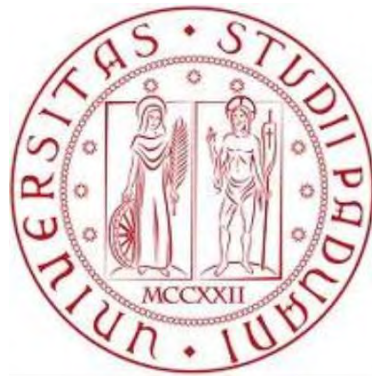


UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO ICEA
INGEGNERIA CIVILE EDILE ED AMBIENTALE



TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

MODELLAZIONE DELL'INTERAZIONE SUOLO-
ACQUA-VEGETAZIONE-ATMOSFERA IN
CONDIZIONI DI SUOLO SALINO

Relatore: Prof. Ing. Nadia Ursino

Laureando: Cristian Cecchetto ----- Matricola n° 1019873

Anno Accademico
2013-2014

INTRODUZIONE

Nell'ambito delle problematiche legate all'eco-idrologia lo studio degli ecosistemi in cui l'acqua scarseggia è di particolare rilevanza. Temperatura atmosferica, intensità durata e frequenza delle precipitazioni, composizione del terreno, rappresentano fattori di cruciale importanza per la sopravvivenza della vegetazione, poiché ne condizionano la germinazione, l'accrescimento e la sopravvivenza.

Il problema della salinità del suolo in relazione alla crescita delle colture è noto nell'ambito delle scienze agrarie e della fisica del suolo tuttavia la gestione dei suoli sabbiosi è spesso effettuata sulla base di pratiche consolidate ma non supportate dall'analisi dei processi fisici e biologici in atto.

La presenza di sali nel terreno rende l'acqua del suolo meno accessibile per le piante. In particolare, nei terreni argillosi con un rilevante contenuto di minerali di smectite, la presenza di sali provoca un rigonfiamento della massa solida, una diminuzione della permeabilità ed un'ulteriore causa di stress per la vegetazione. Paradossalmente, anche se il contenuto idrico del sistema aumenta, l'effetto complessivo risulta dannoso per la vegetazione.

Inoltre, concentrazioni spinte di alcuni sali risultano tossiche per alcuni tipi di piante, impedendone ogni tipo di sviluppo.

Per un recupero della potenzialità produttiva, il terreno deve essere dilavato. Tuttavia reperire risorse per l'irrigazione può essere di per se difficile nelle zone più sensibili alla salinizzazione del suolo dove il clima è arido o semi-arido e l'acqua non può e non deve essere sprecata.

In sostanza quindi, il problema della salinità, legato principalmente alla pratica agricola, si traduce in un problema di gestione dell'acqua e di bilancio idrico nel suolo. E' a questo punto dunque che assume importanza lo studio oggetto di questa trattazione. L'elaborato, attraverso una corretta

modellazione matematica delle interazioni suolo-acqua-vegetazione-atmosfera, ha l'obiettivo di spiegare e riesaminare pratiche agricole consolidate.

Sono state esaminate la fase di coltura e la situazione a riposo o 'maggese' con crescita di vegetazione spontanea. Il volume di controllo è definito da una superficie di area unitaria avente la profondità competente all'apparato radicale della vegetazione. La quantità d'acqua che entra nel sistema dipende dalla precipitazione, la quale viene opportunamente simulata in base alle caratteristiche climatiche del sito. La perdita d'acqua del sistema, intesa come somma tra il contributo di evapotraspirazione e quello di percolazione, viene trattata in maniera distinta nella porzione di terreno vegetata e in quella a suolo nudo. L'evapotraspirazione viene trattata con una funzione che dipende dall'umidità del suolo, opportunamente corretta in relazione al tipo di vegetazione considerato e al valore della concentrazione salina presente nella soluzione liquida del terreno.

Le due fasi, vengono prima studiate separatamente, poi alternate.

Durante il periodo coltivato, l'irrigazione viene attivata per controllare l'umidità relativa e la concentrazione salina presenti. Nella fase a riposo invece, il bilancio idrico del suolo viene regolato esclusivamente dall'apporto meteorico e dai termini di perdita presenti nell'equazione di stato.

Lo studio fornisce dati utili per la scelta di un particolare tipo di coltura piuttosto di un altro, fornisce dunque elementi quantitativi sulla base dei quali effettuare scelte produttive e di gestione. La cui rilevanza è evidente se si pensa che l'agricoltura consuma più del 70% dell'acqua globalmente usata, e che tale percentuale arriva fino al 95% nei paesi in via di sviluppo.

INDICE

1.	<i>SALINITÀ NEL SUOLO E TECNICHE DI GESTIONE</i>	<i>Pag. 6</i>
2.	<i>MODELLO ECO-IDROLOGICO.....</i>	<i>Pag. 14</i>
2.1.	<i>Modello di evoluzione della concentrazione salina</i>	
3.	<i>CALIBRAZIONE E SCELTA DEI PARAMETRI</i>	<i>Pag. 25</i>
3.1.	<i>Test sul modello di dilavamento</i>	
4.	<i>STIME E PREVISIONI DAL MODELLO.....</i>	<i>Pag. 31</i>
4.1.	<i>Studio del rendimento produttivo di varie colture</i>	
4.2.	<i>Gestione della salinità con irrigazione programmata</i>	
4.3.	<i>Simulazione di cicli produttivi successivi</i>	
5.	<i>CONCLUSIONI.....</i>	<i>Pag. 56</i>
	<i>Parametri e variabili del modello.....</i>	
	<i>Codice di calcolo in linguaggio FORTRAN.....</i>	
	<i>Bibliografia.....</i>	

1. SALINITA' NEL SUOLO E TECNICHE DI GESTIONE

Un terreno si dice salino quando la concentrazione di sali presenti è tale da condizionare le proprietà chimico-fisiche del suolo, lo sviluppo della vegetazione e la qualità dell'acqua in esso contenuta.

Dal momento che la presenza di sali può ridurre in modo sostanziale il valore economico e la produttività di un terreno, capire come individuare e gestire i problemi di salinità è una questione di notevole rilevanza.

Un sale è un componente solubile in acqua che nel suolo è composto da ioni di calcio, magnesio, sodio, potassio, cloro. Può svilupparsi dal dilavamento dei minerali contenuti nel terreno o può essere trasportato e depositato dal vento o dall'acqua.

I problemi di salinità sono più frequenti in zone con clima arido e semi-arido, dove l'apporto meteorico non è sufficiente al dilavamento del sale dal suolo.

Il processo di salinizzazione è più spinto dove il terreno contiene notevoli quantità di minerali solubili, dove il drenaggio è limitato, dove l'acqua ristagna ed evapora e dove è presente una risalita di acqua salata dalla falda.

La salinizzazione può essere anche indotta dalle pratiche dell'uomo, per esempio quando l'acqua di irrigazione contiene alti livelli di sali disciolti oppure attraverso l'impiego di concimi e fertilizzanti.

La presenza di sali nel suolo e nell'acqua può essere valutata misurando la salinità e il contenuto di sodio.

Tralasciando la parte riguardante il contenuto di sodio, in quanto non oggetto di studio in questa trattazione, la salinità è misurata con la conducibilità elettrica (*Electrical conductivity EC*), ottenendo una stima della concentrazione di sali solubili in una soluzione liquida di terreno dalla misura della resistenza del mezzo al passaggio di corrente elettrica. La capacità di una soluzione di condurre corrente elettrica risulta crescente

all'aumentare del contenuto di sali, da cui un elevato valore di *EC* corrisponde ad un valore elevato di salinità. *EC* è generalmente misurato in deciSiemens per metro [dS/m]. È possibile quantificare la salinità della soluzione liquida del terreno anche in termini di solidi totali disciolti (Total dissolved solids *TDS*). *TDS*, misurato in milligrammi per litro [mg/l] può essere determinato direttamente in laboratorio o stimato a sua volta dal valore di *EC*, semplicemente moltiplicando *EC* per 640.

In funzione del valore di *EC* della soluzione liquida del suolo, del *pH* e di altre grandezze caratterizzanti la presenza e la capacità di assorbimento di ioni di sodio (Exchangeable sodium percentage *ESP*, Sodium adsorption ratio *SAR*) un terreno può essere classificato come salino, sodico o sodico-salino.

Focalizzando l'attenzione sui terreni salini, da uno studio condotto dal *Montana State University [1]*, si può definire tale un suolo avente valore di *EC* maggiore di 4 dS/m, *pH* inferiore a 8.5, *SAR* ed *ESP* inferiori rispettivamente a 12 e 15.

Un suolo salino può contenere anche sali non solubili come carbonati di calcio e magnesio, i quali, pur non influenzando il valore di *EC*, formano delle croste bianche sulla superficie del terreno che diventano quindi chiari indicatori di salinizzazione in atto.



FIGURA 1- CROSTA BIANCA SULLA SUPERFICIE DEL TERRENO, INDICE DI SALINIZZAZIONE DEL SUOLO

Un altro fenomeno indice di salinizzazione del suolo è la formazione di crepe più o meno estese e ramificate sulla superficie del terreno. Questo fenomeno è evidente in terreni argillosi con elevato contenuto di minerali di smectite. In tali condizioni, alte concentrazioni di sale provocano un aumento della retentività del suolo con globale rigonfiamento della matrice solida, a fronte di un affinamento della porosità e un calo della conducibilità idraulica del terreno. Tale effetto potrebbe essere interpretato in modo positivo specialmente in zone aride poiché l'umidità del suolo risulta in qualche modo trattenuta. In realtà, l'acqua pur presente nella matrice solida risulta tuttavia adsorbita a livello microscopico tra le lamelle di argilla risultando perciò più difficile da captare per le piante. La formazione di crepe deriva dal processo di essiccamento di tali terreni, i quali sottoposti a continui rigonfiamenti e ritiri si danneggiano, aprendo fessure che diventano vie preferenziali di infiltrazione dell'acqua meteorica. Un terreno argilloso perde totalmente la sua capacità produttiva quando queste fessure raggiungono profondità tali per cui l'acqua filtra rapidamente dallo strato superficiale a quello profondo senza incrementare l'umidità del suolo nella zona interessata dall'apparato radicale della vegetazione.

La salinità di un terreno condiziona perciò la quantità d'acqua contenuta in un terreno e la capacità delle piante di captare tale risorsa.

L'eccesso di sali nella zona dell'apparato radicale della vegetazione riduce la quantità d'acqua disponibile per le piante le quali devono spendere maggiore energia per captare acqua pura ed escludere i sali. L'effetto di questo processo è uno stress osmotico per la vegetazione che provoca riduzione della germinazione, essiccamento della foglia, appassimento e morte.

In ogni caso, un aumento di salinità provoca una riduzione dello stato di salute della vegetazione e una perdita di produttività del terreno.

Nei terreni agricoli soggetti al fenomeno di salinizzazione risulta necessario un intervento di controllo e gestione della salinità al fine di mantenere elevato il rendimento produttivo del suolo stesso. Molteplici sono le cause che possono attivare il processo di salinizzazione, per cui prima di attuare tecniche di gestione e controllo del suolo è necessario determinare il tipo di problema ed identificarne le cause.

Se problemi di salinità sono sospetti o probabili, campioni di acqua e terreno devono essere raccolti su base annua e studiati in relazione alle grandezze *EC*, *SAR* o *ESP* e *pH*. Altri parametri quali quantità di materia organica, percentuale di argilla e presenza di calce possono essere utili per lo studio del problema.

Nonostante possa essere difficile identificare origini e cause del processo di salinizzazione, soprattutto quando più fattori sono coinvolti, è comunque necessario raccogliere più informazioni possibili sull'area affetta dal problema. Possono essere molto utili informazioni relative all'uso terreno nella storia, alla geologia locale, alla locazione dell'area in riferimento al territorio circostante e all'origine dell'acqua che bagna il suolo in esame.

Dopo aver determinato il problema e le sue cause, occorre stabilire il piano di gestione. La scelta di come gestire un suolo salino e quali tecniche impiegare dipende da molti fattori quali ad esempio il sistema di coltura, la disponibilità di acqua e i costi.

Se la salinità non è spinta in modo tale da ridurre il rendimento produttivo dell'area, sforzi di bonifica non risultano economici. Prevenire un incremento ulteriore di salinità coltivando per esempio specie tolleranti alla salinità o utilizzando il suolo in modo alternativo può essere in queste situazioni la scelta migliore.

Le pratiche consolidate in ambito agrario per la gestione dei suoli agricoli salini sono essenzialmente tre: bonifica completa del suolo, controllo della salinità con irrigazione programmata o prevenzione dell'incremento di

salinità con l'utilizzo di colture tolleranti al sale. Esse sono attuate rispettivamente per stati di salinizzazione decrescenti.

Per suoli salini con contenuti di sale tali da danneggiare in modo significativo la crescita delle colture, è necessaria una bonifica completa del suolo mediante dilavamento con una notevole quantità d'acqua pura, garantendo inoltre un adeguato drenaggio. La bonifica deve essere eseguita nel periodo di riposo del terreno, in autunno al termine della stagione produttiva o in primavera prima della fase di semina o piantumazione delle colture. L'acqua per la bonifica e il dilavamento del suolo può essere fornita mediante irrigazione per aspersione o per scorrimento superficiale, meglio se in condizioni di terreno non saturo che permette un buon drenaggio dagli strati superficiali a quelli profondi.

Per evitare la saturazione del suolo e ottimizzare il processo di dilavamento, l'acqua deve essere fornita in una serie di applicazioni, permettendo il completo drenaggio tra applicazioni successive. Per questo motivo, l'irrigazione per aspersione risulta sicuramente più efficace.

La quantità d'acqua necessaria alla bonifica dipende dallo stato iniziale del suolo, dal livello di salinità desiderato alla fine del processo, dalla qualità dell'acqua fornita, dal metodo di applicazione e dalle caratteristiche della matrice del suolo.

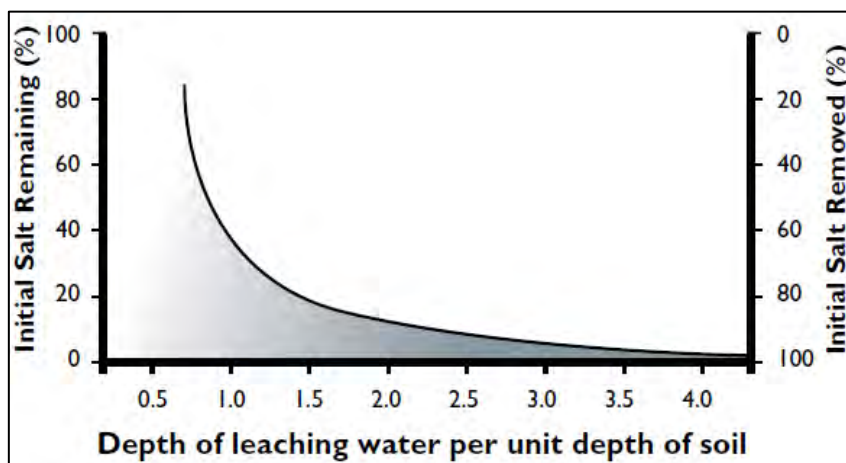


FIGURA 2 – PERCENTUALE DI SALE RIMOSSO DAL SUOLO IN FUNZIONE DEL VOLUME DI DILAVAMENTO (Salinity & Sodicity Management [1])

La figura 2 mostra la profondità d'acqua di dilavamento per unità di profondità di terreno necessaria per rimuovere una determinata percentuale di sale in soluzione. In generale, sono richiesti almeno 30 cm d'acqua per rimuovere il 75 % del sale in soluzione nei primi 30 cm di suolo.

Un'irrigazione intermittente per aspersione permette tuttavia di ridurre di un terzo tale quantità.

I terreni argillosi e limosi, a causa della loro alta retentività, richiedono una quantità d'acqua per il dilavamento maggiore rispetto ai terreni sabbiosi.

Test periodici su campioni di terreno sono comunque necessari per verificare e controllare il processo di dilavamento e l'adeguata bonifica del sito.

Dove possibile, l'irrigazione può essere usata in modo continuo per mantenere la salinità del suolo a livelli tali per cui la vegetazione possa mantenere il massimo rendimento, applicando una quantità d'acqua in eccesso rispetto al fabbisogno idrico della coltura al fine di favorire un dilavamento dello strato interessato dall'apparato radicale delle colture dal sale. La quantità d'acqua LR che deve essere fornita in eccesso per mantenere la salinità ad un livello sostenibile per le colture, può essere stimata dalla seguente relazione (*Salinity & sodicity Management [1]*):

$$LR = \frac{EC_{iw}}{5EC_{th} - EC_{iw}}$$

dove EC_{iw} e EC_{th} sono rispettivamente la conducibilità elettrica dall'acqua di irrigazione e quella limite dell'acqua nel suolo tale per cui il rendimento della coltura sia massimo.

Tale quantità d'acqua, necessaria per il dilavamento del sale si deve sommare al fabbisogno idrico specifico della specie coltivata per determinare la quantità d'acqua totale necessaria a mantenere massima la produttività del sito.

Nella aree dove non risulta possibile o economico dilavare il suolo dal sale tramite irrigazione, la coltivazione di specie in grado di svilupparsi anche a livelli di salinità moderati, può essere una soluzione pratica ed economica per mantenere in qualche modo produttiva una determinata superficie.

Come più volte detto, un aumento di salinità del suolo causa un calo di rendimento per qualsiasi tipo di coltura, tuttavia alcune specie sono più tolleranti di altre.

La tolleranza di un determinato tipo di vegetazione al sale è difficilmente quantificabile, dipende infatti da più fattori quali ad esempio il tipo di sale, il clima, l'età della pianta e le condizioni del suolo.

<i>Coltura</i>	<i>EC_{th}</i>	<i>Coltura</i>	<i>EC_{th}</i>
<i>Cotone</i>	<i>7.7</i>	<i>Soia</i>	<i>5</i>
<i>Grano</i>	<i>6</i>	<i>Pomodoro</i>	<i>0.9-2.5</i>
<i>Mais</i>	<i>1.7</i>	<i>Patata</i>	<i>1.7</i>
<i>Orzo</i>	<i>8</i>	<i>Fagioli</i>	<i>1</i>
<i>Alfalfa</i>	<i>2</i>	<i>Cipolla</i>	<i>1.2</i>
<i>Barbabetola</i>	<i>7</i>	<i>Pesco</i>	<i>1.7</i>
<i>Canna da zucchero</i>	<i>1.7</i>	<i>Arancio</i>	<i>1.7</i>

TABELLA 1 – VALORI INDICATIVI DI EC_{th} DI ALCUNE COLTURE AGRICOLE (valori tratti da FAO Irrigation and drainage paper n° 56 [2])

	<i>Tolleranti</i>	<i>Poco tolleranti</i>	<i>Poco sensibili</i>	<i>Sensibili</i>
	<i>Orzo</i>	<i>Avena</i>	<i>Mais</i>	<i>Fagiolo</i>
<i>Colture</i>	<i>Barbabetola</i>	<i>Soia</i>	<i>Patata</i>	<i>Lenticchia</i>
	<i>Triticale</i>	<i>Grano</i>	<i>Lino</i>	<i>Cipolla</i>

TABELLA 2 – TOLLERANZA AL SALE DI ALCUNE COLTURE (Salinity & Sodicity Management [1])

In generale, piante perenni come alcuni tipi di foraggi hanno la più alta tolleranza alla salinità, mentre i legumi sono tipicamente le specie più sensibili. Sebbene alcune piante possano tollerare alti livelli di *EC*, crescita sviluppo e rendimento sono comunque influenzati dall'aumento della salinità anche per le specie considerate tolleranti.

Nella scelta del tipo di coltura si deve tenere presente che la tolleranza di una pianta al sale varia durante la stagione produttiva. Per esempio, orzo e barbabietola sono sensibili nella fase di germinazione, diventano invece tolleranti nella maturità.

Il tasso di germinazione nei terreni salini è più basso rispetto a quello nei terreni non affetti da salinità, di conseguenza la quantità di semi deve essere incrementata al fine di ottenere la stessa densità di coltura.

