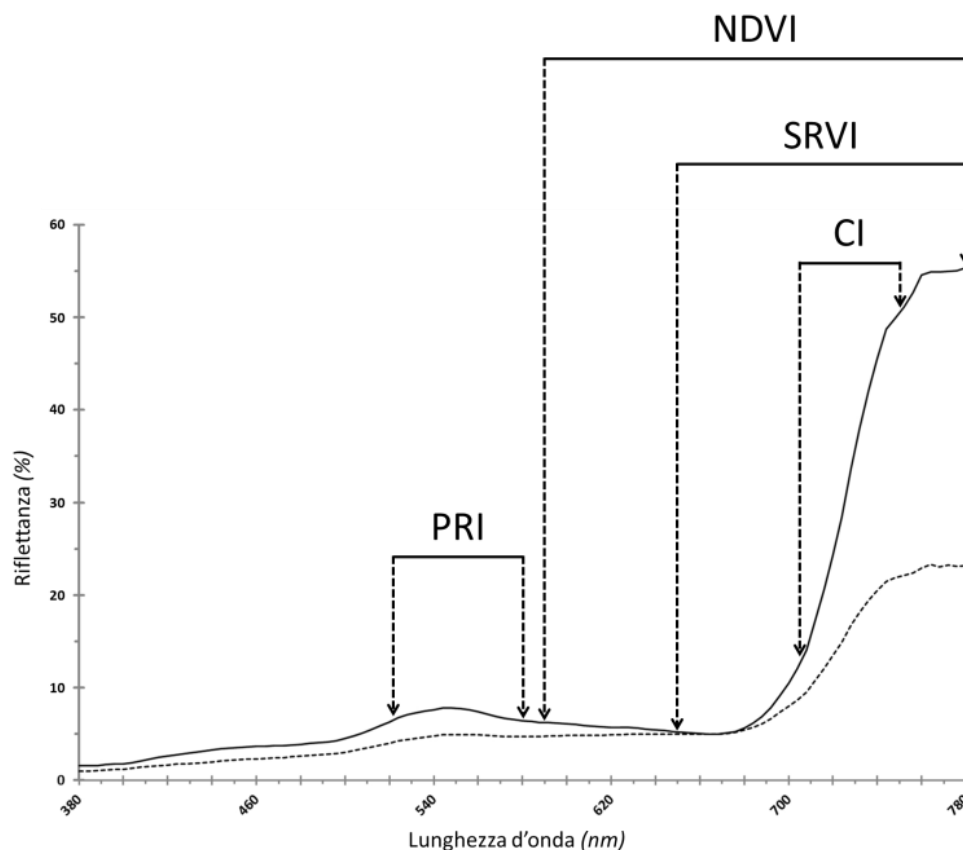


Figura 2. 2. Rappresentazione degli indici vegetativi utilizzati, proiettati su due firme spettrali campione.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) è un Indice di Vegetazione che sfrutta la diversa risposta della copertura vegetale alle bande spettrali del visibile (rosso) e del vicino infrarosso, fornendoci un valore numerico adimensionale compreso tra **-1** e **+1** (Rouse et al., 1974). I valori tipici di NDVI sulle piante sono positivi, più la pianta è vigorosa il valore di NDVI si avvicina ad uno (Ray et al., 1991).

Tale indice è stato calcolato in questa tesi con la seguente formula:

$$\text{NDVI} = (780\text{nm} - 590\text{nm}) / (780\text{nm} + 590\text{nm})$$

SRVI (Simple Ratio Vegetation Index) è un semplice tasso di vegetazione che ha un significato simile al precedente con la differenza che il suo calcolo implica semplicemente il rapporto tra RED con lunghezza d'onda di (780 nm) e NIR (660nm) (Wang, 2000). Su una vegetazione verde ed uniforme, la quantità di radiazione rossa emessa dalle piante è molto piccola. Quindi più vigorosa ed uniforme è la copertura vegetale, più l'indice ha valori alti (Ray et al., 1991). Questo indice è stato calcolato in questa tesi come segue:

$$\text{SRVI} = 780 \text{ nm} / 660 \text{ nm}$$

PRI (Physiological Reflectance Index) è un indice che descrive l’efficienza d’uso dello spettro visibile nel processo fotosintetico da parte della vegetazione. Infatti è stato collegato con il contenuto di carotenoidi legati all’attività del sistema fotosintetico II (Naumann et al., 2008). Generalmente a condizioni ottimali corrispondono valori bassi di PRI. Il PRI è stato calcolato come:

$$\text{PRI} = (531 \text{ nm} - 570 \text{ nm}) / (531 \text{ nm} + 570 \text{ nm})$$

CI (Clorofil Index) viene misurato su un intervallo di lunghezza d’onda della luce da 705 nm a 750 nm. Questo indice è collegato con il picco di emissione delle lunghezze d’onda verdi tipiche degli spettri di emissione delle piante (Naumann et al., 2009). Tipicamente, ad alte quantità di clorofilla presente nelle foglie corrispondono valori alti di CI.

$$\text{CI} = (750 \text{ nm} - 705 \text{ nm}) / (750 \text{ nm} + 705 \text{ nm})$$

Tabella 2.2. Indici vegetazionali usati in questa tesi.

INDICE	NOME ESTESO	FORMULA	AUTORE
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(780\text{nm} - 590\text{nm}) / (780\text{nm} + 590\text{nm})$	Rouse et al., 1974
SRVI	Simple Ratio Vegetation Index	$780 \text{ nm} / 660 \text{ nm}$	Wang, 2000
PRI	Physiological Reflectance Index	$(531 \text{ nm} - 570 \text{ nm}) / (531 \text{ nm} + 570 \text{ nm})$	Naumann et al., 2008
CI	Clorofil Index	$(750 \text{ nm} - 705 \text{ nm}) / (750 \text{ nm} + 705 \text{ nm})$	Naumann et al., 2009

- **il Peso verde il Peso secco, % umidità** dell’ intera pianta campionata;
- **la Composizione chimica della pianta:** In questa fase la pianta è stata tagliata, essiccata in stufa a 45 °c per 48 ore, tritata e poi analizzata in laboratorio con il cromatografo a ioni (ICS – 900, Dionex, USA).

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

Con questa procedura, fatta sulla sostanza secca, sono stati analizzati i seguenti anioni e cationi (*fluoruri, cloruri, nitriti, bromuri, nitrati, fosfati, solfati, litio, sodio, ammonio, potassio, magnesio, calcio*)

- ***l’Umidità suolo*** con sonde TDR per verificare se sussiste la condizione di stress idrico;
- e prima della trebbiatura, nell’ ultimo campionamento è stata rilevata la ***Composizione chimica granella e parte aerea*** analizzando il PESO VERDE PESO SECCO e % UMIDITA'

Su scala di campo

A differenza di prima quest’ analisi è stata svolta considerando l’ intero appezzamento. Essa prevedeva tre misurazioni con ***Crop Circle (Holland Scientific, USA)***, strumento indispensabile per calcolare NDVI con il quale ,accoppiato ad un sistema DGPS e con l’ utilizzo di tecniche geostatistiche, ha consentito di mappare l’intero campo per costruire alla fine delle mappe che rappresentassero l’ evoluzione del benessere della coltura durante il periodo di rilevamento.

Queste analisi sono state svolte nelle tre date coincidenti con le date dei rilievi discussi nel paragrafo precedente.

Durante la fase di mietitura, svolta il giorno 2 settembre 2011, è stata fatta una mappatura di resa mediante un sistema di misurazione, di tipo volumetrico, chiamato ***AGROCOM yield monitor (CLAAS, Germany)*** il quale, montato sulla mietitrebbiatrice, ha fornito dei dati medi di resa (granella) in celle di suolo, tutte adiacenti tra di loro, di superficie 8 metri (larghezza della barra) per 5 metri di percorso svolto dalla macchina.

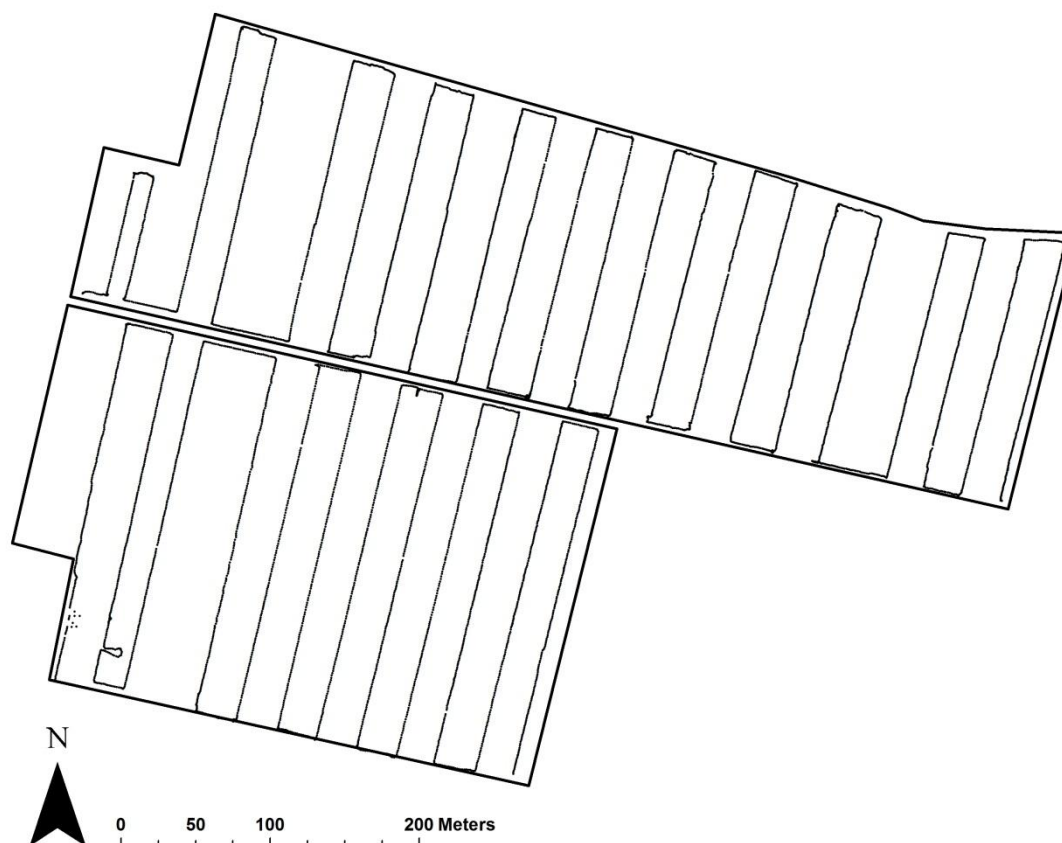


Figura 2.3 – punti di lettura di NDVI con CropCircle accoppiato con un ricevitore DGPS.

Dati pluviometrici dell' area di studio 2011

Come è stato accennato prima i dati meteo sono stati forniti dal centro meteorologico di Teolo (PD). Secondo la figura sotto riportata, possiamo osservare che la piovosità è stata piuttosto scarsa e non omogenea in tutto il periodo di coltivazione del mais:

Infatti, come si può notare, gli eventi piovosi sono avvenuti occasionalmente durante il mese di **giugno, luglio e agosto** raggiungendo dei picchi massimi da circa 10 a 20 mm di pioggia.

Facendo la sommatoria dei millimetri di pioggia caduta durante l' intero arco di tempo che va dalla semina (4 aprile 2011) alla raccolta (2 settembre 2011), possiamo affermare che il quantitativo di acqua apportata dall' evento piovoso è di 166 mm il che equivale a 1660 m³ di pioggia/Ha.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

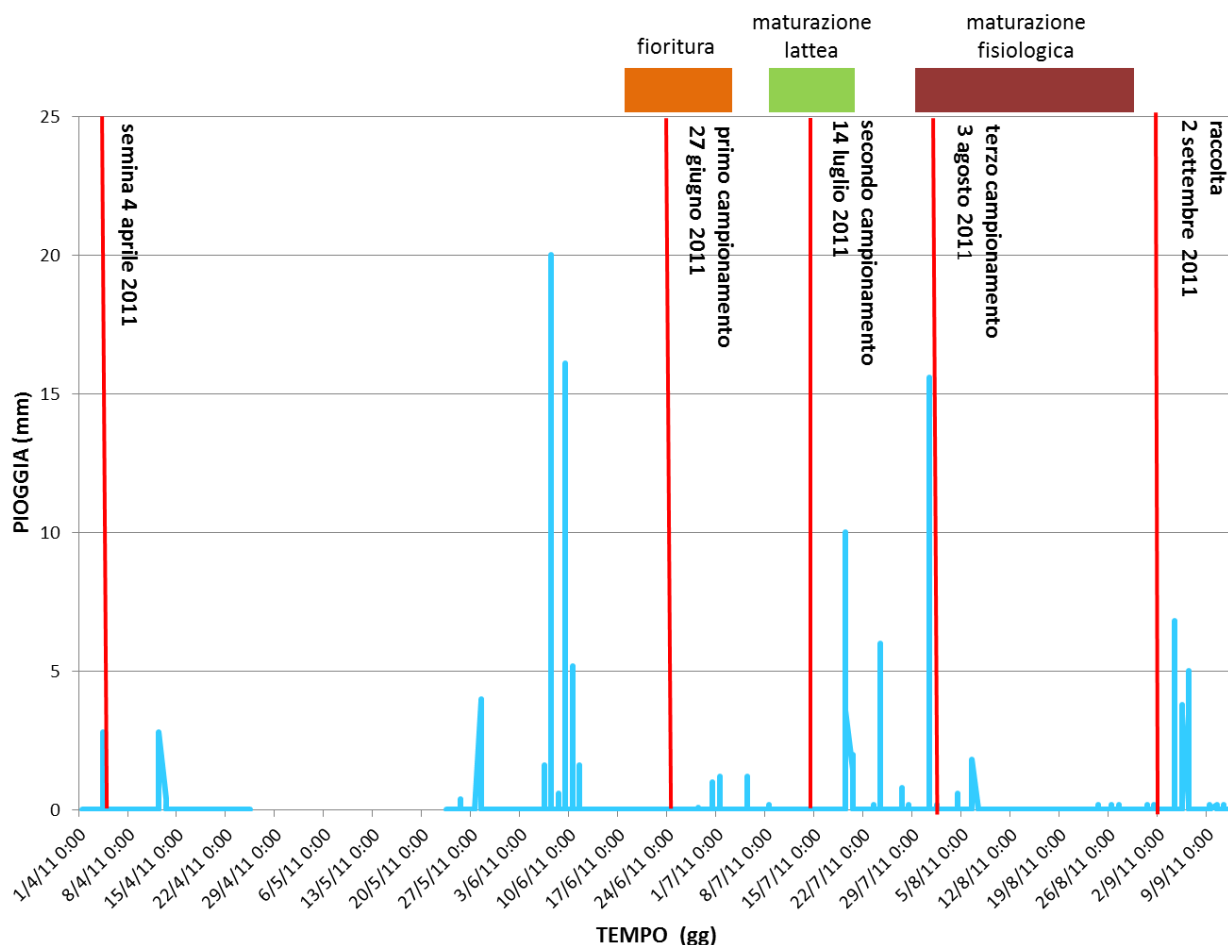


Figura 2.4. Precipitazioni avvenute durante la stagione culturale 2011.

