



UNIVERSITA' DI PISA - FACOLTA' DI AGRARIA
Laurea Specialistica in Scienze della Produzione e Difesa dei Vegetali
Tesi di Laurea

**MODELLIZZAZIONE DEL TASSO DI
ASSORBIMENTO IDRICO E NUTRITIVO DELLA
GERBERA (*Gerbera jamesonii* H. Bolus, cv Vital)
COLTIVATA IN IDROPONICA**

Relatore:

Chiar.mo Prof. Alberto Pardossi

Candidato:

Matteo Bronzini

Matr. N° 221265

Anno accademico 2005-2006

INDICE

<i>CAPITOLO 1 INTRODUZIONE</i>	<i>- 1 -</i>
<i>1.1. LE COLTURE FUORI SUOLO NEL MONDO</i>	<i>- 1 -</i>
<i>1.2. LA SITUAZIONE IN ITALIA</i>	<i>- 3 -</i>
<i>1.3. PRINCIPALI SISTEMI IDROPONICI</i>	<i>- 4 -</i>
<i>1.4. I SISTEMI IDROPONICI</i>	<i>- 8 -</i>
<i>1.5. VANTAGGI E SVANTAGGI</i>	<i>- 13 -</i>
<i>1.6. GESTIONE DEL RIFORNIMENTO IDRICO E MINERALE</i>	<i>- 15 -</i>
<i>CAPITOLO 2 MODELLI DI SIMULAZIONE DELLE COLTURE</i>	<i>- 25 -</i>
<i>2.1. GENERALITÀ</i>	<i>- 25 -</i>
<i>2.2. TIPI DI MODELLI</i>	<i>- 25 -</i>
<i>2.3. MODELLI PER LE COLTURE IN SERRA</i>	<i>- 26 -</i>
<i>2.4. MODELLI PER L'EVAPOTRASPIRAZIONE</i>	<i>- 29 -</i>
<i>2.5. MODELLI PER L'ASSORBIMENTO MINERALE</i>	<i>- 33 -</i>
<i>CAPITOLO 3 LA GERBERA</i>	<i>- 37 -</i>
<i>3.1. ORIGINE E DIFFUSIONE</i>	<i>- 37 -</i>
<i>3.2. DESCRIZIONE DELLA PIANTA</i>	<i>- 37 -</i>
<i>3.3. PROPAGAZIONE DELLA GERBERA</i>	<i>- 38 -</i>
<i>3.4. TECNICHE DI COLTIVAZIONE DELLA GERBERA</i>	<i>- 40 -</i>
<i>3.5. ESIGENZE DELLA GERBERA</i>	<i>- 41 -</i>
<i>3.6. RISPOSTA DELLA GERBERA ALLA SALINITÀ</i>	<i>- 42 -</i>
<i>CAPITOLO 4 SCOPI DELLA TESI</i>	<i>- 44 -</i>
<i>4.1. INTRODUZIONE</i>	<i>- 44 -</i>
<i>4.2. OBIETTIVI ED APPROCCIO SPERIMENTALE</i>	<i>- 44 -</i>
<i>CAPITOLO 5 MATERIALI E METODI</i>	<i>- 47 -</i>
<i>5.1. MATERIALE VEGETALE E NOTE COLTURALI</i>	<i>- 47 -</i>
<i>5.2. RILIEVI EFFETTUATI</i>	<i>- 49 -</i>
<i>5.3. MODELLIZZAZIONE ED ANALISI STATISTICA</i>	<i>- 54 -</i>

<i>CAPITOLO 6 RISULTATI E DISCUSSIONE</i>	<i>- 56 -</i>
<i>6.1 EFFETTO DELLA STAGIONE DI COLTIVAZIONE E DELLA SALINITÀ DELL'ACQUA IRRIGUA</i>	<i>- 56 -</i>
<i>6.2 MODELLIZZAZIONE</i>	<i>- 69 -</i>
<i>6.3 DISCUSSIONE</i>	<i>- 86 -</i>
<i>6.4 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE</i>	<i>- 90 -</i>
<i>BIBLIOGRAFIA CITATA E CONSULTATA</i>	<i>- 91 -</i>
<i>RIASSUNTO</i>	<i>- 98 -</i>

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1. LE COLTURE FUORI SUOLO NEL MONDO

L'idroponica, termine derivante dal greco e formato dalle parole hidros (acqua) e ponos (lavoro), è una tecnica di coltivazione praticata in una soluzione liquida nutritiva o in un substrato (come torba, ghiaia o lana di roccia) imbevuto di tale soluzione, svincolata cioè dalla presenza della matrice suolo.

Data la facilità di controllo degli apporti nutritivi, l'idroponica inizialmente è stata introdotta a scopi di studio; oggi, invece, è praticata anche a livello commerciale in settori quali l'orticoltura e la floricoltura, benché gli elevati costi d'impianto molte volte ne limitano il suo utilizzo in agricoltura.

Molti autori sono d'accordo nel far coincidere la nascita della coltura idroponica (o coltivazione senza o fuori suolo) con i primi esperimenti sulla nutrizione minerale effettuati da Woodward e Boyle nel XVII secolo; in realtà, l'idroponica, ha radici ben più antiche da ricondurre a molti secoli avanti Cristo, ai tempi degli egiziani e dei babilonesi. Comunque, i veri fondatori dell'idroponica sono rappresentati dai due scienziati tedeschi, Sachs (1860) e Knop (1861). I loro studi dimostrarono come lo sviluppo normale delle piante poteva essere conseguito aggiungendo all'acqua alcuni elementi minerali ed in particolar modo azoto, fosforo, potassio, zolfo, calcio e magnesio. In seguito, nel corso degli anni, diversi ricercatori quali Tollens (1882), Shive (1915), Hoagland (1919), Arnon (1938), svilupparono nuove soluzioni nutritive, alcune di queste ancora oggi in uso.

Il termine *idroponica* fu introdotto per la prima volta dal Prof. W. F. Gericke, fisiologo della California Agricultural Experimental Station, (1937) per indicare tutti quei sistemi di coltivazione in cui le piante erano fatte crescere in un mezzo liquido (soluzioni nutritive) e al quale si deve la prima applicazione su scala commerciale di tali colture. Il periodo al quale si fa riferimento è quello a cavallo tra le due guerre mondiali del secolo scorso. Nato come mezzo alternativo alla coltivazione a terra per evitare problemi quali la stanchezza del terreno (Jensen, 1997), il lavoro di Gericke, fu condotto principalmente su ortaggi e suscitò un grande interesse in tutto il mondo grazie alle numerose riviste e ai quotidiani che propagandarono questo nuovo sistema di coltivazione esaltandone i pregi.

Nel 1938 Hoagland e Arnon, professori all'università della California, sotto la

spinta delle numerose richieste di informazione da parte di coltivatori e hobbisti scrissero una circolare informativa dal titolo: *The Water Culture Method for Growing Plants without Soil*. Nonostante il grande interesse che l'idroponica riscosse inizialmente tra gli "addetti ai lavori" non bisogna dimenticare i problemi legati all'utilizzo di questa tecnica che ne scoraggiava un impiego su vasta scala e che erano da ricercare nei costi elevati d'impianto e nei possibili fenomeni d'ipossia radicale (Jensen, 1997).

Per ovviare ai problemi suddetti si sviluppò inizialmente il sistema della coltivazione su sabbia e ghiaia (Shive e Robbins, 1937) dando vita alle prime coltivazioni fuori suolo su substrato ma che, pur rappresentando un passo in avanti da un punto di vista tecnologico, non limitavano di certo i costi di impianto (vedi soprattutto i costi per la realizzazione dei bancali in cemento) che rimanevano comunque alti. Grazie all'introduzione della plastica in agricoltura negli anni sessanta - settanta, si semplificarono di molto alcuni aspetti costruttivi quali canalette, tubazioni ecc. suscitando nuovamente l'interesse degli operatori verso le colture fuori suolo, tant'è che grossi impianti idroponici furono sviluppati nei deserti della California, dell'Arizona e di Abu Dhabi.

Infine, la diffusione su larga scala di queste colture, è avvenuta grazie all'utilizzo di nuovi substrati di natura organica come lana di roccia, perlite, pomice, lapillo vulcanico ecc. le cui caratteristiche fisico-chimiche sono migliori rispetto alla sabbia e alla ghiaia.

Da un punto di vista commerciale le colture fuori suolo hanno iniziato ad assumere una certa importanza dalla fine degli anni sessanta, soprattutto in paesi quali Inghilterra, Olanda e Scandinavia. Nel Regno Unito, il primo sistema d'idroponica impiegato su larga scala da parte degli agricoltori è stato la tecnica del NFT (Nutrient Film Technique) introdotta da Cooper (1979). Il sistema prevede una serie di canalette in pendenza in cui scorre una soluzione nutritiva, nelle quali si sviluppano le radici delle piante. Parallelamente, in Olanda e Scandinavia, si è introdotto un substrato alternativo al terreno costituito da lana di roccia. Lo scopo principale era quello di evitare fenomeni di stanchezza del terreno dovuti allo sfruttamento dello stesso suolo nel corso degli anni (Savvas, 2002). Con il passare degli anni, l'uso di lana di roccia impiegato come substrato per la coltivazione delle piante è andato aumentando: in Olanda siamo passati dai 5 ha di superficie destinata alle colture senza suolo nel 1976 (Van Os, 1982) a 4.100 ha in circa 20 anni (Steiner, 1997). Oggi, in Olanda, più del 90% degli ortaggi e dei fiori coltivati nelle serre sono prodotti in idroponica (Van Os, Stanghellini, 2001).

Nel 2000 le colture fuori suolo nel mondo si estendevano su circa 22.000 ha, di cui oltre il 60% concentrati nell'Europa. I paesi del Nord-Europa presentano gran parte della

loro superficie protetta già investita a colture senza suolo (20-50%), mentre nei paesi del Bacino del Mediterraneo tale percentuale non arriva al 5%.

Infine, bisogna ricordare che le colture fuori suolo stanno diventando delle realtà importanti in Australia, in paesi dell'est asiatico e in quelli del mediterraneo (soprattutto la Spagna ed Israele).



Coltivazione di pomodoro in idroponica realizzata presso una serra commerciale in Olanda

1.2. LA SITUAZIONE IN ITALIA

Per quanto riguarda la situazione in Italia, ad oggi si stima che la superficie delle serre nelle quali vengono impiegati i sistemi idroponici non superi il 3% (700-800 ha) dell'intera superficie protetta italiana. Le tecniche più utilizzate sono quelle che prevedono l'impiego di un substrato, organico (fragola), inerte (ortaggi e fiori recisi); tra i substrati più utilizzati troviamo la torba, la perlite, la lana di roccia, la pomice e la fibra di cocco.

In Italia la coltivazione fuori suolo non è ancora molto utilizzata rispetto ad altre realtà Europee e le specie per le quali l'idroponica ha dato dei reali vantaggi sono rappresentate dalla fragola (150 ha), pomodoro (200 ha), gerbera (100 ha), rosa (200 ha); queste quattro specie coprono, da sole, il 90% della superficie investita in colture

idroponiche. Prevedere quanto le colture senza suolo si diffonderanno nel nostro Paese è difficile. Certo, non mancano elementi a favore di questa diffusione. L'ormai prossima proibizione dell'impiego del bromuro di metile e la limitazione del consumo di fitofarmaci e fertilizzanti imporranno agli agricoltori di rivedere profondamente le tecniche colturali. Le colture senza suolo, in questo senso, potrebbero giocare un ruolo importante, anche se limitatamente al settore ortoflorovivaistico (comunque, uno dei più importanti nel panorama dell'agricoltura italiana), un po' come già sta avvenendo in altri paesi del Mediterraneo come la Spagna.



Coltivazione fuori suolo di fragola.

1.3. PRINCIPALI SISTEMI IDROPONICI

In questo paragrafo viene riportata una descrizione sintetica dei sistemi idroponici attualmente più diffusi a livello commerciale per la coltivazione di specie ortofloricole in ambiente protetto:

Floating System

Questa tecnica prevede la coltivazione su soluzione nutritiva stagnante, senza substrato, di piante seminate o trapiantate in contenitori di polistirolo o altro materiale plastico. L'estrema semplicità costruttiva è il principale motivo della notevole espansione commerciale di questo sistema in Italia (in particolare nel Veneto) per la coltivazione di

specie a ciclo breve, ad esempio insalate da taglio e piante aromatiche (rucola, valerianella, basilico ecc.), soprattutto per il mercato degli ortaggi di IV gamma (prodotti freschi pronti al consumo).

Nel settore del florovivaismo la tecnica del *floating* ha trovato notevole interesse nella coltivazione delle bulbose da fiore reciso. I vantaggi sono da ricercare nella riduzione del costo di produzione, nella fioritura più precoce, nella maggiore produttività annuale, nella riduzione del consumo di energia e di fitofarmaci ed, infine, nel miglioramento delle condizioni di lavoro per quanto riguarda gli addetti ai lavoro (Malorgio, 2005).

Nutrient Film Tehnique (NFT)

La tecnica dell’NFT, messa a punto da Cooper nel 1972 in Gran Bretagna, prevede la coltivazione delle piante in canalette senza alcun substrato e in leggera pendenza (1,5-2,5%) entro le quali scorre (con un flusso di 1-3 L/min) un sottile film di soluzione nutritiva. Il sistema NFT presenta non pochi inconvenienti che ne hanno limitato la diffusione su scala commerciale, ristretta praticamente alle colture a ciclo breve (fino a tre, quattro mesi) come gli ortaggi da foglia. Nelle regioni mediterranee potrebbe essere impiegata anche per le coltivazioni di specie orticole (pomodori, peperoni, meloni...) a ciclo precoce.

Subirrigazione (flusso e riflusso)

La tecnica del “flusso e riflusso”, definita anche come subirrigazione, è una particolare forma di fertirrigazione con ricircolo della soluzione nutritiva per risalita capillare dalla parte basale del vaso. Nella subirrigazione, al contrario dell’irrigazione a goccia, la soluzione nutritiva ha un movimento quasi esclusivamente di tipo ascendente, dall’alto verso il basso innescato, per l’appunto, dalla risalita capillare del substrato e dall’evaporazione presente nella parte alta del vaso. Alcuni accorgimenti sono importanti per il successo della tecnica: *a*) utilizzare substrati dotati di una buona risalita capillare (ad esempio, torba e cocco); *b*) bagnare uniformemente dall’alto il substrato per avviare correttamente il fenomeno di risalita capillare.

I principali vantaggi della tecnica del flusso e riflusso sono la riduzione del rischio di diffondere eventuali malattie delle radici attraverso il riutilizzo delle soluzioni drenate, la maggiore stabilità della composizione della soluzione nutritiva e il risparmio di manodopera, soprattutto per le operazioni di movimentazione dei vasi.

Aeroponica

Nell'aeroponica le radici delle piante si trovano sospese in un contenitore dove un sistema di nebulizzazione le mantiene costantemente umide. La soluzione nutritiva viene direttamente spruzzata sulle radici mediante dei nebulizzatori con interventi della durata variabile di 30-60 secondi e con una frequenza anch'essa variabile in funzione di diversi parametri quali le condizioni climatiche di coltivazione, le specie, lo stato di crescita delle piante ecc ecc.. Generalmente vengono eseguiti dai 40 agli 80 interventi per giorno e la soluzione nutritiva è ricircolante.

Nel sistema dell'aeroponica problemi quali l'ipossia radicale sono praticamente nulli (Massantini, 1973, 1985), tuttavia gli elevati costi di impianto ne hanno limitato la diffusione su ampia scala commerciale. Impianti di aeroponica sono stati proposti per la coltivazione del crisantemo come fiore reciso o per la coltivazione di piante madri da cui prelevare talee per la moltiplicazione di piante quali impatiens, ibisco, poinsettia e fucsia.

La coltura su substrato artificiale o in contenitore

La coltura su substrato artificiale o in contenitore è sicuramente la tecnica di coltivazione più utilizzata per la produzione di fiori recisi e piante ornamentali in vaso.

L'evoluzione delle colture su substrato, che ha visto il passaggio da bancali di cemento riempiti con sabbia o ghiaia, all'introduzione di substrati a base di torba (maggiore riserva idrica e di aerazione, facilitando così l'irrigazione), è stata determinata dalla necessità di diminuire il più possibile i costi di impianto (costi dei supporti e della manodopera necessaria per il montaggio degli impianti ecc.). L'introduzione della plastica, negli anni settanta, ha permesso in un secondo momento di passare dai costosissimi bancali di cemento alle canalette in polipropilene, opportunamente sagomate, quindi alle cassette o ai grossi vasi e infine ai sacchi o agli appositi profilati in polistirolo, che hanno determinato una sostanziale riduzione del volume di substrato a disposizione della pianta.

Per quanto riguarda i substrati si è assistito all'introduzione di molti materiali diversi (gli ultimi sono la fibra di cocco e i materiali ligno-cellulosici derivati dai residui della lavorazione del legno), ognuno con i suoi pregi e i suoi difetti. In realtà, il substrato ideale con le caratteristiche fisico-chimiche ottimali (una buona capacità per l'acqua e per l'aria, una struttura stabile nel tempo ecc.), economico e facilmente riciclabile non esiste, o perlomeno non è stato ancora trovato.

L'erogazione della soluzione nutritiva in questi sistemi idroponici è assicurata da impianti di irrigazione per aspersione, per nebulizzazione oppure a goccia.

Idrocoltura

Un interessante tecnica di coltivazione per piante ornamentali da appartamento è rappresentata dalla tecnica dell'idrocoltura. Nell'idrocoltura il vaso che contiene la pianta e il substrato di coltivazione (argilla espansa, in genere) è fessurato nella parte inferiore con fori non molto grandi, tali da impedire la fuoriuscita dell'argilla espansa, ma adatti invece a far passare l'acqua e quindi le sostanze nutritive in essa disciolte. Il vaso di coltura presenta anche una scanalatura laterale per ospitare l'indicatore di livello. Al vaso di coltivazione vero e proprio, al momento della vendita, vengono aggiunti l'indicatore di livello e il vaso esterno. L'indicatore di livello o idrometro serve a tenere sotto controllo la quantità d'acqua presente all'interno del portavaso. Per quanto riguarda il substrato di coltivazione generalmente si impiega l'argilla espansa a granulometria variabile (4-16 mm secondo la tipologia di pianta). L'argilla espansa presenta notevoli vantaggi in quanto è un materiale inerte e inalterabile nel tempo e non si modifica al contatto con la soluzione nutritiva.

Per la coltivazione delle piante ornamentali e fino alla fase di commercializzazione può essere utilizzata una soluzione nutritiva standard, completa di macro- e microelementi. Nella fase post-vendita si ricorre generalmente all'impiego di resine a scambio ionico (*Levatit*®). Queste resine garantiscono il rifornimento minerale alla pianta per un periodo di 3-6 mesi, in maniera omogenea e graduale, come richiesto dalla pianta stessa, senza bisogno di altri interventi nel periodo se non quello di fornire l'acqua. Le resine a scambio ionico, formulate come microgranuli o come pastiglie (cialde), sono in grado di cedere gradualmente all'acqua (non deionizzata) le sostanze nutritive sotto forma di ioni.



Coltivazione di lattuga in Floating System.