Il periodo migliore per la semina di un foraggio o per la copertura del suolo con una coltura è l'autunno avanzato o il periodo senza neve durante l'inverno. In questo modo la germinazione avviene all'inizio della primavera quando il contenuto di sale risulta diluito per l'elevata umidità del suolo accumulata durante l'inverno.

Come si può dedurre da questo capitolo, il problema della salinizzazione di un suolo è ben noto, e molteplici sono le possibilità di intervento per mantenere adeguato il livello produttivo di un'area soggetta a tale problema. Tuttavia, nella maggior parte dei casi, gli interventi di gestione di un suolo salino sono più fondati su pratiche consolidate che non su un'analisi dei processi fisici e chimici che avvengono all'interno dello strato di suolo interessato dall'apparato radicale delle piante.

Attraverso una corretta modellazione delle interazioni suolo-acqua-vegetazione-atmosfera, questo studio ha lo scopo di dare un'impostazione più teorica alle tecniche di gestione di un suolo salino, fornendo allo stesso tempo sia un mezzo per la verifica delle pratiche agricole consolidate che uno strumento di ricerca per metodi di gestione integrativi o alternativi.

2. MODELLO ECOIDROLOGICO

Il modello sviluppato in questo studio si basa sulla soluzione di tre equazioni differenziali che descrivono la variazione nel tempo dell'umidità relativa del suolo (s), della frazione di terreno coperta da vegetazione (b) e della concentrazione salina nella soluzione liquida del terreno (c):

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{nZ_R} [R + Irr - E - L] \quad (2.1)$$

$$\frac{db}{dt} = gb(1 - b) - \mu b \quad (\text{vegetazione spontanea}) \quad (2.2)$$

$$\frac{db}{dt} = 0 \quad (\text{colture})$$

$$\frac{dc}{dt} = f(c) \quad (2.3)$$

L'equazione 2.1, ricavata dal modello di *Laio et al.[3]*, fornisce l'evoluzione dell'umidità del suolo alla scala temporale giornaliera, dove s è l'umidità relativa del terreno mediata sulla profondità Z_R che interessa l'apparato radicale delle piante.

I termini al secondo membro rappresentano rispettivamente il volume d'acqua in ingresso nel sistema ($R + Irr$) e il volume perso per evapotraspirazione (E) e infiltrazione profonda (L).

La porosità n del suolo e la profondità Z_R dell'apparato radicale della vegetazione sono assunte costanti.

Come nel modello di *M. Baudena et al.[4]*, il termine di accumulo viene considerato come rapporto tra il volume d'acqua acquisito e il volume nZ_R disponibile per l'acqua nella matrice del suolo.

Si introduce perciò l'indice di infiltrazione I , il quale dipende dal contenuto idrico del suolo secondo lo schema di seguito proposto:

$$I(s) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{r}{n z_R} & \text{se } \frac{r}{n z_R} < 1 - s \\ 1 - s & \text{se } \frac{r}{n z_R} \geq 1 - s \end{array} \right\} \quad (2.4)$$

In questo modo, se l'apporto meteorico giornaliero r è superiore al volume d'acqua che può essere assorbito dal suolo, l'acqua in eccesso viene persa per scorrimento superficiale. Quando l'irrigazione viene attivata, all'indice di infiltrazione I così calcolato si somma il contributo irrigato.

Le precipitazioni tipiche di un clima arido o semi arido sono scarse, intermittenti e sporadiche. Per rendere questa trattazione più generale, i valori di precipitazione giornaliera e il tempo di inter arrivo fra gli eventi vengono generati in modo automatico, trasformando un campione di numeri casuali in due serie aventi distribuzione esponenziale. Adattando opportunamente il parametro di ciascuna serie, il quale rappresenta rispettivamente l'intensità media di precipitazione giornaliera λ [mm/gg] e il tempo medio di inter arrivo tra gli eventi ψ [gg], si può comporre un campione di altezze di precipitazione giornaliera. Se gli eventi di precipitazione risultano scarsi e sporadici, come peraltro richiesto, essi possono essere considerati statisticamente indipendenti, e il campione generato automaticamente simula l'apporto meteorico reale di un sito arido o semi-arido.

Per quanto riguarda i termini di perdita, come nel modello di *M. Baudena et al.*[4], viene fatta una distinzione tra le perdite nella frazione di terreno vegetato X_b e quelle nella frazione a suolo nudo X_o :

$$X_b(s) = [E(s) + L(s)] \quad (2.5)$$

$$X_o(s) = [E_o(s) + L(s)] \quad (2.6)$$

In entrambe le porzioni di terreno, il volume d'acqua che viene perso dal volume di controllo dipende dall'umidità relativa del terreno stesso.

L'espressione completa dei termini di perdita in funzione di s diventa :

$$X_b = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{per } s < s_H \\ E_W \frac{s - s_H}{s_W - s_H} & \text{per } s_H < s \leq s_W \\ E_W + (E_M - E_W) \frac{s - s_W}{s^* - s_W} & \text{per } s_W < s \leq s^* \\ E_M & \text{per } s^* < s \leq s_C \\ E_M + K \frac{e^{\beta(s-s_C)} - 1}{e^{\beta(1-s_C)} - 1} & \text{per } s_C < s \leq 1 \end{array} \right\} \quad (2.7)$$

$$X_o = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{per } s < s_H \\ E_W \frac{s - s_H}{s_W - s_H} & \text{per } s_H < s \leq s_C \\ E_W \frac{s_C - s_H}{s_W - s_H} + K \frac{e^{\beta(s-s_C)} - 1}{e^{\beta(1-s_C)} - 1} & \text{per } s_C < s \leq 1 \end{array} \right\} \quad (2.8)$$

s_H, s_W, s^*, s_C sono dei valori caratteristici di s definiti rispettivamente come punto igroscopico, punto di appassimento, valore di ottimo per il rendimento della vegetazione e capacità di campo.

E_M e E_W sono la massima e la minima perdita per evapotraspirazione, K è la conducibilità idraulica satura del terreno. [4]

Nel terreno vegetato, la perdita d'acqua dipende essenzialmente dal processo di traspirazione messo in atto dalle piante, il quale è legato allo stato di umidità e di salinità del suolo. Quando il contenuto di umidità relativa è tale per cui la vegetazione è al massimo della sua funzionalità, si assume che la perdita d'acqua X_b sia costante e pari al valore E_M . Ciò avviene in un intervallo di umidità relativa s compreso tra il valore s^* per cui

la vegetazione raggiunge il massimo della funzionalità e il valore s_c che rappresenta la capacità di campo del terreno. Per valori di s superiori alla capacità di campo, gli stomi delle piante si chiudono bloccando il processo di traspirazione. La perdita d'acqua del sistema in tali condizioni di umidità relativa è legata alla sola percolazione, descritta nel modello da una funzione che, a partire dal valore s_c , raggiunge con andamento esponenziale il valore della conducibilità satura del terreno per s che tende all'unità.

Al di sotto del valore di riferimento s^* , accade che lo stato di umidità del suolo non è sufficiente per la piena funzionalità delle piante, le quali vanno in stress. La funzione X_b decresce linearmente con s fino al valore E_W , il quale si realizza raggiunto lo stato di umidità s_w , definito come punto di appassimento. Per uno stato di umidità inferiore a s_w le piante muoiono e la perdita d'acqua dal terreno avviene per pura evaporazione, fino al punto igroscopico s_H per cui il contenuto idrico del suolo è minimo.

Il valore di E_M e di E_W viene ricavato dalle tabelle della *FAO*, le quali, con riferimento alle condizioni climatico-ambientali che si vogliono simulare, riportano il valore dell'evapotraspirazione potenziale ricavata con formula di *Penman-Monteith*. Il valore di E_M può essere corretto dal coefficiente K_C legato al tipo di vegetazione considerato e dal coefficiente K_S legato ad un eventuale stato di stress quale ad esempio la salinità.

Nel suolo nudo, l'effetto di traspirazione prodotto dalla vegetazione è assente e la perdita d'acqua X_0 , fino allo stato di umidità che definisce la capacità di campo del terreno, è legata all'evaporazione pura. In particolare si assume una crescita lineare di X_0 fino al valore s_c , per lasciare spazio poi all'effetto di percolazione, già descritto nel caso di suolo vegetato, per valori di umidità relativa superiori. X_0 e X_b vengono assunte uguali al di sotto del punto di appassimento assumendo $X_0(s_w)=E_W$.

La perdita d'acqua nel suolo nudo è trattata in modo semplificato, infatti nelle condizioni climatiche che si vogliono simulare, l'effetto di evaporazione

pura si manifesta nei primi 5-10 cm di terreno, mentre è praticamente nulla nella zona sottostante. Inoltre, nello strato superficiale, la perdita d'acqua per evaporazione può essere molto spinta, di gran lunga superiore a quella legata alla traspirazione delle piante. In questo modello tuttavia, si considera una strato di terreno significativamente più profondo, per cui la funzione di perdita considerata può essere intesa come media tra la perdita notevole dello strato superficiale e quella praticamente nulla delle zone più profonde, nelle quali solo i processi di traspirazione e percolazione hanno luogo.

Di seguito il grafico dell'andamento della perdita X al variare dello stato di umidità s , sia nel caso di suolo vegetato che nella condizione di suolo nudo:

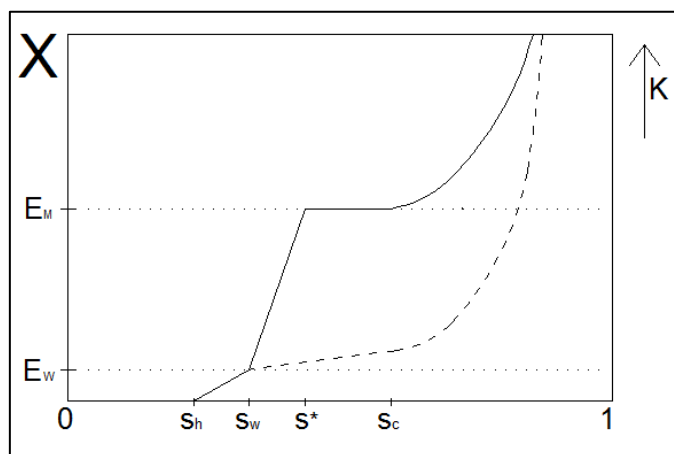


FIGURA 3 - TERMINE DI PERDITA NELLA FRAZIONE VEGETATA (linea continua) E IN QUELLA A SUOLO NUDO (linea tratteggiata)

Come si nota in figura, per valori di umidità superiori al punto di appassimento, la perdita nella frazione di suolo vegetato è sensibilmente maggiore di quella nel suolo nudo.

Dal momento che nella superficie considerata, ad un generico istante temporale, è presente una porzione di terreno coperto da vegetazione e una porzione di suolo non vegetato, e che l'estensione di tali frazioni evolve nel tempo in funzione dell'umidità del suolo, occorre introdurre un'equazione che governi tale processo.

L'evoluzione della copertura vegetale viene descritta con le equazioni 2.2, usate rispettivamente nel caso di vegetazione spontanea o di colture agricole. In quest'ultima situazione, si ipotizza che la frazione di suolo coltivata sia costante, lasciando ad una funzione di rendimento (descritta al punto successivo) il compito di evidenziare eventuali stress per la coltura.

Le dinamiche della vegetazione spontanea sono invece descritte usando l'equazione introdotta da *Levins*, poi generalizzata da *Tilman*[5]. Secondo questo approccio, la superficie del suolo viene suddivisa in particelle, le quali possono essere vegetate o vuote. La frazione vegetata viene rappresentata con un indice b compreso tra 0 e 1, dove 0 indica che la totalità della superficie considerata è a suolo nudo mentre 1 denota la totale copertura del suolo da parte della vegetazione. L'evoluzione dell'indice b dipende dal rapporto con cui le particelle vuote tendono ad essere colonizzate dalla vegetazione e dal rapporto con cui le particelle vegetate diventano vuote a causa della morte delle piante. I processi di morte e colonizzazione che avvengono particella per particella vengono poi mediati sull'intera area.

L'indice g rappresenta il rapporto di colonizzazione o tasso di sviluppo della vegetazione mentre l'indice μ rappresenta il rapporto di estinzione o tasso di mortalità.

Il prodotto tra la porzione vegetata b e l'indice g , rappresenta in qualche modo la potenzialità di colonizzazione della vegetazione, la quale agisce però solo sulla frazione non vegetata $1-b$, bloccando in questo modo il processo di colonizzazione nel caso tutte le particelle fossero vegetate. In realtà, da un semplice studio di funzione, si ricava che per un tasso di mortalità maggiore di 0 e un tasso di sviluppo limitato, una parte di suolo rimane comunque vuota.

La probabilità che una particella piena diventi vuota dipende invece dal tasso di mortalità applicato alla porzione sul quale esso agisce, cioè quella

vegetata. In questo modo, se l'intera superficie risulta a suolo nudo, il processo di estinzione si arresta.

Per semplicità si assume che la distribuzione spaziale delle particelle vegetate sia casuale e uniforme, considerando i fenomeni di colonizzazione ed estinzione spazialmente indipendenti, eliminando di fatto, dal punto di vista statistico, la correlazione spaziale dei fenomeni descritti.

E' facile intuire come, sia il tasso di sviluppo che quello di morte, dipendano dallo stato di umidità del suolo. L'equazione 2.2 relativa al caso di vegetazione spontanea può quindi essere riscritta:

$$\frac{db}{dt} = g(s)b(1 - b) - \mu(s)b \quad (2.9)$$

Nella trattazione si assume che l'indice g sia nullo fino al raggiungimento del valore di umidità s^* , per il quale gli stomi delle piante sono completamente aperti e la vegetazione, al massimo della sua capacità di sviluppo, è perciò in grado di riprodursi. Oltre tale valore di umidità il tasso di sviluppo è assunto costante e pari a g_0 .

Con queste posizioni, si considera il fatto che per bassi valori di umidità, la vegetazione esistente soffre e non può dedicare nessuna risorsa alla produzione di semi. Inoltre, i semi già presenti nel suolo, non hanno le condizioni di umidità sufficienti per la germinazione.

Il tasso di mortalità μ , viene invece assunto massimo e pari a μ_1 al di sotto del punto di appassimento, mentre, per valori di umidità maggiori a s_w , si assume costante e pari a μ_2 .

Di seguito una schematizzazione dell'andamento di g e μ in funzione di s :

$$g = \begin{cases} 0 & \text{per } s < s^* \\ g_0 & \text{per } s \geq s^* \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\mu = \begin{cases} \mu_1 & \text{per } s < s_W \\ \mu_2 & \text{per } s \geq s_W \end{cases} \quad (2.11)$$

Combinando l'equazione di bilancio idrico nel suolo con l'equazione di evoluzione della vegetazione si ottiene il modello accoppiato di *M.Baudena et al.[4]*:

$$\frac{ds}{dt} = I(s) - [bX_b(s) + (1 - b)X_0(s)] \quad (2.12)$$

$$\frac{db}{dt} = g(s)b(1 - b) - \mu(s)b$$

A partire da uno stato iniziale noto, la risoluzione di queste due equazioni permette di ricavare l'andamento nel tempo dello stato di umidità del suolo e della copertura vegetale nella superficie indagata.

L'equazione 2.3 è simile ad una cinetica di reazione del primo ordine e descrive il processo di dissoluzione del sale nel terreno.

Il modello di evoluzione della concentrazione salina è tuttavia più articolato, e rappresenta la particolarità di questo studio.

Per tal motivo viene descritto in maniera dettagliata nel paragrafo seguente.

2.1 Modello di evoluzione della concentrazione salina

L'andamento della concentrazione salina all'interno del volume di controllo definito, dipende sia dalla quantità di sale che viene dissolta dalla matrice solida ed entra in soluzione con l'acqua contenuta nel terreno, sia dalla quantità di sale che viene persa nel processo di dilavamento causato da precipitazioni meteoriche ed irrigazione.

Il processo di dissoluzione viene descritto dall'equazione 2.3, la quale integrata alle differenze finite e correttamente particolarizzata diventa:

$$c = c_R + (c_0 - c_R)e^{-\varphi\tau} \quad (2.13)$$

c_R è un valore di riferimento per la massima concentrazione salina possibile nella soluzione liquida del terreno, c_0 è la concentrazione salina presente al tempo t , φ è una costante di reazione mentre τ è il numero di giorni trascorsi dall'ultimo evento di precipitazione.

In tal modo il processo di dissoluzione risulta limitato ad un valore massimo di riferimento e dipende sia dalla concentrazione salina presente sia dal numero di giorni senza precipitazione, nei quali il processo di dilavamento viene attivato.

Durante gli eventi di pioggia, nei quali un volume d'acqua pura entra nel sistema, i sali in soluzione con l'acqua del terreno vengono dilavati.

Tale processo viene descritto con il modello *Piston-flow*, secondo il quale il volume d'acqua puro in ingresso spinge verso l'infiltrazione profonda il volume d'acqua presente nella matrice solida, di fatto sostituendosi a quest'ultimo e diluendo quindi la concentrazione salina presente.

Nel momento in cui il volume in ingresso è maggiore del volume nZ_R disponibile nella matrice solida, la concentrazione salina si annulla poiché tutta l'acqua presente viene sostituita dal volume d'acqua puro in ingresso.

Nella situazione per cui l'indice di infiltrazione I è minore di 1, la soluzione liquida del suolo viene diluita secondo la relazione seguente:

$$c = \begin{cases} 0 & \text{per } I \geq 1 \\ c_0(1 - I) & \text{per } I < 1 \end{cases} \quad (2.14)$$

La presenza di sale nell'acqua del suolo altera il processo di evapotraspirazione. L'estrazione dell'acqua da parte dell'apparato radicale

della vegetazione è più difficoltosa, il valore di E_M e quindi il rendimento della vegetazione nel caso si consideri una coltura agricola diminuisce.

La conducibilità elettrica EC della soluzione liquida del suolo è la variabile che permette di legare il valore della concentrazione salina e l'effetto di stress causato alla vegetazione.

EC risulta direttamente proporzionale all'incremento di concentrazione c e la relazione con cui tale grandezza viene determinata si ricava interpolando linearmente il valore di conducibilità elettrica dell'acqua di mare ($EC=60$ dS/m , $c=35\%$) e quello dell'acqua meteorica pura ($EC=0.02$ dS/m , $c=0$):

$$EC = 1714 c + 0.02 \quad (2.15)$$

L'effetto della salinità sul processo di evapotraspirazione viene considerato attraverso il coefficiente di stress K_S (*FAO Irrigation and Drainage Paper no.56 [2]*):

$$K_S = 1 - \frac{B}{100 K_Y} (EC - EC_{th}) \quad (2.16)$$

Il valore della massima evapotraspirazione E_M si riduce nel momento in cui il valore di EC supera il valore soglia tollerato dalla vegetazione EC_{th} :

$$E_M^* = K_S E_M \quad (2.17)$$

Di seguito una lista dei parametri della relazione 2.16 per alcuni tipi di colture agricole:

<i>Coltura</i>	K_Y	B	EC_{th}
<i>Cotone</i>	0.85	5.2	7.7
<i>Grano</i>	1.15	7.1	6.0

<i>Mais</i>	1.25	12.0	1.7
<i>Alfalfa</i>	1.1	7.3	2.0
<i>Barbabietola</i>	1.0	5.9	7.0
<i>Canna da zucc.</i>	1.2	5.9	1.7
<i>Patata</i>	1.1	12.0	1.7
<i>Pomodoro</i>	1.05	9.0	0.9-2.5
<i>Fagiolo</i>	1.15	19.0	1.0
<i>Cipolla</i>	1.1	16.0	1.2
<i>Arancio</i>	1.1-1.3	16.0	1.7

TABELLA 3 – PARAMETRI DI TOLLERANZA ALLA SALINITA' PER ALCUNE COLTURE AGRICOLE E SPECIE SPONTANEE (FAO Irrigation and Drainage Paper no.56 [8])

Nel caso di colture agricole, lo stress causato dalla salinità determina una riduzione del rendimento produttivo, che viene calcolato con la seguente relazione (FAO Soils Bulletin 39 [6]):

$$Y = \frac{EC_o - EC}{EC_o - EC_{th}} * 100 \quad (2.18)$$

EC_o rappresenta il valore di EC per cui il rendimento della coltura è nullo.