2.2.1 Selezione dei punti di campionamento e caratteristiche chimico-fisiche dei loro suoli.

Nel 2010 l’area di studio è stata divisa in cinque aree omogenee, nelle quali sono stati allocate dieci punti in cui si sono effettuati i rilievi fisiologici sul mais. Le aree sono state selezionate utilizzando il software **MZA – Management Zones Analyst** (University of Missouri/Columbia, 2000).

MZA crea delle potenziali zone omogenee utilizzando una *unsupervised fuzzy classification* (classificazione fuzzy non supervisionata) per un’area d’interesse su due (o più) classi di valori i quali descrivono delle caratteristiche intrinseche dell’ area in questione (es. tessitura, pH, salinità). In questo studio la classe di valori utilizzata è stata la conducibilità elettrica apparente del suolo (alle profondità di 0-75 cm e 0-150 cm) la quale ha permesso di selezionare le dieci stazioni di monitoraggio in corrispondenza di alcuni dei 120 punti in cui era stato campionato il suolo.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

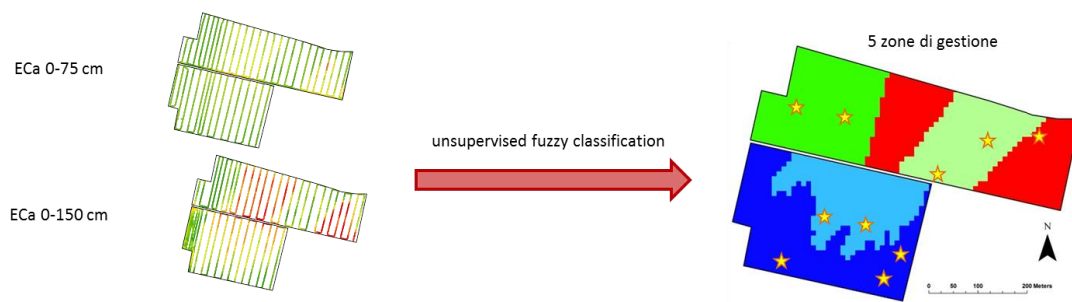


Figura 2.6 Rappresentazione schematica della selezione dei punti di campionamento.

Le proprietà chimico-fisiche dei punti selezionati risulta molto eterogenee. In questa tesi vengono considerati tre profili di suolo (0-15 cm, 15-45 cm e 45 -80 cm) in modo da coprire il volume di suolo interessato dallo sviluppo radicale del mais, che generalmente si sviluppa fino ad un massimo di 35 ÷ 40 cm sotto il piano di campagna. Per quanto riguarda la salinità del suolo, ci sono alcune stazioni di campionamento denotate da valori molto alti di conducibilità elettrica (suoli altamente salini), soprattutto nei due strati più profondi, quali le stazioni **III**, **IV** e **VII**. Altre stazioni invece possono definirsi suoli non salini (stazioni **I**, **II**, **V** ed **VIII**); mentre quelle rimanenti (**VI**, **IX** e **X**) si possono definire moderatamente saline. Alcune stazioni (**V**, **VII**, **VIII** e **IX**) sono inoltre situate all'interno dei **paleoalvei** i quali sono caratterizzati da suoli molto sabbiosi, in cui con molta probabilità si sono create condizioni di stress idrico durante la stagione vegetativa 2011, soprattutto nei mesi di giugno ed agosto, caratterizzati da una scarsa piovosità (vedi tab. 2.3). Le altre stazioni sono caratterizzati da suoli franchi e franchi-argillosi, con alto tenore organico. I punti **II** e **X** sono situati nella parte a nord di uno dei paleoalvei che attraversano l'area di studio e il loro suolo si può definire franco argilloso, almeno nei due strati superficiali.

Questa differenza rispetto agli altri punti situati nei paleoalvei è dovuta al fatto che l'area, in cui sono localizzati i suddetti punti, è stata ricoperta da terreno di riporto durante la creazione dei canali artificiali che scorrono a nord dell'area di studio (**Canal Morto e Bacchiglione**).

Per quanto riguarda il pH si può notare, osservando la tabella sotto riportata, che i valori risultano abbastanza eterogenei in quanto in alcuni punti di rilevamento (**III**, **VII**, **VIII** e **IX**) il suolo è a pH *neutro*, rispetto alla stazione **I** che invece risulta *fortemente acida*; mentre le rimanenti (**II**, **IV**, **V**, **VI** e **X**) sono classificate *debolmente acide*.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

Tabella 2.3: Proprietà del suolo nelle stazioni di monitoraggio a diverse profondità

STAZIONE	Profilo Suolo (cm)	EC suolo (dS m ⁻¹)	pH	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)
I	0-15	0.21	5.66	39.58	40.97	19.45
	15-45	0.38	5.54	42.27	41.65	16.08
	45-80	1.13	5.38	17.78	54.57	27.66
II	0-15	0.35	7.25	51.86	37.21	10.94
	15-45	0.28	7.22	49.22	38.01	12.76
	45-80	0.29	7.70	92.09	7.06	0.85
III	0-15	0.55	7.67	26.87	47.74	25.40
	15-45	0.88	7.50	32.35	49.18	18.47
	45-80	4.82	6.49	45.04	39.69	15.27
IV	0-15	0.79	6.30	39.28	47.64	13.09
	15-45	0.41	5.82	27.06	50.69	22.25
	45-80	2.01	5.62	55.95	32.98	11.06
V	0-15	0.29	7.39	64.66	23.47	11.88
	15-45	0.20	7.79	61.14	26.69	12.17
	45-80	0.18	8.11	82.47	12.45	5.08
VI	0-15	0.67	7.84	29.03	46.73	24.24
	15-45	0.69	7.80	30.12	47.57	22.31
	45-80	0.75	7.68	52.39	34.33	13.28
VII	0-15	0.55	7.03	57.08	34.30	8.61
	15-45	0.42	6.68	62.27	29.38	8.36
	45-80	1.34	7.25	80.48	15.99	3.53
VIII	0-15	0.21	6.73	80.07	16.51	3.42
	15-45	0.22	7.34	82.93	14.54	2.53
	45-80	0.23	7.85	56.75	28.13	15.12
IX	0-15	0.76	7.65	63.07	28.42	8.51
	15-45	0.32	7.46	66.56	26.91	6.53
	45-80	0.28	7.76	81.14	14.50	4.36
X	0-15	0.46	7.46	36.80	49.23	13.97
	15-45	0.42	7.58	46.23	38.45	15.32
	45-80	2.05	7.16	60.54	31.60	7.86

2.3 Analisi dei dati

I dati relativi ai 10 punti di campionamento sono stati confrontati tra loro e con le caratteristiche del suolo con metodi statistici di base (matrice di correlazione di Pearson). Grazie alle matrici di correlazione è stato possibile definire le variabili da utilizzare in un’analisi atta ad individuare la relazione tra tali variabili: la principal component analysis (PCA). La PCA è una tecnica normalmente utilizzata nell’ambito della statistica multivariata per la semplificazione dei dati d’origine. Lo scopo primario di questa tecnica è la riduzione di un numero più o meno elevato di variabili (rappresentanti altrettante caratteristiche del fenomeno analizzato) in alcune variabili latenti. Ciò avviene tramite una trasformazione lineare delle variabili che proietta quelle originarie in un nuovo sistema cartesiano nel quale le variabili vengono ordinate in ordine decrescente di varianza: pertanto, la variabile con maggiore varianza viene proiettata sul primo asse, la seconda sul secondo asse e così via. La riduzione della complessità avviene limitandosi ad analizzare le principali (per varianza) tra le nuove variabili. Diversamente da altre trasformazioni (lineari) di variabili praticate nell’ambito della statistica, in questa tecnica sono gli stessi dati che determinano i vettori di trasformazione. La PCA consente di controllare egregiamente il “trade-off” tra la perdita di informazioni e la semplificazione del problema (basta scegliere il numero appropriato di autovettori). In questa tesi è stata utilizzata con lo scopo di analizzare le relazioni tra le variabili prescelte.

Le variabili campionate nei punti presi in esame sono inoltre state valutate in funzione alla loro variabilità spaziale e alla loro distribuzione nello spazio mediante metodi di elaborazione geostatistica.

La geostatistica si differenzia dall’utilizzo della statistica classica in quanto suppone che vi sia una correlazione spaziale tra i campioni e che tali relazioni possano essere espresse in termini di distanze relative fra i punti e non in funzione delle distanze assolute. Per dipendenza spaziale si intende invece che i valori dei punti studiati non siano distribuiti in modo casuale ma abbiano appunto un legame spaziale, ossia che la probabilità che due punti siano simili tra loro diminuisca all’aumentare della distanza che li divide.

L’obiettivo è quindi quello di valutare l’effetto della posizione del sito di misura sulla variabilità del dato osservato. Tale studio è necessario per la fase successiva di predizione spaziale con cui si possono fornire delle stime sul valore assunto e sugli errori commessi da una variabile in una posizione in cui la misurazione non è stata effettuata.

La variabilità di solito viene elaborata con lo strumento del grafico di covarianza, che valuta il grado di variabilità di punti a distanze crescenti.

La funzione di covarianza è un modello geostatistico che viene impiegato per valutare la scovarianza dei valori osservati in gruppi di coppie di punti a determinate distanze (*lag*) secondo una certa direzione. La formula generale della covarianza è:

$$C(s_i, s_j) = \text{cov}(Z(s_i), Z(s_j)),$$

dove **cov** è la covarianza, **Z** è il valore della variabile in esame e **si** ed **sj** sono posizioni nello spazio separate da una distanza pari ad *h* (*lag*) o a suoi multipli.

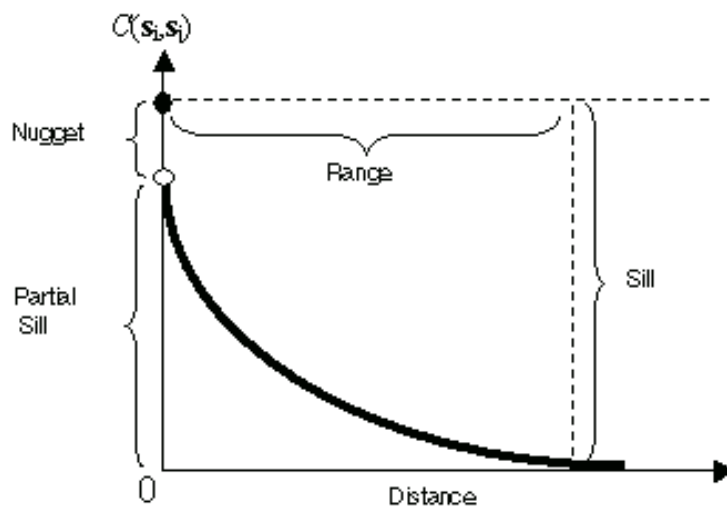


Figura 2.7 – Esempio di funzione covariogramma

Il grafico della funzione di covarianza è determinato da una serie di parametri da cui si ricavano

informazioni sul comportamento spaziale della variabile studiata:

- *Slope*: è la pendenza della prima parte della curva e descrive quanto cambia il valore della variabile nel campo in funzione della distanza tra i punti campionati

- *Sill*: indica il valore massimo della varianza e quindi la variabilità, del dato studiato, che possiamo trovare all’interno del campo
- *Nugget*: indica la quota di semivarianza che deriva dalla variabilità casuale e da quella spaziale a distanze inferiori rispetto a quella minima usata nel campionamento
- *Range*: rappresenta la distanza massima entro cui si manifesta la correlazione spaziale della semivarianza dei dati, oltre non è possibile dare una spiegazione della variabilità del parametro.

Un altro strumento importante è il cross-covariogramma (o funzione di cross-covarianza), che è stato utilizzato in questa tesi per analizzare le correlazioni spaziali tra diverse variabili.

La funzione è la seguente:

$$C_{UV}(\mathbf{h}) = E[(U_i - E(U_i)) (V_j - E(V_j))]$$

dove $\mathbf{sj} - \mathbf{si} = \mathbf{h}(\text{lag})$.

Questa funzione si può essere stimata grazie ad una funzione sperimentale di cross-covarianza:

$$\hat{C}_{UV}(\mathbf{h}) = \frac{1}{n(\mathbf{h})} \sum_{(i,j)|\mathbf{h}_{ij} = \mathbf{h}} u_i \cdot v_j - m_{u,-\mathbf{h}} \cdot m_{v,+\mathbf{h}}$$

dove $\mathbf{n}(\mathbf{h})$ è il numero di coppie di punti separati dalla distanza $\mathbf{h}$; $\mathbf{m}_{v,+\mathbf{h}}$ è il valore medio di tutti i valori $\mathbf{v}_j$ nella somma; $\mathbf{m}_{u,-\mathbf{h}}$ è la media di tutti i valori u_i nella somma. Le due variabili sono legate da correlazione spaziale se a piccoli $\mathbf{h}$ il valore di $\hat{C}_{UV}$ è grande, e tende a zero all’aumentare di $\mathbf{h}$. La correlazione spaziale può essere positiva nel caso $(U_i - E(U_i))$ ed $(V_j - E(V_j))$ abbiano lo stesso segno, o negativa nel caso siano discordi.

L’analisi geostatistica è stata condotta con il software ArcMap (ESRI, Redlands-CA, USA, 2010).

3. RISULTATI

3.1 Resa

La tabella 3.1 illustra la resa finale (t ha^{-1} s.s) in corrispondenza dei 10 punti sui quali sono state fatte le analisi.

Come si può notare la produzione media di mais è risultata attorno a **7.55 t ha^{-1} s.s** con un errore standard pari a **0.77 t ha^{-1} s.s** il che risultano molto inferiori rispetto alle rese medie di (10-11 t ha^{-1} s.s granella).

E' interessante però sottolineare che i singoli valori presentano una modesta variabilità i quali sono contenuti in un intervallo (minimo e massimo) di **5.67 e 12.93 t ha^{-1} s.s** di granella rispettivamente.