1.4. I SISTEMI IDROPONICI

1.4.1 Generalità

E' possibile suddividere le colture idroponiche in due gruppi principali: 1) colture in contenitore su substrato; 2) colture in soluzione nutritiva a radice nuda (no substrato). Le colture idroponiche possono essere ulteriormente classificate anche in funzione del tipo di substrato utilizzato (naturale-artificiale, minerale-organico) e di contenitore impiegato (sacco, vaso, canaletta, bancale...) oltre che per il metodo di distribuzione della soluzione nutritiva (irrigazione a goccia o subirrigazione; sistemi ad irrigazione stagnante, ricircolante o nebulizzata) ed al recupero o meno della soluzione nutritiva di drenaggio (possiamo distinguere in questo caso sistemi chiusi o aperti).

Le soluzioni nutritive che sono erogate alle piante contengono sia i macro nutrienti (azoto, fosforo, potassio, calcio, magnesio e zolfo) che i micro nutrienti (ferro, manganese, zinco, molibdeno e boro) in concentrazioni che variano dall'ordine dei milli ai micro moli/litro (a seconda che si tratti, rispettivamente, dei macro o dei micronutrienti). I valori di pH ottimali sia per l'assorbimento dei nutrienti da parte delle radici della pianta, sia per evitare problemi legati alla solubilità sono compresi tra 5,5 e 6,5. La soluzione nutritiva è generalmente preparata per mezzo di fertirrigatori più o meno complessi, che in pratica diluiscono due o più soluzioni madre con l'acqua irrigua e controllano il pH. La soluzione

nutritiva così preparata può essere distribuita alle piante mediante un sistema di gocciolatori o per subirrigazione (a flusso e riflusso o per scorrimento). Negli impianti NFT (*Nutrient Film Technique*), invece, la soluzione scorre in canalette poste in leggera pendenza dove vengono disposte le piante senza substrato. Nel *floating*, infine, la soluzione nutritiva è stagnante, eventualmente arieggiata con un compressore.

1.4.2 Rifornimento idrico e minerale nei sistemi idroponici.

Nei sistemi fuori suolo su substrato la soluzione nutritiva che rifornisce l'impianto viene erogata in quantità superiori rispetto al reale fabbisogno della coltura (30-50% di eccedenza) mentre la frequenza dei turni irrigui viene calcolata generalmente sulla base della radiazione solare, dalla quale dipendono fenomeni quali la traspirazione e l'assorbimento di acqua da parte delle piante. C'è da aggiungere come l'alto numero dei turni irrigui sia dovuto principalmente a prevenire un eccessivo prosciugamento del substrato, più che per soddisfare le esigenze idriche della coltura stessa (Sonneveld, 2000). Questo fenomeno, ben conosciuto per materiali come la torba, si presenta anche per la lana di roccia (Van der Burg, 1990). La quantità d'acqua disponibile nella maggior parte degli impianti che utilizzano i substrati come mezzo di crescita per le colture è di almeno 10 litri ogni metro quadrato di substrato, generalmente sufficiente per il fabbisogno idrico di un paio di giorni delle piante. Non è sorprendente come in esperimenti condotti su impianti su substrato dove sono utilizzate frequenze di irrigazione diverse non si registrino sostanziali differenze nella crescita della coltura, sempre a meno che non si utilizzino delle frequenze di irrigazioni troppo basse (Sonneveld, 2000). L'acqua nella maggior parte dei substrati è disponibile a basse tensioni (Kipp, Wever, 1993) ed un eccessivo prosciugamento del mezzo di crescita a livello delle radici difficilmente può aumentare il potenziale matriciale.

La traspirazione delle piante all'interno delle serre dipende da molti fattori quali la radiazione, la temperatura dell'aria, l'umidità, la superficie fogliare, la concentrazione di anidride carbonica ed infine dalla velocità del vento (Stanghellini, 1987). Da un punto di vista pratico la traspirazione delle piante in ambiente protetto può essere stimata prendendo in considerazione la radiazione solare, l'energia impiegata per scaldare la serra, e le dimensioni delle piante (De Graff, 1988).

Nelle serre l'irrigazione è generalmente automatizzata. L'agricoltore, stabilisce quando il primo intervento irriguo deve avere luogo e poi, sulla base delle misure che riguardano la radiazione solare, vengono definiti i turni irrigui.

Le soluzioni nutritive destinate alla coltura sono definite sulla base di misurazioni dell'assorbimento degli elementi minerali da parte delle piante. Queste misurazioni sono state compiute per ogni singolo elemento che va a costituire la dieta alimentare della coltura stessa (Voogt, 1993) e tali quantità vanno a costituire la base della composizione della soluzione nutritiva (Voogt et al., 1997) anche se bisogna aggiungere come i rapporti, le quantità di elementi nutritivi della soluzione nutritiva cambiano in funzione dello stadio di crescita della coltura .

Le soluzioni nutritive sono ottenute miscelando tra loro soluzioni madre concentrate con dell'acqua la cui concentrazione complessiva viene controllata automaticamente facendo riferimento alla conducibilità elettrica. Generalmente vengono impiegati quattro contenitori (tanks) contrassegnati con le lettere A, B, Z ed L (Gielink, Schurer, 1995); essi contengono rispettivamente i sali di calcio (contenitore A), i fosfati ed i solfati (contenitore B), un acido (contenitore Z) ed infine una base (contenitore L). I contenitori A e B sono miscelati opportunamente tra di loro con l'acqua che verrà distribuita alla coltura. La miscelazione degli elementi nutritivi, come accennato in precedenza, viene tenuta sotto controllo mediante un conducimetro. In passato i liquidi fertilizzanti venivano direttamente inseriti all'interno dell'impianto di idroponica senza l'impiego dei diversi contenitori (A, B, Z, L).

Negli ultimi anni un numero sempre maggiore di soluzioni nutritive sono state elaborate dagli addetti ai lavori per la coltura del pomodoro in modo da avere benefici da un punto di vista della qualità del prodotto (Dorais et al., 2001). Importante in questo senso risulta essere anche l'esperienza del tecnico o degli addetti ai lavori, che in base alla propria conoscenza dell'impianto e della coltura sono in grado di operare le scelte più giuste per quanto riguarda la quantità e la qualità del prodotto.

1.4.3 Sistemi aperti, sistemi chiusi.

Come accennato in precedenza, a seconda che la soluzione nutritiva di drenaggio (drenato) venga recuperata o meno, possiamo distinguere sistemi a ciclo chiuso o aperto. Entrambi i sistemi possono essere impiegati nelle colture su substrato mentre in tecniche quali l'NFT, il floating e nell'aeroponica vengono impiegati i sistemi chiusi o semichiusi.

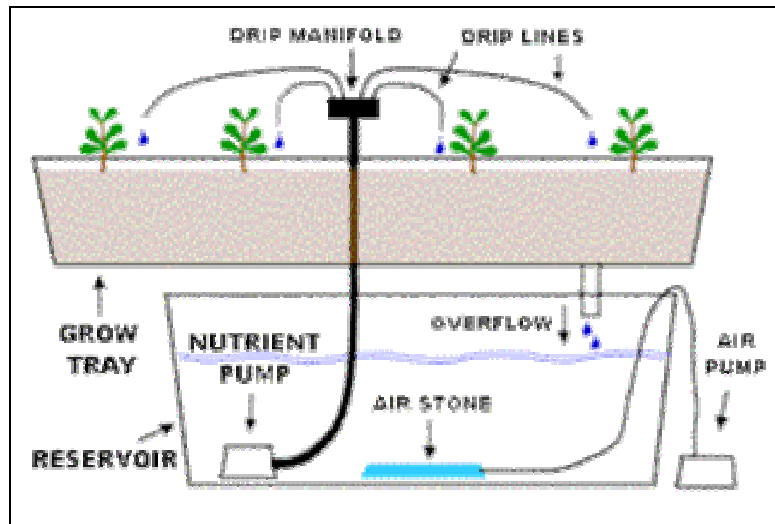
Nei sistemi a ciclo chiuso la soluzione di drenaggio viene recuperata e fatta ricircolare nuovamente nell'impianto, previa aggiustamento del pH, dei valori di conducibilità elettrica ed eventualmente dopo essere stata disinfettata in modo da ridurre il

rischio di diffusione dei parassiti e patogeni radicali (Van Os, Stanghellini 2001). Tali sistemi sono stati sviluppati e si sono diffusi per superare problematiche di tipo ambientale che creavano i sistemi a ciclo aperto. Infatti, nei sistemi aperti, l'erogazione della soluzione nutritiva fresca (cioè con determinati valori di pH EC e concentrazione nutritiva) è generalmente in eccesso rispetto alle effettive necessità fisiologiche delle colture; quanto appena detto è da ricercare nella differenza di traspirazione tra pianta e pianta, nell'erogazione disforme a livello dei gocciolatori e, infine, nella necessità di evitare un accumulo di sali nella zona radicale delle piante.

La distribuzione della soluzione nutritiva fresca in eccesso rispetto alle esigenze delle colture in serra è fonte di cospicue perdite per lisciviazione e per ruscellamento d'acqua e nutrienti (la frazione di drenaggio, ovvero il rapporto tra soluzione drenata ed erogata, è di almeno il 25-30%). Alla fine risulta una minor efficienza d'uso dell'acqua con un aumento dei costi di produzione e un inquinamento delle sorgenti acquifere (vedi soprattutto dovuto ad elementi quali azoto e fosforo). Per evitare ciò negli anni novanta il governo olandese intraprese una politica a sostegno del ricircolo delle acque di drenaggio per le colture in serra (detti anche sistemi *zero-runoff*), con l'intento di ridurre l'impatto ambientale dei sistemi fuori suolo (Voogt e Sonneveld, 1997).

Il ricircolo della soluzione nutritiva richiede frequenti analisi chimiche che sono condotte direttamente sull'impianto mediante l'impiego di sensori ione-specifici o fuori dell'impianto grazie ad analisi di laboratorio o per mezzo di kit rapidi e di facile uso (Gieling e Van Der Vlekkert, 1996). Poiché c'è una correlazione molto stretta tra gli indici di assorbimento dei vari nutrienti della soluzione nutritiva, è possibile stimare l'assorbimento e il cambiamento di concentrazione dei nutrienti attraverso la misurazione della concentrazione di un solo ione ("guide ion") tenendo sempre sotto controllo l'indice di assorbimento dell'acqua e i dati climatici (Pardossi et al., 2004). A tale proposito bisogna ricordare come alcune industrie/compagnie (Priva, NL) abbiano sviluppato dei dispositivi per il controllo di serre dove sono coltivate le piante fuori suolo sulla base di continui monitoraggi dell'EC e della concentrazione dei macronutrienti.

In idroponica, comunque, anche se sono stati introdotti i sistemi chiusi un recupero totale della soluzione di drenaggio è molto difficile. È possibile nel caso in cui la concentrazione dei vari ioni nella soluzione ricircolante sia uguale o inferiore alla concentrazione d'assorbimento (rapporto tra la quantità di nutrienti e acqua assorbiti dalla coltura).



Schematizzazione di un impianto fuori suolo con irrigatori a goccia.

1.4.4 Problematiche connesse all'uso dei sistemi chiusi.

Nei sistemi a ciclo aperto le piante sono continuamente rifornite con una soluzione nutritiva fresca; la gestione risulta assai semplice, in quanto il problema principale è quello di assicurare un ottimale rifornimento idrico riducendo al minimo il drenaggio. Nei sistemi a ciclo chiuso, invece, si deve fare i conti con diverse problematiche quali i maggiori rischi di attacchi parassitari, soprattutto per le malattie radicali (ad esempio, *Pythium* spp., *Verticillium* spp., *Fusarium* spp.) veicolati dalla soluzione ricircolante, e le maggiori difficoltà nel controllo della concentrazione dei nutrienti e degli ioni non essenziali o poco assorbiti dalle piante (Na, Cl, microelementi ecc.) nella soluzione ricircolante stessa, soprattutto quando si usano acque saline. Inoltre, nei sistemi a ciclo chiuso, spesso vengono utilizzati dei sistemi di disinfestazione della soluzione drenata; qualunque sia il sistema di disinfezione utilizzato comunque il coltivatore non può fare a meno di adottare una serie di misure quali:

- l'accurata disinfezione degli impianti prima di ogni nuovo trapianto;
- l'uso di substrati sterili o comunque disinfettati;
- l'impiego di materiale di propagazione sano;
- l'isolamento della serra dall'ambiente esterno,
- la cura nella esecuzione delle varie operazioni colturali;
- il mantenimento di un ambiente di coltivazione pulito e ordinato;
- il continuo monitoraggio della coltura allo scopo di intervenire subito in caso di attacchi di patogeni, magari semplicemente eliminando le piante ammalate.

In molte colture, soprattutto se a ciclo breve, l'adozione di queste 'semplici' misure può ovviare alla mancata installazione di specifici sistemi di disinfezione della soluzione nutritiva ricircolante.

1.5. VANTAGGI E SVANTAGGI

In linea di principio, le colture fuori suolo costituiscono uno strumento formidabile per controllare la crescita e lo sviluppo delle piante e quindi la produttività delle colture, attraverso la regolazione precisa dell'irrigazione e della fertilizzazione grazie alla possibilità di ridurre drasticamente, se non proprio eliminare, i rischi di stress provocati da agenti biotici e abiotici (ad esempio, salinità o carenza idrica). In realtà, per ragioni prettamente economiche, le colture fuori suolo su scala commerciale sono ben lontane dal sistema colturale ideale ora descritto. Pertanto, i pro e i contro di questa tecnologia devono essere attentamente considerate quando le colture fuori suolo sono prese in considerazione come possibile opzione per la produzione ortoflorovivaistica, di serra o all'aria aperta.

In generale, la tecnologia del fuori suolo può aumentare le rese, ad esempio, di fiori recisi, del 20-50%. I record produttivi delle serre olandesi sia di ortaggi che di fiori recisi, sono determinati anche, ma non solo, dall'impiego delle colture fuori suolo. Importante è anche l'effetto del fuori suolo sulla precocità della coltura. Nel caso della rosa, ad esempio, le raccolte dei fiori iniziano già poche settimane dopo l'impianto, al contrario di quanto avviene nelle colture tradizionali a terra. Il fatto che la coltura di rosa invecchi precocemente fuori suolo non rappresenta un grosso inconveniente, in quanto l'aggiornamento varietale imposto dal mercato rende poco convenienti gli impianti con più di 5-6 anni di vita. Inoltre, le colture fuori suolo possono svincolare la coltivazione dal terreno rendendola possibile anche in condizioni estreme. Da questo punto di vista, il vantaggio principale è quello di eliminare la pratica della sterilizzazione del terreno prima dei trapianti. Così, le colture fuori suolo costituiscono una delle principali alternative all'uso del bromuro di metile, il cui uso sarà proibito (quantomeno, fortemente ridotto) alla fine del 2004.

Il recente sviluppo scientifico e tecnologico nel campo dell'ortoflorovivaismo ha avuto come obiettivo principale la maggiore efficienza d'uso delle risorse (energia, lavoro e acqua). Le colture fuori suolo costituiscono uno degli elementi principali dell'ortoflorovivaismo sostenibile, potendo offrire ai coltivatori un mezzo assai efficace per ridurre gli effetti ambientali tipicamente associati alle colture intensive.

Non mancano, comunque, gli svantaggi che consistono essenzialmente nei maggiori costi d'impianto e nella produzione di substrati e/o soluzioni nutritive esauste da dover smaltire. Inoltre, la gestione di un impianto di coltivazione in idroponica, richiede un'elevata preparazione professionale da parte degli addetti ai lavori.

1.5.1 Aspetti economici e finanziari.

I metodi di coltivazione idroponica sono numerosi, ciascuno con i propri vantaggi e svantaggi; però, quelli più usati a livello mondiale per la produzione di ortaggi e fiori recisi su scala commerciale sono quelli su substrato.

In generale, il passaggio dalla coltura a terra a quella fuori suolo sembra conveniente per colture a densità relativamente ridotta (inferiore a 10 p/m²), come gerbera e rosa (oltre a molti ortaggi), mentre è più difficile per colture più fitte (ad esempio, crisantemo programmato). L'ostacolo maggiore alla diffusione di questo sistema rimane l'alto costo degli impianti, variabili da 5-10 euro/m² fino a 40-50 euro/m², nel caso ad esempio, di impianti a flusso e riflusso su bancali mobili (estraibili).

Una maggior produzione unitaria e una miglior qualità dei prodotti possono rendere conveniente la scelta del fuori suolo, ma non è scontato che si produca di più e meglio con questa tecnica.

Un'adeguata politica commerciale, che sfrutti la maggiore ecompatibilità dei sistemi di coltivazione fuori suolo a ciclo chiuso, potrebbe contribuire ad aumentare la competitività commerciale dei prodotti così ottenuti e costituire un incentivo agli investimenti in tal senso. Il Progetto MPS (*Milieu Project Sierteelt* - <http://www.st-mps.nl>) sviluppato in Olanda per i fiori recisi e le piante ornamentali in vaso è un ottimo esempio di certificazione di prodotto/processo in grado di valorizzare le colture fuori suolo (a ciclo chiuso), in quanto attraverso un sistema di punti premia gli agricoltori che più riescono a ridurre l'impiego di risorse (energia, acqua, prodotti chimici) e la produzione di rifiuti (Malorgio, 2005).

1.6. GESTIONE DEL RIFORNIMENTO IDRICO E MINERALE

1.6.1 Generalità

Una gestione efficiente del rifornimento minerale ed idrico per le colture fuori suolo ricopre un'importanza notevole sotto due punti di vista; quello economico e quello ambientale.

Ad oggi, in idroponica, acqua ed elementi nutritivi sono distribuiti contemporaneamente e ciò significa che se l'agricoltore fornisce più acqua alle piante di conseguenza apporta anche una quantità maggiore d'elementi nutritivi. Anche se il rifornimento d'acqua ed elementi nutritivi avviene contemporaneamente, la domanda o la necessità d'acqua e di nutrienti da parte delle piante non è accoppiata, o comunque non procede di pari passo (esempio: l'incremento dell'umidità dell'aria sostanzialmente non cambia la domanda dell'azoto da parte delle piante ma sicuramente porterà ad una riduzione nella richiesta d'acqua). Inoltre, la richiesta di determinati elementi nutritivi da parte delle piante cambia in maniera dinamica, in funzione di diversi parametri. Di conseguenza, anche quando sono impiegati sistemi a ciclo chiuso, l'agricoltore deve provvedere regolarmente a "scaricare" l'acqua e i nutrienti nell'ambiente per prevenire squilibri a livello della soluzione nutritiva che possono causare, alle piante, delle deficienze a livello nutritivo o degli stress salini e di conseguenza possono provocare una riduzione nella produzione e nella qualità del prodotto finale.

La gestione della soluzione nutritiva nel sistema a ciclo aperto, al contrario del ciclo chiuso, risulta più semplice in quanto alle piante viene somministrata una soluzione nutritiva sempre fresca (appena preparata). A tale vantaggio si oppone lo spreco di acqua e sali fertilizzanti che essendo scaricati direttamente nell'ambiente hanno un impatto ambientale molto alto. I sistemi a ciclo chiuso consentono una riduzione nel consumo di acqua e fertilizzanti ma presentano, come accennato in precedenza, difficoltà nella gestione della soluzione nutritiva e nel controllo fitosanitario di alcuni patogeni.