Se si considera invece il caso di vegetazione spontanea, il tasso di mortalità μ e il rapporto di colonizzazione g dipendono dal valore di conducibilità elettrica EC .

Nel modello, quando il valore di EC è maggiore di EC_{th} , il tasso di mortalità assume il valore costante μ_1 mentre il tasso di sviluppo si annulla:

$$g = \begin{cases} 0 & \text{se } s < s^* \text{ o } EC > EC_{th} \\ g_0 & \text{se } s \geq s^* \text{ e } EC < EC_{th} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\mu = \left\{ \begin{array}{l} \mu_1 \text{ se } s < s_W \text{ o } EC > EC_{th} \\ \mu_2 \text{ se } s \geq s_W \text{ e } EC < EC_{th} \end{array} \right\} \quad (2.20)$$

Ancora una volta, l'equazione di bilancio idrico nel suolo e quella di evoluzione della vegetazione nel modello accoppiato di *M.Baudena et al. [4]* possono essere riscritte:

$$\frac{ds}{dt} = I(s) - \frac{1}{n z_R} [bX_b(s, c) + (1 - b)X_0(s)] \quad (2.21)$$

$$\frac{db}{dt} = g(s, c)b(1 - b) - \mu(s, c)b \quad (2.22)$$

3. CALIBRAZIONE E SCELTA DEI PARAMETRI

Il modello ricavato permette di risolvere alle differenze finite le equazioni di bilancio del suolo, di evoluzione della vegetazione e della concentrazione salina. Dopo aver fissato le condizioni iniziali del sistema, una buona calibrazione e una scelta accurata dei parametri di riferimento diventa necessaria per poter applicare il modello ai casi di studio reali con lo scopo di ricavare risultati utili anche in fase di previsione.

Con riferimento al processo di generazione delle precipitazioni, occorre fissare i parametri delle distribuzioni esponenziali che permettono di generare le altezze di pioggia giornaliere e il tempo di inter arrivo tra tali eventi. Tali parametri rappresentano rispettivamente l'altezza di pioggia giornaliera media e il tempo medio di inter arrivo fra eventi.

Il problema della salinità è molto più evidente nelle zone a clima arido o semi arido dove l'altezza di pioggia totale annua si aggira nell'intorno dei 500 mm distribuiti su un numero di giorni piovosi che va da 30 a 40.

Si sceglie quindi di attribuire ai parametri delle distribuzioni i seguenti valori:

$$\lambda = 15mm \quad \psi = 10gg$$

Con riferimento all'equazioni di bilancio idrico, si fissano i valori soglia di umidità relativa e di tutti i parametri richiesti secondo lo studio condotto da *M.Baudena*[4], con riferimento al caso di terreno argilloso-sabbioso:

<i>Parametro</i>	<i>Unità misura</i>	<i>Valore</i>
S_H	/	0.08
S_W	/	0.11
S^*	/	0.31

s_c	/	0.52
β	/	12.7
K	mm/gg	1000
n	/	0.42
E_M	mm/gg	4.5
E_W	mm/gg	0.1

TABELLA 4 - PARAMETRI EQUAZIONE DI BILANCIO IDRICO

I valori dei parametri di evapotraspirazione massima E_M e minima E_W presenti nei termini di perdita dell'equazione di stato, vengono ricavati dalle tabelle della *FAO [1]* con riferimento ad un clima semi arido.

L'equazione di evoluzione della vegetazione spontanea viene opportunamente manipolata per garantire risultati numerici attendibili e ridurre i problemi di instabilità numerica del modello.

In particolare si fissa una soglia di minimo per l'indice b pari a 0.1, in modo da evitare problemi di 'zero' e riprodurre, dal punto di vista numerico, la rapida ripresa della vegetazione quando, al termine di una fase di stress idrico e salino, le condizioni del suolo permettono lo sviluppo della vegetazione. Il valore dei tassi di sviluppo ottimo g_0 e di mortalità μ_1 e μ_2 vengono determinati osservando i risultati di tre diverse simulazioni, tutte chiaramente riferite alla stessa precipitazione.

I parametri dei tre casi studiati sono di seguito riassunti:

Caso	g_0	μ_1	μ_2
1	0.8	0.1	0.05
2	0.6	0.2	0.1
3	1.0	0.05	0.02

TABELLA 5 - TASSI DI SVILUPPO E MORTALITA' RELATIVI AI TRE CASI DI STUDIO

L'andamento dell'indice di copertura vegetale b ricavato dal modello viene riportato nel grafico seguente:

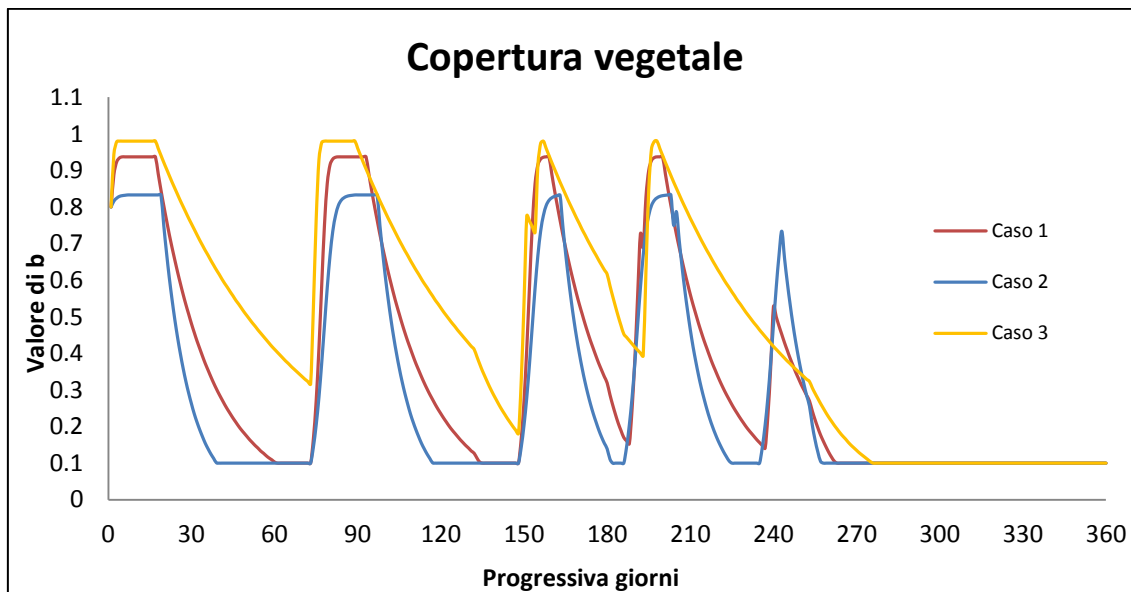


FIGURA 4 – CALIBRAZIONE DEI TASSI DI MORTALITA' E SVILUPPO

Come si può notare il valore dei tassi scelto condiziona in modo marcato l'estensione della superficie vegetata b e la rapidità con cui il processo di sviluppo o di appassimento evolve.

Al crescere di g_0 lo sviluppo della vegetazione diventa più rapido e la massima estensione di b aumenta. Al crescere dei tassi mortalità invece, è il processo di appassimento a subire delle variazioni, risultando evidentemente più rapido per valori di μ elevati.

Nel seguito della trattazione si sceglie di usare i parametri relativi al caso 1.

I parametri di riferimento per le diverse colture in relazione allo stato di stress indotto dalla salinità vengono ricavati ancora una volta dalle tabelle *FAO[1]* e sono già stati presentati ai capitoli 1 e 2.

Per quanto riguarda la calibrazione del modello di evoluzione della concentrazione salina, ulteriori considerazioni possono essere fatte.

L'equazione di dissoluzione del sale permette un accumulo di concentrazione in funzione del numero di giorni che intercorrono tra eventi di pioggia successivi. L'accumulo di sale è limitato al valore della concentrazione salina dell'acqua di mare, fissato al 35 ‰.

Il valore di minimo si realizza quando è nullo τ , cioè durante l'evento di pioggia, e fissa la concentrazione attuale al valore del giorno precedente, simulando la condizione per cui il processo di accumulo per dissoluzione risulta bloccato durante l'evento di pioggia.

Di seguito l'andamento della curva di dissoluzione, il cui valore di minimo equivale alla concentrazione salina iniziale fissata nel sistema, pari all' 1 ‰:

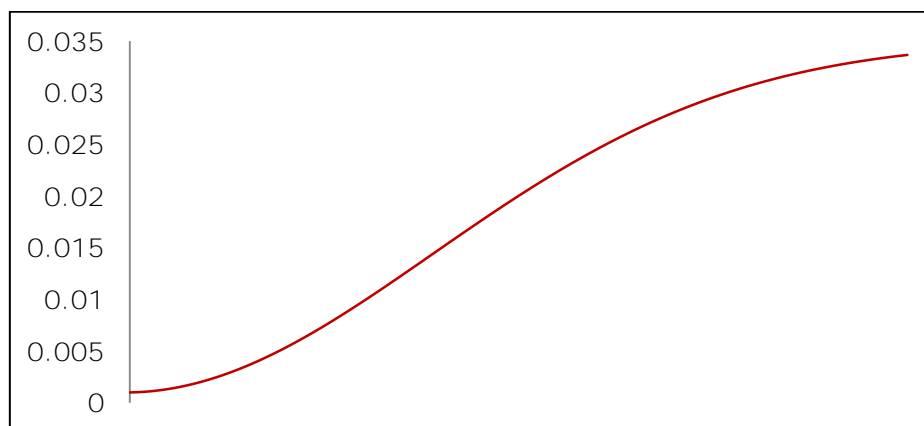


FIGURA 5 - CURVA DI DISSOLUZIONE

Il modello di dilavamento si attiva invece nel momento in cui un volume idrico entra nel sistema. L'incremento di salinità costante, determinato dalla curva di dissoluzione, subisce quindi un crollo rapido secondo le modalità descritte dal modello *Piston flow*.

Se il tasso di infiltrazione è maggiore di 1, significa che tutta l'acqua contenuta nel sistema viene sostituita dall'acqua pura in ingresso e per questo motivo la concentrazione salina nel volume di controllo si annulla.

Se I è minore di 1 invece, la concentrazione salina c_0 si riduce per il fatto che il volume d'acqua salata, dopo l'evento di precipitazione, diventa pari a $1-I$.

3.1. Test sul modello di dilavamento

Il modello di dilavamento spiegato è stato calibrato in funzione di alcuni risultati che si vogliono ottenere in fase di simulazione, con riferimento all'applicazione dell'irrigazione per la bonifica del sito.

L'obiettivo che si vuole realizzare nel momento in cui si applica l'irrigazione per il dilavamento del sale, è quello dimezzare il valore della conducibilità elettrica del terreno EC .

In fase di calibrazione del modello si vuole determinare il volume irriguo necessario per realizzare questo scopo, in relazione alla profondità dello strato di terreno che si vuole indagare.

Il modello *Piston flow* risulta calibrato nel momento in cui, introducendo un tasso di irrigazione prefissato, si ottiene la riduzione di EC desiderata.

Partendo da diverse concentrazioni iniziali e applicando tassi di irrigazione differenti, si controlla l'abbattimento di EC nel sistema. Il tutto viene ripetuto per profondità dell'apparato radicale diverse al fine di determinare la combinazione ottimale tra il valore di Z_R e quello dell'indice di irrigazione di bonifica irr .

Il risultato a cui si vuole pervenire è quello indicato in uno studio del *Colorado State University*[10], per il quale, con l'irrigazione di un volume idrico pari a 6 pollici (152.4 mm) si ottiene il dimezzamento del valore di EC della concentrazione del suolo.

La combinazione corretta dei parametri è stata ottenuta dopo diverse simulazioni. Come proposto di seguito, il risultato ottenuto è ottimo ed è perfettamente allineato con i dati ricavati dallo studio citato.

Ciò è ulteriore garanzia di una buona affidabilità del modello di dilavamento, il quale può tranquillamente essere usato in chiave previsionale per lo studio dei volumi di irrigazioni necessari per la bonifica di un sito salino. Di seguito i risultati ottenuti, dove con V_{IRR} si intende l'altezza d'acqua irrigata ottenuta

moltiplicando l'indice di irrigazione irr per il volume nz_R disponibile per l'acqua nel sistema:

c_0	EC	irr	z_R [mm]	EC_{NEW}	V_{IRR} [mm]
5‰	8.59	0.5	750	4.305	157.5
7.5‰	12.875	0.5	750	6.447	157.5
10‰	17.16	0.5	750	8.59	157.5

TABELLA 6 - ESITO DELLA CALIBRAZIONE DEL MODELLO DI DILAVAMENTO

4. STIME E PREVISIONI DAL MODELLO

Dopo aver descritto il modello e avere calibrato i parametri in esso contenuti sulla base sia di risultati noti dalla letteratura e che da studi e indagini specifiche condotte in alcuni Stati americani [1-2-4-6-7-8-9-10], si usa il modello per effettuare delle stime e delle previsioni numeriche sul comportamento della vegetazione in condizioni di suolo salino.

L'obiettivo della ricerca è quello di simulare le condizioni di umidità e salinità presenti nel suolo per dare risposta numerica riguardo i temi approfonditi in questa trattazione.

Grafici e tabelle ricavate dai dati numerici forniti dal modello permettono di descrivere e analizzare le seguenti tematiche:

- rendimento di alcune tipiche colture aventi tolleranza alla salinità diversa;
- efficacia delle pratiche di gestione dei suoli salini;
- volumi di irrigazione necessari al mantenimento della produttività di un'area soggetta a fenomeni di salinizzazione;
- sviluppo di vegetazione spontanea in funzione dello stato di umidità e salinità del suolo, senza interventi di gestione e controllo;
- risposta del suolo per cicli produttivi successivi, con alternanza di fase coltivata e di fase di riposo con vegetazione spontanea;

4.1. Studio del rendimento produttivo di varie colture

La pratica più semplice per mantenere produttivo un suolo salino dove il dilavamento dei sali tramite irrigazione non risulta possibile o conveniente, è quella di utilizzare delle colture in grado di sopportare concentrazioni saline elevate.

Le colture possono essere classificate come tolleranti, poco tolleranti, poco sensibili e sensibili in base alla concentrazione salina limite che possono

tollerare, mantenendo un rendimento produttivo adeguato.

Si analizza di seguito il comportamento di tre tipi di colture, barbabietola da zucchero, soia e mais, classificate rispettivamente come tollerante, poco tollerante e sensibile.[1]

Si ipotizza che l'apporto meteorico sia l'unico termine di accumulo nella relazione di bilancio idrico del suolo, simulando la situazione per cui sia l'irrigazione artificiale che altre pratiche di gestione del suolo non siano applicabili. La simulazione viene condotta su un periodo di 720 giorni mentre i risultati sono riferiti al secondo anno di simulazione, immaginando che nel primo anno di studio il modello vada a regime e non sia più influenzato dalle condizioni iniziali applicate.

La precipitazione simulata viene di seguito rappresentata:

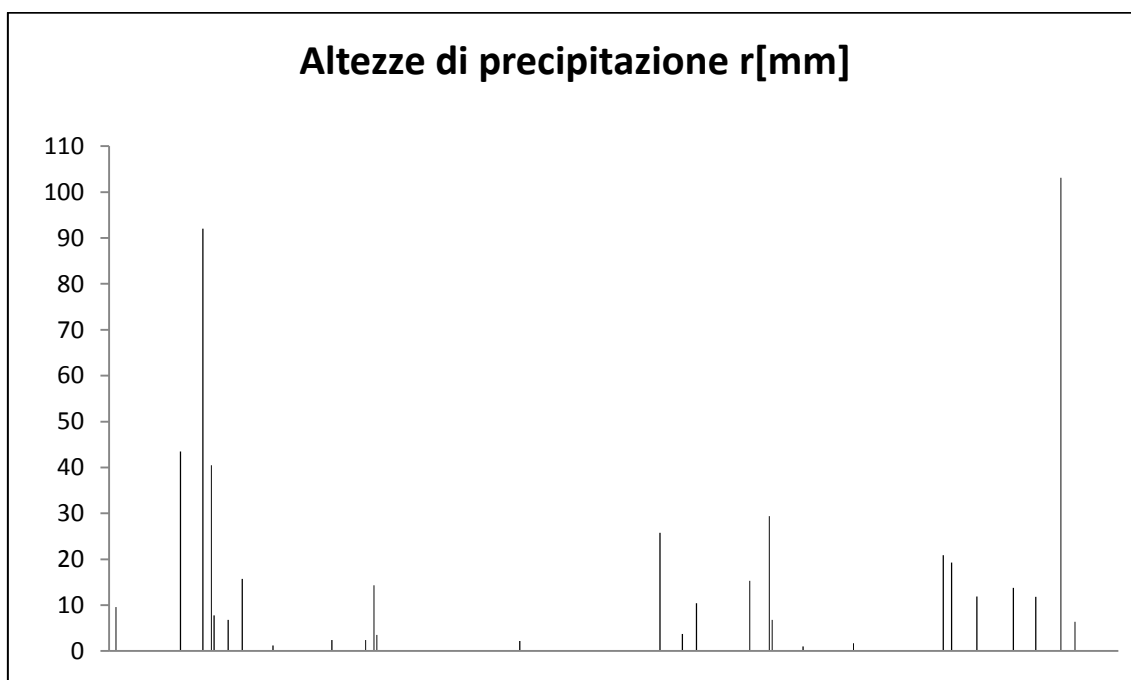


FIGURA 6 - ISTOGRAMMA DELLE ALTEZZE DI PRECIPITAZIONE NEL PERIODO DI SIMULAZIONE CONSIDERATO

L'andamento delle precipitazioni durante il periodo considerato è sporadico, con un lungo periodo di siccità che potrebbe ben descrivere la situazione estiva di una zona a clima semi arido. L'altezza di pioggia totale annua è di

523.2 mm con 28 giorni piovosi. L'altezza di precipitazione media risulta pari 18 mm mentre il tempo medio di inter arrivo fra gli eventi è di 12 giorni, in accordo con i parametri della distribuzione esponenziale usata per simulare il processo.

L'andamento della concentrazione salina nell'anno di osservazione, dipende in maniera prevalente dal volume d'infiltrazione dovuto all'apporto delle precipitazioni. Con riferimento alle tre colture indagate, la variazione di concentrazione risulta indipendente dal tipo di vegetazione studiata, e presenta il seguente andamento:

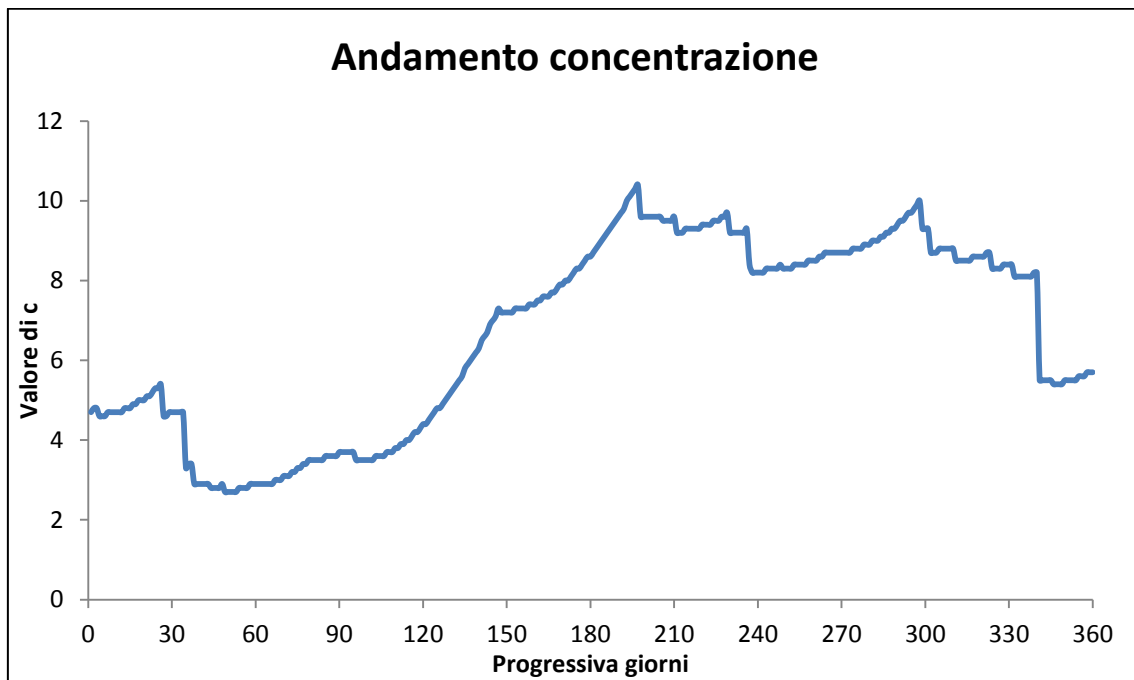


FIGURA 7 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE SALINA

Il grafico di andamento presenta dei picchi di concentrazione del 10‰ in corrispondenza della fine dei periodi più lunghi di siccità. Durante queste fasi infatti la salinità del sistema aumenta e lo fa in maniera proporzionale al tempo di inter arrivo tra eventi meteorici successivi. Si nota chiaramente l'effetto di dilavamento prodotto dal modello Piston flow, evidenziato da un

crollo rapido della concentrazione in corrispondenza agli eventi di precipitazione più rilevanti.