Tabella 3.1. Resa della granella nei dieci punti di campionamento.

punto di campionamento	Resa (ton ha^{-1})
I	6.40
II	5.67
III	6.15
IV	8.27
V	6.01
VI	9.15
VII	8.96
VIII	5.99
IX	5.99
X	12.93

Ora prendiamo come riferimento 3 punti di rilievo che si diversificano l'uno dall'altro in base alle caratteristiche chimico-fisiche del suolo e in base ai livelli di resa raggiunti dalla coltura.

Tali stazioni sono:

- Stazione III caratterizzata da un' elevata concentrazione salina nel suolo;
- Stazione V (paleolueo) caratterizzato da un elevato contenuto di sabbia;
- Stazione X dove la resa ha raggiunto alti livelli grazie ad un ambiente pedoclimatico favorevole per la piante (tessitura , proprietà chimico-fisiche).

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

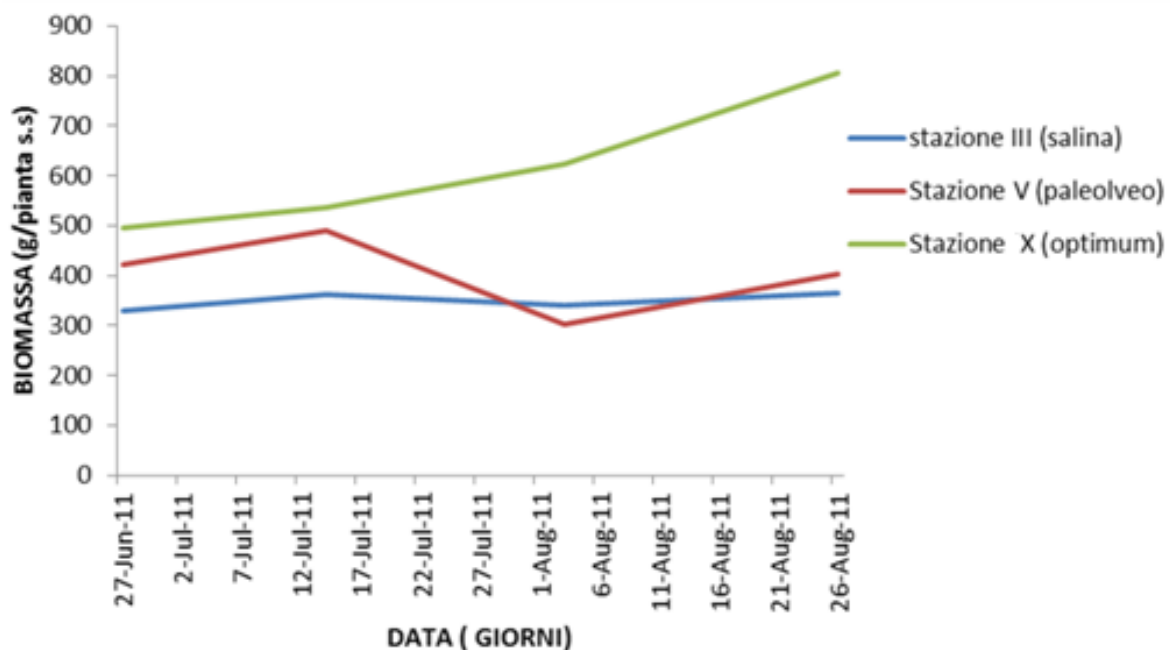


Figura 3.1: andamento dell’ accumulo di biomassa nel tempo dei 3 campioni presi in esame

In questo grafico notiamo i seguenti andamenti di incremento di sostanza secca nelle rispettive 3 stazioni (**III**, **V** e **X**) accumulata durante il periodo di rilevamento dei dati vegetativi.

Nel caso specifico della stazione III (salina) possiamo osservare che già dall’ inizio le piante mostrano una fatica nell’ accumulare la sostanza secca durante il suo ciclo di sviluppo; quindi risulta chiaro che in tali circostanze le piante sono entrate precocemente in una fase di stress (salino) il quale ha influenzato negativamente la loro produzione finale.

Nella stazione V (paleolveo) le piante inizialmente accumulano la sostanza secca con un tasso abbastanza buono; ma successivamente, a causa dell’ elevato contenuto di sabbia e del clima arido tipico dei mesi estivi, periodo in cui la cultura mais traspira in modo esuberante, esse entrano in stress idrico determinando così un decremento repentino dell’ accumulo di sostanza secca determinando così la riduzione della loro capacità produttiva.

Invece, come risulta chiaro dal grafico sopra esposto , la stazione X (situazione ottimale) presenta delle piante che sono state in grado di accumulare progressivamente, durante il

periodo di analisi, un notevole quantitativo di sostanza secca facendo quindi ottenere il risultato produttivo di $12.93 \text{ t ha}^{-1} \text{ s.s.}$

3.2 La composizione chimica della parte aerea

Come si può osservare dalla tabella sotto (Tabella 3.2) esposta la parte aerea è ricca di cationi e anioni ognuno dei quali si comporta in maniera diversa sia nella loro dinamica di accumulo durante il ciclo fenologico della pianta, sia nelle loro concentrazioni nella parte aerea

Nel corso del periodo di analisi si nota che mediamente la concentrazione di **cloruri** nella parte aerea diminuisce man mano che la pianta tende ad arrivare alla fase di fioritura e successivamente aumenta durante la fase di maturazione, ovvero nel periodo del 2° e 3° rilievo.

Questo andamento potrebbe essere dovuto dal fatto che le precipitazioni piovose, verificate in pre fioritura, abbiano diluito la soluzione circolante del suolo determinando così una minor concentrazione di cloro derivante dalla salinità presente. Successivamente sia per effetto della carenza idrica, la quale ha comportato un aumento di concentrazione di tale elemento nel suolo, sia dalla forte domanda di acqua che ovviamente la pianta ha richiesto per le sue funzioni fisiologiche e biochimiche, la concentrazione di cloro, riscontrato su foglie e stocchi, era cresciuta.

Analogo comportamento lo si può osservare in **solfati e sodio**.

Altri invece, come **magnesio e calcio**, tendono aumentare man mano che la coltura stava completando il suo ciclo fenologico; mentre in **fosfati, ione ammonio e nitrati** si assiste ad un decremento della loro concentrazione durante il periodo di maturazione dovuto dal fatto che tali ioni, durante il periodo del riempimento della cariosside, potrebbero essere stati rimossi dai organi di stoccaggio (foglie e stocchi) e traslocati a livello della spiga.

Tabella 3. 2 . Valori medi, minimi e massimi dei cationi ed anioni della parte aerea nei tre rilievi.

Rilievo		Fluoruri	Cloruri	Nitrati	Fosfati	Solfati	Sodio	Ammonio	Potassio	Magnesio	Calcio
I rilievo	Media	261.03	4098.11	3444.53	3914.34	876.60	382.28	186.34	22499.72	1309.63	1800.54
	Minimo	65.52	1164.68	N.A.	1971.02	356.28	148.20	50.05	7363.51	624.28	1307.04
	Massimo	498.73	8234.42	16752.37	5891.19	1697.51	882.21	374.92	60580.60	2484.61	2506.08
II rilievo	Media	512.68	3576.99	2264.63	3013.83	1472.66	320.73	222.64	16337.89	1473.47	2239.43
	Minimo	70.08	1312.66	N.A.	492.63	409.70	208.99	N.A.	9119.58	690.34	1283.95
	Massimo	2568.39	5393.07	13056.60	4373.82	3386.13	500.43	563.22	31140.07	2515.99	2916.38
III rilievo	Media	319.05	4192.97	614.25	2993.06	2285.44	433.90	104.78	17064.52	1909.22	2419.81
	Minimo	38.92	2327.40	N.A.	1033.58	448.51	205.61	N.A.	10531.96	689.24	1402.20
	Massimo	1101.31	7241.35	2710.37	6652.12	5561.92	745.14	187.54	23648.85	3040.98	3104.35

3.3 La risposta spettrale delle piante

La risposta spettrale delle piante viene illustrata dai grafici (fig 3.2) sotto riportati i quali illustrano e descrivono la capacità del mais, nei rispettivi 10 punti di rilevamento, di riflettere la radiazione solare. tale analisi è stata svolta per mezzo di uno strumento chiamato spettro-radiometro da 380 a 780 nm (PR-650 SpectraScan, Photoresearch, USA).

Si può osservare che al 1° rilievo tutte le stazioni mediamente presentano un picco di riflettanza molto più pronunciato rispetto a quanto avviene durante il 2° e 3° campionamento. Questo potrebbe derivare dal fatto che la pianta, nel giorno 27 giugno 2011, fosse ancora in piena fase di sviluppo e di accrescimento e quindi la funzionalità delle foglie ad intercettare la radiazione solare e di fotosintetizzare risultava molto elevata.

Comunque si nota che il comportamento di un singolo punto è abbastanza diverso rispetto all’ altro e questo è causato soprattutto dalla grande variabilità delle caratteristiche chimico- fisiche del suolo (tessitura, concentrazione di sali, disponibilità di acqua ect) che, in positivo o in negativo, modulano le risposte della coltura.

Prendendo come riferimento le tre stazioni **(III,V,X)** possiamo affermare che:

- **Nella stazione III** (fortemente salina) la riflettanza, rispetto alle altre situazioni, risulta molto scarsa in tutte e tre le date di campionamento dovuto dal fatto che la pianta, trovandosi in un ambiente fortemente salino, manifesta ancora nelle prime fasi di sviluppo lo stress da sale. Perciò si osserva poca variabilità tra rilievi, e questo lo si vede mediante il picco di 540 nm che risulta meno evidente rispetto ai altri punti, e senescenza accelerata della pianta.
- **Nella stazione V** (paleolveo ricco di sabbia) si osserva una riflettanza simile a quella della stazione III, con la differenza che nel 1° rilievo il picco del verde (540 nm) risulta abbastanza evidente. Però in presenza di carenza idrica, durante il 2° e il 3° rilievo, l’andamento della riflettanza decresce arrivando a valori molto bassi, simili a quelli osservati nella stazione precedente.
- **Nella stazione X** (la situazione ottimale) la riflettanza parte alta ma poi gradualmente diminuisce man mano che la pianta stà concludendo il suo ciclo fenologico; perciò nel 2° e nel 3° rilievo si assiste ad un decremento della riflettanza del tutto normale in conseguenza della senescenza della coltura.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

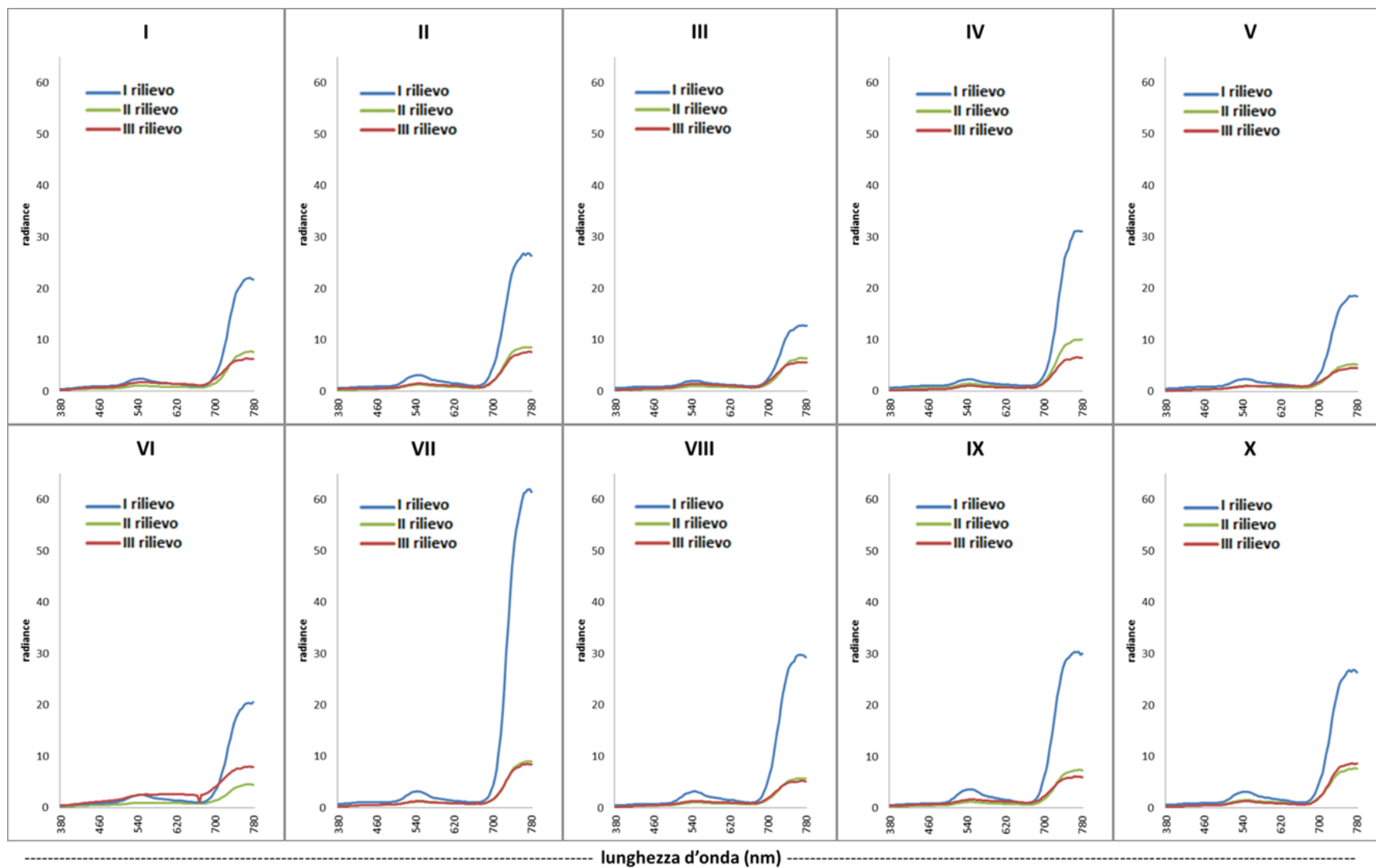


Figura 3.2. Firme spettrali nelle tre date per i dieci punti di campionamento.

3.4 Matrici di correlazione

Le tabelle (3.3, 3.4, 3.5) illustrano come alcuni fattori (**NDI crop circle, NDI spettroradiometro, SRVI, PRI, CI e la resa**) si correlano con le caratteristiche **chimico-fisiche del suolo**, con i **rilievi biometrici** (*Potenziale osmotico, altezza, numero di Foglie, numero di nodi, peso verde, peso secco e % umidità*) , **indici vegetativi** (*NDVI Cropcircle, NDVI, SRVI, PRI, CI*) e con gli **ioni e cationi** (*Fluoruri, Cloruri , Nitrati, Fosfati, Solfati, Sodio, Ammonio, Potassio, Magnesio*) accumulati nella parte vegetativa della pianta.