Le modalità che riguardano l'apporto degli elementi nutritivi alle colture coltivate in ambiente protetto sono per molti versi simili alle colture coltivate in pieno campo (Fink et al., 1993). Il contenuto dei nutrienti all'interno della matrice suolo viene misurato generalmente all'inizio del ciclo colturale e in alcuni casi anche durante il ciclo della coltura. Acqua ed elementi minerali sono somministrati al terreno nelle quantità che si suppone siano assorbiti completamente dalla coltura, tenendo in considerazione anche la

quantità di micro e macro elementi presenti naturalmente nel terreno. È molto importante anche distribuire al suolo alti quantitativi di acqua in modo tale da tenere alto il livello di umidità del terreno stesso ed impedire quindi una salinizzazione eccessiva di quest'ultimo. In alcuni casi è necessario un'ulteriore fertilizzazione del suolo per compensare la perdita dei nutrienti dovuta a lisciviazione, ruscellamento ecc.

Nei sistemi di crescita fuori suolo la riserva d'acqua ed elementi nutritivi prontamente disponibili per le piante è relativamente bassa rispetto alle tradizionali coltivazioni su suolo (Lorenz et al., 1989).

Tabella 1.1. Disponibilità di acqua e azoto (nitrati) in diversi sistemi di crescita di una coltura di pomodoro su base annua (Sonneveld 1981, 1999).

Caratteristiche	Sistema di crescita			
	Suolo	Torba	Lana di roccia	NFT
Volume del substrato (mm)	300	25	14	-
Contenuto di acqua del substrato (% vol.)	25	50	70	-
Contenuto di acqua a livello radicale (mm)	75	12	10	4
Contenuto di acqua relativo alla disponibilità giornaliera/max assorbimento	30/9.4	4.8/1.5	4/1.3	1.6/0.5
Concentr. di nitrati nella soluzione (mM)	25	3	23	12.5
Cont. di nitrati zona radicale (mmoli m ²)	1875	276	230	50
Contenuto di nitrati relativo alla disponibilità giornaliera/max assorbimento	75/37.5	11/5.5	11.5/4.6	2/1

Basta pensare, per esempio, come per il pomodoro coltivato su un substrato quale la lana di roccia le riserve d'acqua e d'azoto hanno una durata limitata di pochi giorni durante i quali la pianta assorbe completamente tali elementi; questo valore tende a restringersi a poche ore se si considera la tecnica di coltivazione fuori suolo NFT. Nel caso in cui il pomodoro sia coltivato in ambiente protetto ma su suolo la disponibilità di questi elementi è invece nell'ordine di alcune settimane. In altre parole, l'orticoltura fatta con produzioni in pieno campo, svincolata cioè da un ambiente protetto, comporta, rispetto a quest'ultima, uno spreco maggiore d'acqua. Su una media di un chilogrammo di pomodori prodotti in pieno campo sono utilizzati dai 100 ai 200 litri d'acqua. Questi valori, in Israele, possono

scendere a 60 litri per kg di prodotto grazie all'impiego dell'irrigazione a goccia. In ambiente protetto (serre in Olanda per esempio), la media d'acqua utilizzata per la produzione di un kg di pomodori raggiunge i 20 litri.

Da quanto appena detto si può capire come sia necessario sincronizzare la richiesta per acqua e nutrienti nel breve periodo in modo tale da evitare deficienze di tali elementi o fenomeni quali la salinizzazione all'interno del mezzo di crescita. I costi relativamente bassi dell'acqua e dei fertilizzanti messi a confronto con l'alto valore delle colture sul mercato, ed il crescente passaggio ai sistemi fuori suolo, possono spiegare la ragione per cui si hanno sempre un minor numero di pubblicazioni riguardanti lo sviluppo di strategie per la nutrizione delle piante coltivate su suolo ed in ambiente protetto. Invece diverse tipologie di modelli sul bilancio dei nutrienti sono stati sviluppati per le colture coltivate in pieno campo. Tali modelli prendono in considerazione processi quali il rifornimento e l'assorbimento nutritivo da parte delle piante e i fenomeni come lisciviazione, mineralizzazione e denitrificazione (Hansen et al., 1991). Solo più recentemente, in relazione agli aspetti qualitativi, questi modelli sono stati resi disponibili per le coltivazioni in serra. De Tourdonnet (1998, 1999, 2001), per esempio, ha dato vita ad un modello di simulazione per la lattuga che prendeva in considerazione i processi d'assorbimento dell'acqua e dell'azoto. Studi successivi hanno messo in evidenza come tale approccio può essere utilizzato per analizzare gli effetti d'irrigazione e fertilizzazione azotata sulla qualità del prodotto e gli effetti dell'inquinamento da nitrati dovuti all'uso di acqua irrigua contaminata.

1.6.2 Sistemi a ciclo chiuso.

Nei sistemi chiusi, la soluzione di drenaggio è recuperata e ridistribuita alla coltura dopo un opportuno aggiustamento del pH e della conducibilità elettrica (EC), ed eventualmente dopo essere stata disinfettata. La gestione dei sistemi chiusi è particolarmente difficile quando l'acqua irrigua è di scarsa qualità (salina); valori di EC e/o della concentrazione di cloruro di sodio (NaCl) superiori, rispettivamente, a 1,0-1,2 mS/cm e 4-5 mmoli/L. In queste condizioni, le piante possono andare incontro a condizioni di stress a causa del progressivo aumento di EC legato all'accumulo di ioni come sodio, cloruro, solfato, e boro o qualche altro microelemento presente nell'acqua irrigua. Così, quando l'acqua irrigua non è particolarmente buona, la soluzione nutritiva è ricircolata fin quando la sua composizione e la EC rimangono nei limiti considerati ottimali per una determinata specie, dopodiché è sostituita, almeno parzialmente (sistemi semi-chiusi)

Nell'ambito della ricerca sono stati sviluppati diversi approcci per la gestione del rifornimento idrico e minerale di colture ortofrutticole coltivate in sistemi fuori suolo a ciclo chiuso. Un aiuto in questo senso è stato dato dall'impiego di modelli matematici, grazie ai quali è stato possibile migliorare le presenti strategie per il controllo del rifornimento idrico e minerale delle colture in serra, oltre che far uso di strategie più consone per quanto riguarda l'impatto ambientale.

Processi quali l'assorbimento degli elementi nutritivi e la crescita delle colture in funzione delle condizioni climatiche presenti in ambiente protetto, o la traspirazione delle colture in relazione all'assorbimento dell'acqua e degli elementi nutritivi, possono essere calcolati sulla base di misurazioni dei diversi parametri delle serre in combinazione con modelli matematici di tipo dinamico. In questo modo la crescita e lo sviluppo della pianta possono essere tenuti continuamente sotto controllo, monitorati, facendo riferimento da un lato ai parametri climatici in serra e dall'altro al rifornimento nutritivo specifico per quella determinata coltura (Marcelis et al., 2000).

L'impiego d'informazioni/dati e modelli matematici relativi alle concentrazioni dei nutrienti e al contenuto d'acqua somministrati nell'impianto permettono un'efficiente gestione del rifornimento idrico e minerale nelle coltivazioni fuori suolo in ambiente protetto, oltre che un uso di strategie ottimali da un punto di vista economico ed ambientale.

Ad oggi, comunque, molti di questi processi sono scarsamente conosciuti; per esempio la risposta delle piante alle variazioni nel tempo e nello spazio del contenuto dell'acqua e delle concentrazioni dei nutrienti all'interno dell'impianto di coltivazione fuori suolo. Inoltre, c'è da aggiungere come le risposte delle piante siano notevolmente influenzate/dipendenti dalle condizioni climatiche presenti all'interno della serra.

Il controllo dei nutrienti si basa essenzialmente sulla misura dell'EC e del pH della soluzione da reintegrare nell'impianto di coltivazione a ciclo chiuso; l'integrazione avviene mediante l'aggiunta di soluzione concentrate d'acidi e nutrienti. Poiché la sola misurazione della EC non permette di conoscere la quantità di nutrienti presenti nella soluzione circolante sono necessarie periodiche analisi chimiche.

Possiamo distinguere due principali metodi per la reintegrazione dei nutrienti nella soluzione ricircolante; nel primo il reintegro della soluzione nutritiva viene effettuato con acqua e/o soluzione nutritiva (talora con diversa concentrazione di nutrienti) in proporzioni tali da mantenere costante la EC della soluzione ricircolante. Il sistema è utilizzato quando si dispone di acque di buona qualità (cioè con basso contenuto di ioni non essenziali). Nel

secondo caso il reintegro dei consumi di soluzione nutritiva è effettuato sempre con soluzione nutritiva ‘fresca’, cioè appena preparata dal fertirrigatore. Questo sistema detto anche a “*EC crescente*” si caratterizza per un mantenimento più o meno costante della concentrazione dei nutrienti e, nel caso di acque contenenti ioni non essenziali o poco assorbiti dalla coltura, per un progressivo aumento di EC della soluzione nutritiva. Questo sistema è più adatto alla gestione con acque saline, in quanto l’accumulo di sali non essenziali è indicato dall’incremento di EC.

Nei sistemi che utilizzano l’ultimo tipo di reintegrazione l’EC tende ad aumentare in maniera più o meno veloce in funzione della qualità dell’acqua irrigua e della evapotraspirazione della coltura, fino a raggiungere una soglia massima di tolleranza della coltura, quando viene scaricata e sostituita con soluzione, in parte, nuova. In ogni caso è molto importante la periodica analisi della soluzione ricircolante per prevenire o individuare eventuali anomalie.

1.6.3 Rilevamento della concentrazione ionica nella soluzione nutritiva

Uno dei principali problemi dei sistemi fuori suolo su substrato è rappresentato dalla definizione e dalla misurazione della concentrazione degli elementi nutritivi a livello delle radici della coltura. Negli impianti commerciali la concentrazione degli elementi nutritivi viene stimata attraverso la conducibilità elettrica (EC). Tale affermazione è particolarmente vera nel caso si abbia a che fare con acque saline in cui l’assorbimento selettivo di alcuni elementi piuttosto che altri da parte della pianta provoca un accumulo di ioni scarsamente utilizzati (sodio, cloro...) che compensa, in termini di EC, la diminuzione del contenuto dei nutrienti.

Ad oggi non esistono delle procedure standard per la misurazione di tale parametro anche se generalmente viene presa in considerazione l’acqua di drenaggio o, in alternativa, viene estratta la soluzione nutritiva direttamente dal substrato stesso. Comunque c’è da aggiungere come in letteratura non esista un’unica vera e propria correlazione tra l’EC (e la concentrazione ionica) del drenato e quella della soluzione nutritiva in prossimità delle radici delle piante. Tale mancanza di standardizzazione rappresenta un vero e proprio handicap quando si costruiscono modelli e viene fatta una stima dei parametri; spesso sono necessari dati reperiti da esperimenti diversi per la calibrazione e la validazione del modello in questione.

Sonneveld (1999) ha messo in evidenza come l’EC del substrato può essere

calcolata come media dell'EC della soluzione di drenaggio e della soluzione madre, di rifornimento.

La conducibilità elettrica, il contenuto d'acqua e la concentrazione ionica non sono uniformi all'interno degli impianti fuori suolo (De Tourdonnet et al., 2001; Heinen, 2001; Otten, 1994; Van Noordwijk 1980): per esempio De Ricjk e Schrevens hanno misurato valori di conducibilità elettrica in un substrato di lana di roccia sul quale veniva coltivato pomodoro che variavano da 4,5 a 10 mS/cm, con un'acqua di irrigazione la cui EC si aggirava intorno a valori di 2 mS/cm. Schwarz ed altri ricercatori hanno misurato valori di EC compresi tra 1,8 e 6,5 mS/cm su di un substrato dove veniva coltivata della lattuga e dove veniva impiegata acqua di irrigazione con livelli di EC intorno a 2 mS/cm.

Modelli di simulazione molto sofisticati sono stati impiegati con successo per descrivere i vari processi che avvengono a livello delle radici delle piante ed in modo da gestire in maniera ottimale il rifornimento idrico e minerale negli impianti fuori suolo (Heinen, 1997, 2000; Otten, 1994). Per un applicazione pratica vera e propria questi modelli risultano ad oggi ancora complicati e richiedono la stima di numerosi parametri specifici del sistema in uso.

1.6.4 Procedure di controllo

Ad oggi le strategie per il controllo degli elementi nutritivi negli impianti di idroponica si fondano sul mantenimento di determinati livelli (*set-point*) di concentrazione degli elementi minerali stessi, ricavati da esperimenti di altri ricercatori o sviluppati sulla base delle esperienze passate degli agricoltori. I *set-point* sono mantenuti grazie ad un approccio denominato a "feedback", che consiste nel reintegrare la soluzione nutritiva quando la EC scende al di sotto di una certa soglia in seguito al depauperamento degli elementi nutritivi. L'abbassamento della EC è vera solo nel primo periodo di coltivazione; in seguito, con l'invecchiamento della soluzione nutritiva e a causa dello squilibrio ionico, la EC tende ad aumentare per l'accumulo di sali non asportati o poco asportati dalla pianta, mentre gli elementi nutritivi diminuiscono.

Questa strategia di controllo pur se può considerarsi efficace presenta alcuni aspetti negativi quali lo spreco di acqua e fertilizzanti oltre che il rischio di favorire i consumi di lusso di elementi nutritivi da parte della pianta. Infatti, gli elevati *set-point* di concentrazione uniti a condizioni ambientali favorevoli dovute all'ambiente protetto tendono a favorire oltre misura l'assorbimento degli ioni minerali da parte della coltura. In

questo modo si ottiene un accumulo di nutrienti all'interno della pianta senza effetti positivi sulla produzione.

Nei sistemi di controllo più innovativi si cerca di correlare il fabbisogno nutritivo con il tasso di crescita della pianta. Importante in questo caso è il tasso d'assorbimento degli elementi nutritivi da parte della pianta più che la concentrazione. In questo sistema sono indispensabili l'uso di sensori ione-specifici. Tra i sistemi di controllo citiamo il metodo di Nielsen e di Okuya Okuya; Nielsen differenzia la gestione del sistema idroponica in due distinte fasi, ovvero in una iniziale e in un'altra di mantenimento. Gli elementi della soluzione iniziale devono essere presenti in concentrazione ridotta, ossia simile a alla soluzione circolante di un terreno fertile. Invece, nella soluzione di mantenimento (erogata per compensare l'acqua persa per traspirazione) gli elementi nutritivi devono essere presenti in concentrazioni più elevate con rapporti ionici stabiliti sulla base dell'assorbimento netto della pianta.

Il metodo Okuya Okuya prevede che un computer gestisca la soluzione nutritiva in funzione del tasso di assorbimento minerale modificando il rapporto di somministrazione di quattro soluzioni stock.

Un altro metodo per la gestione del rifornimento idrico e minerale si basa invece su di un approccio a “ feed-forward”, dove l'assorbimento d'acqua e nutrienti sono stimati utilizzando modelli di crescita e traspirazione delle piante. Un approccio di questo tipo è stato proposto per la prima volta da Klaring ed il suo staff di ricercatori. (Klaring et al., 1997). Essi stimarono il fabbisogno giornaliero di elementi nutritivi per una coltura mediante un modello di crescita (model of net photosynthesis) mentre il fabbisogno giornaliero di acqua venne stimato mediante un modello per la traspirazione delle piante (Heibner, 1997).

Infine, un metodo alternativo al controllo della nutrizione minerale per le colture coltivate in idroponica, è rappresentato dal cosiddetto Programmed nutrient addition (PNA) (Asher & Blamey, 1987; Ingestad & Lund, 1992; Lea-Cox et al., 1999; Zerche, 2000) in cui l'elemento nutritivo è somministrato in maniera graduale e a concentrazioni ridotte. La quantità dell'elemento nutritivo da somministrare è calcolata sulla base delle analisi di produzione di sostanza secca e sulla sua composizione minerale. Calcoliamo così non solo la quantità, ma anche il momento migliore per la reintegrazione.

1.6.5 Gestione degli impianti idroponici nel caso di acque saline

L'acqua d'irrigazione è uno dei principali fattori che limitano lo sviluppo delle colture fuori suolo in quanto, in idroponica, le colture dipendono totalmente dalla disponibilità dell'acqua e dalla sua qualità.

Ad oggi, se da un lato si assiste ad un aumento delle superfici coltivate fuori suolo, dall'altro si ha a che fare con disponibilità idriche sempre minori, caratterizzate dalla presenza di alte concentrazioni di sali al proprio interno. Molti sono i paesi che presentano problematiche di questo tipo; tra questi ricordiamo il Marocco, l'Egitto nella regione di Gaza, la Spagna e anche l'Italia.

L'alta salinità dell'acqua d'irrigazione ha un effetto deleterio sulla fertilità del suolo, e va ad incidere in maniera negativa sulla crescita delle piante e anche sulla produzione delle stesse. La riduzione della crescita delle piante in seguito all'impiego di acque irrigue saline è dovuto ad un aumento del potenziale osmotico dell'acqua, della concentrazione di ioni tossici oltre che all'induzione di squilibri o deficienze a livello nutritivo (Munns, 2002; Flowers, 2004; Parida, 2005).

Bisogna comunque ricordare come gli effetti della salinità sulle colture dipendano molto anche dalle condizioni climatiche; per esempio, le alte temperature e le alte traspirazioni incrementano gli effetti negativi della salinità (Shannon et al., 1999).

Tra la salinità del suolo e la produzione delle piante esiste una relazione lineare, che si può esprimere con la seguente equazione (modello di Maas e Hoffman 1977):

$$P = 100 - b (EC - a), \text{ con } EC > a$$

dove P è la produzione della coltivazione rispetto alla massima possibile in condizioni ottimali, EC è la salinità del suolo (in mS/cm), a è la EC massima oltre la quale si assiste a un decremento della produzione, b è la pendenza della retta.

Ovviamente, esistono specie maggiormente tolleranti di altre alla presenza di sali. La definizione di tolleranza alla salinità è solitamente legata alla percentuale di biomassa prodotta nei suoli salini rispetto ai suoli non salini; esistono diversi studi che hanno tentato di classificare il grado di tolleranza delle specie coltivate alla salinità. Nella Tabella 2 è riportato il grado di tolleranza alla salinità in diverse specie ornamentali arbustive e arboree.

Com'è stato già accennato in precedenza un recupero totale dell'acqua di drenaggio nei sistemi a ciclo chiuso è possibile solo quando la concentrazione dei vari ioni nella soluzione ricircolante è uguale o inferiore alla concentrazione d'assorbimento (rapporto tra

la quantità di nutrienti e acqua assorbiti dalla coltura). L'accumulo dei sali a livello dell'impianto fuori suolo si verifica quando si ha a che fare con acque di scarsa qualità (per esempio acque che presentano un'alta concentrazione di Na, Cl, solfati oppure microelementi e, in caso di acque dure, di Ca e Mg) in quanto la concentrazione di assorbimento apparente (rapporto tra l'assorbimento dei nutrienti e assorbimento dell'acqua) degli ioni, quali per esempio il Na, è molto più bassa rispetto alla loro concentrazione nell'acqua d'irrigazione. Per tale motivo la soluzione nutritiva viene fatta ricircolare fino a che non raggiunge valori molto alti di salinità (rilevata attraverso l'EC), generalmente specifici per ogni coltura, e dopo di che viene scaricata nell'ambiente con spreco di acqua e fertilizzanti, ricorrendo quindi all'uso di sistemi semi-chiusi.