Nell'arco dell'anno di osservazione, la concentrazione salina rimane comunque stabile, oscillando tra il valore massimo del 10 ‰ e il valore minimo del 2.5‰, presentando i valori minimi alla fine del periodo piovoso post-invernale/primaverile e quelli massimi nella fase di siccità caratteristica del periodo estivo.

Il valore dell'umidità relativa del suolo invece dipende sia dal volume d'infiltrazione, sia dal termine di perdita relativo al contributo di evapotraspirazione, legato evidentemente al tipo di coltura studiata.

Di seguito il grafico di andamento relativo all'umidità del suolo con riferimento alle tre colture studiate:

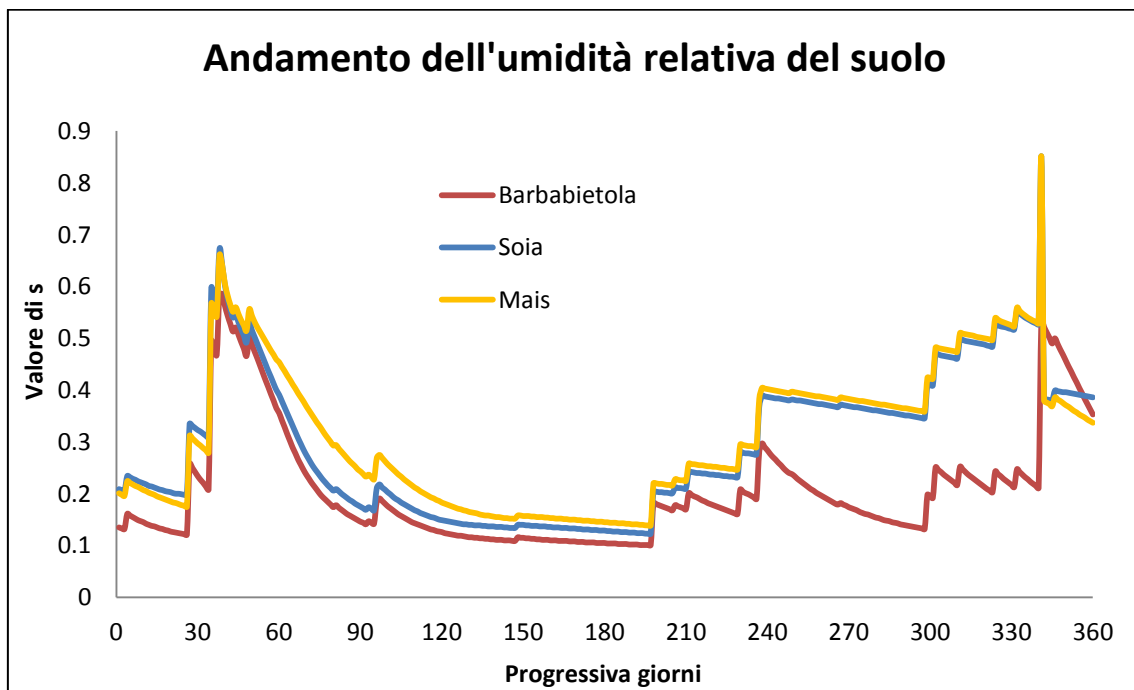


FIGURA 8 - CONFRONTO TRA L'UMIDITA' RELATIVA DEL SUOLO IN PRESENZA DI COLTURE DIVERSE

Il grafico evidenzia un periodo iniziale in cui il contenuto idrico del suolo è elevato e pressoché simile per le tre colture, corrispondente alla fase in cui

sono presenti le precipitazioni e la concentrazione salina rimane contenuta. In tali condizioni la vegetazione riesce a mantenere un rendimento adeguato. Successivamente il grafico evidenzia una fase di decrescita dell'umidità relativa corrispondente all'inizio del periodo secco. Nella fase di siccità s si stabilizza al valore del punto di appassimento delle colture, fissato in questa simulazione a 0.11. Le colture subiscono uno stress evidente, dovuto sia alla concentrazione salina spinta sia a contenuti idrici nel suolo assai ridotti a causa dell'assenza del termine di accumulo legato all'infiltrazione delle precipitazioni. A questo punto lo studio si concentra sullo stress dovuto alla presenza di una concentrazione salina elevata. Il diverso grado di tolleranza delle colture alla salinità va ad influenzare il valore dell'umidità del suolo, agendo sul termine di perdita legato all' evapotraspirazione.

Questa grandezza si mantiene rilevante solo se la coltura è in grado di sopportare lo stress legato alla salinità del suolo, in caso contrario si arresta il processo di sviluppo e il rendimento produttivo si annulla.

Soia e mais, per il fatto che sono in grado di sopportare concentrazioni saline più ridotte rispetto alla barbabietola, subiscono un calo evidente di rendimento, che si traduce in un crollo del termine di perdita per evapotraspirazione e di conseguenza il valore dell'umidità relativa del suolo aumenta. Queste colture sono in stato di stress per salinità elevata, e non sono nelle condizioni di recuperare la capacità produttiva nonostante il contenuto idrico del suolo ne permetta in seguito lo sviluppo.

Da notare il picco di s nell'ultima fase del periodo di simulazione, corrispondente ad un evento di precipitazione molto elevato che genera pure un crollo improvviso della concentrazione c .

L'instabilità nel grafico di andamento è dovuta all'attivazione del termine di infiltrazione profonda. Tale termine, governato da una legge esponenziale, si attiva nel momento in cui l'umidità relativa del suolo supera la capacità di

campo e fa tendere al valore della conducibilità satura del terreno il termine di perdita nell'equazione di bilancio.

Per evitare instabilità numeriche nel momento in cui l'umidità relativa del suolo è prossima allo stato di saturazione, si è fissato a 0.85 il valore di massimo per la variabile s .

Quanto dedotto dal grafico del contenuto idrico può essere dimostrato studiando la variazione del rendimento produttivo delle tre colture nel periodo simulato. A seguito il grafico di riferimento ricavato dai risultati del modello:

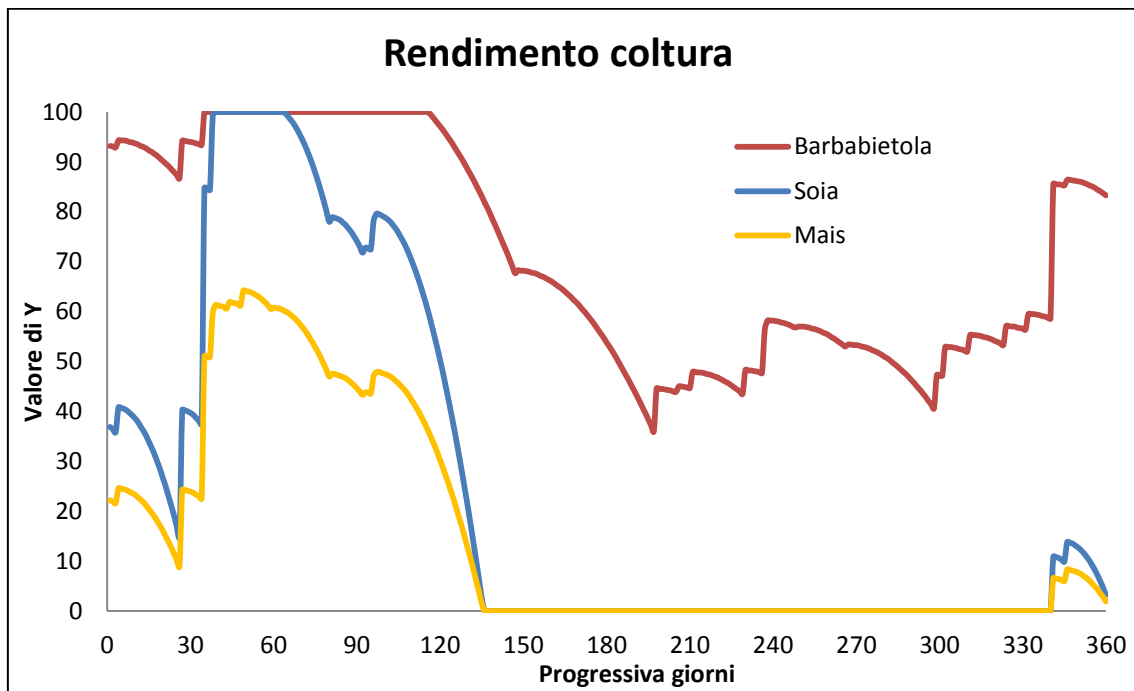


FIGURA 9 - CONFRONTO TRA RENDIMENTO PRODUTTIVO DI COLTURE DIVERSE

Come anticipato, a valori di concentrazione salina ridotti, il rendimento delle colture è elevato e caratterizza la prima fase del periodo di simulazione.

Il crollo in termini di umidità del suolo unito all'aumento rapido della salinità determina una riduzione del rendimento produttivo, in misura proporzionale alla tollerabilità della coltura al sale.

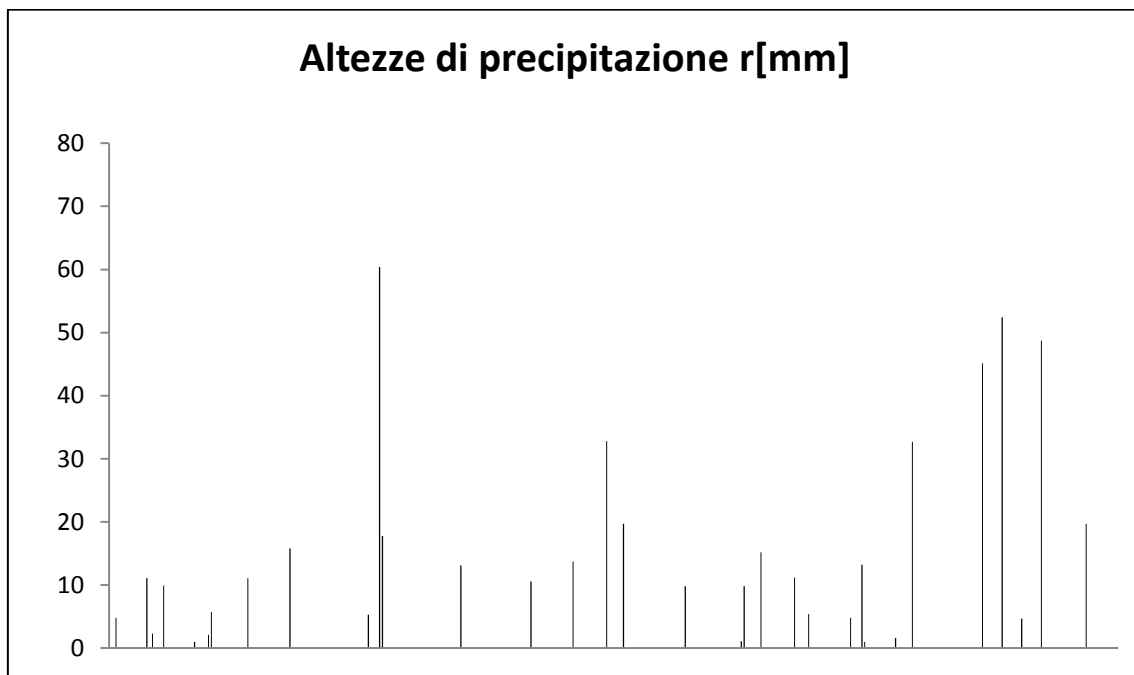
Se si coltiva la barbabietola il terreno resta produttivo, pur subendo un calo di rendimento superiore al 50% nel ciclo colturale del periodo secco.

Da notare che al termine della fase di stress, la coltura riesce a recuperare spontaneamente un rendimento adeguato, anche senza l'ausilio di tecniche di gestione del suolo atte al dilavamento del sale.

Per quanto riguarda invece le altre colture, la fase di stress del periodo secco causa una perdita completa del rendimento del sito, il quale solo con un'adeguata gestione tramite irrigazione può essere recuperato per il ciclo produttivo successivo. Il recupero di produttività dopo la fase secca infatti, se pur presente, risulta assai limitato e comunque non tale da consentire l'immediata risemina delle colture.

Simulando nel modello delle precipitazioni diverse, sempre con riferimento ai parametri di altezza media e tempo medio di inter arrivo calibrati, la soluzione proposta si ripete, per cui tale risultato può essere molto utile nella scelta delle colture opportune quando non possa essere applicata una gestione della salinità mediante irrigazione.

Di seguito alcuni grafici di andamento delle varie grandezze, in riferimento ad una precipitazione diversa:



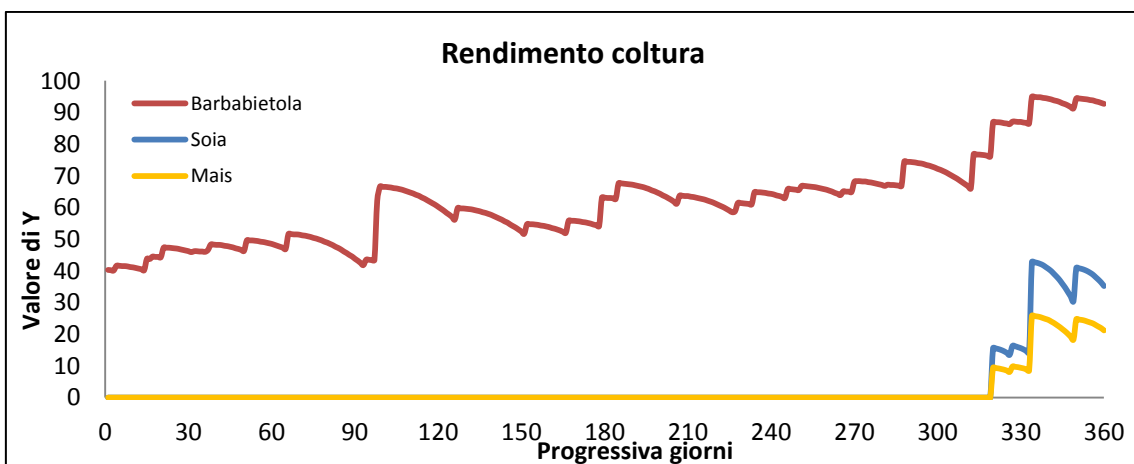
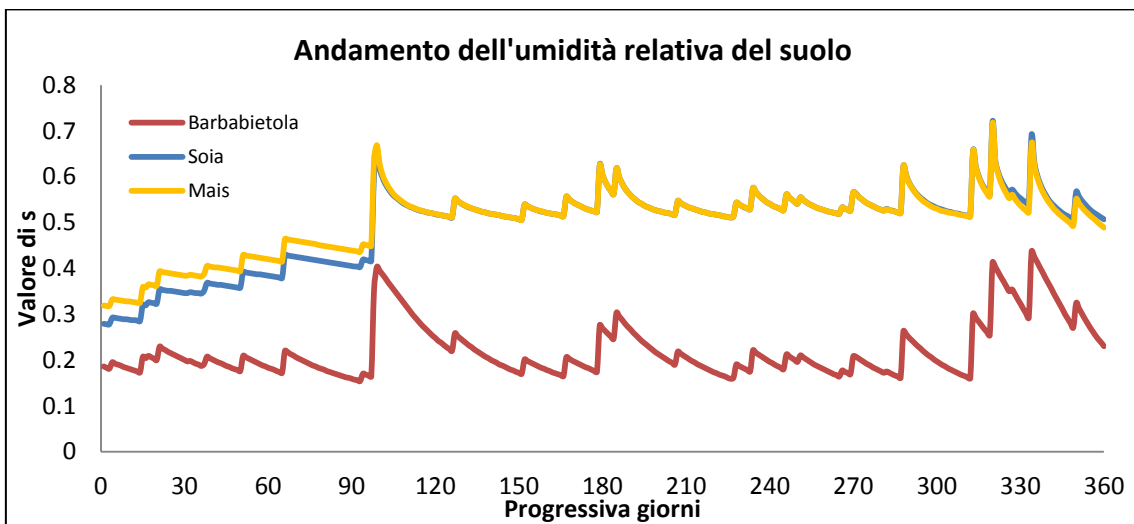
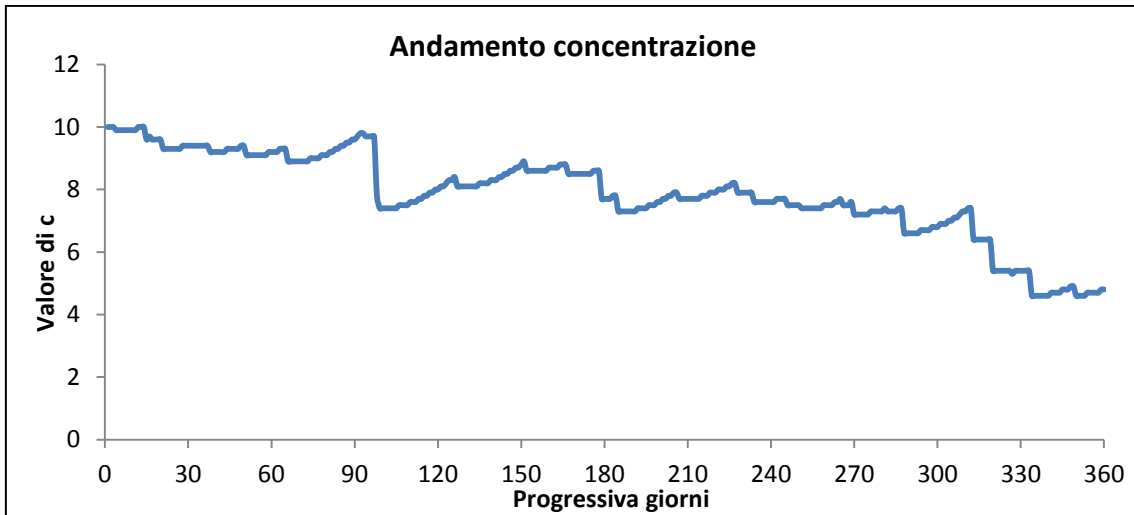


FIGURE 10-11-12-13- GRAFICI DI RISULTATO CON RIFERIMENTO AD ALTEZZE DI PRECIPITAZIONE DIVERSE

La precipitazione di questa seconda applicazione del modello, risulta distribuita in modo più uniforme nella finestra temporale, pur avendo un'altezza totale di pioggia e un numero di giorni piovosi simile al primo caso studiato (513.6 mm , 33 giorni piovosi).

La concentrazione iniziale risulta elevata come probabile conseguenza di uno stato di siccità precedente. In tali condizioni di salinità, mais e soia non sono in grado di svilupparsi e hanno un rendimento nullo.

Nel grafico di andamento di s si nota che, per queste due colture, lo stato di umidità rimane elevato, conseguenza del fatto che il termine di perdita legato all'evapotraspirazione della porzione di suolo vegetato è minimo per gran parte del periodo di studio. La barbabietola invece, riesce a resistere allo stato di stress presente seppur con notevole riduzione di rendimento.