Nel primo rilevamento, svolto in data 27 giugno 2011, notiamo la seguente situazione:

- Non c'è una correlazione significativa tra NDVI (sia quello derivante dal crop-circle, sia dallo spettroradiometro) e resa con le caratteristiche chimico-fisiche del suolo.
Esiste un legame negativo tra: PRI con EC e con la tessitura del terreno; e SRVI con la sabbia (correlazione negativa) e con argilla (correlazione positiva).
- Per quanto riguardano le misurazioni fatte sulle piante invece si notano delle correlazioni molto significative tra SRVI, CI e resa con le misure biometriche;
- NDVI è correlato negativamente con la concentrazione di cloro nelle foglie e positivamente con la resa finale;
- Le concentrazioni dei cationi e degli anioni diversi dal Cl non paiono correlati con gli indici vegetativi e con la resa finale.

Nel secondo periodo di rilevamento (tabella 3.4), svolto il giorno 14 luglio 2011 (stadio fenologico della maturazione lattea della spiga), si osserva che tante correlazioni riscontrate nel primo rilievo non sono più evidenti. In particolare non si evidenziano correlazioni tra le caratteristiche chimico-fisiche del suolo e gli indici vegetativi. Si riscontrano delle correlazioni significative tra resa con gli aspetti biometrici della pianta; tra i diversi indici vegetativi mentre, come nel rilievo precedente, non si evidenziano correlazioni tra gli stessi indici e concentrazioni di ioni e cationi accumulati nella parte epigea.

Al terzo rilievo (tabella 3.5), fenofase della maturazione fisiologica avvenuta in data 3 agosto 2011, la situazione è la medesima a quella del secondo rilievo con la presenza di correlazioni significative tra la resa e i parametri biometrici; e tra i diversi indici ecofisiologici.; Si evidenzia un legame negativo tra la resa e la concentrazione di potassio presente nella parte vegetativa della pianta.

Si può quindi concludere che:

- Esiste poca correlazione tra NDVI misurato con il crop-circle e quello ottenuto con lo spettro radiometro. Questo potrebbe derivare dalle piccole differenze nelle lunghezze d’onda utilizzate dai due strumenti, soprattutto nella banda del vicino infrarosso;
- Gli indici vegetativi sono poco correlati con le proprietà del suolo; questi indici sono infatti dei buoni indicatori di un eventuale stato di stress ma non discriminano tra fonti di stress diverse (es. salinità o stress idrico);
- SRVI pare essere l’indice più interessante per la stima precoce della resa finale, anche se, in generale, le correlazioni tra resa e indici vegetativi non sono risultate particolarmente forti;
- NDVI misurato con il radiometro pare essere un discreto indice per determinare la presenza dei cloruri nelle foglie in stadi precoci;
- come è stato osservato in precedenza, con la senescenza della pianta molte correlazioni vengono perse e questo risulta essere concorde con le analisi delle firme spettrali viste precedentemente.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

Tabella 3.3. Matrice di correlazione per gli indici vegetazionali calcolati dalle firme spettrali e dal Cropcircle e per la resa, con alcune caratteristiche del suolo e i dati relativi ai rilievi sui dieci punti, nel primo rilievo.

PRIMO RILIEVO	NDVI Cropcircle	NDVI	SRVI	PRI	CI	Resa
CARATTERISTICHE SUOLO						
EC _a aprile 2011	-0.15	-0.48	0.14	-0.51	-0.17	-0.10
EC _a settembre 2011	-0.15	-0.62	0.05	-0.48	-0.35	-0.22
EC 0 - 15 cm	0.42	0.14	0.43	0.07	0.13	0.27
pH 0 - 15 cm	0.21	-0.21	0.37	0.12	-0.25	0.16
EC 15 - 45 cm	0.20	-0.36	0.52	-0.53	-0.06	0.20
pH 15 - 45 cm	0.00	-0.26	0.20	0.12	-0.35	0.07
EC 45 - 80 cm	0.26	-0.19	0.30	-0.63	0.14	0.20
pH 45 - 80 cm	0.02	-0.05	-0.05	0.52	-0.32	-0.08
Sabbia 0 - 15 cm	-0.19	0.14	-0.66	0.71	-0.25	-0.42
Limo 0 - 15 cm	0.30	0.10	0.68	-0.63	0.44	0.55
Argilla 0 - 15 cm	-0.02	-0.50	0.52	-0.72	-0.10	0.13
Sabbia 15 - 45 cm	-0.22	0.18	-0.56	0.72	-0.20	-0.29
Limo 15 - 45 cm	0.21	-0.17	0.52	-0.68	0.19	0.27
Argilla 15 - 45 cm	0.23	-0.18	0.61	-0.78	0.21	0.33
Sabbia 45 - 80 cm	0.36	0.20	-0.13	0.59	-0.05	-0.08
Limo 45 - 80 cm	-0.28	-0.15	0.22	-0.63	0.13	0.18
Argilla 45 - 80 cm	-0.48	-0.29	-0.05	-0.48	-0.10	-0.10
RILIEVI SULLE PIANTE						
Potenziale osmotico	0.13	0.33	0.10	-0.10	0.27	0.30
Altezza	0.62	0.42	0.83	-0.54	0.71	0.79
Foglie (numero)	0.37	0.22	0.78	-0.32	0.46	0.60
Nodi (numero)	0.54	0.31	0.64	-0.62	0.66	0.60
Umidità suolo (0 - 40 cm)	-0.02	0.04	0.36	0.11	0.04	0.27
PESO VERDE	0.52	0.34	0.82	-0.61	0.65	0.74
PESO SECCO	0.52	0.26	0.83	-0.65	0.59	0.69
% UMIDITA'	-0.44	0.06	-0.64	0.79	-0.36	-0.37
Resa	0.53	0.71	0.84	-0.29	0.84	-
INDICI VEGETAZIONALI						
NDVI Cropcircle	-	0.50	0.59	-0.13	0.65	0.53
NDVI	0.50	-	0.33	0.25	0.88	0.71
SRVI	0.59	0.33	-	-0.46	0.59	0.84
PRI	-0.13	0.25	-0.46	-	-0.20	-0.29
CI	0.65	0.88	0.59	-0.20	-	0.84
IONI PARTE AEREA						
Fluoruri	-0.46	-0.34	-0.63	0.09	-0.37	-0.61
Cloruri	-0.33	-0.66	-0.01	-0.35	-0.43	-0.33
Nitrati	-0.49	-0.16	-0.40	0.72	-0.51	-0.37
Fosfati	-0.55	-0.46	-0.65	0.05	-0.51	-0.69
Solfati	0.04	0.27	-0.21	0.14	0.27	-0.15
Sodio	-0.21	-0.09	-0.30	0.50	-0.37	-0.25
Ammonio	0.19	0.51	0.25	0.41	0.27	0.46
Potassio	-0.47	-0.32	-0.43	0.47	-0.55	-0.46
Magnesio	-0.56	-0.27	-0.75	0.62	-0.58	-0.66
Calcio	-0.61	-0.33	-0.56	0.28	-0.44	-0.53

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

Tabella 3.4. Matrice di correlazione per gli indici vegetazionali calcolati dalle firme spettrali e dal Cropcircle e per la resa, con alcune caratteristiche del suolo e i dati relativi ai rilievi sui dieci punti, nel secondo rilievo.

SECONDO RILIEVO						
	NDVI Cropcircle	NDVI	SRVI	PRI	CI	Resa
CARATTERISTICHE SUOLO						
EC _a aprile 2011	0.06	-0.03	-0.44	-0.36	0.13	-0.10
EC _a settembre 2011	0.17	-0.08	-0.51	-0.24	0.01	-0.22
EC 0 - 15 cm	0.67	0.10	0.02	0.41	0.20	0.27
pH 0 - 15 cm	0.18	-0.43	-0.15	-0.34	-0.37	0.16
EC 15 - 45 cm	0.37	-0.20	-0.42	-0.28	0.05	0.20
pH 15 - 45 cm	-0.16	-0.58	-0.16	-0.52	-0.58	0.07
EC 45 - 80 cm	0.34	0.21	-0.03	0.01	0.36	0.20
pH 45 - 80 cm	-0.23	-0.48	-0.10	-0.38	-0.59	-0.08
Sabbia 0 - 15 cm	-0.46	-0.04	0.06	0.02	-0.33	-0.42
Limo 0 - 15 cm	0.51	0.26	0.17	0.16	0.53	0.55
Argilla 0 - 15 cm	0.31	-0.31	-0.41	-0.29	-0.04	0.13
Sabbia 15 - 45 cm	-0.61	-0.03	0.08	-0.23	-0.27	-0.29
Limo 15 - 45 cm	0.62	0.10	-0.08	0.25	0.32	0.27
Argilla 15 - 45 cm	0.57	-0.10	-0.08	0.19	0.16	0.33
Sabbia 45 - 80 cm	0.29	0.06	0.25	0.29	-0.12	-0.08
Limo 45 - 80 cm	-0.22	-0.02	-0.19	-0.26	0.19	0.18
Argilla 45 - 80 cm	-0.40	-0.14	-0.36	-0.33	-0.02	-0.10
RILIEVI SULLE PIANTE						
Potenziale osmotico	0.58	0.24	0.12	0.32	0.38	0.05
Altezza	0.23	-0.07	0.35	-0.18	0.28	0.73
Foglie (numero)	0.50	-0.15	0.15	-0.02	0.16	0.45
Nodi (numero)	0.40	-0.19	0.18	-0.07	0.05	0.39
Umidità suolo (0 - 40 cm)	0.24	0.04	-0.04	-0.36	0.33	0.52
PESO VERDE	0.11	-0.16	0.29	-0.34	0.20	0.83
PESO SECCO	0.32	-0.07	0.28	-0.08	0.27	0.67
% UMIDITA'	-0.47	-0.18	0.04	-0.57	-0.15	0.33
Resa	0.09	0.23	0.65	-0.08	0.52	-
INDICI VEGETAZIONALI						
NDVI Cropcircle	-	0.18	0.03	0.59	0.28	0.09
NDVI	0.18	-	0.68	0.59	0.91	0.23
SRVI	0.03	0.68	-	0.40	0.70	0.65
PRI	0.59	0.59	0.40	-	0.43	-0.08
CI	0.28	0.91	0.70	0.43	-	0.52
IONI PARTE AEREA						
Fluoruri	-0.36	0.40	0.68	-0.21	0.56	0.69
Cloruri	0.23	0.35	-0.12	0.04	0.44	0.00
Nitrati	0.04	0.23	-0.01	0.25	-0.03	-0.36
Fosfati	-0.14	0.19	0.08	0.33	0.03	-0.27
Solfati	0.33	0.56	0.22	0.48	0.62	0.06
Sodio	0.43	0.56	0.15	0.76	0.32	-0.28
Ammonio	-0.19	-0.31	0.03	-0.17	-0.21	0.46
Potassio	0.14	0.52	0.19	0.43	0.35	-0.18
Magnesio	0.14	0.52	0.12	0.55	0.29	-0.41
Calcio	0.32	0.49	0.35	0.55	0.40	-0.11

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

Tabella 3.5. Matrice di correlazione per gli indici vegetazionali calcolati dalle firme spettrali e dal Cropcircle e per la resa, con alcune caratteristiche del suolo e i dati relativi ai rilievi sui dieci punti, nel terzo rilievo.

TERZO RILIEVO	NDVI Cropcircle	NDVI	SRVI	PRI	CI	Resa
CARATTERISTICHE SUOLO						
EC _a aprile 2011	-0.17	-0.34	-0.42	0.37	-0.22	-0.10
EC _a settembre 2011	-0.09	-0.31	-0.33	0.33	-0.23	-0.22
EC 0 - 15 cm	0.35	0.10	-0.45	0.19	0.13	0.27
pH 0 - 15 cm	0.08	-0.19	0.34	0.16	-0.19	0.16
EC 15 - 45 cm	0.07	-0.27	-0.28	0.45	-0.16	0.20
pH 15 - 45 cm	-0.10	-0.28	0.48	0.07	-0.32	0.07
EC 45 - 80 cm	0.36	0.17	-0.33	-0.12	0.22	0.20
pH 45 - 80 cm	-0.24	-0.17	0.58	0.03	-0.23	-0.08
Sabbia 0 - 15 cm	-0.40	0.09	0.14	-0.33	-0.02	-0.42
Limo 0 - 15 cm	0.61	0.15	-0.15	0.17	0.26	0.55
Argilla 0 - 15 cm	0.00	-0.46	-0.10	0.52	-0.37	0.13
Sabbia 15 - 45 cm	-0.40	0.06	0.13	-0.28	-0.01	-0.29
Limo 15 - 45 cm	0.42	-0.03	-0.17	0.28	0.05	0.27
Argilla 15 - 45 cm	0.35	-0.12	-0.05	0.27	-0.08	0.33
Sabbia 45 - 80 cm	0.23	0.36	0.54	-0.31	0.28	-0.08
Limo 45 - 80 cm	-0.12	-0.30	-0.54	0.28	-0.21	0.18
Argilla 45 - 80 cm	-0.41	-0.46	-0.50	0.34	-0.39	-0.10
RILIEVI SULLE PIANTE						
Potenziale osmotico	-0.40	-0.01	0.20	-0.19	-0.06	-0.61
Altezza	0.41	0.12	0.52	0.07	0.20	0.68
Foglie (numero)	0.21	-0.12	0.40	0.26	-0.11	0.20
Nodi (numero)	0.35	0.08	0.53	-0.06	0.10	0.41
Umidità suolo (0 - 40 cm)	0.17	0.05	-0.30	0.29	0.20	0.53
PESO VERDE	0.53	0.42	0.63	-0.19	0.46	0.15
PESO SECCO	0.66	0.38	0.24	-0.30	0.44	0.84
% UMIDITA'	0.17	0.31	0.57	-0.14	0.31	-0.35
Resa	0.65	0.42	0.09	-0.20	0.48	-
INDICI VEGETAZIONALI						
NDVI Cropcircle	-	0.80	0.14	-0.55	0.80	0.65
NDVI	0.80	-	0.11	-0.78	0.98	0.42
SRVI	0.14	0.11	-	-0.20	0.06	0.09
PRI	-0.55	-0.78	-0.20	-	-0.65	-0.20
CI	0.80	0.98	0.06	-0.65	-	0.48
IONI PARTE AEREA						
Fluoruri	0.16	0.42	-0.24	-0.37	0.32	-0.16
Cloruri	0.00	0.02	-0.47	0.15	0.10	-0.19
Nitrati	-0.48	-0.30	-0.39	0.16	-0.33	-0.29
Fosfati	-0.12	0.17	-0.39	-0.36	0.09	-0.21
Solfati	0.28	0.50	-0.50	-0.17	0.56	0.17
Sodio	-0.15	-0.50	-0.37	0.44	-0.48	-0.20
Ammonio	-0.46	-0.50	-0.18	0.61	-0.37	-0.10
Potassio	-0.46	-0.36	-0.20	0.10	-0.42	-0.77
Magnesio	-0.30	0.27	-0.36	-0.33	0.20	-0.46
Calcio	-0.13	0.22	-0.14	-0.40	0.15	-0.35

3.5 Principal component analysis

Tabella 3.6: Analisi sui 2 fattori principali e la loro varianza spiegata (rispetto alla varianza totale) nei dieci punti di campionamento per salinità (0-45 cm), sabbia (0-45cm), resa, SRVI, sodio e cloruri della parte aerea delle piante nelle tre date di rilievo.