Tabella 1.2. Grado di tolleranza alla salinità in diverse specie ornamentali ed arboree

Grado di sensibilità	Valore max EC (mS cm ⁻¹) A	Valore max EC (mS cm ⁻¹) B	Specie
Molto sensibili	1,0-2,0	0,7-1,3	Cotonaster congestus, Mahoia aquifolium, Photinia x Fraseri
Sensibili	2,0-4,0	1,3-2,7	FeiJoa sellowiana, Ilex cornuta, Rosa spp., Hedera canadiensis, Hibiscus rosasinensis, Lagerstroemia indica, Platycladus orientalis, Pittosporum tobiria, Nandina domestica, Viburnum tinus, Arbutus unedo
Moderatamente sensibili	4,0-6,0	2,7-4,0	Lantana camara, aligustrum spp., Magnolia grandiflora, Buxus spp., Dodonea viscosa, Pyracantha spp., Prunus spp
Moderatamente tolleranti	6,0-8,0	4,0-5,0	Callistemon spp., Chamerops humilis, Euonymus spp., Nerium Oleander, Cordiline indivisa, iquidambar styraciflua, Pinus halepensis, Rosmarinus officinalis
Tolleranti	8,0-10	5,3-6,7	Syzigium paniculatum, Leucophillum frutescens, Pinus pinea, Carissa grandiflora Baganvillea spectabilis
Molto tolleranti	≥10	≥6,7	Delosperma alba, drosanthemum hispidum, Lampanthus productus, Hymenocyclus croceus

Nota: A valore di EC riferito all'estratto saturo del terreno o del substrato;

B valore di EC dell'acqua irrigua max tollerabile;

Fonte: Barbieri e De Pascale, 1992

CAPITOLO 2

MODELLI DI SIMULAZIONE DELLE COLTURE

2.1. GENERALITÀ

Nella sua accezione più generale un modello è una rappresentazione semplificata di un sistema, intendendo come sistema una parte ben delimitata del mondo reale (De Wit, 1982). In campo agricolo, ad esempio, una coltura con tutti i suoi organi (radici, culmi, foglie) e i suoi processi e meccanismi (crescita, sviluppo, fotosintesi, traspirazione, ecc.) costituisce un sistema.

Negli ultimi anni i modelli di simulazione della crescita delle colture sono diventati uno strumento fondamentale per gli studi e le applicazioni agrometeorologiche. Essi in generale sono impiegati per studiare il comportamento di una coltura e per valutare la sua risposta all'ambiente che la circonda.

Una delle caratteristiche peculiari dei modelli è quella di fornire risultati validi anche in realtà agronomiche, colturali e gestionali diverse da quelle dove sono stati sviluppati. Caratteristica quest'ultima che permette di considerare, oggi, la modellistica come lo strumento complementare ideale alla classica sperimentazione. In generale la costruzione di un modello consiste nell'individuazione di una serie di equazioni matematiche mediante le quali è possibile riprodurre nel modo più fedele possibile il comportamento del sistema esaminato.

2.2. TIPI DI MODELLI

In base alla validità e al significato delle equazioni matematiche individuate è possibile distinguere i modelli in empirici (descrittivi) o meccanicistici (esplicativi).

I modelli empirici descrivono in modo semplificato il comportamento di una coltura. Lo sviluppo di un modello empirico si basa sull'individuazione, a partire da dati sperimentali, di una o più equazioni matematiche in grado di rappresentare il processo esaminato. Sebbene questi modelli possano rappresentare, in teoria, uno strumento agile e di facile applicazione, in pratica essi risultano essere uno strumento incompleto ed ampiamente condizionato dalla disponibilità dei dati, dalle modalità di campionamento e dagli errori sperimentali.

Le principali carenze di questo tipo di approccio sono da ricercare: nella limitata validità in ambienti diversi da quelli originali e nell'impiego di equazioni che spesso non hanno un significato biologico.

L'elemento principale che differenzia i modelli meccanicistici da quelli empirici è la natura e il modo con il quale vengono individuate le equazioni che descrivono il sistema. In un modello meccanicistico, infatti, i meccanismi e i processi che determinano il comportamento del sistema vengono quantificati separatamente attraverso equazioni ispirate a principi e leggi di validità generale e non ricavate da dati empirici.

Il modello è costruito poi unendo e integrando i singoli processi per l'intera coltura. Per quanto concerne il numero di processi di primaria importanza esaminati per la simulazione della crescita di una coltura, esso dipende: dal livello di dettaglio che devono raggiungere i risultati e dai fattori limitanti la crescita considerati (carenze idriche e/o nutritive).

A loro volta i modelli empirici e meccanicistici possono essere classificati in: dinamici o statici e instocastici o deterministici.

- Modelli dinamici: descrivono sistemi che variano in funzione del tempo (es. modelli di ripartizione degli assimilati).
- Modelli statici: descrivono sistemi che non variano nel tempo (es. modelli di distribuzione della luce all'interno della coltura).
- Modelli deterministici: assegnano ad ogni variabile del sistema un solo valore (modelli di simulazione della crescita delle colture).
- Modelli stocastici: assegnano ad ogni variabile del sistema una distribuzione di valori attorno alla loro media (es. modelli per la determinazione del grado di diffusione di infezioni fungine).

2.3. MODELLI PER LE COLTURE IN SERRA

Lo sviluppo della modellistica in agricoltura risale a circa tre decenni fa, in parallelo alle scoperte fatte sulla fisiologia e sull'ecologia delle piante unitamente ai passi da gigante fatti in campo informatico (Hammer et al., 2002). L'uso di modelli nel campo dell'orticoltura risale agli anni ottanta, ed inizialmente si è affermata in quei paesi dove la produzione d'ortaggi in serra aveva storicamente un'importanza economica elevata e dove l'impiego di modelli era già affermato in altri settori agricoli (Gary et al., 1998). I paesi da ricordare sono rappresentati dall'Olanda, Inghilterra, Francia, Israele, USA, Germania,

Canada e solo in tempi più recenti in paesi dell'Europa del sud tra cui l'Italia. L'importanza sempre più crescente dei modelli applicati in orticoltura è da ricercare in diverse ragioni; in primo luogo i modelli sono potenti strumenti in mano ai ricercatori, grazie ai quali è possibile descrivere e conoscere anche i sistemi più complessi.

In letteratura la maggior parte delle pubblicazioni riguardanti i modelli applicati in orticoltura riportano lavori sui processi quali la crescita, lo sviluppo e l'evapotraspirazione (Tabella 2.1) delle piante mentre è stata data molto meno attenzione ad argomenti quali l'assorbimento nutrizionale e le interazioni tra piante e malattie (Gary et al., 1998).

Tabella 2.1. Numero di articoli riguardanti i modelli in orticoltura per le produzioni in serra, in pieno campo ed ornamentali. Fonte: Carmassi (2005).

Argomento	Frutti	Produzioni in serra	Produzioni in pieno campo	Produzioni ornamentali
Crescita	55	69	34	17
Sviluppo	61	10	25	33
Bilancio idrico	6	10	5	6
Assorbimento minerale	8	4	4	3
Economia	8	8	2	4
Altri	5	2	4	2

In questi ultimi anni, in seguito ad un interesse commerciale sempre più importante intorno all'idroponica e soprattutto all'insorgere di numerose problematiche legate all'orticoltura, l'attenzione degli addetti ai lavori si è sempre più concentrata verso nuove metodologie d'analisi e soluzioni delle problematiche, che comprendono lo sviluppo di modelli (con un diverso grado di complessità) e di un sistema di supporto decisionale (DSS) per la gestione dell'irrigazione e della fertilizzazione delle colture in serra (Lentz, 1998). Tale soluzione può costituire, infatti, uno strumento in grado di guidare il coltivatore nelle sue decisioni operative.

Si tratta in pratica di sviluppare modelli affidabili e di integrarli in un sistema in grado di simulare, ad esempio, il fabbisogno idrico di una coltura oppure la variazione del contenuto di nutrienti e di conducibilità elettrica della soluzione nutritiva ricircolante, a partire dai valori iniziali dell'acqua irrigua, dalle caratteristiche della coltura e dalle condizioni microclimatiche. Un simile approccio consente di ottimizzare la gestione del sistema colturale e nello stesso tempo ridurre l'impatto ambientale dovuto allo scarico

periodico delle soluzioni ricircolanti dei sistemi idroponici a ciclo chiuso.

In altre parole il DDS è uno strumento in grado di migliorare i processi decisionali/gestionali (decision-making process) anche quando si ha a che fare con i sistemi più complessi.

Su scala temporale è possibile, per esempio, distinguere tra tre livelli decisionali: decisioni strategiche (uno o più anni), tattiche (mesi) ed infine operative (giorni).

A livello strategico un uso dei modelli può essere fatto per decidere degli investimenti del capitale nel lungo periodo, a livello tattico (prima dell'inizio di una nuova coltivazione) i modelli possono essere d'aiuto all'agricoltore per decidere le specie da coltivare, il periodo migliore per il trapianto, il tipo di sistema di crescita in cui far sviluppare la piante ecc, infine, a livello operativo, i modelli possono subentrare per controllare processi quali l'irrigazione e la fertilizzazione (Lenz, 1998).

In funzione del loro diverso grado di complessità e di utilizzo i modelli possono suddividersi in tre categorie diverse che verranno descritte di seguito. Possiamo distinguere, infatti, modelli su piccola e media scala oltre che software decisionali su larga scala.

I modelli su piccola scala sono costruiti sulla base di una o due equazioni, una o due variabili indipendenti e una o due variabili dipendenti. Un modello in grado di simulare come una specifica caratteristica di una coltura si sviluppi nel corso del tempo è un tipico esempio di modello su piccola scala. Osservando e paragonando lo stato di una coltura con quello simulato tramite il modello, l'agricoltore può capire se la pianta sta progredendo come ci si dovrebbe aspettare oppure no.

I modelli in questione, nel mondo produttivo, vengono indicati con il nome di "graphical tracking" in quanto consistono generalmente di un grafico e sono molto utilizzati nella produzione di piante da vaso, dove ci sono specifiche richieste di mercato per quanto riguarda il parametro altezza della pianta. La medesima tecnica può essere utilizzata prendendo in considerazione anche altri numerosi parametri.

Un altro esempio è rappresentato dalla modellizzazione del tempo di fioritura del giglio pasquale (*Lilium longiflorum*) in funzione della lunghezza delle gemme fiorali e della temperatura esterna (Fischer et al., 1996). Dai risultati sperimentali i ricercatori hanno ottenuto un "regolo" nel quale sono stati inseriti il numero di giorni mancanti alla gemma per andare in fioritura in funzione della temperatura. L'agricoltore doveva solamente appoggiare il regolo sulla gemma e in funzione della lunghezza di quest'ultima ricavava il numero di giorni mancanti alla fioritura, numero che tendeva a cambiare in

funzione della temperatura registrata (Fischer et al., 1997).

I modelli su media scala sono quelli costruiti sulla base di diverse equazioni e variabili dipendenti ed indipendenti. Un esempio è dato da un software in grado di simulare l'altezza delle piante e lo sviluppo delle colture in funzione della temperatura che si registra all'interno della serra (Lieth & Li, 1998).

Infine, un esempio di sistema di supporto decisionale progettato su larga scala è il greenhouse CARE system (Fischer et al., 1997), un software costituito al suo interno da diversi modelli relativi alla crescita e allo sviluppo di colture quali poinsettia e giglio pasquale in ambiente climatizzato protetto. Tale prodotto è stato commercializzato e supportato da una ditta privata per alcuni anni, in seguito ai quali, viste le numerose difficoltà nel mantenere la produzione ed assicurare il giusto supporto agli agricoltori, è stata cessata la produzione.

2.4. MODELLI PER L'EVAPOTRASPIRAZIONE

Il termine evapotraspirazione (E) combina l'*evaporazione* dal suolo con la *traspirazione* dalle piante così da descrivere la perdita d'acqua totale di una coltura. L'acqua evapora da una superficie umida verso l'atmosfera finché quest'ultima non diviene satura. Il processo di evaporazione è tanto più rapido quanto maggiore è la differenza fra la pressione di vapore della superficie evaporante e quella dell'atmosfera (deficit di pressione di vapore, o VPD).

L'evaporazione dalle piante, tuttavia, assume un nome specifico, *traspirazione*, e avviene attraverso gli stomi.

Si distinguono due tipi di evapotraspirazione: a) evapotraspirazione potenziale o di riferimento (EP o E0), cioè la perdita di acqua calcolata attraverso equazioni e modelli matematici oppure misurata da una coltura di riferimento (normalmente *Festuca arundinacea*); b) evapotraspirazione effettiva (EE), cioè la reale perdita di acqua dalla coltura in oggetto, in genere inferiore al valore precedente.

La relazione fra i due tipi di evapotraspirazione è la seguente:

$$EE = E0 Kc$$

dove il termine *Kc* (coefficiente colturale) riflette le differenze nella specie, nella copertura vegetale e nello stadio di sviluppo. L'E viene generalmente espressa in millimetri per unità di tempo: considera quindi la perdita di acqua come unità di altezza. L'E può tuttavia venire espressa anche in relazione al volume evaporato per unità di superficie per unità di

tempo (ad esempio, m³/ha giorno), oppure per unità di energia necessaria per far evaporare l'acqua ricevuta per unità di superficie (ad esempio, MJ/m² giorno). Questa energia è chiamata calore latente di vaporizzazione.

L'evapotraspirazione di una coltura può essere ricavata attraverso diverse metodologie; ad oggi, l'equazione di Penman-Monteith è considerata la formula standard a cui si fa riferimento per il calcolo dell'evapotraspirazione stessa (Allen, et al., 1998). Nel 1948 Penman dette vita ad un'equazione in grado di calcolare l'evaporazione di una superficie d'acqua libera a partire dalla registrazione di dati climatici standard quali la radiazione, la temperatura dell'aria, l'umidità e la velocità del vento. In un secondo momento, grazie anche all'aiuto d'altri studiosi, fu possibile estendere e rendere valida questa formula anche nel caso in cui si avesse a che fare con superfici coltivate mediante l'introduzione di fattori di resistenza. I fattori di resistenza possono distinguersi in fattori di resistenza di superficie e aerodinamici. I primi tengono conto della resistenza che incontrano i flussi di vapore nel passaggio attraverso le aperture stomatiche e/o l'intera superficie, mentre i secondi tengono conto delle resistenze a livello della vegetazione che si trova in alto rispetto al terreno e coinvolgono flussi d'aria al di sopra della superficie vegetativa.

Di seguito viene riportata per esteso l'equazione di Penman- Monteith:

$$E = \frac{\Delta(Rn - G) + p a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

dove: E = evapotraspirazione potenziale (mm/giorno); Rn = radiazione netta alla superficie della vegetazione (MJ/m² • giorno); G = densità di flusso di calore del suolo (MJ/m • giorno); (e_s - e_a) = deficit di pressione di vapore dell'aria (kPa); p_a = densità media dell'aria a pressione costante (kg m⁻³); c_p = calore specifico dell'aria (KJ Kg⁻¹); Δ = pendenza della curva di pressione di vapore (kPa/°C); γ = costante psicrometrica; r_s / r_a = resistenze di superficie ed aerodinamiche.

Il metodo di Penman-Monteith è considerato il metodo più preciso fra quelli matematici per il calcolo dell'E. Data la difficoltà di misurazione di alcuni parametri, però, viene raramente utilizzato a livello aziendale, preferendo a esso altri metodi, più immediati e intuitivi.

La maggior parte dei parametri di tale equazione sono misurati o calcolati attraverso i dati climatici (le resistenze aerodinamiche e di superficie risultano essere specifiche per ogni coltura) e grazie a questa formula è possibile fare una stima di tutto il vapore acqueo che viene perso dall'impianto per traspirazione, da ogni singola foglia della coltura, e per evaporazione dall'intera superficie dove sono fatte crescere le piante.

L'equazione di Penman-Monteith è stata applicata a tutti i livelli, dalle singole foglie fino ad intere colture all'interno degli ambienti protetti (Stanghellini, 1987; Bailey, 1993) ed anche a numerose colture orticole coltivate in pieno campo.

Per le colture coltivate in ambiente protetto, dove le perdite per evaporazione dal suolo possono considerarsi trascurabili (in quanto viene sempre più fatto ricorso alle colture fuori suolo e/o alla pacciamatura) l'evapotraspirazione dipende principalmente dalla radiazione solare, dalla temperatura e dall'umidità dell'aria, dalla superficie fogliare e dalla velocità del vento (Stanghellini, 1987).

Per fare un esempio pratico possiamo stimare il valore dell'evapotraspirazione di una coltura in ambiente protetto prendendo in considerazione il valore della radiazione globale, dell'energia impiegata per il riscaldamento della serra e il livello di crescita della coltura. Il risultato di questa stima unito con i dati delle misurazioni riguardanti la quantità d'acqua drenata offre buone possibilità per risalire ad un controllo automatico dell'irrigazione (Sonneveld, 2000). Il rischio d'errori nella valutazione della frequenza e della quantità di acqua da rifornire all'impianto può essere ricondotto principalmente a due cause: 1) improvvisi cambiamenti delle condizioni meteorologiche esterne; 2) impiego di strumentazioni in grado di controllare le condizioni climatiche (luce artificiale, riscaldamento, impianti di ventilazione...).

Tali strumentazioni vanno ad influire in maniera importante sul valore dell'evaporazione della coltura in quanto sono in grado di modificare i principali fattori climatici che determinano E, quali la radiazione globale (RG) e deficit di pressione di vapore (VPD) (Monteith, 1973). Nelle serre a climatizzazione controllata RG e VPD sono monitorati continuamente grazie ad appropriati sensori (solarimetri e psicometri) e, in un secondo momento, registrati su di un sistema computerizzato centrale. Numerosi e di diversa complessità sono stati i modelli proposti nell'arco di quest'ultimi anni per il calcolo dell'evapotraspirazione; negli anni settanta, per esempio, la stima di questo parametro era fatta sulla base di una semplice correlazione con la radiazione globale (Morris et al., 1957, De Villèle, 1974)

$$E = A \cdot Kc \cdot RG + B$$

dove K_c rappresenta un coefficiente che dipende dallo stadio vegetativo della coltura, mentre A e B sono due coefficienti ricavati da calcoli statistici. Tali modelli hanno permesso di stimare l'E attraverso la sola radiazione globale e pochi altri coefficienti, specifici per la coltura in serra presa in esame.

Sebbene tali modelli siano molto semplificati sono ugualmente molto utilizzati per il controllo dell'irrigazione di diverse specie vegetali, specialmente su scala temporale settimanale o giornaliera. C'è da aggiungere come i parametri siano specifici per determinate condizioni all'interno della serra; se tali condizioni cambiano i parametri dei modelli non possono più considerarsi validi (Jemaa, et al., 1995). Nell'equazione sopra riportata non viene fatto riferimento al valore del VPD e questo, nel caso in cui il riscaldamento e l'umidità nella serra sia automatizzato, può essere una fonte di errore nella stima dell'evapotraspirazione (Baille et al., 1994). Negli anni ottanta, invece, sono stati elaborati nuovi modelli sulla base dell'equazione di Penman-Monteith (Stanghellini, 1987; Okuya et al., 1988; Yang et al., 1990; Jolliet & Bailey, 1992) il cui uso richiede la conoscenza di vari inputs o parametri che non sempre sono di facile reperimento. Questo è il principale motivo per il quale diversi ricercatori (Okuya & Okuya, 1988; Jolliet & Bayley, 1992; Baille, 1994) utilizzano una forma più semplificata della formula sopra citata in modo da superare questi problemi.