Ancora una volta è evidente dai risultati, l'incapacità delle colture più sensibili alla salinità di recuperare autonomamente un rendimento produttivo accettabile durante il ciclo produttivo.

Sono perciò necessari interventi di gestione della salinità tramite irrigazione. Come nel caso di studio precedente, la barbabietola è in grado di sopportare periodi di stress anche prolungati e riprendersi senza ausilio di tecniche di gestione, grazie all'apporto idrico naturale delle precipitazioni.

Si analizza di seguito il caso in cui un terreno soggetto al fenomeno della salinizzazione sia lasciato a riposo, con eventuale sviluppo di vegetazione spontanea. Nel modello, l'estensione della superficie vegetata b non è più costante, ma varia in funzione sia di s che di c , secondo l'equazione di evoluzione della vegetazione di *Tilman*.^[5]

Lo studio viene particolarizzato con riferimento ai parametri del loglio, un'erba infestante spontanea appartenente alla famiglia delle graminacee e avente un tolleranza alla salinità media.

I parametri di riferimento per questo tipo di vegetazione sono:

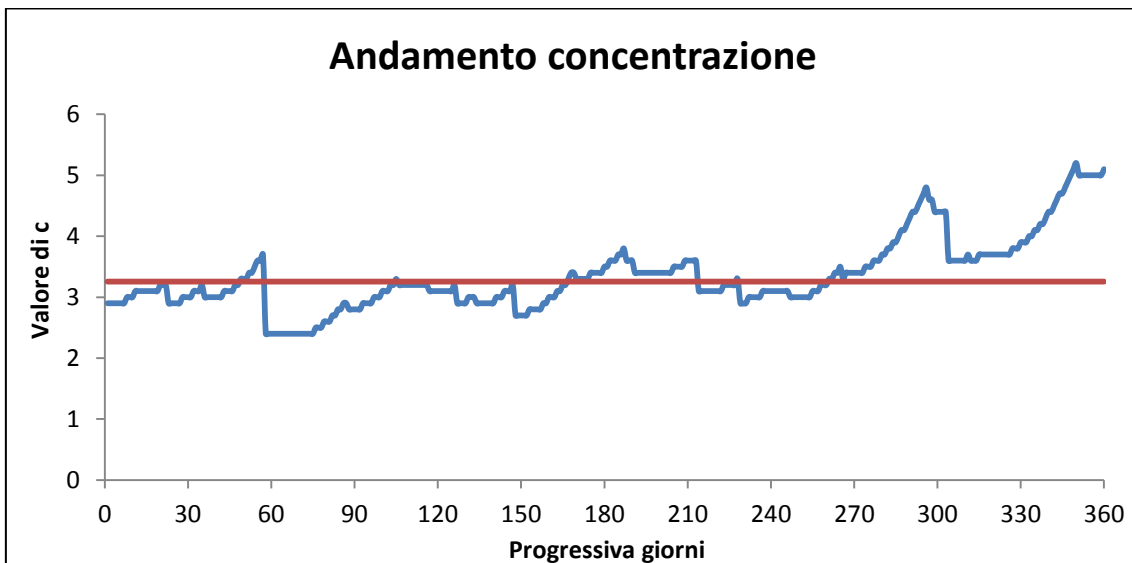
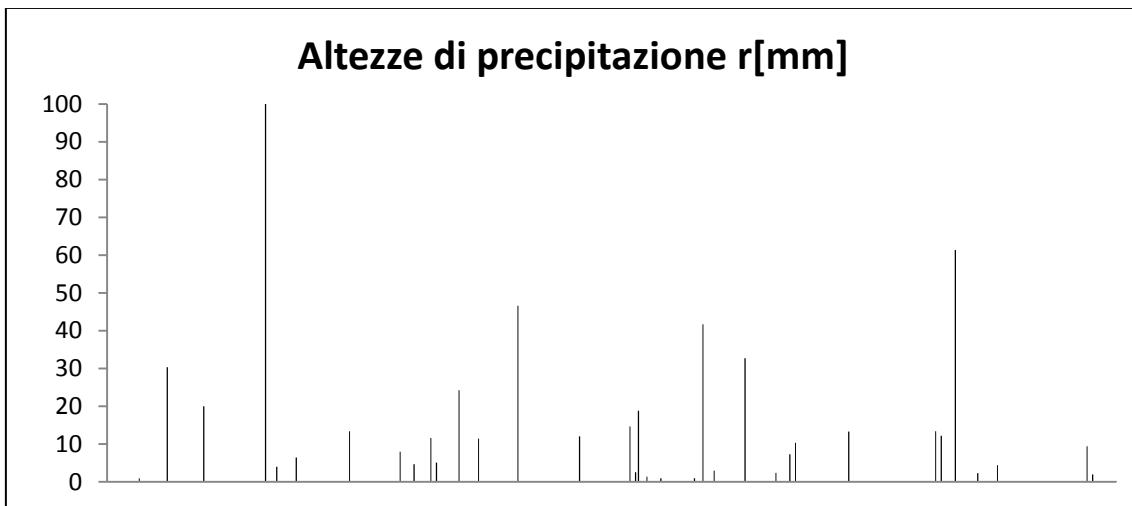
<i>Vegetazione</i>	<i>K_y</i>	<i>B</i>	<i>EC_{th}</i>
<i>Lolium</i>	1	7.6	5.6

TABELLA 7 - PARAMETRI DELLA VEGETAZIONE SPONTANEA STUDIATA[2]

L'indagine effettuata in questo caso di studio vuole dimostrare se, nel caso di vegetazione spontanea, è più gravoso lo stress per carenza idrica o quello legato alla salinità.

Si ipotizza che i tassi di sviluppo e di morte siano legati prima solo ad s , poi solo a c , infine ad entrambe secondo le equazioni 2.19 e 2.20.

Con riferimento ad una terza distribuzione della precipitazioni a seguito riportata, il modello fornisce i seguenti risultati:



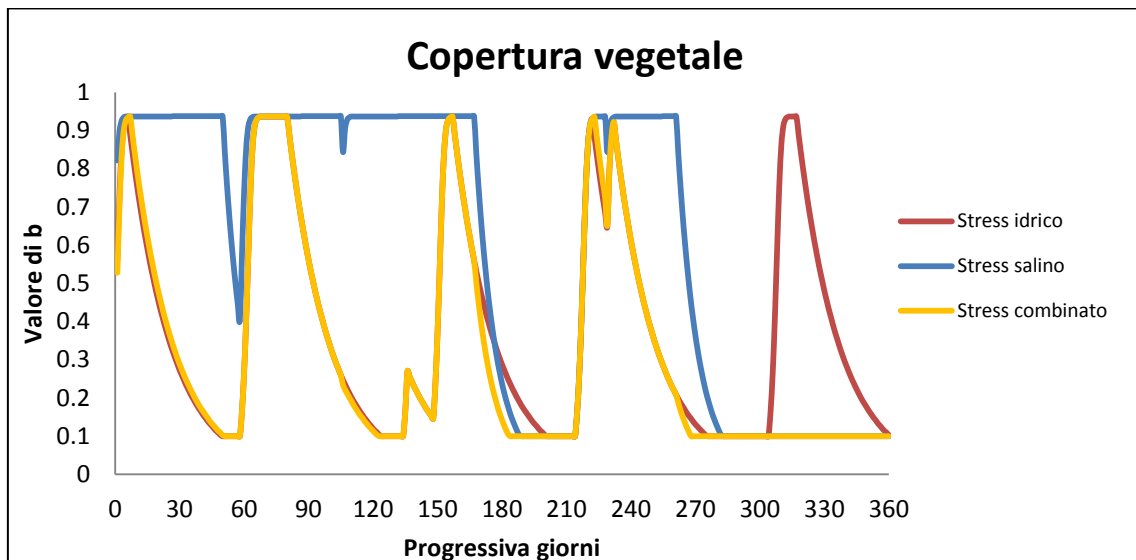
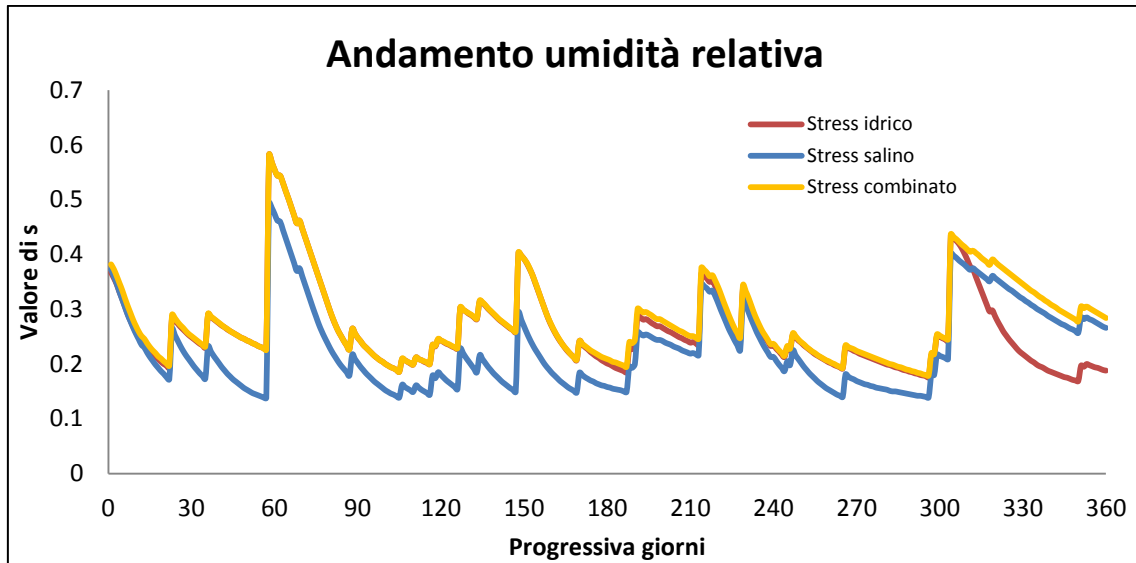


FIGURE 14-15-16-17 - GRAFICI DI RISULTATO CON RIFERIMENTO AL CASO DI VEGETAZIONE SPONTANEA

Analizzando innanzitutto la distribuzione delle precipitazioni e il grafico dell'andamento della concentrazione è evidente che nel caso rappresentato l'effetto di stress legato alla salinità è in qualche modo contenuto.

I valori di concentrazioni salina oscillano infatti nell'intorno del valore di soglia per cui il tasso di sviluppo della vegetazione si annulla. Tale soluzione è perciò molto significativa per capire come i due effetti di stress legati all'accumulo di sale e alla carenza idrica concorrano tra loro e quale dei due

sia prevalente in base alla situazione generale che si sviluppa all'interno del volume di controllo studiato.

Fino al giorno n° 270 circa, il livello di concentrazione salino permette alla coltura un naturale sviluppo, perciò l'estensione dall'area vegetata dipende solo dal valore dell'umidità relativa s . La linea di andamento che descrive l'effetto di stress combinato segue perfettamente quella legata allo stress idrico.

Nella seconda parte dell'arco temporale studiato invece, l'indice b diventa nullo pur essendo il sistema in condizioni di umidità superiori al valore di ottimo s^* . In questa situazione diventa predominante l'effetto legato alla salinità che interviene sulla vegetazione bloccando il processo di sviluppo e impedendone la possibilità di ripresa finché non viene applicato un adeguato processo di dilavamento del sale.

Lo studio condotto in riferimento alla vegetazione spontanea, permette di trarre alcune considerazioni: mentre lo stress idrico può essere rapidamente superato nel momento in cui un volume di pioggia s'infiltra nel sistema, l'effetto della salinità è molto più gravoso, porta alla paralisi totale del sistema e blocca ogni possibilità di sviluppo della vegetazione.

Finché il valore della concentrazione salina presente nella soluzione del suolo non viene adeguatamente ridotto, il terreno è improduttivo e deve essere abbondantemente dilavato per un totale o parziale recupero.

Un periodo di siccità prolungato infatti, provoca notevoli incrementi della salinità del suolo con perdita di produttività spesso non recuperabile in modo naturale, a maggior ragione in zone a clima arido o semi arido nelle quali l'apporto meteorico risulta scarso e sporadico.

4.2. Gestione della salinità con irrigazione programmata

Dopo aver studiato il comportamento di alcune colture e di una specie di vegetazione spontanea senza l'applicazione di alcuna tecnica di gestione del suolo, viene ora simulata la condizione per cui l'irrigazione artificiale è disponibile, poco onerosa e attivabile ogni qual volta il valore della conducibilità elettrica del suolo EC risulti superiore al valore soglia in riferimento alla coltura o specie spontanea studiata.

Questa fase di studio ha lo scopo di descrivere l'efficacia di questa pratica agricola, determinando i volumi irrigui necessari al mantenimento di un rendimento ottimale per le colture.

Si immagina di attivare l'irrigazione nel momento in cui EC diventa maggiore di EC_{th} , con lo scopo di dimezzare il valore della conduttività elettrica del terreno e ristabilire una condizione di per cui il rendimento della coltura non risente dell'effetto della salinità.

Come visto in fase di calibrazione e secondo uno studio del *Colorado States University* [10], il volume d'acqua di irrigazione necessario per il dimezzamento del valore di EC nello strato di suolo dell'apparato radicale delle piante è pari a 6 pollici, circa 150 mm.

Dalla calibrazione del modello di dilavamento, tale riduzione di EC si realizza con l'introduzione di un tasso di irrigazione irr pari a 0.5, con riferimento a uno spessore z_R di 750 mm e una porosità di 0.42.

Si applica il modello per studiare la risposta delle tre colture indagate nel caso di gestione con irrigazione controllata. La precipitazione di riferimento è quella del primo caso presentato, rappresentata in figura 6.

Di particolare interesse è l'analisi del profilo di concentrazione della soluzione del suolo, presentata di seguito con riferimento alla coltura della barbabietola da zucchero. Nel grafico vengono riportati il profilo della concentrazione salina e il valore limite tollerato dalla coltura:

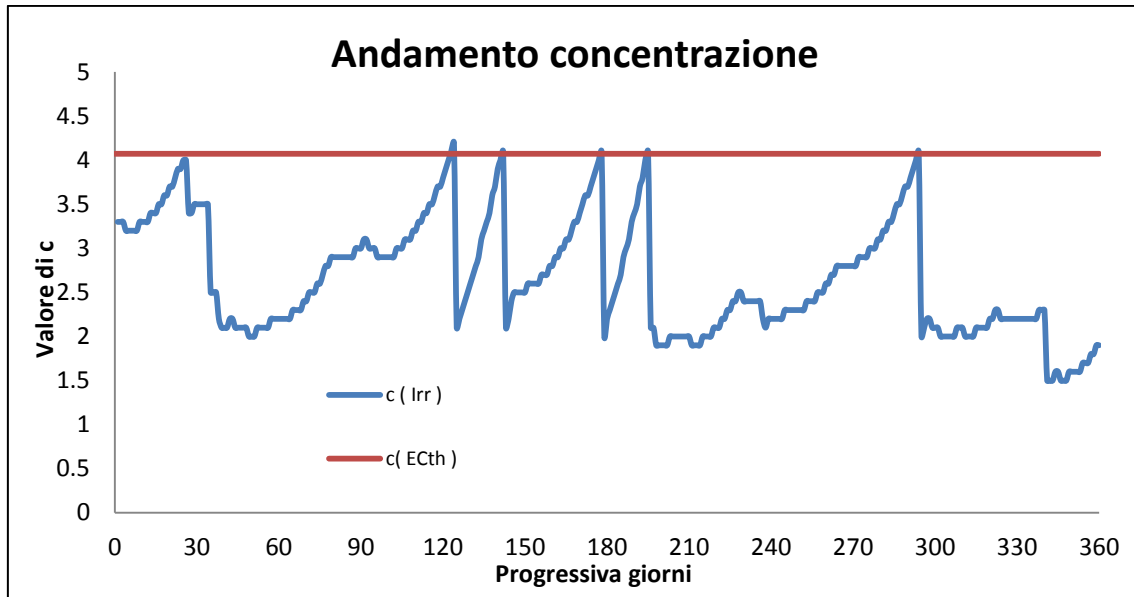


FIGURA 18 - GRAFICO DI ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE SALINA

L'effetto prodotto dall'irrigazione permette di contenere il valore di c e di garantire le condizioni di salinità per il massimo rendimento della coltura. Come si nota dal grafico, nei 360 giorni simulati dal modello, l'irrigazione viene attivata 5 volte, per un volume totale di irrigazione di circa 750 mm. Ad ogni attivazione, il valore di EC e quindi di c viene correttamente dimezzato, come stabilito nella fase di calibrazione del modello.

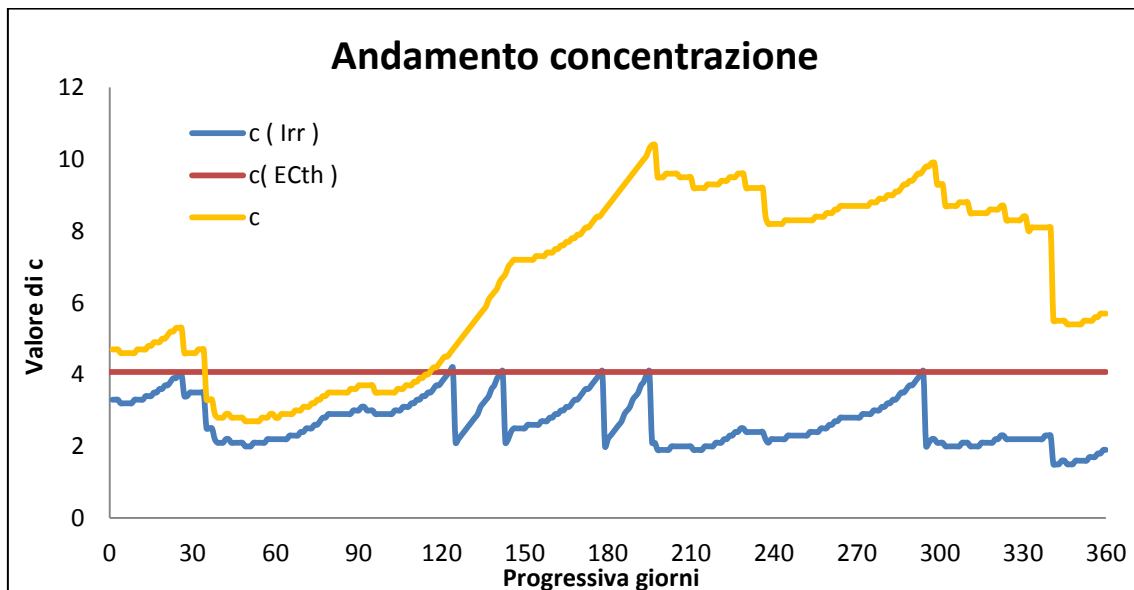


FIGURA 19 - CONFRONTO CON IL CASO SENZA IRRIGAZIONE

Il grafico proposto evidenzia il confronto tra il profilo di concentrazione nel caso con irrigazione controllata e quello nella situazione in cui l'intervento di gestione non risulta pratico ed economico.

Il beneficio in termini di produttività del sito risulta evidente e un corretto bilancio tra le spese per l'irrigazione e i benefici da essa prodotti in termini di incremento di produzione permette di determinare l'eventuale convenienza di questa pratica di gestione del suolo.

Il modello da questo punto di vista potrebbe essere un valido strumento utile in fase di progettazione preliminare dei sistemi per l'irrigazione di siti con problemi di salinità.