	I rilievo		II rilievo		II rilievo	
	Fattore 1	Fattore 2	Fattore 1	Fattore 2	Fattore 1	Fattore 2
Salinità (0-45 cm)	0.864	0.306	0.895	0.156	0.905	0.054
Sabbia (0-45 cm)	-0.806	-0.397	-0.869	0.144	-0.863	0.103
Resa	-0.097	0.938	0.265	-0.885	0.377	-0.742
SRVI	0.272	0.914	-0.256	-0.925	-0.361	-0.648
Cloruri	0.926	-0.291	0.709	0.049	0.675	0.483
Sodio	-0.057	-0.492	-0.100	0.029	0.239	0.608
Varianza Spiegata (%)	47.0	30.3	36.9	28.5	41.8	23.8

La tabella 3.6 mostra come i 2 fattori principali, uguali per tutte le tre le date di rilevamento, influenzano la varianza delle sei variabili più rappresentative scelte dalle matrici di correlazioni viste precedentemente.

Queste influenze tra le variabili sono illustrate nelle figure successive:

Nel primo rilievo il fattore 1 spiega il 47% della varianza totale mentre nel fattore 2 la varianza totale viene spiegata per il 30.3% (Fig. 3.7).

- Come prima cosa da osservare è che le variabili cloruri e salinità sono strettamente legate da una forte relazione positiva e sono contrapposte alla variabile sabbia. Questo significa che la salinità presente nel suolo risulta ridotta nelle zone fortemente sabbiose; di conseguenza le piante presenti in tali zone avranno una bassa concentrazione dei cloruri.
- E' interessante notare che sodio e cloro, i principali elementi chimici che formano il sale e rilevati nella parte aerea delle piante, non sono fortemente legati tra loro. Questo potrebbe derivare dal fatto che i due elementi non vengono assorbiti insieme ma in maniera differenziata per la capacità della pianta di effettuare assorbimenti selettivi. In particolare le concentrazioni di ioni rilevate nel campionamento delle colture evidenziano che la pianta riesce parzialmente ad escludere il catione sodio mentre il cloruro viene assorbito in maniera non selettiva.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

- La terza cosa interessante sta nel fatto che, in fase di pre-fioritura, le variabili resa e SRVI sono strettamente associate, quindi la misura di questo indicatore risulta utile nel predire la resa.
- Infine si riscontra una modesta correlazione negativa tra la variabile resa con le variabili sabbia, cloro e sodio

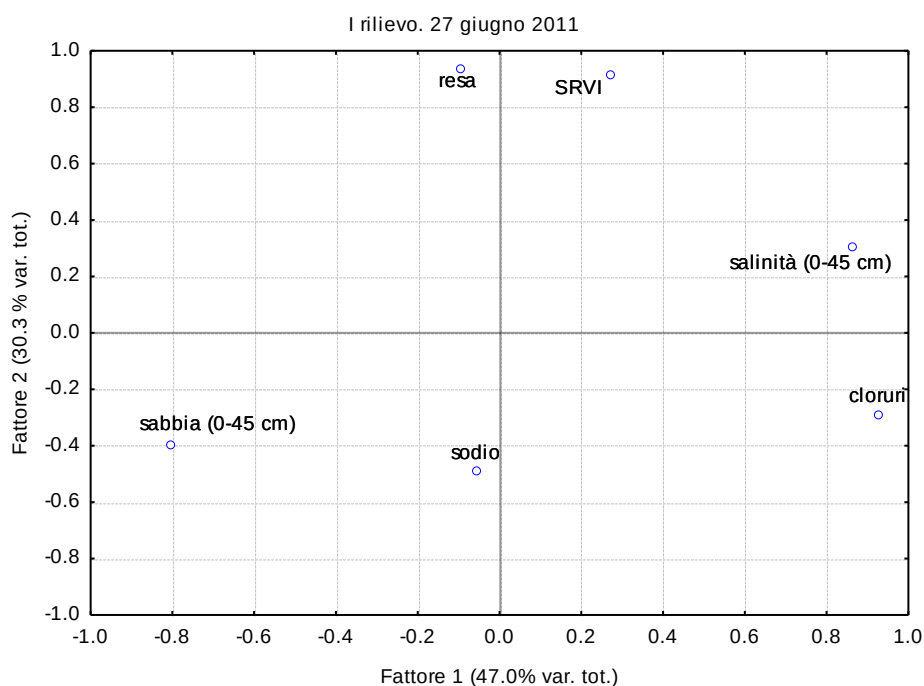


Figura 3.7 Principal component analysis (PCA) tra salinità (0-45 cm), sabbia (0-45cm), resa, SRVI, sodio e cloruri della parte aerea delle piante nei dieci punti di campionamento nel primo rilievo.

Nel secondo rilievo il fattore 1 spiega il 36.9% della varianza totale mentre nel fattore 2 la varianza totale viene spiegata per il 28.5 % (Fig. 3.8).

In questo caso si può osservare che:

- la contrapposizione tra la variabile sabbia e la variabile salinità, vista nella data di rilievo precedente, è rimasta invariata;
- si osserva una maggior correlazione tra la salinità e cloruri
- la correlazione tra la variabile SRVI e la resa invece tende a diminuire;
- è meno evidente la contrapposizione tra le variabili sodio, cloro e sabbia con la resa.
- Infine si registra un allontanamento progressivo tra la variabile SRVI e la resa.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

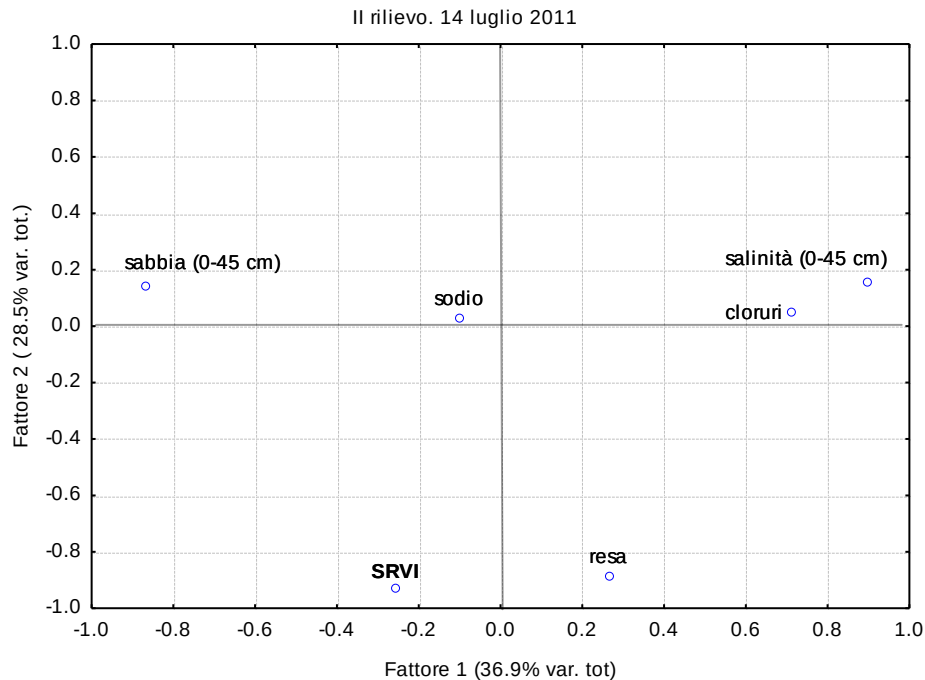


Figura 3.8 PCA tra salinità (0-45 cm), sabbia (0-45cm), resa, SRVI, sodio e cloruri della parte aerea delle piante nei dieci punti di campionamento nel secondo rilievo.

Nel terzo rilievo (Fig. 3.9) si riscontra una spiegazione della varianza totale pari a 41.8% nel caso del fattore 1; e del 23.8% nel caso del fattore 2.

Nel seguente grafico si osservano i seguenti punti:

- Riferendoci al fattore 1 la variabile sabbia e la variabile salinità risultano essere molto contrapposti e quindi la loro correlazione risulta fortemente negativa
- Le variabili salinità e cloro, concentrato nella parte aerea, tendono a distanziarsi indebolendo sempre più il loro legame.
- Sempre comparando i grafici precedenti osserviamo una maggior legame tra la variabile sodio e la variabile cloruri accumulati nelle foglie. Si presume che procedendo verso la senescenza, la pianta perda la capacità di effettuare assorbimenti selettivi dei cationi presenti nella soluzione circolante.
- Sodio e cloro si correlano negativamente con la resa finale come nei rilievi precedenti.
- Contrariamente a quanto visto nel primo rilievo, l' indicatore SRVI e la resa risultano essere molto distanti, in altri termini non più affini. Ciò indica che, dallo stadio di fioritura

Con l'avanzare dello stadio fisiologico, SRVI non risulta più essere un indicatore idoneo per predire la resa finale della coltura.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

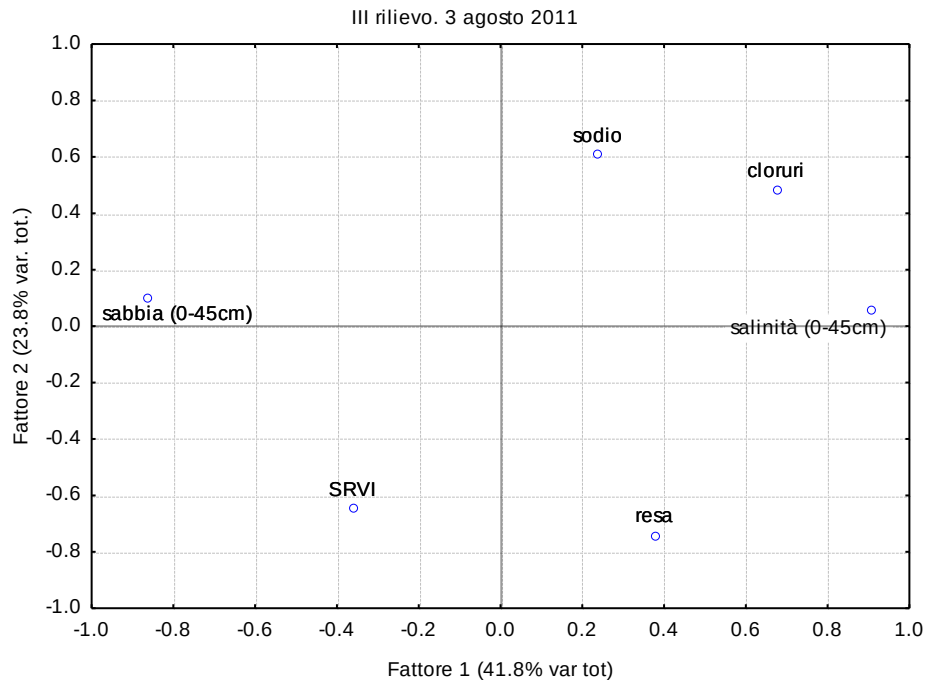


Figura 3.9: PCA tra salinità (0-45 cm), sabbia (0-45cm), resa, SRVI, sodio e cloruri della parte aerea delle piante nei dieci punti di campionamento nel terzo rilievo.

Riassumendo possiamo affermare generalmente che:

- Sabbia e salinità, a livello dei 10 punti analizzati, sono contrapposti e quindi sono correlati negativamente;
- Nel 2011, anno abbastanza siccitoso, sia il tenore in sabbia (stress idrico) che salinità hanno influito sulla resa e quindi risulta difficile determinare quale sia stato il contributo di ognuno dei due fattori nella risposta della pianta allo stress;
- SRVI risulta essere un indicatore utile per predire la resa specialmente fino alla fioritura; questo indice, però, non si correla in maniera specifica con le proprietà del suolo o con Na o Cl concentrati nelle piante. Quindi tale indicatore non risulta essere discriminante tra stress idrico e salino.

3.6 Scala di campo

In questo paragrafo verranno mostrate delle mappe per il contenuto di sabbia, la salinità del suolo, la resa e i tre rilievi di NDVI effettuati con il CropCircle. Verranno inoltre discusse le relazioni spaziali tra le variabili presentate.