Ad esempio, le resistenze aerodinamiche e di superficie (resistenza del vapor acqueo a livello delle aperture stomatiche della superficie fogliare) sono ben note per ogni specie di coltura e possibilmente per ogni cultivar; generalmente sono stimate tenendo conto dei parametri climatici e del suolo (Yang et al., 1990; Baille et al., 1994, 1996). Baille (1994) mise in evidenza come per diverse specie di piante i valori di resistenza stomatica (r_s) potevano essere stimati con una certa precisione utilizzando una relazione che collegava questo parametro alla radiazione globale e al VPD. Incorporando il valore di R_s stimato come detto in precedenza nell'equazione di Penman-Monteith si può stimare il valore dell'evapotraspirazione facendo riferimento alla formula semplificata dell'equazione che è del tipo:

$$E = A \cdot RG + B \cdot VPD$$

dove i coefficienti A e B dipendono principalmente dall'indice di area fogliare (LAI) e assumano valori diversi in funzione del giorno e della notte. I valori di A e B per diverse colture si trovano in letteratura o possono essere calcolati direttamente sull'impianto attraverso i valori di traspirazione e i parametri climatici (Baille, 1994).

2.5. MODELLI PER L'ASSORBIMENTO MINERALE

Il lavoro condotto da Le Bot (Le Bot et al., 1998) sulla modellizzazione dell'assorbimento dei nutrienti nel campo dell'orticoltura ha messo in evidenza come sia possibile distinguere due diversi metodi per descrivere l'assorbimento dei nutrienti da parte delle piante. Il primo metodo, denominato "meccanicistico", considera l'assorbimento come un processo costituito da più step che includono l'entrata del nutriente all'interno delle radici, l'assimilazione ed il trasporto nella pianta e, infine, l'utilizzazione del nutriente nel metabolismo della pianta stessa. In questo caso i modelli riguardano scale spazio-temporali abbastanza ristrette e gli studi sono fatti sul breve periodo a livello cellulare o molecolare. Solo l'integrazione di questi successivi step saranno in grado di simulare in maniera adeguata il comportamento dell'intero sistema pianta (Le Bot et al., 1998). Nel secondo metodo, chiamato "statistico", l'attenzione non è concentrata tanto sui vari step che conducono all'assorbimento del nutriente, quanto sui fattori "ultimi" che governano le relazioni tra assorbimento minerale e le esigenze della pianta durante la crescita. Da questo punto di vista i modelli vengono costruiti su scale spazio-temporali molto più ampie e gli studi interessano il medio-lungo periodo (mesi, anni). Per entrambi questi approcci, la maggior parte degli studi sono stati condotti sull'elemento nutritivo azoto vista la sua elevata importanza nel controllo della crescita della pianta. Inoltre, entrambi gli approcci descritti in precedenza possono essere ricondotti a modelli di tipo meccanicistico o empirico-statistico. Generalmente la maggior parte dei modelli che vengono costruiti cade all'interno della categoria empirico-statistico, anche se tutti i modelli meccanicistici possono fare, eventualmente, uso di dati empirici.

Nel metodo meccanicistico, che considera come detto in precedenza il breve periodo, un esempio è rappresentato dalla cinetica di Michaelis-Menten, impiegata per correlare la concentrazione della soluzione di un nutriente all'assorbimento di quel determinato nutriente (Epstein and Hagen, 1952). Nel lungo periodo, invece, le richieste di elementi nutritivi da parte delle piante vengono generalmente ricavate sulla base di conoscenze di tipo empirico che si rifanno a leggi universali che regolano la crescita delle piante. Tuttavia, anche per questo tipo di approccio sono stati sviluppati alcuni modelli di tipo meccanicistico; i primi in questo senso si basavano sull'accumulo di nutrienti nella sostanza secca delle piante e sono stati sviluppati su delle colture quali i cereali. Il primo studio condotto con questo metodo è stato fatto da Lemaire (Lemaire et al., 1981); l'autore

ed il suo staff di collaboratori osservarono, durante il ciclo vitale delle colture di cereali prese in esame, un progressivo abbassamento della concentrazione totale di azoto nella sostanza secca totale prodotta dalla pianta. Questo comportamento è stato successivamente descritto mediante una relazione di tipo statistico:

$$\% N = a \cdot DM^b$$

dove $\% N$ rappresenta la concentrazione percentuale di azoto nella sostanza secca presa in esame (g N per 100 g di sostanza secca) e DM la biomassa secca totale aerea della pianta (tonnellate /ha). Il coefficiente a è invece la concentrazione di azoto nella biomassa secca prodotta alla fine del periodo di crescita esponenziale della pianta, mentre b è un parametro statistico coinvolto nella pendenza della curva dell'equazione. Da questa relazione è possibile ricavarne la successiva:

$$Nu = 10 \cdot a DM^{1-b}$$

dove Nu rappresenta la quantità di azoto assorbito da una coltura (Kg/ha), $1-b$ è il rapporto tra la quantità di azoto assorbita e la sostanza secca accumulata, mentre a è la quantità di azoto assorbito da un ettaro della coltura alla fine della sua crescita esponenziale.

Tali risultati sono stati generalizzati a diverse specie C_3 e C_4 (Greenwood et al., 1990, Lemaire et al., 1997): quando viene presa in considerazione la concentrazione critica di azoto si vengono a delineare le seguenti relazione medie: per le specie C_3 : $\% N = 4.8 \cdot DM^{0.34}$, per le specie C_4 : $\% N = 3.6 \cdot DM^{0.34}$. Tali relazioni mettono in evidenza il fatto che se le colture vengono fatte crescere in condizioni di rifornimento abbondante per quanto riguarda la nutrizione azotata, l'efficienza d'utilizzo dell'azoto (biomassa accumulata per unità d'azoto assorbita) è maggiore del 25 % nelle specie C_4 che nelle specie C_3 .

La relazione generale del progressivo decremento in $\% N$ nella biomassa secca delle piante è stata verificata per numerose colture; per quanto riguarda le colture orticole è stato preso in considerazione il pomodoro. A tale proposito bisogna aggiungere come, in condizioni non limitanti di rifornimento azotato, Andriolo (1995) ha elaborato la seguente relazione:

$$\% N = 5.77 \cdot DM^{0.33}$$

Il progressivo decremento di azoto, che avviene con il decorrere del tempo all'interno dei tessuti della pianta, può spiegarsi introducendo il concetto di compartimentazione. Due sono i modelli meccanicistici proposti da Caloin (Caloin et al., 1984) e Hardwick (Hardwick et al., 1987): entrambi i modelli partono dal presupposto che nelle piante siano presenti due differenti comparti nei quali è presente, anche se in forme e

concentrazioni diverse, l'azoto (Le Bot et al., 1998). Un comparto, nel quale la presenza di azoto è maggiore, è coinvolto negli scambi energetici e determina la crescita delle piante, mentre l'altro comparto è associato ad altre funzioni quali immagazzinamento e struttura e nel quale i livelli di azoto riscontrati sono più bassi rispetto al primo. La predominanza del secondo comparto rispetto al primo nel lungo periodo spiega il decremento della percentuale di azoto da valori alti a valori bassi.

Per colture quali il pomodoro, Le Bot (Le Bot et al., 1998) ha messo in evidenza una relazione empirica di tipo lineare tra l'assorbimento di azoto e lo sviluppo dell'area fogliare: per ogni metro quadrato di foglia di pomodoro è registrato un assorbimento di di 4.4 g di azoto. Inoltre, l'accumulo di nutrienti nella sostanza secca in un determinato intervallo di tempo veniva indicato sulla base della radiazione intercettata dalla coltura. La percentuale di azoto nella pianta veniva poi calcolata come rapporto tra la quantità di azoto assorbita e la biomassa secca della pianta.

2.5.1 Modellizzazione dell'assorbimento nutritivo in colture fertirrigate e in idroponica.

Nei sistemi di coltivazione in ambiente protetto la modellizzazione delle colture è stata motivata dalla necessità di un maggior numero di informazioni che avevano lo scopo di poter migliorare la gestione della coltura tramite l'impiego di strumenti informatici, a loro volta impiegati per un miglior controllo dell'ambiente radicale nel quale si trova a vivere la pianta. In questi sistemi, i modelli possono essere impiegati a livello operativo mediante simulazione, nel breve periodo, di quei processi della pianta che vanno ad interagire con i fattori ambientali e contribuiscono alla crescita giornaliera della coltura o a livello tattico, dove i modelli sono necessari per poter relazionare la linea di condotta generale del controllo climatico e della gestione della coltura durante tutto il ciclo di sviluppo della pianta (Gary, 1998).

L'assorbimento nutritivo delle piante cresciute in fuori suolo stato studiato ampiamente e le informazioni riguardo all'assorbimento radicale e la domanda di elementi nutritivi da parte delle colture sono disponibili e facilmente reperibili in letteratura. Tali informazioni possono essere impiegate per la costruzione di modelli relativamente semplici in grado di risolvere svariati problemi relativi alla gestione delle piante su fuori suolo. Questi sistemi, infatti, devono essere costantemente monitorati da parte del tecnico per impedire un esaurimento della concentrazione dei nutrienti o nel caso di un aumento della

salinità, quando abbiamo a che fare con acque di scarsa qualità. Diversi sono i modelli proposti in questo senso.

Klaring (Klaring et al., 1997), per esempio, ha descritto il rapporto tra l'assorbimento dei nutrienti e l'assorbimento idrico come funzione delle condizioni ambientali, impiegando un modello per la fotosintesi e la traspirazione delle piante. De Willigen e Heinen (1998) hanno dato vita ad un modello in grado di calcolare l'assorbimento di acqua ed elementi nutritivi per una coltura di lattuga. Il modello in questione era inoltre in grado di stimare gli effetti della salinità sull'assorbimento idrico della pianta. Un altro esempio ancora è rappresentato dal lavoro di Silberbush e la sua équipe di collaboratori (Silberbush et al., 2001), che hanno proposto un modello capace di spiegare l'interazione tra gli ioni e l'effetto della salinità dell'acqua irrigua sulla crescita delle piante. Recentemente, la tecnologia ha sviluppato sistemi automatici capaci di misurare costantemente l'attività delle colture. Per esempio, l'Hydrion-line System (www.Hydrion.nl), come descritto da Marcelis (Marcelis et al., 2001) è un sistema "on-line" per il monitoraggio ed il controllo dell'assorbimento idrico e della crescita delle piante in sistemi idroponici che impiegano il ciclo chiuso. In questo sistema un modello dinamico va a stimare sia la crescita che la domanda di acqua e nutrienti da parte della coltura presa in esame.

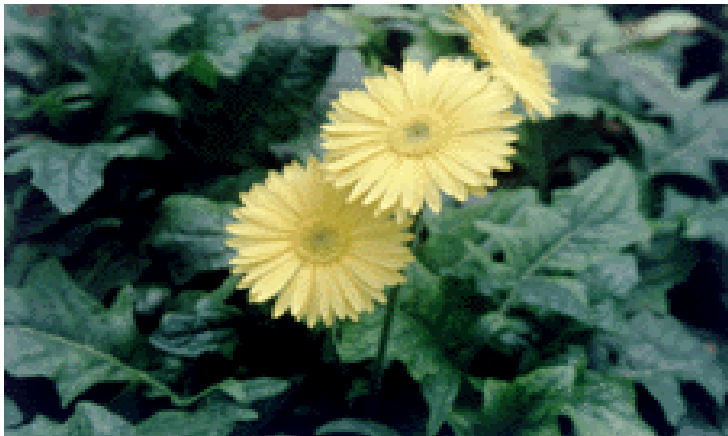
CAPITOLO 3

LA GERBERA

3.1. ORIGINE E DIFFUSIONE

La gerbera è una pianta appartenente alla famiglia delle compositae o asteraceae ed è originaria dell'Africa e dell'Asia Orientale, dove vive spontaneamente all'ombra delle rocce e della vegetazione circostante. Ne esistono circa 80 specie di perenni erbacee, semirustiche; quelle coltivate hanno un germoplasma che deriva dalla *Gerbera jamesonii* e dalla *Gerbera viridifolia*. I fiori recisi di gerbera hanno un notevole interesse commerciale per la loro ampia varietà di colori e forme.

La specie più comunemente coltivata è *Gerbera jamesonii*. Questa specie è spontanea nella regione del Transval, in Sud-Africa, dove vegeta ad una altitudine media di 1100 metri, con condizioni di clima freddo e asciutto per circa 5 mesi durante i quali la pianta entra in riposo e perde le foglie e con una stagione calda e piovosa durante la quale la pianta vegeta e fiorisce.



Pianta di gerbera.

3.2. DESCRIZIONE DELLA PIANTA

La gerbera ha un apparato radicale fittonante e profondo con numerose radici avventizie che si sviluppano sia orizzontalmente che verticalmente. Il fusto è a rizoma da cui si dipartono radici e foglie. Le foglie si presentano lanceolate, tormentose, lobate e generalmente disposte a rosette. L'infiorescenza è un capolino ed è composta da fiori femminili (le "ligule" o "petali") e fiori maschili (costituenti la parte centrale detta "disco"). Le ligule hanno sempre colore diverso da quello del disco: in ogni caso quando si parla di

colore si intende sempre quello delle ligule. Vi sono tre tipi di gerbere: a fiore semplice, con un solo cerchio di ligule; a fiore semidoppio, dove le ligule formano due piani sovrapposti di cui quello interno è una sorta di collarino di circa 30-40 ligule corte; a fiore doppio, con ligule lunghe esterne, come nel fiore semplice, e alcune centinaia di ligule corte al centro.

La fioritura ha un andamento centripeto ed il frutto è rappresentato da un achenio che presenta una temperatura ottimale di germinazione intorno ai 20-25 gradi centigradi. Tra le specie più importanti possiamo ricordare *Gerbera Jamesonii*, *Gerbera ambigua* Cass., *Gerbera aurantica*, *Gerbera galpinii* Klatt. e *Gerbera viridifolia* Schultz-Bip.

Le varietà da fiore reciso derivano da ibridi tra *Gerbera Jamesonii* e *Gerbera viridifolia* mentre quelle da vaso vengono ibridate con specie a crescita ridotta in modo da ottenere una chioma compatta, steli fiorali corti e una fioritura precoce dopo la formazione di una decina di foglie. Le varietà da vaso vengono moltiplicate per seme o per coltura di tessuti e sono disponibili selezioni a fiori semplici (1-5 giri di ligule) semidoppi (5-10), doppi (10-20), col "cuore giallastro" o col "cuore scuro"

Tra le specie di gerbera comunemente più coltivate troviamo la *Gerbera jamesonii* e la *Gerbera viridifolia*; le caratteristiche che differenziano le due specie riguardano principalmente due aspetti: le foglie e le infiorescenze. In *G. jamesonii* le prime sono piuttosto coriacee con pagina superiore grigiastra a causa della presenza di peli corti e ruvidi, mentre in *G. viridifolia* sono glabre con colore verde chiaro. Per quanto concerne le infiorescenze bisogna dire come le due specie manifestino colori differenti. In *G. jamesonii* le ligule si presentano con una gamma di colori che va dallo scarlatto all'arancio, mentre in *G. viridifolia* i fiori ligulati sono bianchi e la pagina superiore o gialli in quella inferiore.

Ad oggi non si conoscono ibridi naturali di queste due specie di fiori anche se in letteratura si riportano casi di ibridazione naturale tra *G. discolor* Harvey, *G. plantaginea* e *G. viridifolia*. (Ferrante A., 1997). Attualmente la *G. discolor* e la *G. plantaginea* sono incluse rispettivamente nella *G. ambigua* e nella *G. viridifolia* (Ferrante A., 1997).

3.3. PROPAGAZIONE DELLA GERBERA

Le piante di gerbera possono essere propagate per seme, per moltiplicazione e, soprattutto, facendo ricorso alla micropropagazione.

Ad oggi la propagazione per seme è limitata solo per il miglioramento genetico delle piante e per la produzione di piante da aiuola in quanto le piantine ottenute mediante

questa metodologia sono molto eterogenee per il colore del capolino, la vigoria, la resistenza al freddo, l'attitudine produttiva ecc...e di conseguenza sono poco adatte per la coltivazione a scopo commerciale. La germinazione dei semi è ottenuta su substrato costituito per il 50% da torba e per il 50% da perlite, ad una temperatura di 20°C, condizione ottimale per una rapida ed uniforme germinazione. La germinazione si completa in un intervallo di 10-14 giorni e le piantine, nei primi stadi di crescita, devono essere trattate con anticrittogamici per la prevenzione contro *Botrytis*.

La propagazione per via vegetativa della gerbera avviene, sostanzialmente, in tre diversi metodi: divisione, talea, microtalea.

La divisione si esegue su piante adulte di almeno due anni, dalle quali, a seconda del grado di sviluppo, si possono ottenere da 2 a 10 piantine. Una volta che la pianta ha raggiunto la stasi vegetativa si fraziona il rizoma e le parti tagliate si cospargono di fungicida e si mettono in vaso. Tale sistema, comunque, non è molto utilizzato visto l'alto rischio fitopatologico dovuto alla diffusione della *Phytophthora cryptogea*.

Le talee, nella gerbera, derivano dall'apparato radicale avventizio (rizoma con un paio di foglie) a partire dal quale viene ricostruito completamente l'apparato radicale. Le giovani piantine sono pronte entro venti giorni dall'inizio della propagazione e mostrano una spiccata rassomiglianza con le piante madri. In un periodo non molto lungo è quindi possibile ottenere una popolazione di piantine aventi caratteristiche sufficientemente uniformi.

Un altro sistema di propagazione è rappresentato dalle micro talee, in cui le piante madri poste in riposo vegetativo e private di una buona parte dell'apparato radicale vengano poste in un substrato di torba per la forzatura (serra riscaldata con temperature comprese tra i 25-30°C e umidità relativa dell'80%). Il numero dei germogli per pianta madre si aggira intorno a 40-50 e una volta che questi hanno formato almeno un paio di foglioline sono separati e disposti su di un substrato per la radicazione.

I sistemi appena descritti per la propagazione della gerbera sono, in generale, poco utilizzati e stanno lasciando il posto a sistemi più efficienti come per esempio la micropropagazione. Quanto appena detto è da ricercare in un modesto tasso di moltiplicazione, ad un intervallo molto lungo per ottenere nuove piantine, una notevole suscettibilità alle malattie durante il periodo di radicazione (perdite stimate intorno al 5-10%) ed, infine, al fatto che nella gerbera l'attitudine alla clonazione è una caratteristica specifica variabile di pianta a pianta ed è legata alla conformazione del rizoma ed alla sua capacità di produrre germogli ascellari.

La micropropagazione è un sistema ormai diffuso tra i vivaisti e consiste nel prelevare espianti dall'apice vegetativo, porli in un appropriato mezzo per la rigenerazione ed ottenere nuove piantine. La propagazione in vitro ha il vantaggio di avere un elevatissimo tasso di moltiplicazione e di ottenere piantine di ottima qualità dal punto di vista fitosanitario. Oggi, la micropropagazione, oltre ad essere un mezzo per la moltiplicazione dei vegetali risulta essere anche un importante strumento che è utilizzato nel miglioramento genetico per l'ottenimento di nuove varietà sempre migliori.

3.4. TECNICHE DI COLTIVAZIONE DELLA GERBERA

La gerbera, nel nostro paese, può essere coltivata per ottenere una produzione invernale o primaverile, con la produzione invernale preferita a quella primaverile in quanto permette di ottenere un prodotto di qualità superiore.