Da notare che l'attivazione dell'irrigazione avviene solamente in relazione allo stato di salinità del terreno, senza considerare l'effetto di stress idrico legato a s . Di seguito il grafico di confronto tra l'andamento di s nel caso irrigato e nel caso senza gestione:

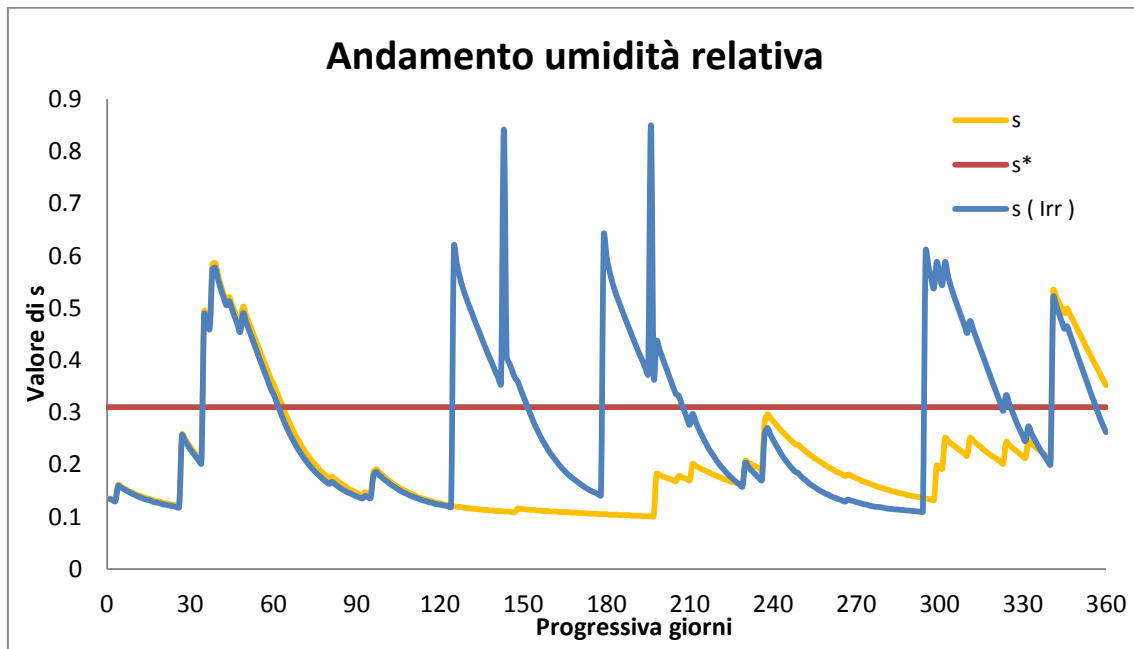


FIGURA 20 – ANDAMENTO DI s CON O SENZA IRRIGAZIONE PROGRAMMATA

L'irrigazione, attivata per contenere il valore della concentrazione salina, porta sicuramente dei benefici in termini di incremento di umidità relativa s .

Tuttavia, come si evidenzia dal grafico, l'apporto di notevoli volumi di irrigazioni isolate nel tempo attivano il termine di infiltrazione profonda, il quale disperde parte del volume irrigato senza portare beneficio in termini di incremento di umidità relativa del suolo.

Il problema della salinità viene sicuramente risolto, ma si intuisce che con una gestione più accurata potrebbe essere possibile, con volumi d'irrigazione pressoché simili, trattare in modo combinato salinità e umidità, realizzando le condizioni di ottimo per la coltura, sia dal punto di vista del contenuto idrico che da quello della salinità.

Come descritto nel primo capitolo infatti, un'irrigazione di intensità inferiore ma più frequente, potrebbe preferirsi. Con il modello sviluppato si dà una risposta anche a questa questione.

Si studia la situazione per cui l'irrigazione viene attivata al fine di mantenere lo stato di umidità del suolo nell'intervallo tra il valore di ottimo s^* e quello della capacità di campo s_c . Si vuole verificare l'opportunità di risolvere contemporaneamente il problema di stress idrico e quello legato alla salinità con volumi irrigui confrontabili a quelli determinati nel caso precedente.

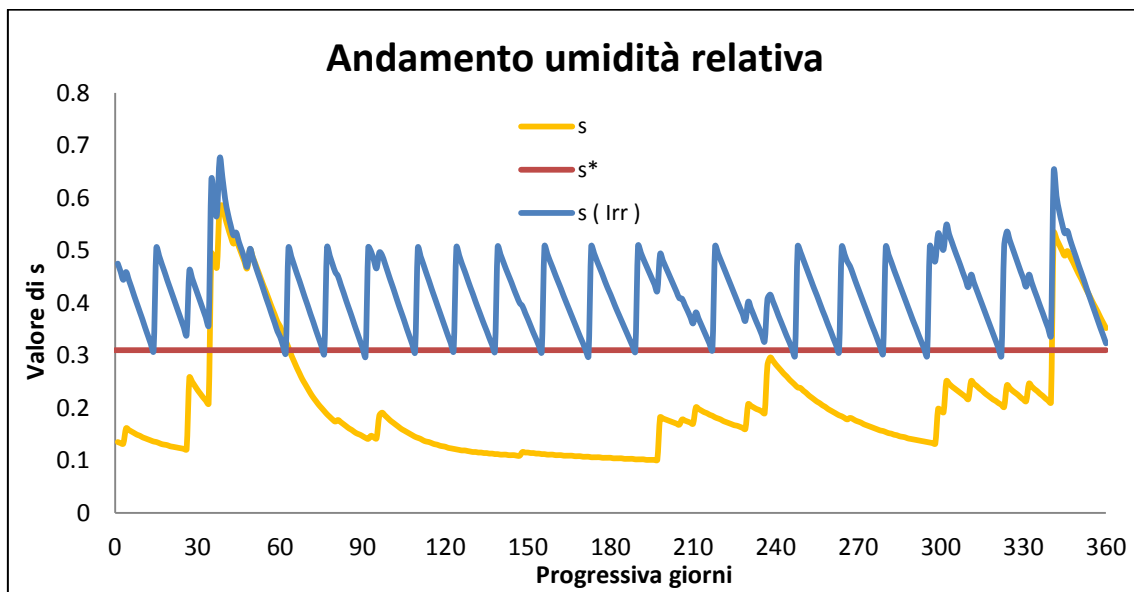


FIGURA 21 – ANDAMENTO DI s CON O SENZA IRRIGAZIONE PROGRAMMATA PER STRESS IDRICO

Come si vede dal grafico, in questa situazione l'irrigazione si attiva in modo molto più frequente (16 attivazioni su 360 giorni) ma con volumi irrigui più contenuti ad ogni applicazione. In particolare, dai risultati numerici del modello, si ricava un volume irriguo per applicazione di circa 60 mm, per un totale di circa 1000 mm annui.

Con un volume irriguo del tutto confrontabile a quello del caso precedente, il suolo può essere mantenuto in condizioni di umidità ottimali per la coltura garantendo, in questo modo, un rendimento produttivo superiore.

Inoltre, le portate necessarie per garantire il volume irriguo di ogni applicazione sono contenute, nell'ordine di grandezza di quelle fornite abitualmente dagli impianti per l'irrigazione gestiti dai consorzi di bonifica.

Di seguito l'andamento del profilo di concentrazione:

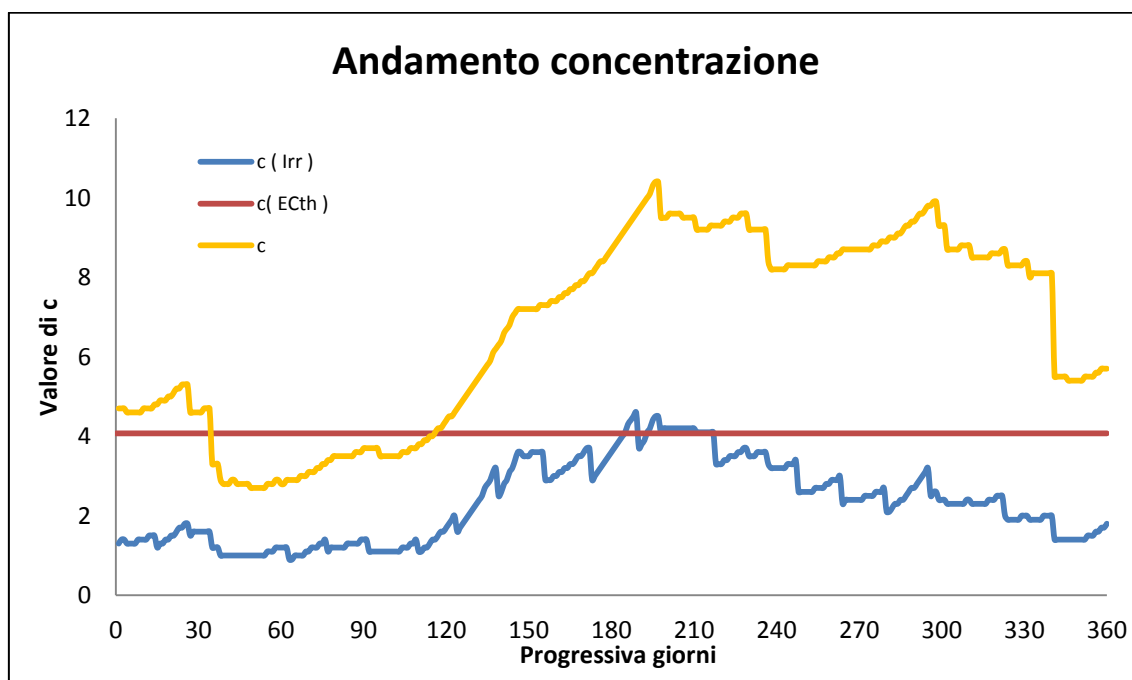


FIGURA 22 - ANDAMENTO DI c CON O SENZA IRRIGAZIONE PROGRAMMATA PER STRESS IDRICO

Dopo aver dimostrato l'efficacia di un'irrigazione meno intensa ma più frequente nel tempo in termini di umidità del suolo s , il grafico proposto

evidenzia l'effetto di dilavamento prodotto da questo tipo di gestione del suolo nei confronti della salinità.

Nel caso di applicazione, la concentrazione rimane sempre al di sotto del valore di soglia, garantendo ancora una volta il massimo rendimento produttivo della coltura.

In definitiva, con un'irrigazione abbondante ma poco frequente, la concentrazione salina viene notevolmente ridotta ad ogni applicazione ma, per l'attivazione del processo di infiltrazione profonda, parte del volume irriguo viene perso e non porta benefici in termini di contenuto idrico del terreno. Tale gestione può essere utile quando il valore della concentrazione salina risulta molto elevato, per cui un immediato abbattimento è assolutamente necessario. Questa situazione potrebbe verificarsi dopo un periodo prolungato di siccità, oppure al termine del periodo di riposo tra fasi di coltivazioni successive. In genere un intervento di bonifica con elevati volumi di irrigazione può risultare utile prima della semina della coltura, in modo da portare rapidamente il terreno alle condizioni per cui la germinazione risulta possibile.

Un'irrigazione meno intensa ma frequente nel tempo è sicuramente preferibile, sempre se tale tecnica di gestione possa essere facilmente applicabile. I volumi irrigui sono in questo caso leggermente superiori ma permettono il mantenimento dello stato di umidità del suolo a livelli ottimali per tutta la fase di coltura. Tale gestione risolve contemporaneamente sia il problema dello stress per carenza idrica che quello legato alla salinità, la quale risulta contenuta per tutto il periodo di osservazione.

4.3. Simulazione di cicli produttivi successivi

Come anticipato al punto precedente, la gestione di un suolo salino con l'irrigazione può essere diversa a seconda della fase di coltivazione in atto.

Per esempio, dopo la fase di mietitura o di raccolta della coltura, un periodo di riposo per il terreno è necessario. In questa fase, in cui l'irrigazione del suolo non è conveniente poiché nessun rendimento produttivo è richiesto, la vegetazione spontanea può comunque svilupparsi.

Se il periodo a 'maggese' corrisponde ad un periodo con scarso apporto meteorico, l'accumulo di sale nel terreno è notevole.

Prima della fase di semina successiva quindi, un abbondante intervento di irrigazione per dilavare il sale e ristabilire rapidamente le condizioni per la germinazione delle colture risulta necessario.

A questo punto, con un'irrigazione meno intensa ma ben programmata è possibile mantenere lo stato di umidità e di concentrazione salina a livelli tali da garantire il massimo rendimento della coltura.

Il modello permette di simulare l'alternanza tra fasi di coltivazione e fasi di riposo, con l'attivazione dell'irrigazione sia per ridurre lo stato di salinità che per mantenere, nella fase di coltivazione, un contenuto idrico ottimale per la coltura. L'attivazione dell'irrigazione fornisce i volumi necessari a dimezzare il valore di *EC* quando sia attivata in relazione al problema della salinità, garantisce inoltre il mantenimento dello stato di umidità ottimale durante tutta la fase produttiva. Lo scopo è quello di simulare cicli di coltivazione successivi e verificare, con il passaggio degli anni, il comportamento del terreno e le risposte della vegetazione.

Si simulano 5 cicli produttivi annui successivi, i quali riproducono in sequenza le risposte del sistema alternando una fase a 'maggese' con una fase coltivata a barbabietola, ciascuna di durata pari a 180 giorni. Nella fase a 'maggese' è prevista la crescita spontanea del loglio, mentre nella fase

coltivata è previsto l'ausilio dell'irrigazione per mantenere massimo il rendimento della coltura.

I risultati sono relativi a 4 anni di osservazione ipotizzando che nel primo ciclo simulato il sistema vada a regime e non sia più condizionato dallo stato iniziale imposto.

La precipitazione generata dal modello ha le seguenti caratteristiche:

<i>Anno</i>	<i>V_{PIOGGIA} [mm]</i>	<i>GG_{PIOVOSI}</i>	<i>h_{MEDIO} [mm]</i>	<i>t_{MEDIO_INT} [gg]</i>
1	497.1	28	17.8	12.9
2	292.4	26	11.2	13.8
3	500.3	30	16.7	12.0
4	603.5	41	14.7	8.9

TABELLA 8 - CARATTERISTICHE DELLA PRECIPITAZIONE NEI CICLI PRODUTTIVI

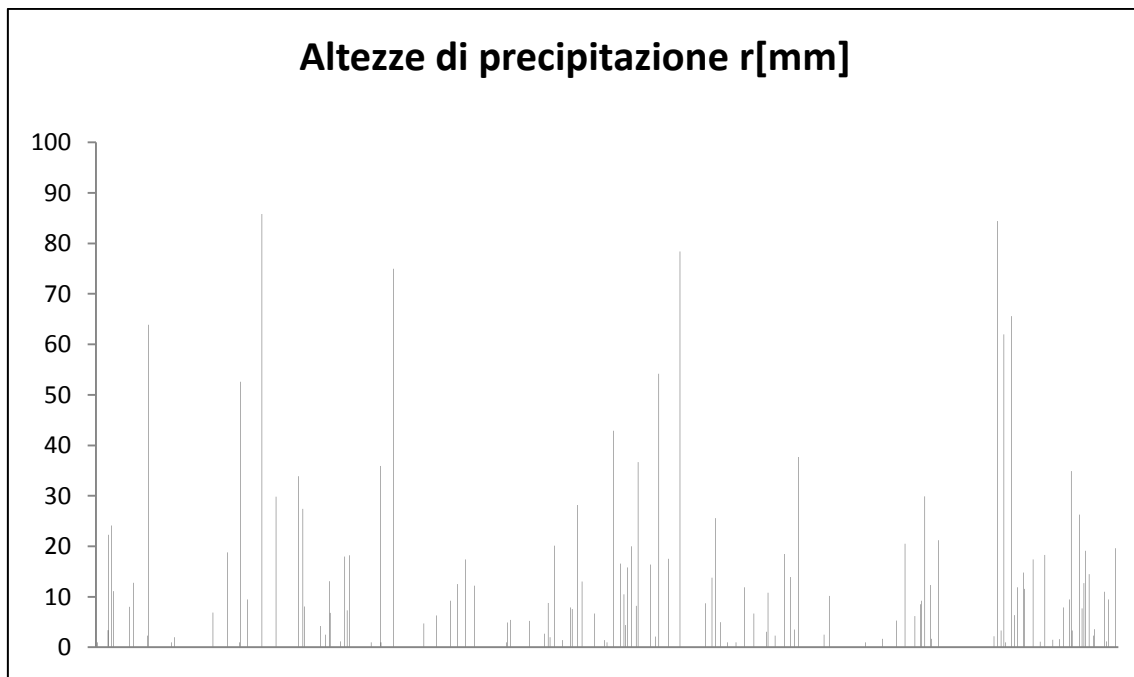


FIGURA 23 - ISTOGRAMMA DELLE ALTEZZE DI PRECIPITAZIONE NEL PERIODO DI SIMULAZIONE CONSIDERATO

Di seguito i grafici dell'andamento della superficie vegetata b , dell'umidità relativa del suolo s e della concentrazione salina c :