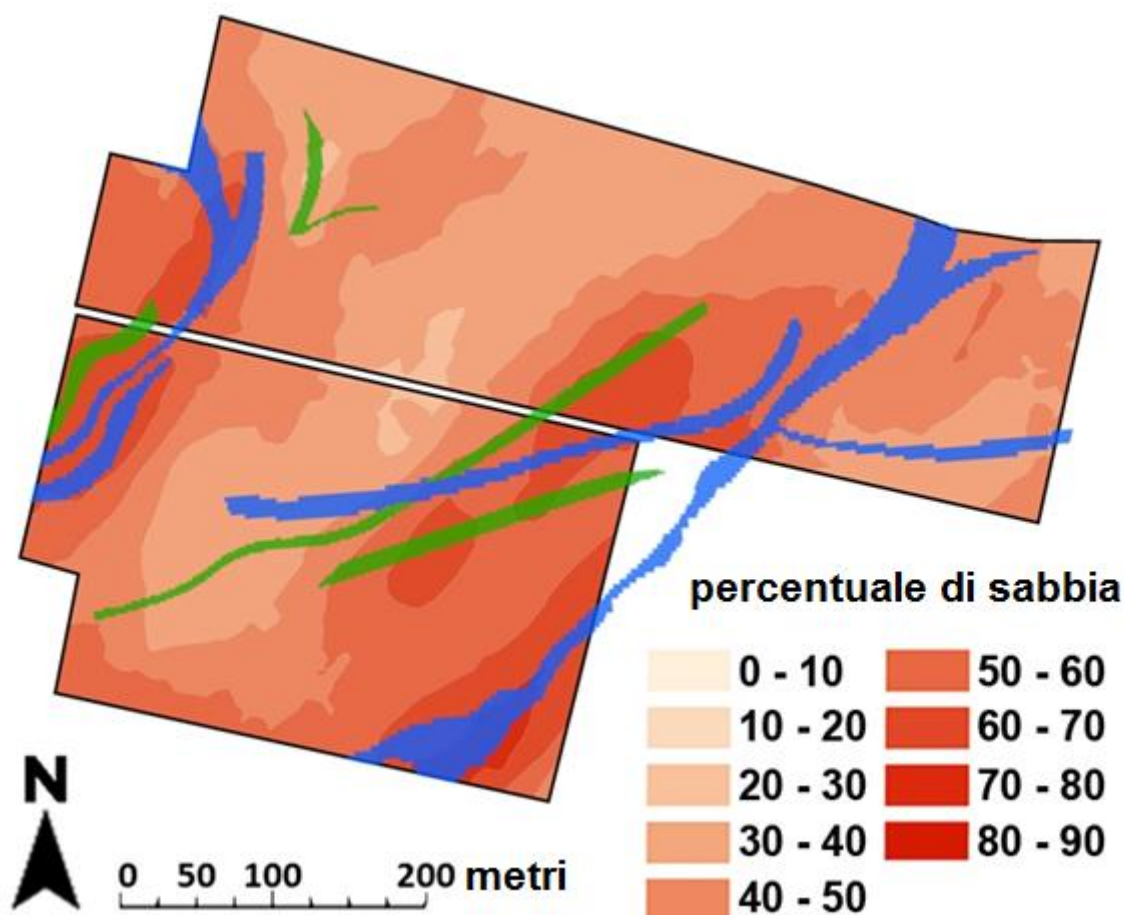


Figura 3.10: Mappa del suolo in base al tenore di sabbia. In blu e verde, i paleoalvei ben preservati e poco preservati, rispettivamente.

La figura 3.10 rappresenta la mappa di tessitura dell’area di studio la quale è stata creata in base alla percentuale di sabbia presente nello strato superficiale (0-45cm) del suolo. La mappa mostra valori molto eterogenei, zone in cui la sabbia è presente in piccole quantità si alternano a zone molto sabbiose, corrispondenti ai paleoalvei che attraversano l’area (in blu e verde nella figura). In linea generale si può considerare che il tenore di sabbia presente rientra in un intervallo pari da 0

al 90%. Man mano che ci si allontana dai palealvei la percentuale di sabbia decresce arrivando a valori moderati, come risulta evidente nella parte centrale a nord e sud dell’ appezzamento e zona nord- est), determinando così una tessitura di tipo franco-franco argilloso.

L’area può essere suddivisa in un appezzamento settentrionale ed uno meridionale. Entrambi le zone sono molto simili tra loro per quanto riguarda la tessitura.

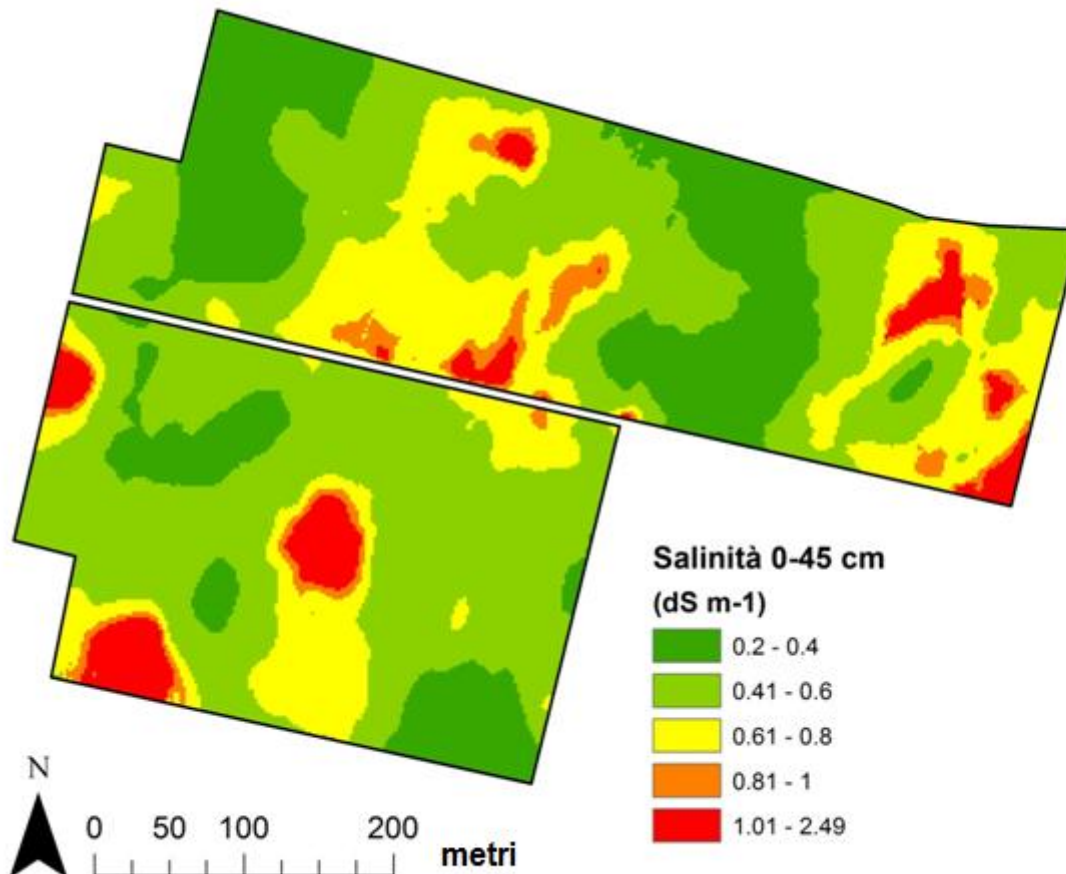


Fig 3.11; Mappa della salinità dello strato superficiale di suolo (0-40cm)

La figura 3.11 riporta i valori di EC 1:2 per i primi 45 cm di suolo. Anche in questo caso possiamo osservare una buona eterogeneità spaziale della salinità. L’area a nord non si differenzia dalla parte meridionale in quanto i valori mostrati, e la distribuzione spaziale degli stessi è molto simile nelle due.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

I valori riportati in legenda variano da minimo di 0.2 a un massimo di 2.49 dS m⁻¹. La scala di colori utilizzata rappresenta classi di salinità analoghe a quelle presentate in tabella 1.1. Generalmente il suolo presenta una moderata salinità (da 0.4 a 1 dS m⁻¹). Sono comunque presenti in quantità ed estensioni considerevoli zone caratterizzate da una elevata concentrazione di sali (zone colorate di rosso).

Confrontando la mappa della salinità con quella della tessitura (fig 3.10) si può generalmente notare che le aree poco saline tendono a concentrarsi nei dei palealvei. Infatti dal punto di vista agronomico questo potrebbe derivare dal fatto che la sabbia, avendo un bassissima capacità di scambio cationico, abbia una scarsa capacità di assorbire e di trattenere la gli ioni Na⁺ i quali invece tendono a concentrarsi soprattutto nelle zone argillose in quanto, oltre essere assorbiti dai colloidali vengono dilavati più difficilmente dagli eventi piovosi e di irrigazione.

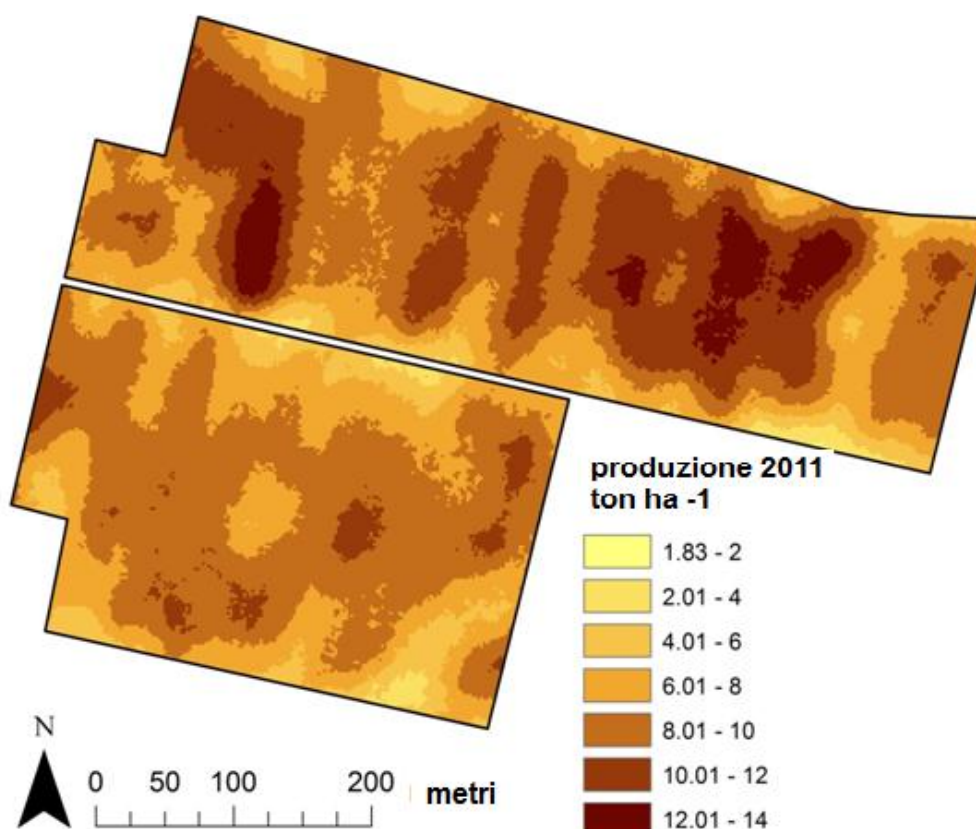


Fig 3.12; mappa della produzione per l'anno 2011

La figura 3.12 rappresenta la mappa di produzione di granella (t ha^{-1} s.s.) creata durante la mietitura in data 2 settembre 2011. Come è stato detto precedentemente la resa in granella è stata modesta (media 8.60 t ha^{-1} s.s. in un intervallo minimo e massimo dei valori di produzione pari 1.83 e 13.66 t ha^{-1} s.s.).

Anche in questa figura si riscontra un’elevata variabilità spaziale dei valori di resa all’interno dell’area di studio. L’area settentrionale ha valori di produzione visibilmente più elevati rispetto all’area meridionale. Infatti si può osservare che le aree più produttive sono situate nella parte nord del campo, in particolare nella zona centrale dell’appezzamento. Quest’area è geomorfologicamente definibile come paleoalveo, nonostante il tenore in sabbia, limo e argilla definisca questo suolo come frantumi. Durante la scaturitura del canale morto e del bacchiglione quest’area è stata utilizzata per depositare il terreno di riporto (prevalentemente limo e argilla), abbassando così il tenore in sabbia e garantendo maggiore ritenzione idrica al terreno.

Per interpretare al meglio la variabilità della produzione confrontiamo ora tale mappa con quelle della salinità e tessitura. Come si può notare, confrontando le tre mappe (fig 3.10, 3.11, 3.12) la modesta produzione è stata ottenuta nelle aree dove c’è elevata concentrazione salina e in corrispondenza dei paleoalvei dell’area a sud e il paleoalveo nell’area settentrionale, situato a nord ovest rispetto all’area. In altri termini la bassa resa viene riscontrata in tutte quelle zone dove, sia per la tossicità da sale che per carenza idrica, la coltura ha subito dei forti stress.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

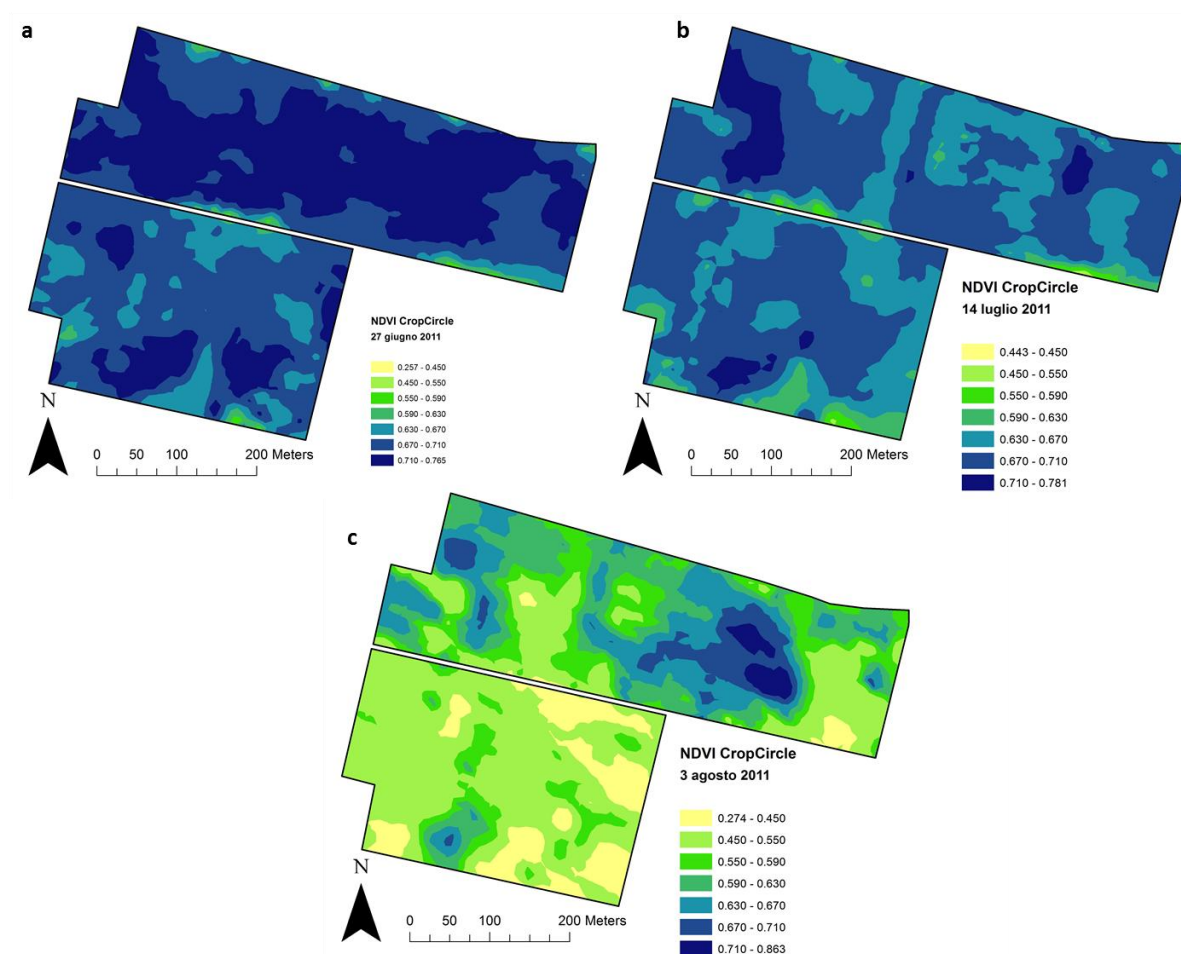


Fig 3.13; mappa di NDVI misurato a livello di campo mediante il CropCircle: a) 27giugno2011; b) 14 luglio2011; c) 3 agosto 2011

Le figure **3.13 a, b e c** rappresentano le mappe di NDVI relative ai rilievi effettuati con il CropCircle nelle tre date di campionamento.