La coltivazione invernale inizia a maggio-giugno con la messa a dimora delle piantine, le quali iniziano la produzione a settembre e vanno avanti fino a maggio dell'anno successivo. Generalmente sono previste l'esecuzione di un paio di defogliazioni e la messa a riposo dell'impianto nel periodo estivo. Il sesto d'impianto è di 8-10 p/m² ed è necessario mantenere la temperatura minima notturna dell'aria di 13-15 C e quella del substrato di 12 C (possibile blocco della produzione per l'entrata in dormienza della pianta). Nella coltivazione estiva la messa a dimora delle piantine di gerbera avviene a marzo per entrare in produzione in luglio-agosto e per terminare ai primi di novembre.

Le principali tappe evolutive nella tecnica colturale della gerbera sono rappresentate dall'introduzione della micropropagazione, del riscaldamento basale, della microirrigazione e dalla coltivazione fuori suolo (o coltivazione idroponica).

Per quanto riguarda la micropropagazione rimandiamo al paragrafo precedente; ripetiamo che si tratta di un sistema di propagazione vegetale che di lunga superiore a quelli tradizionali.

Il riscaldamento basale è una tecnica colturale che si è sviluppata per ridurre i costi di produzione attraverso il risparmio energetico; consiste nell'andare a collocare i tubi per il riscaldamento nel terreno ad una profondità di circa 40 cm, oppure all'interno dei bancali nel caso che venga utilizzata la tecnica di coltivazione fuori suolo. Tale sistema è davvero molto utilizzato nel caso della coltivazione della gerbera in quanto questa pianta, in condizioni di alte temperature a livello radicale, mantiene costante l'attività vegetativa ed

incrementa la produzione dei fiori (Ferrante A, 1997). Inoltre, grazie all'impiego del riscaldamento basale, si va a riscaldare una superficie minore rispetto ai sistemi tradizionali che interessano l'intera serra, con una convenienza economica maggiore.

L'introduzione della microirrigazione nelle coltivazioni della gerbera per la produzione di fiori recisi ha ridotto notevolmente l'incidenza della *Phitophthora cryptogea*; la distribuzione in maniera localizzata dell'acqua ad una certa distanza dal colletto della pianta stessa impedisce infatti la diffusione delle zoospore. Microirrigazione come mezzo di lotta indiretto della fitoftora (no acqua libera, mezzo di diffusione del patogeno). Inoltre, questa tecnica, migliora anche la qualità e la quantità della produzione della gerbera, in quanto consente una migliore distribuzione degli elementi nutritivi alla pianta nelle giuste dosi ed in funzione del reale fabbisogno della coltura.

Infine, la coltivazione su substrati artificiali, è stata l'ultima tappa nel campo dell'evoluzione della coltivazione della gerbera. Questa sistema consente un miglior controllo della fitoftora e nello stesso tempo incrementa la resa produttiva delle piante rispetto ai sistemi di coltivazione tradizionali (Goldsberry e Lang, 1987).

3.5. ESIGENZE DELLA GERBERA

La gerbera è una pianta che necessita un volume d'acqua annuo che si aggira intorno ai 300 m³; eccessi idrici sono però da considerarsi negativi in quanto possono favorire lo sviluppo e la proliferazione di numerose malattie crittogamiche. La temperatura ottimale di crescita è di 15-20 °C, mentre quella del terreno o del substrato è di 16-20 °C. Il riscaldamento del terreno mediante la tecnica del riscaldamento basale, accennata nel precedente paragrafo, aumenta l'efficienza dell'assorbimento radicale poiché stimola l'emissione di numerosi peli radicali. La temperatura basale non deve scendere eccessivamente altrimenti le piante ingialliscono, soprattutto se coltivate con irrigazione a flusso-riflusso o sub-irrigazione. La crescita vegetativa si arresta intorno agli 8-10 °C anche se la gerbera può sopportare molto bene temperature intorno allo zero, senza una manifestazione palese di danni da freddo.

La gerbera è una pianta poco sensibile al fotoperiodo ma molto all'irraggiamento totale. Le piante in coltura richiedono una posizione molto luminosa e sopportano una luminosità di 35-40000 lux; una forte intensità luminosa durante i mesi invernali consente una fioritura anticipata e abbondante. Inoltre, una forte intensità luminosa nelle fasi iniziali della coltivazione, unita a temperature moderate, favorisce la formazione di numerosi fiori

alla prima fioritura e la ramificazione del rizoma. Durante i mesi estivi è necessario ombreggiare la coltivazione per non ottenere piante non indurite con una fioritura di corretta qualità e più duratura. Alcune selezioni di gerbera sono sensibili al fotoperiodo e producono piante più compatte, più uniformi, con una fioritura più precoce e più abbondante se vengono tenute in condizioni di giorno corto (9-10 h a partire da sei settimane dopo l'invasatura).

Infine, le gerbere, sono piante mediamente sensibili alla salinità ma molto esigenti di nutrimento; sono molto sensibili alla carenza di ferro e richiedono un notevole apporto di potassio e di calcio. L'eccesso di azoto causa l'allungamento delle foglie e le rende sensibili alla Muffa grigia (*Botrytis cinerea*).

3.6. RISPOSTA DELLA GERBERA ALLA SALINITÀ

L'impiego dei sistemi idroponici a ciclo chiuso in orticoltura permette, come è stato già accennato nei paragrafi precedenti, una diminuzione delle emissioni di elementi fertilizzanti nell'ambiente, con un conseguente abbassamento dell'impatto ambientale, ed un uso efficiente e razionale dell'acqua di irrigazione (Graves, 1983; Van Os et al., 1991). Nel caso dei sistemi chiusi la qualità dell'acqua irrigua è un parametro molto importante, poiché se l'acqua stessa è di cattiva qualità (acqua salina) la gestione di tali sistemi diventa molto difficile. In Olanda, per esempio, l'acqua irrigua può contenere al suo interno quantità di NaCl (cloruro di sodio) superiori a 5 mM. Questo non impedisce di poter essere impiegata all'interno dei sistemi a ciclo chiuso coltivando piante resistenti o comunque tolleranti alla salinità, anche se il problema dell'accumulo di sali all'interno dell'impianto rimane. Importante, in questo caso, è capire se quanto detto potrebbe essere causa di effetti negativi sulla produzione e sulla qualità del prodotto finale, e, se così fosse, capire come e quando questi effetti avvengono. La salinità può inibire la crescita delle piante attraverso un abbassamento del potenziale osmotico esterno, inducendo in questo caso uno stress idrico, oppure attraverso uno sbilanciamento ionico e, infine, mediante l'accumulo di ioni tossici (Greenway e Munns, 1980). La presenza di alte concentrazioni di cloruro di sodio nella produzione di alcune specie vegetali coltivate in ambiente protetto e su fuori suolo può portare ad un incremento della conducibilità elettrica della soluzione nutritiva (Sonneveld e Van dee Burg, 1991), mettendo in evidenza come l'abbassamento del potenziale osmotico sia la causa principale per l'inibizione della crescita delle piante. Molte specie vegetali, comunque, si avvantaggiano di alti valori di conducibilità elettrica

della soluzione nutritiva; numerosi sono gli esempi in letteratura che mostrano come i frutti di alcune specie coltivate con acque saline hanno caratteristiche qualitative migliori rispetto a quelli cresciuti con acque di buona qualità. Al contrario, però, la produzione e la qualità dei fiori di piante quali la gerbera (De Kreij e Van Os, 1989) e la rosa (De Kreij e Van de Berg, 1990) risulta molto bassa ad alti valori della EC della soluzione nutritiva.

La gerbera è classificata come una specie moderatamente sensibile al variare dei livelli dell'Ec della soluzione nutritiva (Sonneveld, 1988; Sonneveld et al., 1999); la sensibilità di tale coltura alla salinità è collegabile in larga parte alle condizioni in cui viene valutata. Per esempio, il sistema in cui viene fatta crescere la pianta gioca un ruolo molto importante nella tolleranza della gerbera alla salinità. Infatti, per le gerbere cresciute su suolo, Sonneveld e Voogt (1983) hanno riscontrato dei decrementi della produzione dovuti alla presenza di sali nell'acqua di irrigazione (SYD, Salinity Yeld Decrease) rispettivamente del 12 e del 19% per dS m^{-1} della soluzione nutritiva per cv. Mandarine e cv. Fabiola, con valori della EC inferiori a $0,6 \text{ dS m}^{-1}$. Il SYD riscontrato per la cv. Beauty coltivata su lana di roccia come substrato aveva valori più bassi ($9,8\% \text{ dS m}^{-1}$) con valori della EC della soluzione nutritiva comunque molto più alti ($1,5 \text{ dS m}^{-1}$) rispetto agli esperimenti condotti coltivando la gerbera su suolo (Sonneveld, 1999). I risultati così raccolti hanno messo in evidenza come la gerbera coltivata su fuori suolo e sotto un alto regime di fertirrigazione mostra una minore sensibilità alla salinità (Sonneveld, 1988; Shillo, et al., 2002). In letteratura esistono alcuni articoli che trattano dell'argomento salinità collegato alla coltura gerbera. Possiamo citare il lavoro svolto da Paradiso (Paradiso et al., 2003), il cui obiettivo era valutare la crescita, le risposte fisiologiche e la produzione di due diverse cultivar di gerbera coltivate in fuori suolo, con un sistema aperto, e utilizzando due livelli di conducibilità elettrica della soluzione nutritiva dell'impianto. Un altro lavoro interessante è quello rappresentato da Baas (1995) e la sua equipe di ricercatori olandesi. In Olanda, la gerbera, rappresenta uno tra i principali fiori recisi coltivati in idroponica in ciclo chiuso. In questo paese, la floricoltura in serra che impiega i cicli chiusi è "obbligata" dallo stato a ricircolare per un determinato tempo le soluzioni nutritive prima di poterle scaricare liberamente nell'ambiente. Poiché l'accumulo di sali negli impianti a ciclo chiuso è cosa molto frequente, alcuni autori hanno studiato le conseguenze sulla produzione e la qualità della coltura in questione (Bass et al., 1995).

CAPITOLO 4

SCOPI DELLA TESI

4.1 INTRODUZIONE

L'elemento tecnico più importante di una coltura su substrato è l'alimentazione idrica e nutritiva della coltura effettuata normalmente attraverso la fertirrigazione. Per evitare errori, il sistema prevede anche l'uso di un substrato ad elevatissima capacità di drenaggio e, non di rado, l'erogazione in eccesso di soluzione nutritiva senza recupero dell'acqua di drenaggio (sistema aperto). Un sistema del genere è certo efficace, ma poco efficiente in quanto è causa di un elevato spreco di acque e di fertilizzanti come pure di un notevole impatto sull'ambiente circostante.

Un attento pilotaggio della fertirrigazione per quanto riguarda sia il regime idrico (volumi e frequenze delle irrigazioni) che quello nutrizionale (composizione ionica della soluzione nutritiva) è quindi di fondamentale importanza nei sistemi aperti ed anche in quelli chiusi, dove è comunque necessario ridurre i rischi di squilibri nutritivi e può risultare utile diminuire i volumi delle acque di drenaggio, per ridurre ad esempio i costi della disinfezione. Quanto detto appare particolarmente utile nel caso in cui sia disponibile soltanto acqua irrigua di scarsa qualità, in genere per un eccessivo contenuto salino.

Lo studio della relazioni tra le condizioni ambientali e la crescita, l'assorbimento idrico e nutritivo della coltura può consentire lo sviluppo di modelli matematici da implementare in software di gestione, anche relativamente semplici, o di simulazione, da utilizzare ad esempio in fase di pianificazione produttiva di un'azienda o addirittura di un comprensorio produttivo.

4.2 OBIETTIVI ED APPROCCIO SPERIMENTALE

Lo studio condotto per la tesi ha avuto come obiettivo principale la modellizzazione dei consumi di acqua e di elementi nutritivi di una coltura su substrato (lana di roccia di gerbera) a ciclo chiuso. La prova è stata condotta in due anni successivi, dalla primavera del 2004 fino alla fine del 2005. Le osservazioni, in realtà, sono state ristrette a tre diversi periodi, nell'autunno del 2004 e del 2005 e nella primavera del 2005. La prova prevedeva anche il confronto tra due concentrazioni di NaCl nell'acqua irrigua: 0 e 10 mM.

Lo studio ha, appunto, considerato due livelli di salinità e due stagioni di

coltivazione, sostanzialmente diversi dal punto di vista climatico, per verificare se tali fattori, il cui effetto era prevedibile, condizionavano la modellizzazione.

Oltre che per la sua relativa sensibilità allo stress salino, la gerbera è stata scelta per questo studio tenendo conto anche dalla sua importanza commerciale. Inoltre, c'era la possibilità di utilizzare i dati sperimentali raccolti, pur in una varietà diversa (cv. Maria), in una precedente prova sperimentale sulla gerbera coltivata in substrato (Ferrante, 1997). Di quella prova sono stati utilizzati i dati relativi al contenuto minerale sulla sostanza secca.

La struttura logica della modellizzazione, schematizzata nella figura 4.1, ha preso in esame una serie di processi a partire da tre fattori principali, quali il clima (radiazione globale, temperatura ed umidità dell'aria), la pianta ed il sistema colturale.

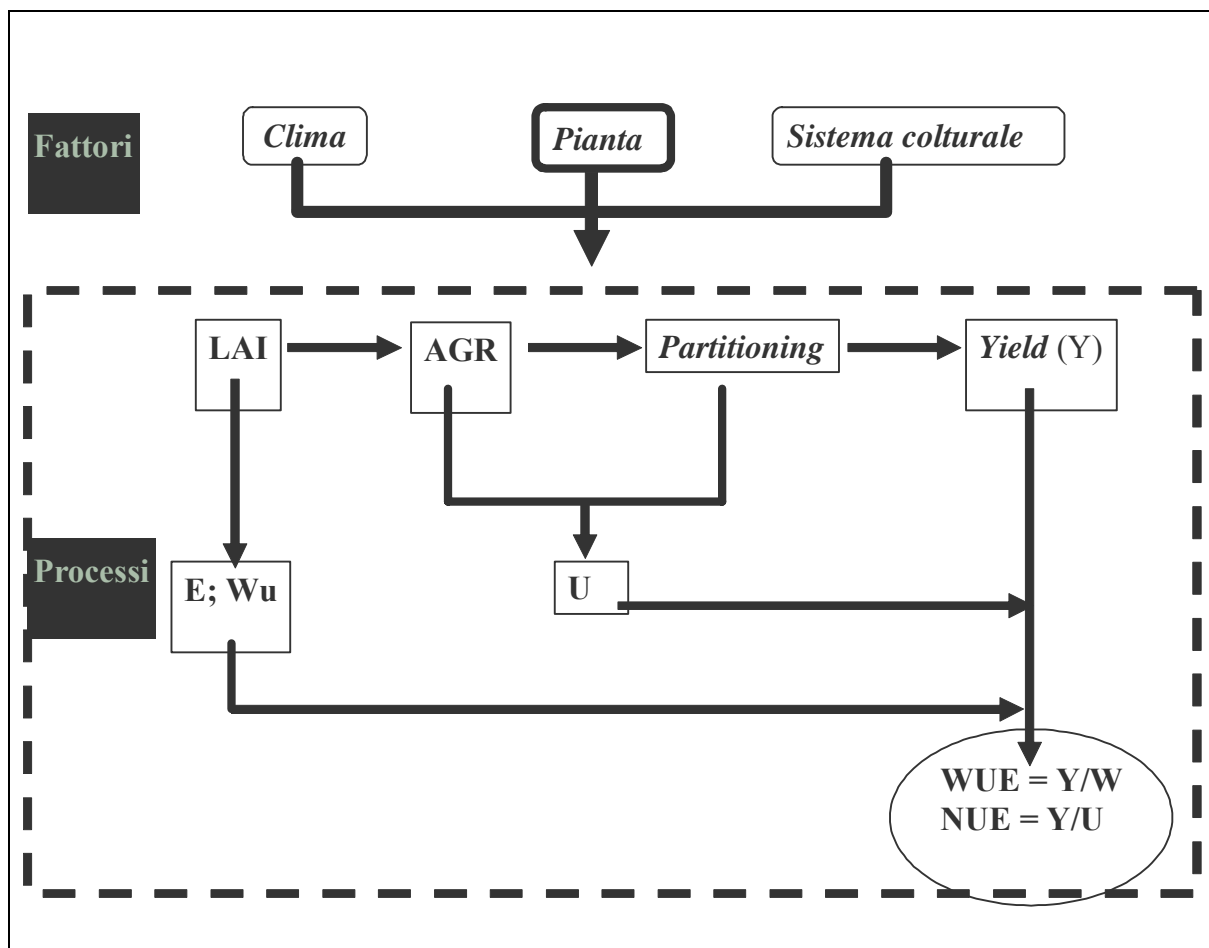


Figura 4.1: Struttura logica della modellizzazione.

Per l'assorbimento minerale sono stati considerati diversi tipi di modello, sia meccanicistico che empirico-statistico (modelli di regressione). Tra le variabili indipendenti sono stati considerati il tasso di crescita e di assorbimento idrico.

I consumi minerali sono stati determinati mediante un bilancio nutrizionale basato sulle analisi chimiche delle soluzioni nutritive e pertanto si riferiscono all'assorbimento minerale apparente, cioè al lordo delle eventuali perdite di elementi nutritivi provocate da fenomeni diversi dall'assorbimento radicale, ad es. precipitazioni di sali nel substrato, volatilizzazione dell'azoto sotto forma di ammoniaca o azoto gassoso, ecc. Per l'assorbimento idrico, invece, è stato calibrato e validato il modello di traspirazione (E) proposto da Baille et al. (1994), che è una semplificazione del modello fisico di Penman-Monteith e che è stato testato in numerose specie (cetriolo, Medrano et al., 2005; zuccino, Roupheal e Colla G., 2004; rosa, Kittas et al., 1999; Suay et al., 2003; pomodoro, Boulard e Jeema., 1993), compresa la gerbera, oggetto di uno studio di Marfà et al. (2000) simile a quello riportato in questa tesi.

Per la raccolta dei dati sperimentali della E oraria, con un approccio simile a quello utilizzato da Medrano et al. (2005), è stato impiegato un microlisimetro gravimetrico, cioè una bilancia elettronica che provvedeva a registrare la variazione di peso di alcune piante-campione; tale variazione è stata interpretata come risultato della perdita di acqua attraverso la traspirazione fogliare.

Per l'assorbimento nutritivo non è stata compiuta una vera e propria validazione, almeno per quanto riguarda i modelli di regressione. Invece, per E, la calibrazione del modello ha considerato una parte dei dati, mentre l'altra è stata usata per la validazione, seguendo una procedura classica per la modellizzazione delle colture agrarie. Recentemente questo metodo è stato messo in discussione poiché non sembra possa portare allo sviluppo di modelli "generici", in grado cioè di adattarsi ad un ampio range di condizioni di crescita delle colture (Sinclair e Seligman, 2000; Van Oijen, 2002).