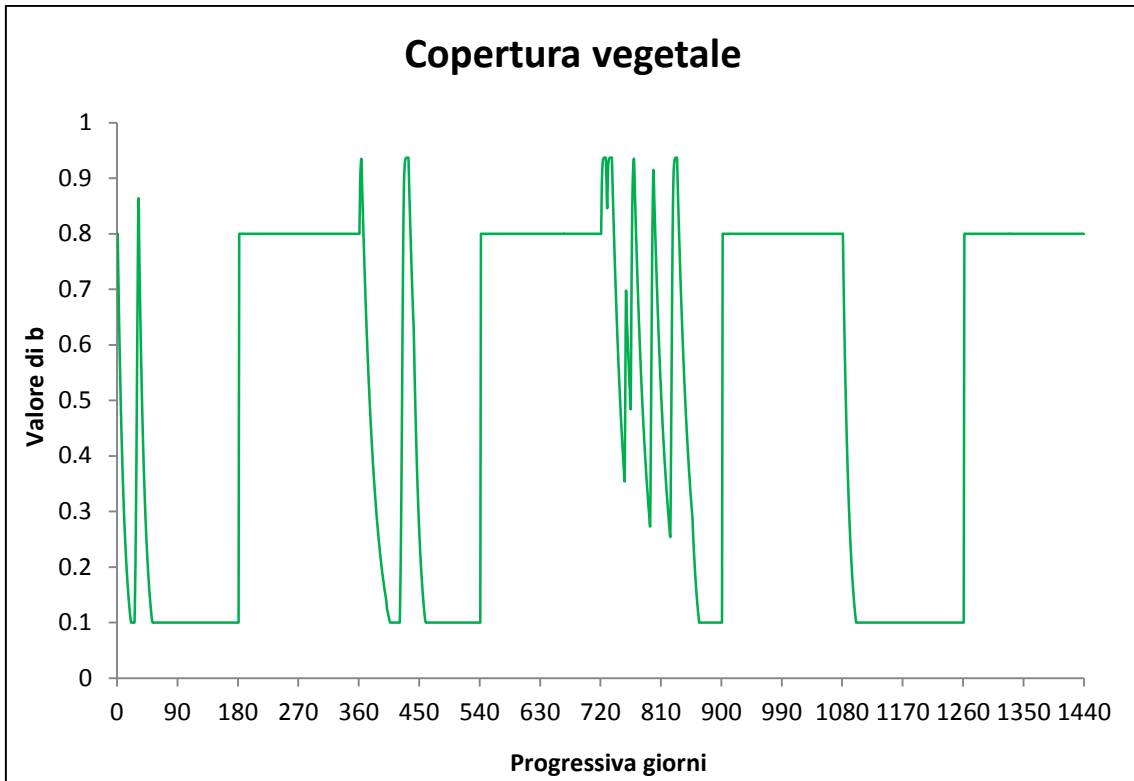


FIGURA 24 - INDICE DI COPERTURA VEGETALE b

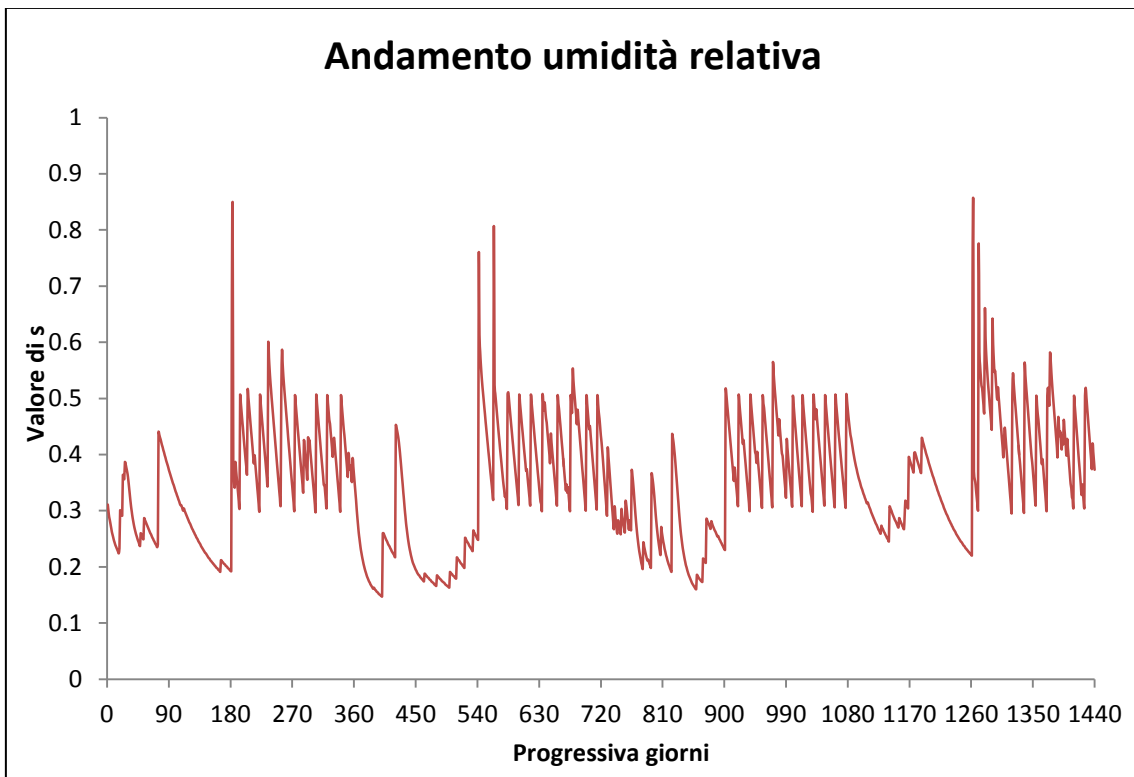


FIGURA 25 - ANDAMENTO DELL'UMIDITA' RELATIVA DEL TERRENO

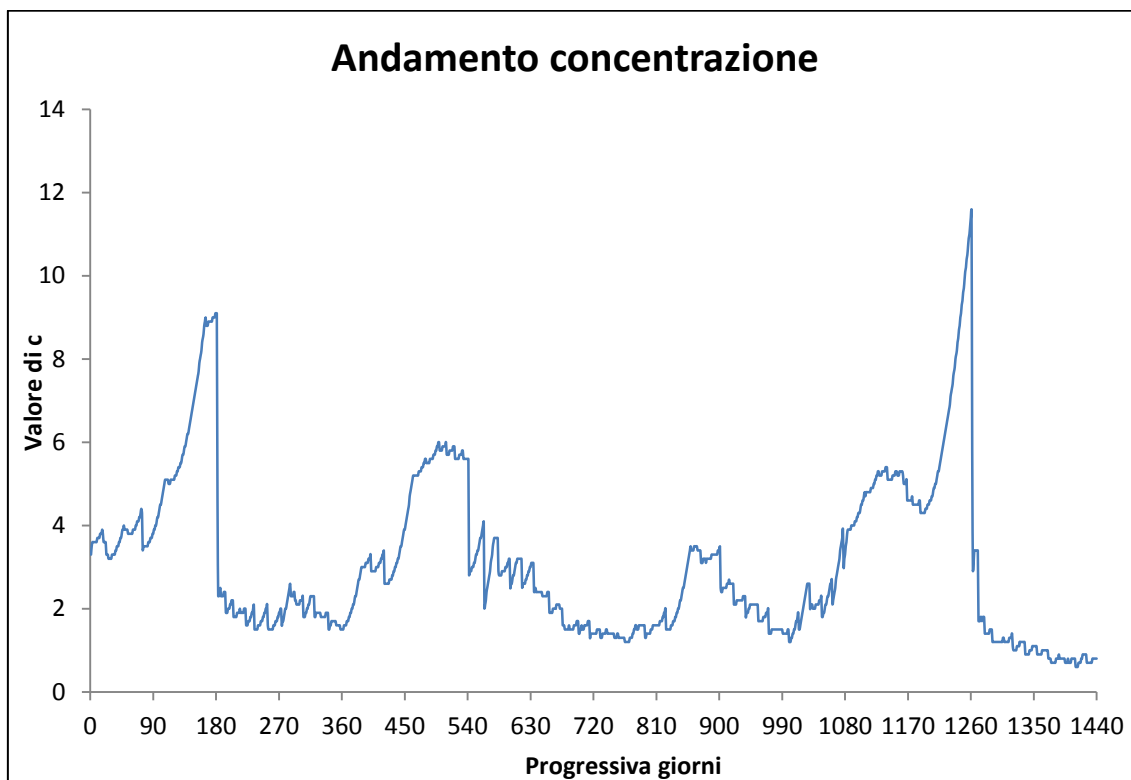


FIGURA 26 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE SALINA DEL SUOLO

I risultati appena proposti riassumono quanto osservato e ricavato dagli studi condotti ai punti precedenti.

Le due fasi alternate si possono distinguere chiaramente nei grafici di andamento. L'indice dell'estensione della superficie vegetata è costante nella fase di coltura, mentre varia in funzione dello stato del suolo quando si considera la fase a maggese con sviluppo del loglio.

Nei primi tre cicli di coltivazione la vegetazione spontanea è in grado di resistere allo stato di stress e rigenerarsi nel momento in cui le condizioni lo permettono. Questo avviene tuttavia per un periodo limitato, oltre il quale l'accumulo di sale è rilevante e la vegetazione spontanea non è in grado di sopravvivere. Nel terzo ciclo, la concomitanza di un periodo molto piovoso con la fase di maggese permette di mantenere contenuto il valore della concentrazione salina, di conseguenza la vegetazione spontanea riesce a

resistere e l'indice b rimane positivo per gran parte del periodo di riferimento.

Nel quarto ciclo di maggese invece, la vegetazione spontanea muore rapidamente e non è mai nelle condizioni di superare lo stress per salinità.

I picchi di concentrazioni visibili in figura 26 corrispondono alla fine della fase di maggese e come anticipato, solo con un abbondante irrigazione il terreno può essere riportato nelle condizioni ottimali per la semina della coltura. All'inizio di ogni ciclo colturale quindi, l'irrigazione deve essere concentrata e abbondante, con lo scopo di ridurre rapidamente il valore di EC . A questo punto, l'irrigazione frequente e controllata permette di mantenere lo stato di umidità del suolo a livelli ottimali per la coltura.

Nel grafico dell'andamento di c vengono indicate le attivazioni dell'irrigazione nel periodo di simulazione, differenziando gli interventi di bonifica da quelli di controllo:

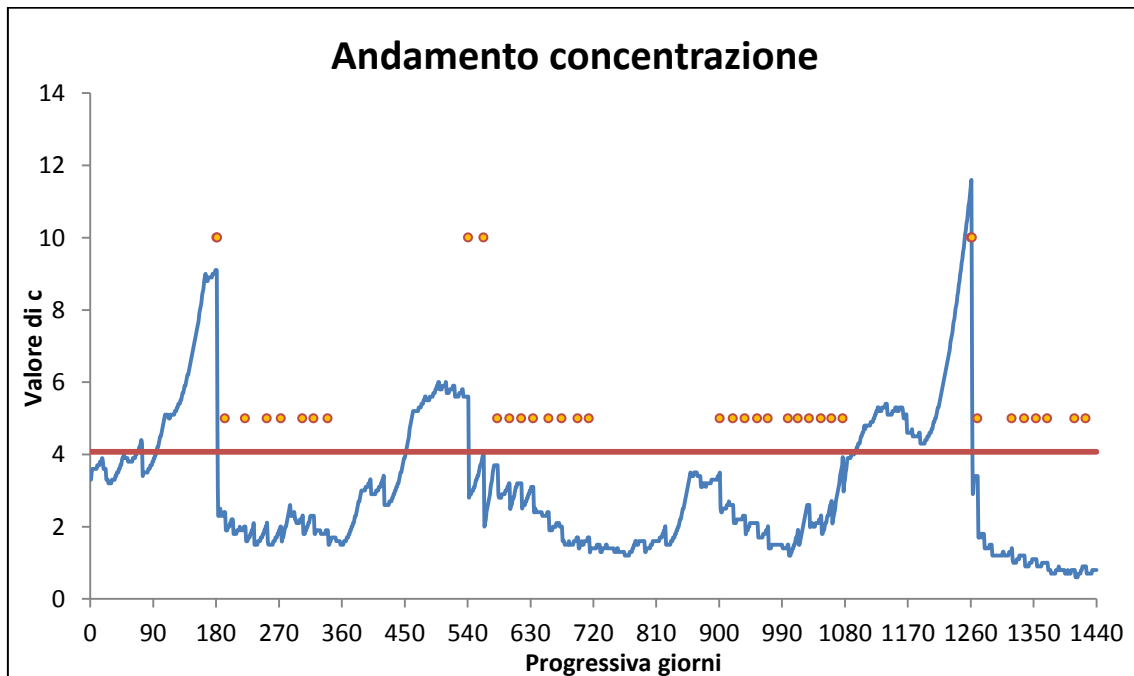


FIGURA 27 – MAPPA DELLE ATTIVAZIONI DELL'IRRIGAZIONE

Come anticipato, nel grafico si distinguono due diversi tipi di irrigazione, a seconda che questa sia attivata per sopperire allo stress per salinità o per carenza idrica.

Interventi concentrati con volumi irrigui importanti sono necessari per abbattere i picchi di concentrazione dopo la fase di riposo, un'irrigazione meno intensa ma più frequente è richiesta invece per mantenere lo stato di umidità ottimo durante la fase produttiva.

Analoghe considerazioni possono essere fatte con riferimento alla coltura della soia. In questo caso, per il diverso grado di tolleranza alla salinità, i volumi di irrigazione richiesti sono necessariamente maggiori.

Di seguito il grafico di andamento della concentrazione c nel caso della coltura della soia, con indicate le diverse attivazioni dell'irrigazione:

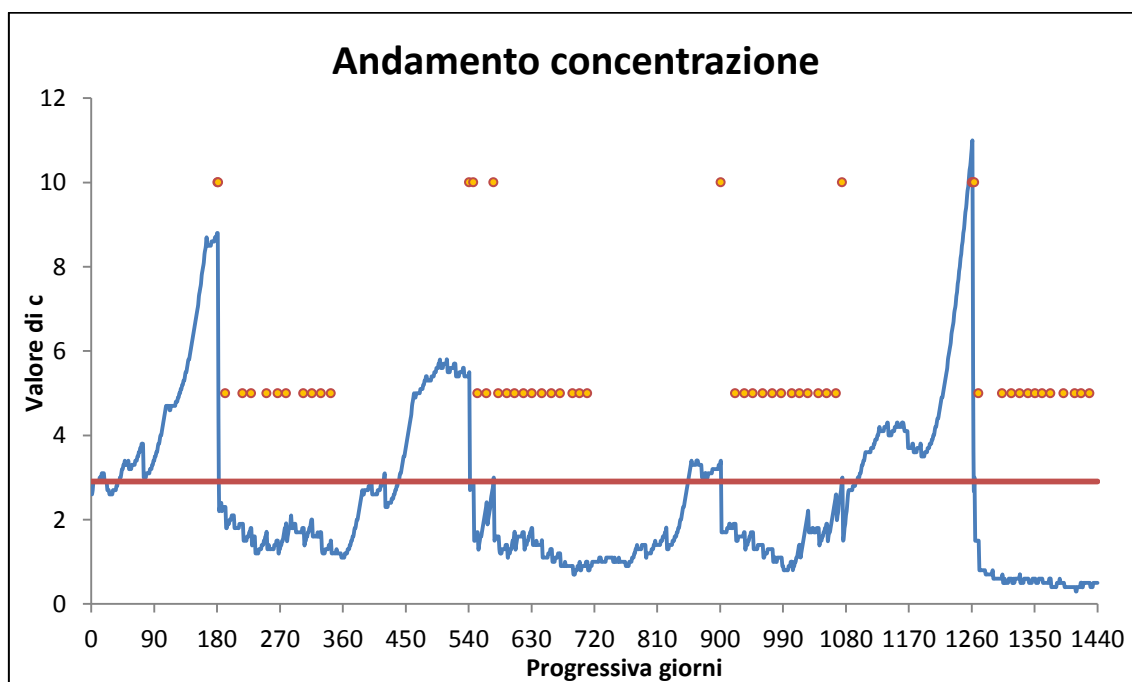


FIGURA 28 - MAPPA DELLE ATTIVAZIONI DELL'IRRIGAZIONE NEL CASO DI COLTIVAZIONE DELLA SOIA

Lo studio condotto non ha prodotto risultati inaspettati ma ha confermato e validato le ipotesi di intervento e gestione spesso applicate nei casi reali dove il problema della salinità del suolo è rilevante.

I risultati numerici prodotti permettono di meglio interpretare il problema precisando in modo più dettagliato e quantitativo l'effetto prodotto dalle pratiche di gestione.

5. CONCLUSIONI

In questo studio, un modello eco idrologico che risolve in modo accoppiato l'equazione di bilancio del suolo e quella di evoluzione della vegetazione, è stato particolarizzato con riferimento al problema della salinità dei terreni. Attraverso l'introduzione di un'equazione di dissoluzione e di un mini modello di dilavamento, è stato possibile legare tra loro le dinamiche della vegetazione, l'evoluzione dell'umidità relativa nel suolo e l'andamento della concentrazione salina nella soluzione liquida presente nel terreno.

Nelle zone a clima arido e semi arido, nelle quali l'apporto meteorico risulta assai limitato, il problema della salinità assume notevole rilevanza.

In tali condizioni, l'effetto di dilavamento naturale prodotto dall'ingresso di un volume di precipitazione nel sistema, risulta scarso e la concentrazione salina dell'acqua di soluzione può arrivare a livelli tanto elevati da bloccare ogni processo di sviluppo della vegetazione, portando in breve tempo ad una perdita della capacità produttiva del sito.

Nel caso di terreni argillosi, l'effetto è ancora più gravoso poiché i continui ritiri e rigonfiamenti provocati dalla presenza di sale nella soluzione del suolo, generano delle fessurazioni che possono creare vie preferenziali per l'infiltrazione dell'acqua di dilavamento. In questa condizione, l'acqua che arriva nel sistema filtra rapidamente dallo strato superficiale a quello profondo e viene persa prima di generare i benefici attesi, sia in termini di incremento di umidità relativa, nella zona dall'apparato radicale della vegetazione, che per l'effetto di dilavamento del sale.

E' facile intuire come solo attraverso una gestione programmata del suolo sia possibile recuperare la capacità produttiva e mantenere attiva un'area afflitta da queste problematiche.

L'obiettivo principale dello studio è quello di descrivere il fenomeno della salinità di un terreno, approfondendo la questione in maniera più teorica e

scientifico . Tale problema infatti, per la molteplicità dei fattori dai quali è attivato e poi governato, viene spesso risolto in modo approssimativo, con pratiche agrarie consolidate ma non supportate da uno studio approfondito del fenomeno e degli effetti che tali interventi inducono al sistema suolo-acqua-vegetazione.

Queste pratiche infatti, sono in genere applicate senza corretta programmazione in funzione dello stato del suolo, con un consumo esagerato di risorse idriche che, specialmente nelle aree a clima secco, non può e non deve essere sprecata.

Dopo una fase di calibrazione dei parametri, necessaria per particularizzare il modello in funzione delle condizioni climatiche ambientali che si vogliono studiare, sono state eseguite diverse simulazioni allo scopo di supportare le considerazioni teoriche descritte con alcuni risultati numerici.

Il modello è stato reso più generale immaginando di simulare una precipitazione casuale, ricavata trasformando una serie di numeri casuali in relazione ad una distribuzione esponenziale, la quale ben descrive l'andamento dell'altezza di precipitazione giornaliera.

I profili di concentrazione salina ricavati presentano una fase di incremento durante i periodi secchi, funzione del numero di giorni trascorsi tra eventi meteorici successivi, subiscono poi un crollo rapido quando un volume idrico entra nel sistema.

La variabile che descrive l'estensione della copertura vegetale, funzione dello stato di salinità e umidità del terreno, è stata assunta costante nel caso delle colture agricole immaginando che l'irrigazione sia attivabile quando necessaria, per garantire alle colture le condizioni ottimali e mantenere massimo il rendimento produttivo dell'area. Nel caso di crescita di vegetazione spontanea invece, il tasso di sviluppo g e quello di mortalità μ , funzione anch'essi di c e s , regolano l'estensione della porzione vegetata b .

L'andamento dell'umidità relativa del suolo è poi legato alla curva di concentrazione salina attraverso il termine di perdita per evapotraspirazione.

Analizzando il comportamento di colture con diverso grado di tolleranza al sale, è emerso come colture più sensibili subiscano una riduzione di rendimento notevole quando l'irrigazione per il dilavamento del sale non sia applicabile, senza possibilità di recupero autonomo dopo periodi di siccità prolungati. In queste condizioni, solo con l'introduzione di specie tolleranti, quali ad esempio la barbabietola da zucchero, il rendimento produttivo dell'area può essere accettabile e recuperabile tra cicli produttivi successivi. Lo stress per la coltura è comunque presente e la riduzione di rendimento può portarsi a valori superiori al 50%.

Se si attiva l'irrigazione al solo scopo di ridurre la concentrazione salina, un prefissato volume irriguo risulta necessario. Si tratta però di un'irrigazione abbondante, con volumi notevoli che devono essere introdotti nel sistema in modo concentrato nel tempo, per esempio prima della fase di semina o piantumazione di una coltura.

Il terreno viene portato rapidamente a saturazione, perciò si attiva il processo di infiltrazione profonda quando il drenaggio dall'area sia adeguato. Parte del volume irrigato risulta quindi perso, e non produce incrementi di umidità relativa.

Con un'irrigazione più frequente e di intensità contenuta, il valore di s può essere mantenuto tra il valore di ottimo per la vegetazione e quello della capacità di campo del suolo, ricreando le condizioni ottimali di umidità per le colture e massimizzando il loro rendimento. Con questo tipo di gestione anche la concentrazione salina risulta contenuta in tutto il periodo di osservazione simulato, e nessun volume irriguo risulta sprecato.

Secondo quanto citato, una gestione del suolo con volumi irrigui più ridotti ad ogni applicazione ma introdotti nel sistema in modo più frequente, è da

preferirsi al processo di bonifica che prevede invece un'irrigazione abbondante e concentrata nel tempo.

Dai risultati ottenuti in riferimento alla simulazione di cicli produttivi successivi, con alternanza di una fase coltivata a gestione programmata e di una fase di riposo senza controllo irriguo, l'intervento di bonifica risulta tuttavia necessario, specialmente quando periodi particolarmente secchi coincidono con la fase di 'maggese'. L'accumulo di sale in questa fase, quando nessun controllo irriguo viene applicato poiché il rendimento produttivo del terreno non è richiesto, porta all'incremento del valore della conducibilità elettrica del suolo, che limita o addirittura blocca il processo di germinazione della coltura all'inizio della successiva fase coltivata.

In definitiva, solo attuando in modo ben programmato tutte le tecniche di gestione presentate si può mantenere produttiva un'area afflitta dal problema della salinizzazione del suolo.

Questa gestione deve essere però pianificata in funzione dello stato del suolo, al fine di mantenerlo nelle condizioni ottimali per le colture durante tutto il ciclo produttivo, con maggiore attenzione alle fasi più delicate dello sviluppo di una coltura, quale ad esempio la fase di germinazione.

Da questo punto di vista, il modello fornisce un valido strumento per il controllo dello stato del suolo, e permette, se ben calibrato in funzione delle caratteristiche specifiche del sito da studiare, una programmazione accurata degli interventi di gestione, dando specifiche indicazioni sui volumi irrigui necessari e sui benefici prodotti in termini di miglioramento del rendimento della coltura. Lo studio oltre ad approfondire e dare risposta quantitativa alle problematiche analizzate, permette di simulare ipotesi di intervento per il controllo del suolo, fornisce indicazioni numeriche sulla risposta della vegetazione a stati di stress idrici e salini applicati ed è in grado di fornire i volumi irrigui necessari al dilavamento del sale in relazione all'apporto meteorico naturale nell'area di interesse.