Nella figura 3.13 a i valori di NDVI, rilevati in piena fioritura, sono generalmente alti nella parte nord e bassi nella parte a sud. È interessante poi notare che in entrambe le parti dell’area di studio sono presenti delle piccole zone (tendenti al verde) nelle quali si evidenzia già una forma di stress in atto.

Nella figura 3.13 b, Durante la maturazione cerosa, si può osservare una maggior eterogeneità dei valori di NDVI con l’ incremento di zone molto più chiare corrispondenti alle aree di maggior stress (salino e/o aree molto sabbiose). Infatti nella zona nord si vede che la parte centrale non risulta più colorata uniformemente come nel primo rilievo e ciò significa che durante il pieno periodo del caricamento della cariosside la pianta sia in fase di pieno stress ed è per questo motivo che i valori di NDVI diminuiscono.

Nella parte sud si assiste ad una dinamica simile, le zone precedentemente colorate con la tonalità blu scuro tendono a diminuire diventando sempre più chiare (valori di NDVI minori). In questo caso risulta possibile distinguere il comportamento della coltura situata nelle due zone ovvero maggior benessere delle piante nella parte nord rispetto ad un pessimo stato in quella sud nella quale già si evidenzia una maggiore crisi della coltura ai stress.

Nelle figura 3.13 c si riscontra un ulteriore abbassamento dei valori di NDVI. Gran parte delle zone che precedentemente erano caratterizzate da valori alti di NDVI (>0.67) si distinguono ora per valori molto bassi di NDVI (<0.55). Si può comunque notare la presenza di aree con valori elevati di NDVI, ad esempio nella parte nord-est.

Le tre mappe, in particolare quella relativa all’ultimo rilievo sembrano essere legate significativamente con la mappa di produzione. Infatti, già in tabella 3.5 si può notare come nei dieci punti di campionamento la resa sia significativamente correlata con il NDVI letto con il CropCircle.

Da queste considerazioni possiamo affermare che i valori di NDVI variano sia nel tempo che nello spazio.

Dal punto di vista temporale l’indice varia passando da un rilievo al successivo: durante la fase di accrescimento e di sviluppo vegetale la pianta riesce a tollerare meglio gli stress che caratterizzano l’ambiente, con la transizione di fase (passaggio da fase vegetativa a fase riproduttiva, il quale è particolarmente critico per sensibilità agli stress) i valori di NDVI diminuiscono con una velocità che dipende dal tipo e dal grado di stress presente. La dinamica della diminuzione dell’indice diminuisce drasticamente non solo in base allo stress salino o idrico ma anche in base alla progressiva senescenza che è geneticamente programmata. Ovviamente la velocità con cui la coltura senesce dipende molto dall’ambiente pedo-climatico in cui si trova a vivere la coltura.

Dal punto di vista spaziale possiamo affermare che i valori di NDVI variano in rapporto non solo con la salinità e stress generici ma anche in base alle caratteristiche fisiche del suolo; ad esempio la presenza dei paleoalvei, che influenzano la tessitura del suolo, determinano delle risposte della coltura diverse rispetto a quando la medesima coltura si trovi in suolo

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

con tessitura franca. Resta da chiarire il motivo per cui l’area meridionale si differenzi così sensibilmente dall’area settentrionale.

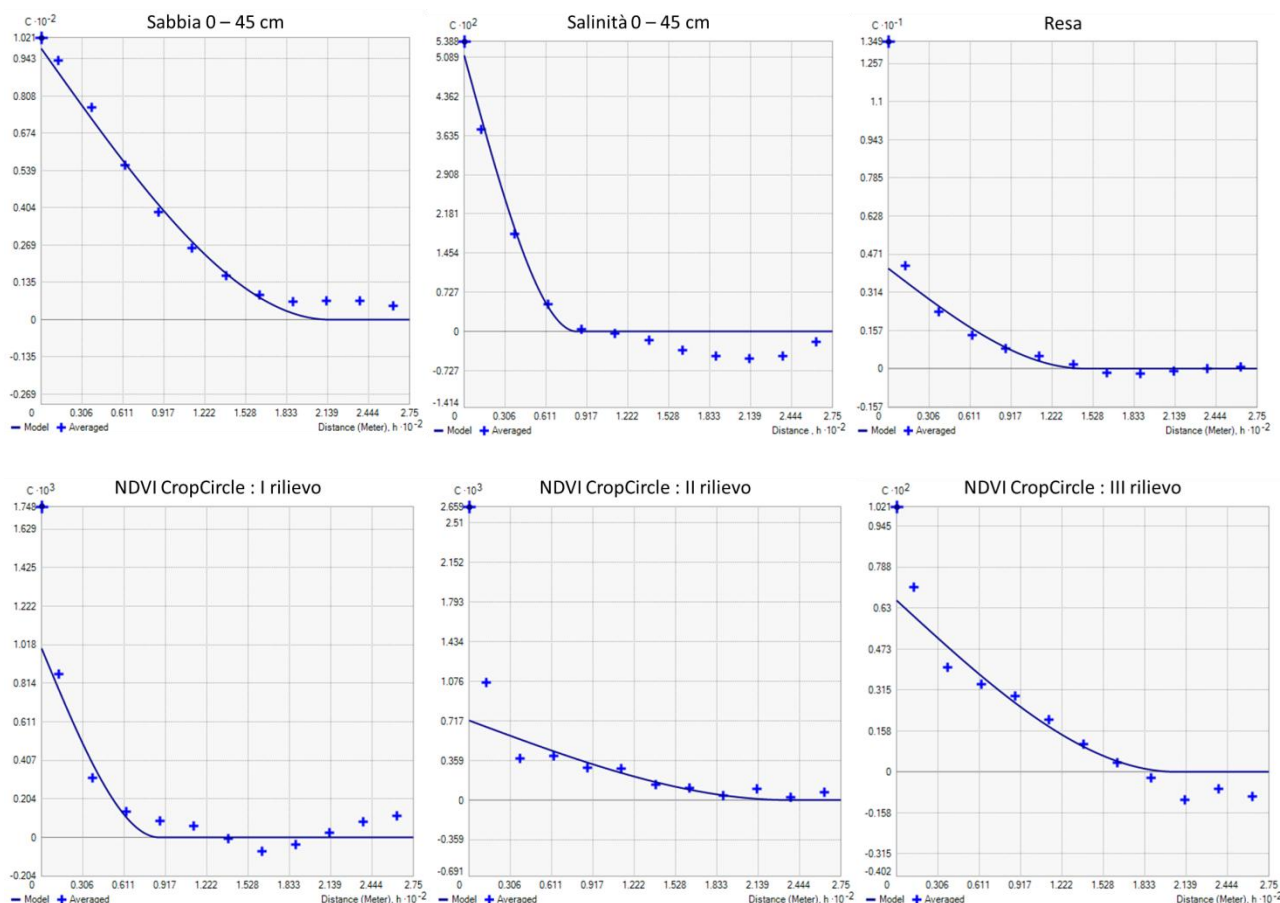


Figura 3.14. Grafici per la covarianza spaziale per sabbia (0-45cm), salinità (0-45 cm), resa e NDVI (da Crop Circle) nei tre rilievi. Tutte le variabili sono correlate spazialmente con loro stesse.

La figura 3.14 mostra la relazione spaziale delle variabili spaziali prese in esame in questa sezione. Tutti i covariogrammi mostrano le medie delle coppie considerate a ciascun lag e un modello che ne interpola l’andamento. In tutti i casi è stato impostato un lag di 25 m ed un range di 275 m. I dati sono stati interpolati con un modello sferico senza anisotropia e con nugget variabile di caso in caso.

Si può notare come per tutte le variabili sia presente una correlazione spaziale tra i dati. Tuttavia per alcune variabili questa relazione non è molto marcata, in particolare per la resa, in quanto la covarianza tra punti poco distanti tra loro è molto bassa rispetto.

La figura 3.10 mostra i cross-covariogrammi tra resa contro sabbia, salinità e i tre rilievi di NDVI e tra salinità e i tre rilievi di NDVI. La resa ha una correlazione spaziale negativa con la quantità di sabbia presente nel suolo e con la salinità del suolo (entrambe riferite allo strato 0-40 cm). Questa relazione negativa è particolarmente evidente nelle aree ad alta salinità e alto contenuto sabbioso come i paleoalvei. Dai grafici si può notare come la relazione tra resa e salinità sia più forte rispetto alla sua relazione spaziale con la quantità di sabbia. Infatti la cross-covarianza tra resa e salinità è circa quattro volte più grande di quella tra resa e sabbia quando le coppie di punti considerate si trovano a distanza minima. Ciò indica che, negli appezzamenti considerati, l’effetto della salinità è prevalente su quello dello stress idrico.

La resa si correla spazialmente in modo positivo ai tre rilievi di NDVI. In particolare, il secondo rilievo risulta avere la relazione spaziale più definita e più forte tra le tre. I grafici giustificano quindi l’uso dell’indice vegetativo per monitorare la variabilità spaziale della resa già nelle fasi di prefioritura, maturazione latte e maturazione fisiologica.

Al contrario di quanto mostrato per la stagione 2010 (Scudiero et al., 2011) nel 2011 l’indice NDVI non può essere usato per monitorare la variabilità spaziale della salinità del suolo. Nel 2010, un anno molto piovoso, la salinità del suolo era risultata essere il fattore principale che ha limitato la resa di granella. Nel 2011 lo stress idrico si sovrappone allo stress salino e l’NDVI, come evidenziato in precedenza, non riesce a discriminare tra queste due tipologie di stress. Ciò determina la perdita della correlazione spaziale tra salinità ed NDVI.

*“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”*

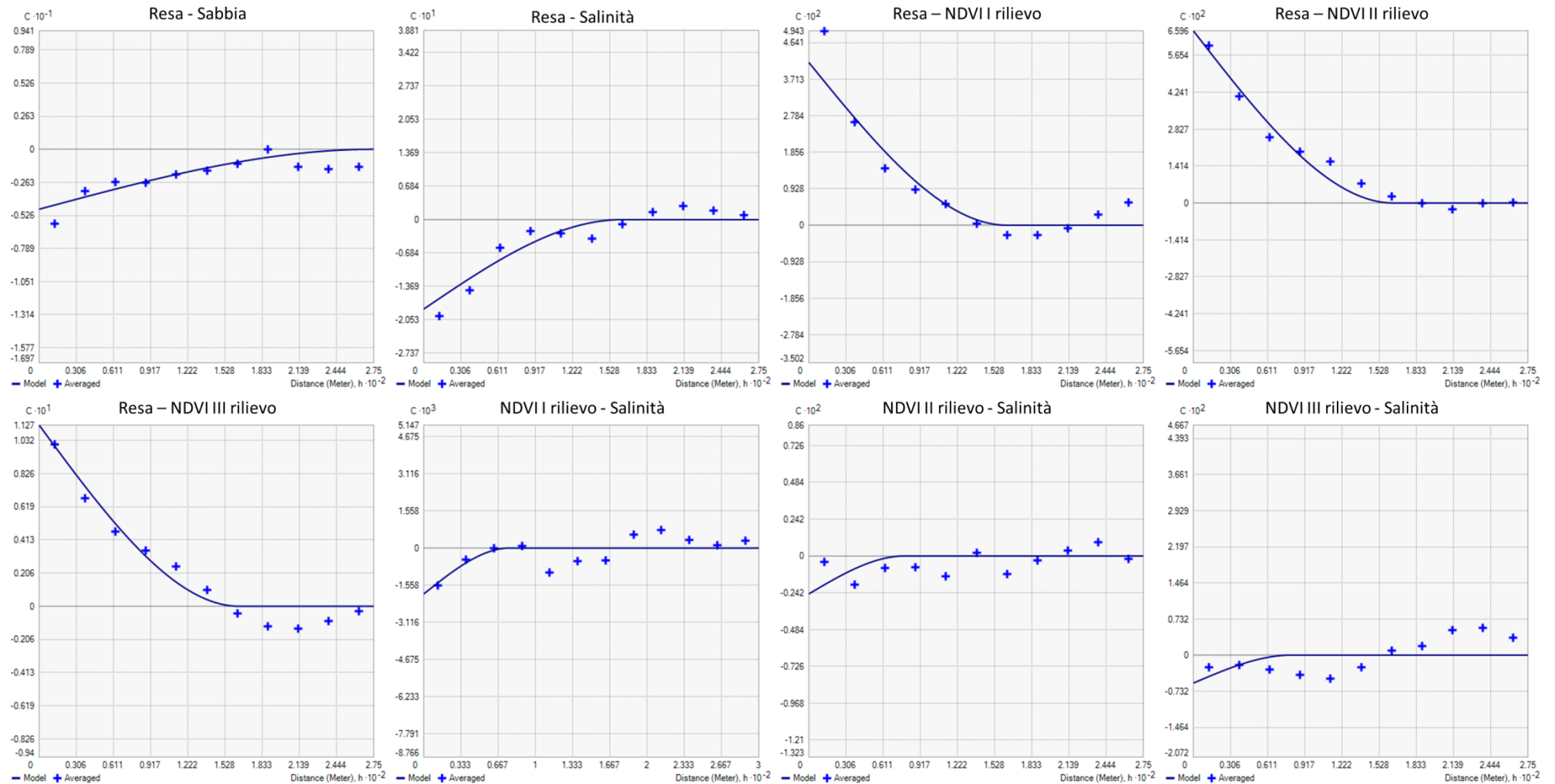


Figura 3.10. Diagrammi di cross-covarianza spaziale tra resa contro sabbia, salinità e i tre rilievi di NDVI; e tra la salinità e i tre rilievi di NDVI. I diagrammi indicano la presenza di una relazione spaziale negativa tra resa contro sabbia e salinità. Mostrano invece una relazione spaziale positiva tra la resa e i tre rilievi di NDVI. Non pare esserci invece alcuna relazione spaziale tra la salinità e i tre rilievi di NDVI.