CAPITOLO 5

MATERIALI E METODI

5.1 MATERIALE VEGETALE E NOTE COLTURALI

La coltura sperimentale di gerbera è stata realizzata presso il Dipartimento di Biologia delle Piante Agrarie dell'Università di Pisa. Le osservazioni sperimentali sono state effettuate in 3 diversi periodi, come indicato dalla Tabella 5.2 che riporta anche il numero di rilievi effettuati per ognuno dei parametri relativi all'assorbimento di acqua ed elementi minerali (macronutrienti e Na). La serra dove sono state condotte le prove aveva una superficie di circa 500 m², suddivisi in 4 comparti, con struttura in ferro e copertura fatta di materiale plastico costituito da lastre grecate di PVC biorientato; la coltura sperimentale di gerbera occupava solo uno dei comparti. L'apertura e la chiusura delle finestre sul tetto e laterali erano controllate da un computer; le finestre si aprivano quando la temperatura superava i 25 °C. La serra era inoltre provvista di impianto di aerotermini per il riscaldamento, che durante la prima parte della prova hanno mantenuto la temperatura minima dell'aria non inferiore ai 12° C. Durante il periodo estivo la serra è stata ombreggiata con una rete nera che consentiva una trasparenza del 50%.

Le piante di gerbera (*Gerbera jamesonii* H. Bolus, cv Vital) sono state trapiantate il 29/05/2004 su lastre di lana di roccia, con una densità di 5 piante/m². La tecnica colturale e la difesa fitosanitaria sono state quelle che generalmente si effettuano per la gerbera in coltura protetta. In particolare, una o due volte la settimana le piante venivano ripulite dalla foglie basali ormai ingiallite, senescenti oppure colpite da patogeni e parassiti. In autunno, questa procedura ha portato, in pratica, ad avere un indice di area fogliare (LAI) praticamente costante (v. avanti). Nel periodo invernale del 2005 la coltura, abbondantemente defogliata, è stata mandata in una sorta di riposo, abbassando la temperatura minima di coltivazione a 10°C circa e riducendo drasticamente la frequenza delle fertirrigazioni. La coltura è stata riavviata, quindi, a metà marzo del 2005. La coltivazione sperimentale si è conclusa alla fine di novembre del 2005.

La prova ha previsto il confronto tra due livelli di salinità dell'acqua di irrigazione:

- 0 mM NaCl (S0); in pratica, è stata utilizzata acqua piovana con una concentrazione di Na inferiore ad 1 mM, con un valore valore di EC della soluzione nutritiva finale di 1.45 mS/cm;

- 10 mM NaCl (S10), cioè, si è impiegata l'acqua fornita dal pozzo del Dipartimento (la composizione è riportata nella Tabella 5.1), con una concentrazione di Na intorno a 10 mM ed una EC della soluzione nutritiva di 2.45 mS/cm.

Per ogni tesi sono state predisposte 2 repliche, ciascuna costituita da un impianto idroponico indipendente contenente 48 piante, un serbatoio della soluzione nutritiva ricircolante di 80 L, un volume totale d'acqua in circolo di circa 150 L, compreso quella trattenuta dalle lastre di lana di roccia (circa 70 L).

L'acqua consumata dalle piante è stata sistematicamente reintegrata con soluzione nutritiva completa. Gli interventi irrigui sono stati programmati mediante un orologio, prevedendo un numero variabile (2-6) di irrigazioni in funzione della condizioni ambientali e del LAI. La frazione di drenaggio è stata mantenuta intorno al 60-70%.

Tabella 5.1. Composizione dell'acqua di pozzo utilizzata per la preparazione della soluzione nutritiva impiegata in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra.

Parametro	Valore
pH	6.8 – 7.2
EC (mS/cm a 25 °C)	1.3 – 1.5
Durezza totale (°F)	18 – 24
Calcio (mM)	1.5 - 2.0
Magnesio (mM)	0.75 - 0.80
Sodio (mM)	9.5 – 10.5
Potassio (mM)	0.05 – 0.08
Cloruri (mM)	9.5 – 10.5
Solfati (mM)	< 0.1
Nitrati (mM)	< 0.1
Ammonio (mM)	< 0.1

Mediamente, nelle due tesi, la concentrazione nominale nella soluzione nutritiva è stata la seguente (mM/L): N 8.53; P 1.03; K 4.35; Ca 3.18; Mg 1.05, più i microelementi (concentrazione di Hoagland).

Per la preparazione delle soluzioni sono stati impiegati acidi a gradazione tecnica (acido nitrico, fosforico e solforico) e sali per fertirrigazione, quali nitrato di ammonio, nitrato di calcio, nitrato di potassio, e solfato di magnesio.

In ogni impianto, le soluzioni ricircolanti venivano scaricate parzialmente (cioè, si rinnovava solo la soluzione contenuta nei serbatoi, che come detto costituiva poco più che

la metà del volume totale in circolo nel sistema) quando si raggiungevano valori di EC di 3.0 mS/cm (S0) oppure di 4.0 mS/cm (S10).



Impianto di gerbera coltivata fuori suolo in serra.

5.2 RILIEVI EFFETTUATI

I rilievi hanno interessato solo alcuni periodi dell'intera coltivazione, protratta per circa 18 mesi tra il 2004 ed il 2005. In particolare, i rilievi sono stati concentrati nel periodo estivo-autunnale (di seguito indicato, per comodità, "autunno") del 2004 e del 2005, e nella primavera del 2005.

La Tabella 5.2 riepiloga i periodi di osservazione considerati dalla studio, riportando anche la dimensione delle serie di dati, eventualmente suddivisi considerandone l'impiego per la calibrazione o la validazione dei vari modelli. Si fa notare che nel terzo periodo di osservazione, quello nell'autunno del 2005, sono state considerate solo le piante della tesi S0.

In ogni impianto, a cadenza settimanale, è stata registrata la produzione di fiori e più precisamente: il numero, il peso fresco e la percentuale di sostanza secca (sulla massa fresca) dei fiori commerciali e di quelli di scarto (perlopiù, malformati). Per il contenuto di sostanza secca dei fiori, su di un campione di 5 fiori commerciali è stato determinato prima

il peso fresco e, dopo l'essiccazione in stufa ventilata a 80°C, il peso secco.

Tabella 5.2. Riepilogo relativo ai dati sperimentali raccolti durante lo studio.

Stagione	Salinità (NaCl)	Periodo d'osservazione (n. settimana dell'anno)	Numero di osservazioni (n. di settimane o di giorni presi in esame)	
Assorbimento idrico e minerale su base settimanale				
Autunno 2004	0 mM	02/08/04 – 27/12/04	42 (21)	
	10 mM	(32-52)	42 (21)	
Primavera 2005	0 mM	04/04/05 – 27/06/05	22 (11)	
	10 mM	(14-24)	22 (11)	
Assorbimento idrico su base oraria e giornaliera				
			Calibrazione	Validazione
Autunno 2004	0 mM	22/09/04 – 09/01/05	528 (44)	528 (44)
	10 mM	(39-52)	510 (45)	487 (45)
Primavera 2005	0 mM	11/04/05 – 03/07/05	384 (44)	384 (44)
	10 mM	(15-25)	360 (30)	336 (30)
Autunno 2005	0 mM (LAI alto)	10/10/05 – 20/11/05		288 (13)
		(41 - 45)		

Sempre su base settimanale si è provveduto a determinare il peso secco delle foglie derivate dai periodici interventi di pulizia della coltura e dalla raccolta dei fiori. Per il calcolo del tasso settimanale di crescita (accumulo di sostanza secca) sono stati usati i) il valore della sostanza secca asportata con le defogliazioni e la raccolta dei fiori; ii) il valore derivante dall'analisi di crescita basata su rilievi distruttivi effettuati su base mensile su alcune piante dei vari replicati. Di fatto, il secondo valore è stato preso in considerazione solo nel caso delle prime 7 settimane del periodo primaverile del 2005.

Ogni giorno, durante tutto il periodo della prova, si provvedeva al rilievo del consumo idrico dei singoli bancali mediante l'uso di contaltri meccanici, periodicamente verificati per l'accuratezza della misura.

Durante la prova, 6 delle 48 piante di una replica della tesi S0 e S10 sono state collocate su di una bilancia elettronica collegata ad un datalogger, insieme ad un piranometro ed uno psicrometro ventilato; quest'ultimo misurava la temperatura e l'umidità relativa dell'aria. Il datalogger provvedeva a registrare ogni 10 minuti il valore medio delle letture effettuate ogni 10 secondi, quindi ogni valore rappresentava la media di 60 misure di peso, radiazione solare, temperatura dell'aria e deficit di pressione di vapore (VPD), che veniva calcolato automaticamente dal datalogger in base alle misure puntiformi

di temperatura ed umidità relativa. I dati sono poi stati elaborati come valori medi orari ed eventualmente giornalieri o settimanali. In fase di elaborazione dei dati, si è provveduto ad eliminare i disturbi nella misurazione del peso delle piante-campione sulla bilancia determinati dagli interventi irrigui regolati da un timer. La variazione in peso è stata interpretata come traspirazione delle piante. Poiché era disponibile solo una bilancia, questa è stata posta una settimana nella tesi S0 e in quella successiva nella tesi S10. La bilancia veniva calibrata ogni 7-14 giorni.



Particolare di piante di gerbera su bilancia elettronica (microlisimetro gravimetrico)

L'affidabilità delle misure di E effettuate con la bilancia elettronica è stata verificata attraverso il confronto tra il consumo idrico così stimato delle 6 piante-test e quello di tutte le 48 piante dell'impianto (quindi, comprendendo anche le piante-test), quest'ultimo misurato attraverso i contaltri ed entrambi espressi in mm/m^2 . Il confronto ha interessato circa 40 giorni nei due principali periodi d'osservazione. La Figura 5.1 indica la

corrispondenza tra queste due grandezze, pur risultando la prima leggermente inferiore alla seconda, come del resto previsto; infatti, la bilancia, misura E, mentre il contalitri il consumo idrico, comprensivo anche dell'acqua assorbita dalla pianta per la crescita.

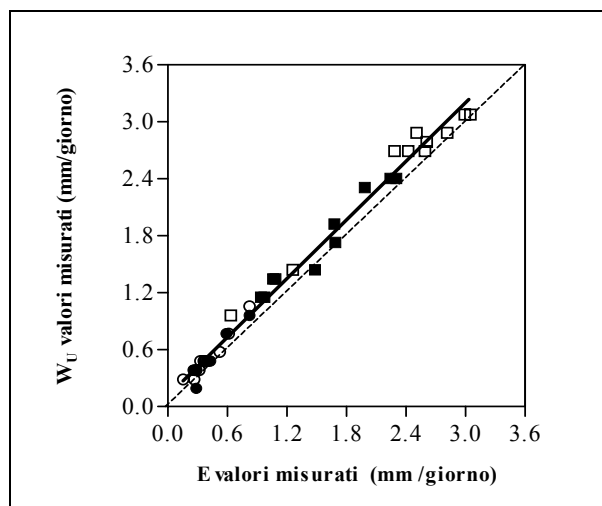


Figura 5.1. Confronto tra i valori di traspirazione fogliare misurata su piante-test di gerbera (in una coltura idroponica sperimentale), determinati con una bilancia elettronica, e quelli del consumo idrico dell'intero gruppo di piante (n = 48), comprendente le stesse piante-test e misurato con un contalitri che provvedeva a registrare i volumi di soluzione nutritiva aggiunta sistematicamente al cassone di recupero della soluzione nutritiva ricircolante in un sistema idroponica a ciclo chiuso. ○ = Autunno 0 mM, ● = Autunno 10 mM, □ = Primavera 0 mM, ■ = Primavera 10 mM. La linea tratteggiata rappresenta la relazione 1:1.

Sono state eseguite anche misure di conduttanza stomatica utilizzando un porometro del tipo *transit-time* e considerando solo la pagina inferiore della lamina fogliare.

Per seguire la variazione settimanale del LAI si è utilizzata una procedura non-distruttiva basata sulla misura della lunghezza (LU) e della larghezza (LA) massima delle singole foglie di una pianta; per la lunghezza, non veniva considerato il picciolo.

Il metodo è stato calibrato e validato in un lavoro parallelo che ha preso in esame 100 foglie, di varia grandezza, sulle quali, oltre ai suddetti parametri, è stata misurata con un planimetro digitale l'area (AREA). L'area è stata stimata in base alla seguente regressione lineare:

$$\text{AREA} = a + b X$$

Per la variabile indipendente X, sono state considerate diverse combinazioni di LU e di LA (NeSmith, 1992), come riportato nella Tabella 5.3. L'eq. 2 è risultata la migliore in termini di coefficiente di determinazione R^2 e dei parametri della regressione, cioè

mostrando valori della pendenza (b) e dell'intercetta (a) più vicini, rispettivamente, a 1 e 0.

Il modello derivato dall'eq. 2 è stato, inoltre, validato con dati indipendenti da quelli utilizzati per la sua calibrazione. I risultati della validazione, riportati in Figura 5.2, indicano l'affidabilità del metodo non-distruttivo utilizzato per la stima dell'area fogliare (quindi del LAI), pur con una leggera sottostima dei valori più elevati.

Tabella 5.3. Modelli per la stima della superficie fogliare con le equazioni di regressione lineare corrispondenti. SF = superficie fogliare (cm²); LU = lunghezza massima (cm); LA = larghezza massima (cm).

N.	Combinazioni di LU e LA	Equazione: AREA = a + b X	R ²
1	$X = LA \times LA \times 0.5$	$Y = -9.15 + 1.050 X$	0.90
2	$X = LU \times LA \times 0.5 - (LU + LA) \times 0.5$	$Y = -0.90 + 1.016 X$	0.91
3	$X = LA \times LA$	$Y = 21.59 + 0.774 X$	0.69
4	$X = LU \times LU$	$Y = 5.32 + 0.792 X$	0.78

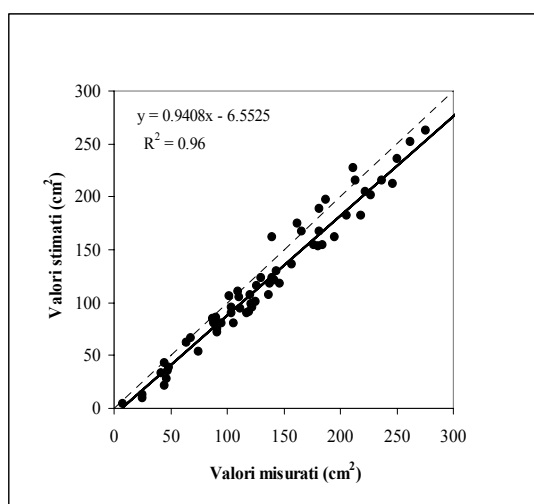


Figura 5.2. Confronto tra i valori di superficie fogliare stimati e quelli misurati. I valori rappresentano l'area di singole foglie di gerbera in diversi stadi di sviluppo stimata, prima, in base alle misure di lunghezza e larghezza massima e, quindi, misurata con un planimetro digitale (n = 100). La linea tratteggiata rappresenta la relazione 1:1.

I consumi nutritivi sono stati determinati, come già accennato, sulla base della variazione della concentrazione dei vari ioni nella soluzione ricircolante e della quantità e della composizione della soluzione nutritiva aggiunta ad ogni impianto idroponico delle due tesi a confronto, per compensare l'assorbimento idrico delle piante. I campioni delle soluzioni nutritive ricircolanti e della soluzione di reintegro venivano raccolti in diverse circostanze: 1) nel caso dei singoli impianti, prima e dopo ogni rinnovo della soluzione

nutritiva dei cassoni, avendo cura di uniformare la concentrazione nel sistema con abbondanti e ripetute irrigazioni in sequenza; 2) ogni volta che si verificava una variazione di EC nella soluzione ricircolante di almeno 1 mS/cm; 3) settimanalmente nel caso della soluzione di reintegro.

I campioni di soluzione nutritiva venivano subito filtrati e posti in frigorifero per non più di 2-3 settimane e quindi analizzati in laboratorio con le seguenti metodiche (v. Landi, 1992, per la descrizione dettagliata della procedura):

- nitrati: metodo dell'acido salicil-solfonico (colorimetrico);
- fosfati: metodo del molibdato di ammonio (colorimetrico);
- potassio e sodio: fotometria a fiamma;
- calcio e magnesio; titolazione con EDTA (volumetrico);

5.3 MODELLIZZAZIONE ED ANALISI STATISTICA

Come già accennato, per la modellizzazione si sono seguiti approcci diversi per quanto riguarda il tipo di modello e la procedura di calibrazione e validazione.

Per la validazione, è stata presa in considerazione l'analisi della regressione tra i valori misurati e quelli stimati dal modello stesso. A tal scopo è stato utilizzato il software IRENE (*Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates*) sviluppato dall'Istituto di Ricerca delle Colture Industriali (ISCI, Bologna, Italy; <http://www.isci.it/tools>). IRENE è in grado di valutare le prestazioni del modello sulla base delle differenze tra valori stimati (Y) e misurati (X) (Loague e Green, 1991); in pratica, IRENE è stato utilizzato per verificare la significatività della differenza tra 1 e la pendenza dell'equazione della regressione lineare ($Y = a + b X$), oppure tra 0 e l'intercetta della stessa. Queste due indicano una corrispondenza perfetta tra i valori; per un modello in grado di simulare perfettamente un fenomeno, evidentemente, i valori simulati sono esattamente uguali a quelli misurati e quindi $a = 0$ e $b = 1$.

I dati sono di seguito riportati come valore medio (eventualmente accompagnato dall'errore standard) di due replicati, oppure come singole osservazioni. Per comodità, i vari parametri sono stati identificati con delle abbreviazioni (Tabella 5.4).

Tabella 5.4. Unità di misura ed abbreviazioni utilizzate per le varie grandezze considerate dallo studio.

Grandezza	Unità di misura	Abbreviazione
Conducibilità elettrica	EC	mS/cm
Radiazione globale interna alla serra	MJ/m ²	RG
Temperatura dell'aria interna alla serra	°C	T
Deficit di pressione di vapore	KPa	VPD
Indice d'area fogliare	-	LAI
Tasso di crescita (fiori)	g/m ² /settimana	AGRf
Tasso di crescita (parti verdi)	g/m ² /settimana	AGRpv
Tasso di crescita totale	g/m ² /settimana	AGR tot
Assorbimento idrico	mm per settimana, giorno o ora	Wu
Traspirazione	mm per settimana, giorno o ora	E
Resistenza stomatica	sec/cm	r
Concentrazione d'assorbimento apparente N	meq/L	NCU
Concentrazione d'assorbimento apparente P	meq/L	PCU
Concentrazione d'assorbimento apparente K	meq/L	KCU
Concentrazione d'assorbimento apparente Ca	meq/L	CaCu
Concentrazione d'assorbimento apparente Mg	meq/L	MgCU
Concentrazione d'assorbimento apparente Na	meq/L	NaCU
Assorbimento apparente N	g/m ² /settimana	NU
Assorbimento apparente P	g/m ² /settimana	PU
Assorbimento apparente K	g/m ² /settimana	KU
Assorbimento apparente Ca	g/m ² /settimana	CaU
Assorbimento apparente Mg	g/m ² /settimana	MgU
Assorbimento apparente Na	g/m ² /settimana	NaU
Distribuzione N	g/m ² /settimana	NS
Distribuzione P	g/m ² /settimana	Ps
Distribuzione K	g/m ² /settimana	KS
Distribuzione Ca	g/m ² /settimana	CaS
Distribuzione Mg	g/m ² /settimana	MgS
Distribuzione Na	g/m ² /settimana	NaS
Conc. N media (settimanale) sol. ricircolante	mmoli/L (mM)	CN m
Conc. P media (settimanale) sol. ricircolante	mmoli/L (mM)	CP m
Conc. K media (settimanale) sol. ricircolante	mmoli/L (mM)	CK m
Conc. Ca media (settimanale) sol. ricircolante	mmoli/L (mM)	CCa m
Conc. Mg media (settimanale) sol. ricircolante	mmoli/L (mM)	CMg m
Conc. P media (settimanale) sol. ricircolante	mmoli/L (mM)	CNa m
Resistenza stomatica	sec/cm	rs

CAPITOLO 6

RISULTATI E DISCUSSIONE

6.1 EFFETTO DELLA STAGIONE DI COLTIVAZIONE E DELLA SALINITÀ DELL'ACQUA IRRIGUA

6.1.1 Parametri climatici

L'andamento settimanale della temperatura media giornaliera e della radiazione globale cumulata è riportato nella Figura 6.1. Come previsto, la stagione autunnale è stata caratterizzata, rispetto a quella primaverile, da valori inferiori sia della disponibilità di radiazione che di temperatura. Mediamente, la temperatura media e la radiazione sono state di 20.71°C e 23.02 MJ m² per settimana in autunno e di 21.88°C e 68.90 MJ/m² per settimana in primavera.