Parametri e variabili del modello

Parametri dell'equazione di bilancio:

s	umidità relativa mediata sulla profondità dell'apparato radicale
n	porosità del suolo
z_R	profondità dell'apparato radicale della vegetazione [mm]
s_H	punto igroscopico del suolo (contenuto idrico minimo)
s_W	punto di appassimento
s^*	valore di umidità ottimo per la vegetazione
s_C	capacità di campo del suolo
β	coefficiente di perdita per infiltrazione profonda
K	conducibilità satura del terreno [mm/gg]
I	indice d'infiltrazione
X_b	perdita nella porzione di suolo vegetato [mm]
X_o	perdita nella porzione di suolo nudo [mm]

Parametri della vegetazione:

b	porzione di suolo vegetato
E_M	massimo valore di evapotraspirazione [mm/gg]
E_W	minimo valore di evapotraspirazione [mm/gg]
E_M^*	valore di evapotraspirazione corretta dalla salinità [mm/gg]
K_S	coefficiente di stress legato alla salinità
Y	rendimento della coltura
EC	conduttività elettrica della soluzione del suolo
EC_{th}	conducibilità elettrica limite per $Y = \max$ [dS/m]
EC_o	conducibilità elettrica per $Y = 0$ [dS/m]
k_Y	fattore di rendimento
B	riduzione di rendimento % per incremento di EC [% m /dS]
g_o	tasso di sviluppo ottimo
μ_1	tasso di mortalità in condizioni di suolo secco
μ_2	tasso di mortalità in condizioni di suolo umido

Parametri del modello di evoluzione della concentrazione salina :

c	concentrazione di sali nella soluzione del suolo
c_R	concentrazione salina di riferimento, pari al 35‰
c_0	concentrazione salina presente al tempo t
φ	costante di reazione del processo di dissoluzione

Parametri della precipitazione:

- r* altezza di precipitazione giornaliera [mm/gg]
- τ* numero di giorni trascorsi tra eventi di precipitazioni successivi
- λ* precipitazione media giornaliera [mm/gg]
- ψ* tempo medio di inter arrivo tra eventi successivi [gg]

Altre grandezze citate:

- ESP* percentuale di sodio scambiabile
- SAR* rapporto di assorbimento di sodio
- TDS* solidi totali disciolti
- LR* volume idrico per dilavamento del sale richiesto dalla coltura
- R* volume idrico in ingresso da precipitazione
- Irr* volume idrico in ingresso da irrigazione
- E* volume in uscita per evapotraspirazione
- L* volume in uscita per infiltrazione profonda

Codice di calcolo in linguaggio fortran

```
program modello_ecoidrologico

implicit none

FILE 1_PARAMETRI PIOGGIA E TERRENO
to=tempo medio interrario pioggia,ro=intensità media giorn.
no=porosità,zr=strato radicale, beta=esponente, k=conduc.terreno

FILE 2_STATO INIZIALE
co=conc iniziale, bo=veg.iniziale, so=umidità iniziale

FILE 3_PARAMETRI VEGETAZIONE
KcEto=ET potenziale, Etm=valore massimo ET, Etw= minimo ET,
ky=coeff.calcolo ks, rend= pend. rendimento con sale,
EC_tr=condubibilità limite,udry=tasso morte terreno secco,
umost=tasso morte con suolo umido,go= tasso sviluppo,
ECo=conducibilità per Y=0

FILE 4_STATI UMIDITA' NOTEVOLI
sh=punto igroscopico, sw=punto appassimento, sopt=umidità ottima
sfc=capacità campo

FILE 10_PARAMETRI SALINITA'
cr=massima concentrazione(3,5%) , cI=conc.acqua irrigata

FILE 5_VARIABILI OUTPUT
b=indice copertura vegetata, c=conc. Soluzione, s=umidità
Y=rendimento coltura

VARIABILI AUSILIARIE INTERNE
r=vettore alt.pioggia, Xo,Xb=termini di perdita, Ks=coeff.sale
EC=conduttività elettrica suolo , tau = vettore interrarrivi ,
fi=cost.reazione ,Inf=tasso infiltrazione,
Int=nø giorni dall'ultima pioggia, Irr=tasso irrigazione,
V = volume irrigazione , P = volume totale pioggia

Dichiarazione delle variabili

integer dt,i,n,tau(1000000),Int
real*8 to,ro,K,beta,no,zr
real*8 r(1000000),Xo,Xb,Ks,EC
real*8 co,so,bo
real*8 kcEto,Etw,ky,rend,EC_tr,umost,udry,go,Etm,ECo
real*8 sh,sw,sopt,sfc,Inf,Irr
real*8 cr,cI
real*8 c,s,b,V,P,Y
character*1 kind

Apertura dei file dati input e file risultati output

open(1,file='dati.dat')
open(2,file='stato_iniziale.dat')
open(3,file='par_vegetazione.dat')
open(4,file='stati_notevoli.dat')
```

```
open(7,file='var_output.txt')
open(8,file='pioggia.txt')
open(9,file='grafici.txt')
open(10,file='salinita.dat')
open(11,file='parametricrop1.dat')
open(12,file='interarrivi.txt')
```

Lettura stato parametri generali e stato iniziale del sistema

```
read(1,*) to,ro,k,beta,no,zr
read(2,*) co,so,bo
```

Distinzione tra crop and natural vegetation con lettura o inserimento dei parametri caratteristici

```
12 write(6,*) 'crop or natural vegetation:c,n'
read(5,*) kind
if ((kind.ne.'c').and.(kind.ne.'n')) then
write(6,*) 'error, please retry'
go to 12
else
if (kind .eq. 'c') then
write(6,*) 'insert crop parameters:'
write(6,*) 'ETmax,ETmin,ky factor,
reductionyield/increaseEC,EC threshold'
read(11,*) kcEto,ETw,ky,rend,EC_tr,ECO
endif
if (kind .eq. 'n') then
read(3,*) kcEto,ETw,ky,rend,EC_tr,umost,udry,go
endif
endif
```

Lettura stati noti terreno(punto igroscopico, capacità di campo..)

```
read(4,*) sh,sw,sopt,sfc
```

Lettura parametri salinità

```
read(10,*) cr,cI
```

Inserimento n° di giorni della simulazione

```
write(6,*) 'insert the number of days of the simulation'
read(5,*) n
```

Scrittura file risultati

```
call output(n,so,bo,co,cI)
```

Chiamata della subroutine che genera gli eventi di pioggia

```
call rain(n,to,ro,r,tau)
```

Eventuale scrittura dei vettori r e tau su file

```
write(8,105) (r(i),i=1,n)
write(12,106) (tau(i),i=1,n)
```

Eventuale lettura file piogge esterno

```
read(8,*) (r(i),i=1,n)
read(12,*) (tau(i),i=1,n)
```

Eventuale scrittura a video file pioggia

```
write(6,105) (r(i),i=1,n)
write(6,106) (tau(i),i=1,n)
```

```
Inizializzazione variabili volume Irriguo e volume di pioggia
V = 0.d0
P = 0.d0

Inizio ciclo di calcolo
do i=1,n

Inizializzazione variabili
s = 0.d0
b = 0.d0
c = 0.d0
EC = 0.d0
ETm = 0.d0
Xb = 0.d0
Xo = 0.d0
Ks = 0.d0
Inf = 0.d0
Int = 0.d0
Irr = 0.d0

Calcolo parametri
Inf = min((r(i)/(no*zr)),1-so)
Int = tau(i)
EC = 1714*co + 0.02

Calcolo coefficiente stress per salinità
Ks = 1 - ((rend/(ky*100))*(EC - EC_tr))

Differenziazione caso natural/crop vegetation
if (kind.eq.'n') then
Chiamata calcolo salinità e conduttività elettrica
call salinity_1(Inf,no,zr,Int,cr,co,c)
Chiamata calcolo dinamica della vegetazione
call naturalveg(so,bo,go,umost,udry,EC,EC_tr,sw,sopt,b)
else
Chiamata calcolo irrigazione artificiale
call irrigation(so,sopt,EC,EC_tr,Irr)

Chiamata calcolo salinità con irrigazione salina
call salinity_2(Inf,Irr,Int,co,cI,so,c,cr)

Stima volume infiltrato e irrigato
Inf = Inf + Irr

Chiamata calcolo salinità e conduttività elettrica
call salinity_1(Inf,no,zr,Int,cr,co,c)

Calcolo rendimento coltura
Y= ((ECo-EC)/(ECo-EC_tr))*100
if (Y.gt.100.d0) then
Y=100.d0
endif
if (Y.lt.0.d0) then
Y=0.d0
endif

Accumulo volume irriguo
V = V + Irr
```

Costanza di b nel caso crop vegetation

```
b = bo
endif
```

Chiamata calcolo perdite

```
call loss(so,sw,sh,sopt,sfc,K,beta,ETw,kcETo,Ks,Xb,Xo,ETm)
      Xb=Xb/(no*zr)
      Xo=Xo/(no*zr)
```

Chiamata calcolo stato umidità del suolo

```
call soil(Inf,so,Xb,Xo,bo,s)
if (s.gt.0.85) then
  s = 0.85
endif
```

Scrittura su file dei risultati

```
write(7,103) tau(i),r(i),co*1000,EC,bo,Xb,Xo,Irr,so,Y,Ks
write(9,104) r(i),(co*1000),bo,so,Y
```

Scambio stato attuale-stato old per step successivo

```
so = s
co = c
bo = b
P = P + r(i)
enddo
```

Calcolo volume effettivo irrigato ed eventuale scrittura

```
V = V*no*zr
write(7,*)'Total irrigation volume=', V,'mm/mq'
```

Eventuale scrittura altezza totale di pioggia

```
write(7,*)'Total rainfall =', P , 'mm/mq'
```

Chiusura file

```
close(1)
close(2)
close(3)
close(4)
close(7)
close(8)
close(9)
close(10)
close(11)
close(12)
```

Formati di scrittura dei file output

```
103 format(1(i3),2(f14.1),6(f14.3),2(f14.1))
104 format(1x(f14.1),1x(f14.1),1x(f14.3),1x(f14.3),1x(f14.1))
105 format(1(f14.1))
106 format(1(i3))
107 format(1(i3),1(f14.1),1(f14.5),6(f14.5))
108 format(1x(f14.1),1x(f14.1),1x(f14.3),1x(f14.3))
```

```
stop
end program
```

Subroutine per la scrittura dei dati generali della simulazione nel del file risultati

```

Subroutine output (n,so,bo,co,cI)
implicit none

integer n
real*8 so,bo,co,cI

write(7,*) 'Duration of the simulation=',n, ' days'
write(7,*) 'Initial soil moisture=', so
write(7,*) 'Initial vegetation cover=', bo
Write(7,*) 'Initial salt concentration=', co*1000
Eventuale irrigazione con acqua salata
write(7,*) 'Concentration of irrigation water =',cI*1000
write(7,*)
write(7,*) 'tau(i)      r(i)      c      EC
1b          Xb          Xo          Irr          s
2  Y'

return
end

```

Subroutine che trasforma una serie di numeri random compresi tra 0 e 1 in un campione di altezze di precipitazione r(i) e di inter arrivi tau(i). i rappresenta l'indice del giorno della simulazione ES.

r(i) =(0,0,0,23.2,0,0,14.3,0....)
tau(i)=(1,2,3, 0, 1,2, 0, 1....)

```

subroutine rain (n,to,ro,r,tau)
implicit none

integer n,i,tmp(9),z(1000),k,j,jj,jold,tau(n)
real*8 to,ro
real*8 toll
real*8 ri(1000),t(1000),p(1000),s(1000)
real*8 r(n)

```

Casualità della serie random

```

call ltime(time(),tmp)
call srand(tmp(1))

```

k=1000

Generazione serie random e inizializzazione vettori ausiliari

```

do i=1,k
  ri(i)= 0.d0
  t(i)= 0.d0
  p(i) = rand()
  s(i) = rand()
enddo

```

Trasformazione in sequenza esponenziale e modifica vettore tempi interarrivo in vettore di # interi

```

toll=1.d0
do i=1,k
  ri(i)= - ro * log(1-p(i))

```

```
t(i)= - to * log(1-s(i))
z(i)= nint(t(i))
```

Se l'intensità di pioggia \bar{S} diversa da 0 ma minore di 1 mm la considero pari a 1mm

```
if (ri(i).le.toll) then
    ri(i)= toll
endif
enddo
```

Inizializzazione vettori pioggia e interrarrivo definitivi

```
do i=1,n
    r(i)= 0.d0
    tau(i) = 0.d0
enddo
```

Costruzione vettori pioggia e tempo di interarrivo

```
j=1
jold=1
do i=1,k
    if (i.eq.1) then
        j = j + z(i)-1
    else
        j = j + z(i)
    endif
    tau(j)=0
    do jj = j-1,jold,-1
        tau(jj)= jj-jold+1
    enddo
    if (j.gt.(3*n)) then
        go to 50
    endif
    r(j) = ri(i)
    jold = jold+z(i)
50 enddo

101 format(10(f14.1))
102 format(10(i5))
return
end
```

Subroutine che calcola la concentrazione salina nel suolo per effetto di dissoluzione(reazione 1^o ordine) e dilavamento(piston flow model).

```
subroutine salinity_1(Inf,no,zr,Int,cr,co,c)
implicit none

integer Int
real*8 no,zr,co
real*8 cr,fi,Inf
real*8 c
```

Dissoluzione

```
fi=0.0001
c = cr + (co-cr)*exp(-fi*Int)
```

Dilavamento

```
if (Inf.ne.0) then
    if (Inf.ge.1.0) then
        c=0.d0
    else
```

```
        c=co*(1-Inf)
    endif
endif

return
end
```

Subroutine che stima la frazione di suolo vegetato in funzione dei valori di concentrazione c e umidità relativa s, il tutto riferito al caso di vegetazione spontanea in assenza di irrigazione

```
subroutine naturalveg(so,bo,go,umost,udry,EC,EC_tr,sw,sopt,b)
implicit none
```

```
real*8 so,bo,go,umost,udry,EC,EC_tr,sw,sopt,toll
real*8 g,u
real*8 b

g=0.d0
u=0.d0
toll=1e-1
```

Influenza sui tassi di sviluppo e morte della vegetazione della conducibilità del suolo(se EC>EClimite, il tasso di sviluppo si annulla e il tasso di morte del terreno umido viene posto uguale e quello del terreno secco)

```
if (EC.gt.EC_tr) then
    g = 0.d0
    u = udry
else
```

Caso di studio con solo effetto di stress per salinità

```
    g = go
    u = umost
endif
```

Valore dei tassi in funzione dello stress combinato umidità/sale

```
    if (so.lt.sw) then
        u = udry
        g = 0.d0
    else
        u = umost
        if (so.ge.sopt) then
            g = go
        else
            g = 0.d0
        endif
    endif
endif
```

Equazione discretizzata della dinamica della vegetazione spontanea

```
b = g*bo*(1-bo) - u*bo + bo
if (b.le.toll) then
    b = toll
endif
return
end
```

Subroutine che stima le perdite per evapotraspirazione dal suolo vegetato e da quello 'nudo', in funzione dello stato di umidità

```
subroutine loss (so, sw, sh, sopt, sfc, k, beta, Etw, kcEto, Ks, Xb, Xo, ETm)
implicit none
```

```
real*8 so, c, sw, sh, sopt, sfc, K, beta, Etw, kcEto, Ks
real*8 f, h, l
real*8 Xb, Xo, ETm
```

Calcolo dell'evapotraspirazione massima condizionata da stress per la presenza di salinità

```
if (Ks.lt.0.d0) then
    Etm = Etw
else
    ETm = kcEto*Ks
endif
```

Variabili ausiliarie

```
f = 0.d0
l = 0.d0
h = 0.d0
l = beta * (so-sfc)
h = beta * (l-sfc)
f = k * ((EXP(l)-1)/(EXP(h)-1))
```

Calcolo perdita suolo vegetato e suolo 'nudo', in funzione dello stato di umidità

Stato critico, al di sotto del punto igroscopico

```
if (so.le.sh) then
    Xb = 0.d0
    Xo = 0.d0
endif
```

Stati intermedi

```
if ((so.gt.sh) .and. (so.le.sw)) then
    Xb = Etw * ((so-sh)/(sw-sh))
    Xo = Etw * ((so-sh)/(sw-sh))
endif
if ((so.gt.sw) .and. (so.le.sopt)) then
    Xb = Etw+(Etm-Etw)*((so-sw)/(sopt-sw))
    Xo = Etw * ((so-sh)/(sw-sh))
endif
```

Stato ottimo

```
if ((so.gt.sopt) .and. (so.le.sfc)) then
    Xb = Etm
    Xo = Etw * ((so-sh)/(sw-sh))
endif
```

Condizione per cui si attiva la perdita per leakage

```
if (so.gt.sfc) then
    Xb = ETm + f
    Xo = Etw*((sfc-sh)/(sw-sh))+ f
endif
```

```
return
end
```

Subroutine che calcola lo stato di umidità del suolo

```
subroutine soil(Inf,so,Xb,Xo,bo,s)
implicit none

real*8 so,Xb,Xo,bo
real*8 Inf
real*8 s
```

Equazione discretizzata del bilancio idrico del suolo

$$s = \text{Inf} - ((\text{bo} * \text{Xb}) + (1 - \text{bo}) * \text{Xo}) + \text{so}$$

```
return
end
```

Subroutine che attiva l'irrigazione

```
Subroutine irrigation(so,sopt,EC,EC_tr,Irr)
implicit none

real*8 so,co,EC,Ec_tr,sopt
real*8 Irr
```

```
Irr=0.d0
if (EC.ge.EC_tr) then
  Irr =0.5
endif
```

```
return
end
```

Subroutine che governa l'andamento di c nel caso di irrigazione salina

```
Subroutine salinity_2(Inf,Irr,Int,co,cI,so,c,cr)
implicit none
```

```
integer Int
real*8 Inf,Irr,co,so,cr,cI
real*8 cc,fi
real*8 c
```

```
fi=0.0001
cc = cr + (co-cr)*exp(-fi*Int)
```

Dilavamento modello CMFR

$$c = (\text{cc} * \text{so} + \text{cI} * \text{Irr}) / (\text{so} + \text{Irr} + \text{Inf})$$

```
return
end
```

Bibliografia

- [1] Mc.Cauley, A., Jones, C., *Salinity & Sodicity Management*. Montana State University , 2005.
- [2] Allen, R.G., Pereira , L.S., Raes, D., Smith, M., *FAO Irrigation and Drainage Paper no. 56*. 1998.
- [3] Laio, F., Porporato, A., Ridolfi, L., Rodriguez Iturbe, I. *Plants in water controlled ecosystems: active role in hydrological processes and response to water stress II. Probabilistic soil moisture dynamics*. Advances in Water Resources, 2001; 24:707-23.
- [4] Baudena, M., Boni, G., Ferraris, L. , von Hardenberg, J., Provenzale, A. *Vegetation response to rainfall intermittency in drylands: Results from a simple ecohydrological box model*. Advances in Water Resources 30, 2007, 1320-1328.
- [5] Tilman, D. *Competition and biodiversity in spatially-structured habitats*. Ecology 1994, 75(1):2-16.
- [6] Abrol, I.P., Yadav, J.S.P, Massoud, F.I. *FAO Soils Bulletin 39*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 1988.
- [7] Baudena, M., D'andrea, F., Provenzale, A. *A model for soil-vegetation-atmosphere interactions in water-limited ecosystems*. Water Resources Research, vol 44, W12429, 2008.
- [8] Frenkel, H., Hadas, A., Jury, W.A. *The effect of salt precipitation and High Sodium Concentrations on Soil Hydraulic Conductivity and Water Retention*. Water Resources Research, vol 14 , 1978.
- [9] Uri Shani, Alon Ben-Gal, Effi Tripler, Lynn M.Dudley , *Plant response to the soil environment: An analytical model integrating yield, water, soil type, and salinity*. Water Resources Research, vol. 43, W08418, 2007.
- [10] Cardon, G.E., Davis, J.G., Bauder, T.A., Waskom, R.M. *Managing Saline Soils*. Colorado State University.