4 CONCLUSIONI

Le caratteristiche chimico-fisiche del suolo nell’area di studio di Ca’ Bianca assumono valori molto eterogenei. Questa eterogeneità non è osservabile a livello spaziale in quanto all’interno dell’area si possono facilmente individuare macrozone con caratteristiche affini. L’area di studio non viene normalmente irrigata artificialmente, in quanto il livello di falda nell’area è controllato dall’attività di idrovore di bonifica che la mantengono alta nei mesi estivi. Tuttavia, il 2011 è stato un anno molto siccitoso, durante il quale si sono venute a creare delle condizioni di stress idrico nelle aree più sabbiose. La resa è stata quindi influenzata sia dallo stress idrico che dallo stress salino.

La concentrazione di sali è risultata generalmente minore nelle aree più sabbiose, per il prevalere di un effetto di dilavamento dello strato superficiale del terreno, dove però la coltura ha maggiormente sofferto per stress idrico. Il comportamento fisiologico del mais in aree soggette da stress salino e da stress idrico è stato molto simile e gli indici vegetativi impiegati non hanno permesso una discriminazione tra le due tipologie di stress. Essi hanno comunque mostrato correlazioni significative con la resa, in particolare l’indice SRVI a scala puntuale e l’indice NDVI a scala di campo. Tuttavia questi indici hanno mostrato basse correlazioni con le caratteristiche del suolo o le concentrazioni di ioni nell’apparato fogliare.

Si può concludere constatando che la salinità è stata la variabile principale nel limitare la resa del mais anche se l’insorgenza di stress idrico in alcune zone dell’area di studio ha determinato consistenti effetti sulla coltura di mais. In relazione all’andamento climatico particolarmente siccitoso non è stato possibile distinguere tra diversi tipi di stress nè a livello di proximal sensing nè tramite le analisi statistiche effettuate sui dati. Gli indici di proximal sensing usati, pur dimostrandosi dei validi indicatori di uno stato di stress generico della pianta, non paiono quindi in grado di discriminare tra tipi di stress diversi.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AGIP Mineraria (1962) - ***La Pianura Padano- veneta***. In voce: Italia, Geologia e Ricerca Petrolifera, Enciclopedia Petrologia e Gas Naturali, ENI, Ed. Colombo, Milano.
- Almansa M. S., Hernández J. A., Jiménez A., Botella M. A., Sevilla F., 2002. ***Effect of salt stress on the superoxide dismutase activity in leaves of Citrus limonum in different rootstock combinations***. Biol Plant 45: 545–549.
- Amdt S. K., Clifford S. C., Wanek W., Jones H. G., Popp M., 2001. ***Physiological and morphological adaptations of the fruit tree Ziziphus rotundifolia in response to progressive drought stress***. Tree Physiol 21: 705-715.
- ARTIOLI R., GALGARO G., FINZI E. & TOSI L. (1999) - ***Indagini geofisiche nel sottosuolo litoraneo di Chioggia. Atti del Convegno “Conoscenza e Salvaguardia delle Aree di Pianura - Il contributo delle Scienze della Terra-”***, Ferrara, 8-11 Novembre 1999, Sess. Poster 128-130.
- Baker N. R., Rosenqvist E., 2004. ***Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities***. J. Exp. Bot. 55:1607–1621.
- Baker N. R., 2008. ***Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo***. Annu. Rev. Plant Biol. 59: 89–113.
- Barbieri G., De Pascale S., 1992. ***Salinità dell’acqua di irrigazione e colture ortofloricole***. Colture Protette 2: 75-81.

“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”

- Belkhodja R., Morales F., Abadía A., Medrano H., Abadía J., 1999. ***Effects of salinity on chlorophyll fluorescence and photosynthesis of barley (Hordeum vulgare L.) grown under a triple-line-source sprinkler system in the field.*** Photosynthetica 36: 375–387.
- Biosalinity Awareness Project (B.A.P.), 2004. ***Soil, water and plants.***
- Carbognin L. and Tosi L., 2003. ***Il progetto ISES per l’analisi dei processi di intrusione salina e subsidenza nei territori meridionali delle province di padova e venezia.*** Istituto per lo studio della dinamica delle grandi masse. C.N.R. Venezia.
- Cramer G.R.& Lauchli A. (1986) ***Ion activities in solution in relation to Na^+ - Ca^{2+} interactions at the plasmalemma.*** Journal of Experimental Botany **37**, 321-330.
- De Franco R, Biella G, Tosi L, Teatini P, Lozej A, Chiozzotto B et al. 2009. ***Monitoring the saltwater intrusion by time lapse electrical resistivity tomography: The Chioggia test site (Venice Lagoon, Italy).*** Journal of Applied Geophysics;69:117-130.
- De Pascale S., Ruggiero C., Barbieri G., Maggio A., 2003 (a). ***Physiological response of pepper to salinity and drought.*** J. Amer. Soc. Hort. Sci. 128 (1): 48-54.
- De Pascale S., Maggio A., Ruggiero C., Barbieri G., 2003 (b). ***Growth, water relation, and ion content of field-grown celery (Apium Graveolens L. Var. Dulce (Mill.) Pers.) under saline irrigation.*** J. Amer. Soc. Hort. Sci. 128 (1): 136-143.
- Fagnano M., Quaglietta Chiarandà F., 2003. ***Relazione tra qualità dell’ambiente e produzione agricola.*** Atti del XXXV Convegno Società Italiana di Agronomia, Obiettivo Qualità Integrale: Il Ruolo della Ricerca Agronomica, Portici (NA), Italy: 40-56.

“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di *Zea mais* L.”

- F.A.O. & A.G.L., 2000(b). Introduction. ***In Global Network on Integrated Soil Management for Sustainable Use of Salt-affected Soils. Land and Plant Nutrition Management Service.*** Food and Agriculture Organization of United Nations/Land and Water Development Division. Website: www.fao.org/ag/agl/agll/spush
- Giardini L., 2002. ***Agrografia generale***. Patron editore, Bologna.
- Goyal, S.S., and Rains, D.W., 2003. ***Strategies for managing crop production. In Crop production in saline environment: Global and integrative perspectives.*** Goyal, S.S., Sharma, S. K., Rains, D. W. (eds). Food Products press. New York, U.S.A.
- Greenway H.&Munns R.(1980) ***Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes***. Annual Review of Plant Physiology **31**, 149-190.
- Greenway H. & Osmond C.B (1972) ***Salt responses of enzymes from species differing in salt tolerance***. Plant physiology **49**, 256-259.
- Julie C. Naumann. ***“Linking physiological responses, chlorophyll fluorescence and hyperspectral imagery to detect environmental stresses in coastal plants***. Virginia Commonwealth University Richmond, Virginia May 2008.
- Julie C. Naumann., D.R. Young, J.E. Anderson. ***“ Spatial variations in salinity stress across a coastal landscape using vegetation indices derived from hyperspectral imagery”*** 2009.
- Karthikeyan B., Jaleel C. A., Gopi R., Deiveekasundaram M., 2007. ***Alterations in seedling vigour and antioxidant enzyme activities in *Chataranthus roseus* under seed priming with native diazotrophs***. J. Zhejiang Univ Sci B **8**: 453-457.

“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”

- Istituto Nazionale di Economia Agraria “**Valutazione del rischio di salinizzazione dei suoli e di intrusione marina nelle aree costiere delle regioni Meridionali in relazione agli usi irrigui**” a cura di Rosario Napoli e Silvia Vanino INEA.
- Lauchli A. (1984) ***Salt exclusion: an adaptation of legumes for crops and pastures under saline conditions.*** In Salinity Tolerance in plants: Strategies for Crop Improvement (ed R.C. Staples), pp 171-187. Wiley, New York.
- Maas E. V., 1996. ***Plant response to salinity.*** 4th National Conference and workshop on the Productive Use and Rehabilitation of Saline Lands, Published by Promaco Conventions PTY LTD, Albany Western Australia.
- .
- Maas E. V., Grattan S. R., 1999. ***Crop salt tolerance. In Agricultural drainage.*** Americ. Soc. Agron. Monogr., 38: 55-108.
- Kovda V. A., 1977. ***Arid land irrigation and soil fertility: problems of salinity, alkalinity, compaction. Arid Land Irrigation in Developing Countries.*** Pergamon Press, Oxford.
- Ministero Delle Politiche Agricole, 1997. ***Metodi di analisi fisiche del suolo.***
- Mishra S. K., Dogra J. V. V., Singhal G. S., 1993. ***Influence of high salt on protein contents and lipid peroxidation and their interaction with high photon flux density on isolated chloroplasts of mustard.*** J Plant Biochem Biotech 2: 39–42.

“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”

- Morales F., Abadía A., Abadía J. (2008). **Photoinhibition and Photoprotection under Nutrient Deficiencies, Drought and Salinity.** In “**Photoprotection, Photoinhibition, Gene Regulation and Environment**” di Demming-Adams B., Adams III W. W., Mattoo A.K. (© Springer Science+Business Media B.V.). Capitolo 6: 65-85.
- Mugnai S., 2004. **Elementi di ecofisiologia vegetale.** In Quaderno A.R.S.I.A. Toscana 5/2004. Uso razionale delle risorse nel florovivaismo: l’acqua. Capitolo 4: 35-47.
- Munns, R., 1999. **The impact of salinity stress.** The Foundation for Sustainable Agriculture – Coping with Plant Environment Stress.
- Munns R.& Rawson H.M. (1999) **Effect of salinity on salt accumulation and reproductive development in the apical meristem of wheat and barley.** Australian Journal of Plant Physiology **26**, 459-464.
- Munns, R., 2002(a). **Comparative Physiology of salt and water stress. Plant, Cell and Environ.** **25**, pp. 239-250.
- Munns R. & Tester M., 2008. **Mechanisms of Salinity Tolerance.** Annu. Rev.Plant Biol. 2008. **59**, pp. 651-81.
- Passiora J.B. & Munns R. (2000) **rapid environmental changes that affect leaf water status induce transient surges or pauses in leaf expansion rate.** Australian Journal of Plant Physiology **27**, 941-948.

“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di *Zea mais* L.”

- Piccolo A., Mbagwu J. S. C., 1999. ***Role of Hydrophobic Components of Soil organic Matter in Soil Aggregate Stability***. Soil Science Society of American Journal, 63, pp.1801 – 1810.
- Powles S. B., 1984. ***Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light***. Annu Rev Plant Physiol 35: 15-44.
- Raven J.A.(1985) ***regulation of osmolarity in vascular plants: a cost-benefit analysis in relation of efficiency of use of energy, nitrogen and water***. New Phytologist 101, 25-77
- Rawson H. M., 1986. ***Gas exchange and growth in wheat and barley grown in salt***. Aust J Plant Physiol **13**, pp. 475–489.
- Rhoades J. D., Chanduvi F., Lesch S., 1999. ***Soil salinity assessment. Method and interpretation of electrical conductivity measurement***. FAO, irrigation and drainage paper.
- Rouse, J.W., 1974. ***Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation***. NASA/GSFC, type III, Final Report, Greenbelt, MD, pp. 371.
- Saxton K. E., Rawls W. J., 2006. ***Soil water estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions***.
- Schulze E. D., Hall A. E., 1982. ***Stomatal responses to water loss and CO₂ assimilation rates in plants of contrasting environments***. In: Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H (eds) Encyclopedia of plant physiology. Physiological plant ecology, vol 12B. Springer-Verlag, Berlin: 181–230.

“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”

- Scudiero, E.; Braga, F.; Teatini, P.; Piragnolo, D. ; Berti, A.; Morari, F. (2011). **“Saltwater contamination in the Venice Lagoon margin, Italy. 2: the influence on soil productivity. First results”**. The Wageningen Conference on Applied Soil Science, September 18-22, 2011. Wageningen, Olanda.
- Seeling B. D., 2000. ***Salinity and sodicity in North Dakota Soils***. NDSU Extension Service and North Dakota State University.
- Sequi, P., 1989. ***Chimica del suolo***. Patron Editore. Bologna, Italia, pp. 406-413.
- Shao H. B., Chu L. Y., Jaleel C. A., Zhao C. X., 2008. ***Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants***. C R Biologies 331: 215-225.
- Sharma P. K, Hall D. O., 1991. ***Interaction of salt stress and photoinhibition on photosynthesis in barley and sorghum***. J Plant Physiol 138: 614-619.
- Shannon, M., 1997. ***Adaptation of plants to salinity***. Advances of Agronomy, 60, pp. 5-120.
- Sifola M. I., De Pascale S., Romano R., 1995. ***Analysis of quality parameters in eggplant grown under saline water irrigation***. Acta Hort 412: 176-184.
- Sonia Cacini., Dottorato di Ricerca in Ortoflorofrutticoltura XXII Ciclo. ***Valutazione dell’efficienza d’uso dell’acqua in nuove specie ornamentali per ambienti urbani***
- Storey R.& Walker R.R. (1999) ***Citrus and salinity***. Scientia Horticulturae **78**, 39-81.

“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di Zea mais L.”

- Storey R. & Wyn Jones R.G. (1978) ***salt stress and comparative physiology in the gramineae. Ion relations of two salt- and water-stressed barley cultivars, California Mariout and Arimar***. Australian Journal of Plant Physiology **5**, 801-816.
- Teatini, P. et al. (2007). “***Assessing short- and long-time displacements in the Venice coastland by synthetic aperture radar interferometric point target analysis***”. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 112, F01012.
- Tanji, K. K., 2002. ***Salinity in the soil environment. In salinity: environment- Plants-Molecules***. Läuchli, A., Lüttge, U. (eds). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (The Netherlands), pp. 21-52.
- Umali, D., 2003. Irrigation – ***induced salinity: A growing problem for development and environment***. World Bank Technical Paper number 215.
- Van Groenigen JW, Siderius W and Stein A., 1999 ***Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the kriging variance***. Geoderma;87:239-259.
- Walinga, I., Van Der Lee, J., Houba, V. J. G., Van Vark, V., Novazamsky, I., Warrence, N. J., Bauder, J. W., Pearson, K. E., 2002. ***Basics of salinity and sodicity effects on soils physical properties***. Department of Land Resources and Environmental Sciences, Montana State University-Bozeman.
- Yeo A.R (1983) ***Salinity resistance: Physiologies and princes***. Physiologia Plantarum **58**, 214-222.

“La contaminazione salina nel margine della Laguna di Venezia:
l’influenza sulla produttività di *Zea mais* L.”