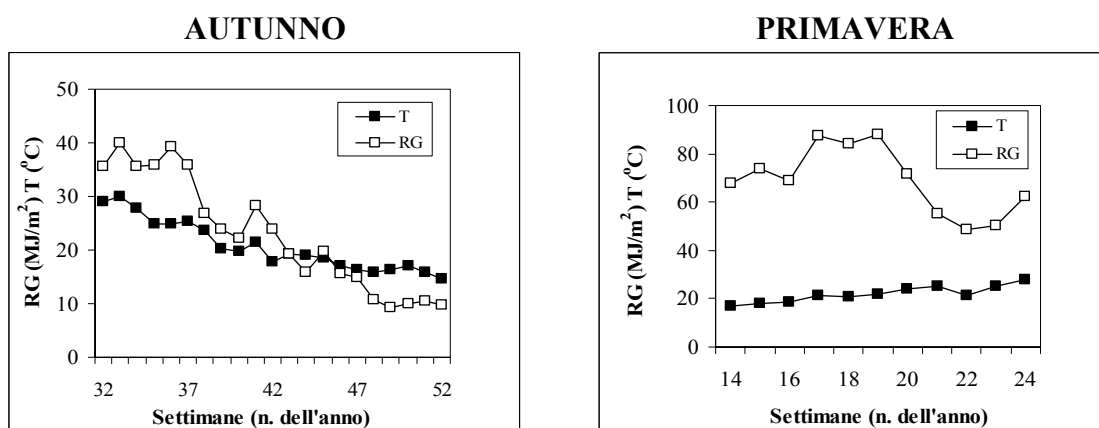


Figura 6.1. Variazione della radiazione globale (valore settimanale) e della temperatura dell'aria (media settimanale dei valori medi giornalieri) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. Le figure si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005.

6.1.2 Produzione di fiori

La produzione dei fiori è riportata nella Tabella 6.1 (valori cumulati) e nella Figura 6.2 (valori mensili). Si può osservare, come del resto era ipotizzabile, una maggiore produzione di fiori durante il periodo primaverile rispetto a quello autunnale e, un effetto negativo della salinità dell'acqua irrigua, almeno in primavera. Considerando l'andamento temporale, la produzione di fiori più elevata è stata riscontrata, sia in S0 sia in S10, nei mesi di maggio e giugno del 2005, con circa 40-43 fiori/m².

Tabella 6.1. Valore cumulato della produzione totale dei fiori e della sostanza secca prodotta in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. I dati si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi di 2 replicati (\pm SE).

	Autunno 2004 0 mM NaCl	Autunno 2004 10 mM NaCl	Primavera 2005 0 mM NaCl	Primavera 2005 10 mM NaCl
Numero fiori (m ²)	58.20 \pm 5.40	50.80 \pm 7.80	114.50 \pm 0.80	76.30 \pm 9.10
P. fresco fiori (g/m ²)	1732.10 \pm 111	1466.80 \pm 277.6	3745 \pm 47.70	2188 \pm 459.90
P. secco fiori (g/m ²)	228.30 \pm 15.10	200.70 \pm 39.70	502.30 \pm 12	311.50 \pm 51.50
P. secco p. verdi (g/m ²)	163.90 \pm 8.20	193.20 \pm 18.70	210.50 \pm 2.90	191.70 \pm 1.54
P. secco totale (g/m ²)	392.20 \pm 23.40	393.90 \pm 58.40	712.80 \pm 14.90	503.20 \pm 53.05
Cont. s.secca fiori (%)	13.20 \pm 0.03	13.60 \pm 0.12	13.40 \pm 0.15	14.40 \pm 0.67

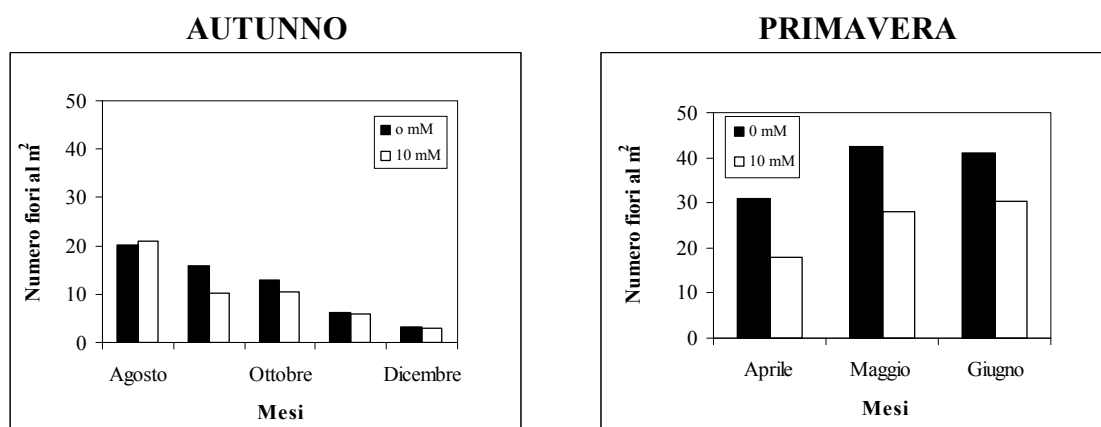


Figura 6.2. Variazione del numero di fiori prodotti in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra (valori mensili). Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. Le figure si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi di 2 replicati.

6.1.3 Sviluppo fogliare e crescita

Nei due periodi di osservazione, nell'autunno del 2004 e nella primavera del 2005, è stato eseguito, con il metodo non-distruttivo illustrato nel precedente paragrafo, l'andamento settimanale del LAI (Figura 6.3). Il LAI è stato determinato su 6 piante, le stesse poi impiegate per le misure di E con la bilancia elettronica. Mentre in autunno non si sono verificate differenze tra le varie tesi ed il valore del LAI è rimasto pressoché costante, in primavera il LAI è aumentato progressivamente, in particolar modo nella tesi S0. Sono stati effettuati anche dei rilievi distruttivi a cadenza praticamente mensile, che sono riportati nella Tabella 6.2. Questi rilievi hanno interessato delle piante campionate subito dopo la raccolta dei fiori (commerciali o di scarto) e la periodica defogliazione. I dati confermano quanto illustrato dalla Figura 6.3 per il LAI ed indicano una scarsa influenza della salinità sulla biomassa delle parti verdi vitali.

Come è evidenziato nella Figura 6.4 e nella Tabella 6.3, l'andamento del tasso di crescita delle piante, totale e ripartito tra parti verdi e fiori, è stato nettamente superiore in primavera rispetto all'autunno, quando è stata osservata anche una riduzione del rapporto AGRf/AGRtot (cioè, l'indice di raccolta) rispetto all'altra stagione (Figura 6.5).

Tabella 6.2. Analisi di crescita in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. I dati si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi, espressi per pianta, di 2 replicati (\pm SE).

Data rilievo	Salinità (NaCl)	N. foglie	Peso fresco (g)	Peso secco (g)	LAI
Estate – Autunno (Agosto – Dicembre 2004)					
26/10/2004	0 mM	12.75 \pm 0.25	109.50 \pm 2.80	14.15 \pm 1.72	1.04 \pm 0.40
	10 mM	13.75 \pm 0.25	103.60 \pm 2.10	15.35 \pm 0.73	1.20 \pm 0.09
23/12/2004	0 mM	15.75 \pm 3.75	83.00 \pm 5.80	15.00 \pm 0.14	1.10 \pm 0.04
	10 mM	14.00 \pm 2.00	74.70 \pm 5.40	14.37 \pm 0.83	1.04 \pm 0.08
Primavera (Aprile – Giugno 2005)					
18/04/2005	0 mM	20.50 \pm 2.50	111.20 \pm 7.40	18.95 \pm 0.90	1.22 \pm 0.11
	10 mM	18.00 \pm 2.00	90.25 \pm 0.25	14.50 \pm 1.50	1.17 \pm 0.09
24/05/2005	0 mM	27.00 \pm 3.00	162.30 \pm 36.03	33.65 \pm 4.40	2.15 \pm 0.07
	10 mM	24.50 \pm 1.50	158.00 \pm 10.00	31.80 \pm 5.50	1.39 \pm 0.30
22/06/2005	0 mM	26.50 \pm 0.50	164.30 \pm 5.00	31.50 \pm 1.00	2.31 \pm 0.06
	10 mM	21.50 \pm 0.60	144.00 \pm 4.00	30.40 \pm 4.10	1.39 \pm 0.02

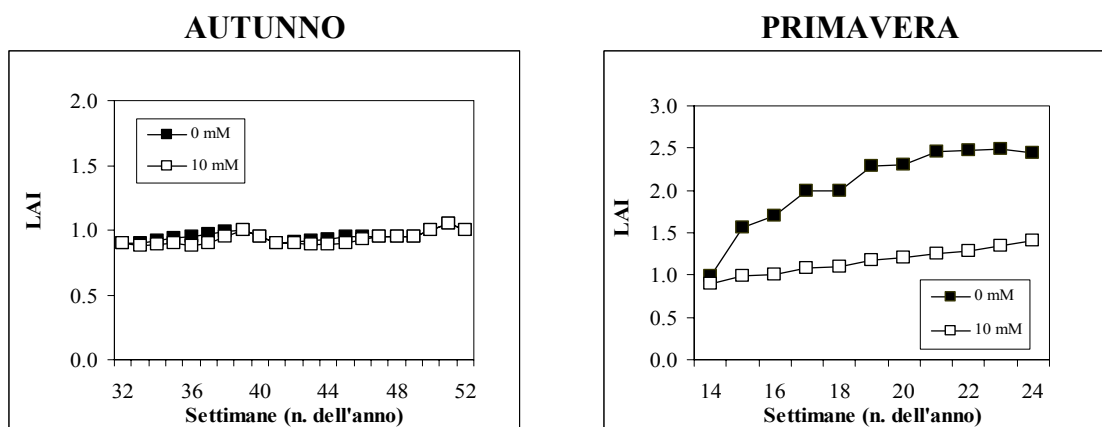


Figura 6.3. Variazione del LAI (indice di area fogliare) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. Le figure si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi di 6 replicati.

Tabella 6.3. Valori medi del tasso di crescita (AGR), totale e riportato per i vari organi (fiori o foglie), in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. I dati si riferiscono a due periodi di osservazione. I dati sono i valori medi di 2 replicati (\pm SE).

	Autunno 2004	Autunno 2004	Primavera 2005	Primavera 2005
	0 mM NaCl	10 mM NaCl	0 mM NaCl	10 mM NaCl
	$\text{g/m}^2 \cdot \text{settimana}$			
		21		11
AGR fiori	12.0 ± 8.6	10.8 ± 9.4	43.0 ± 11.1	26.3 ± 6.1
AGR parti verdi	5.4 ± 3.5	6.0 ± 2.6	6.6 ± 4.1	5.0 ± 3.5
AGR totale	17.5 ± 11.3	16.4 ± 11.0	49.5 ± 10.9	31.3 ± 7.4
AGR fiori / AGR totale	0.68	0.66	0.87	0.84

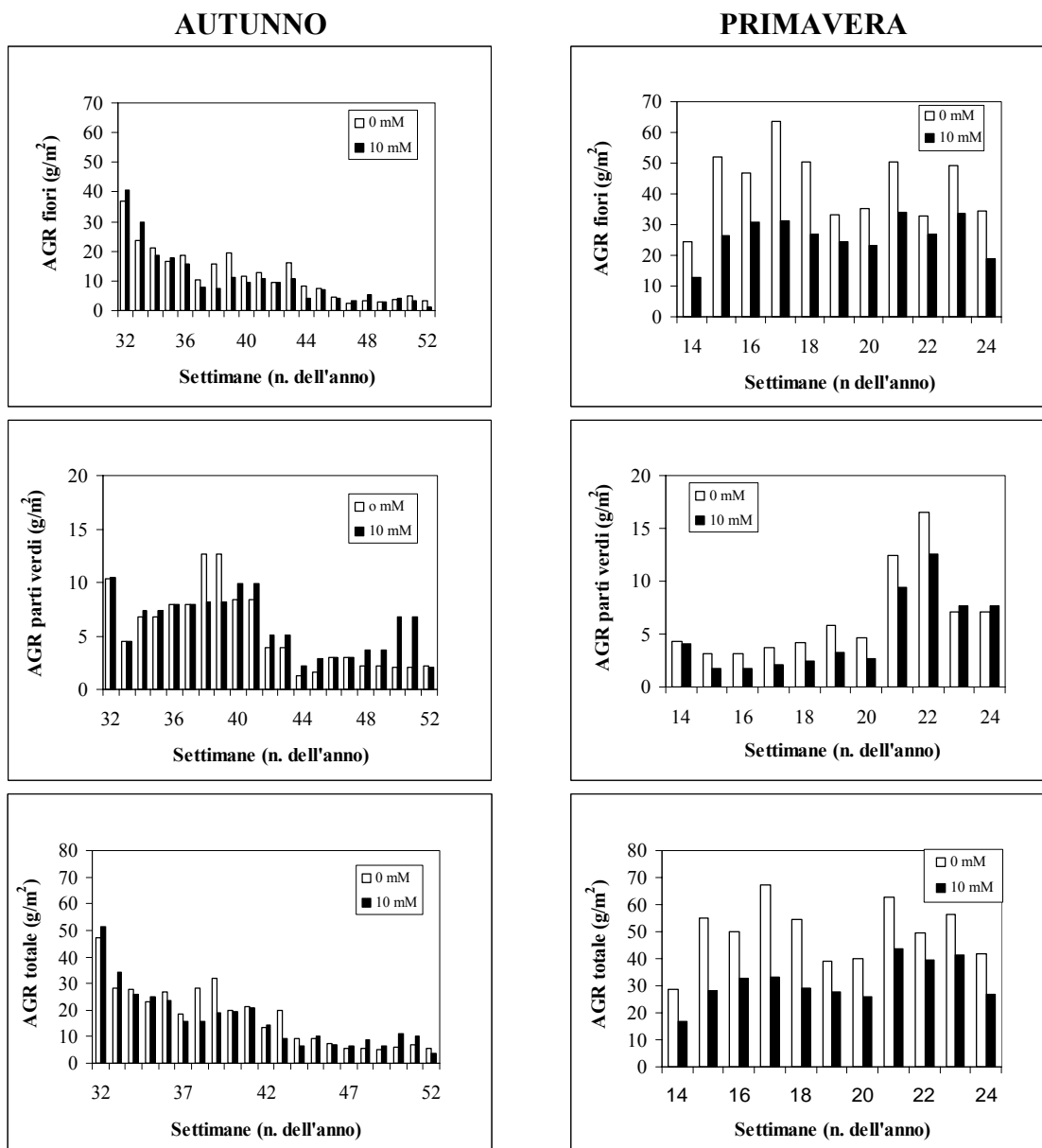


Figura 6.4. Variazione del tasso di crescita (valore settimanale), totale e riportato per i vari organi (fiori o foglie), in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. Le figure si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi di 2 replicati.

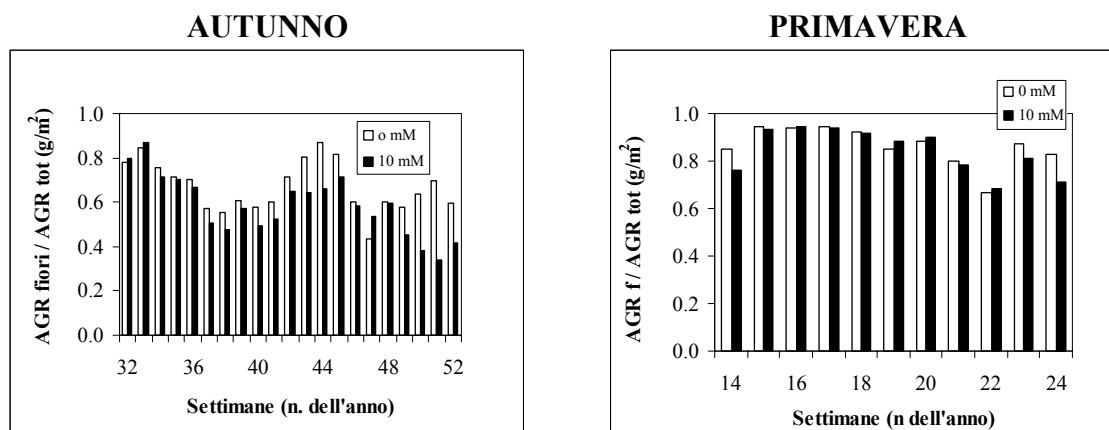


Figura 6.5. Variazione del rapporto (valore settimanale), tra il tasso di crescita dei fiori e quello totale in una coltura in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. Le figure si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi di 2 replicati.

6.1.4 Assorbimento idrico e traspirazione

Il consumo idrico della coltura è risultato variabile durante il periodo in cui si è effettuata la prova in funzione delle condizioni climatiche (Figura 6.6; Tabella 6.4). I valori dell'assorbimento idrico (espressi su base settimanale) sono risultati maggiori nel periodo primaverile rispetto a quello autunnale. La salinità ha influenzato il consumo idrico soltanto nella stagione primaverile, verosimilmente attraverso la riduzione del LAI.

Per buona parte dei due periodi considerati per i rilievi sperimentali, la E delle piante è stata stimata utilizzando una bilancia elettronica. In questo caso, diversamente rispetto a quanto misurato con i contaltri, le misure rappresentavano la E propriamente detta, stimata appunto attraverso la registrazione della variazione in peso di alcune (6) piante-test.

I rilievi sono stati effettuati tra la settimana 39 e 52, nel 2004, e tra la settimana 14 e 24 nel 2005. Per questi periodi, i valori di radiazione globale e della temperatura dell'aria sono riportati nella Figura 6.1, mentre quelli del LAI e del consumo idrico sono illustrati, rispettivamente, nella Figura 6.3 e 6.6. La bilancia ha consentito di determinare la ripartizione del consumo idrico nelle 24 ore tra quello nelle ore diurne o notturne. Nel periodo autunnale, la E cumulata nelle 12-14 ore notturne ha rappresentato il 20-30% del valore registrato nell'intera giornata, mentre in primavera, con periodi bui ben più brevi,

l'incidenza della E notturna è stata assai più bassa, intorno al 5%.

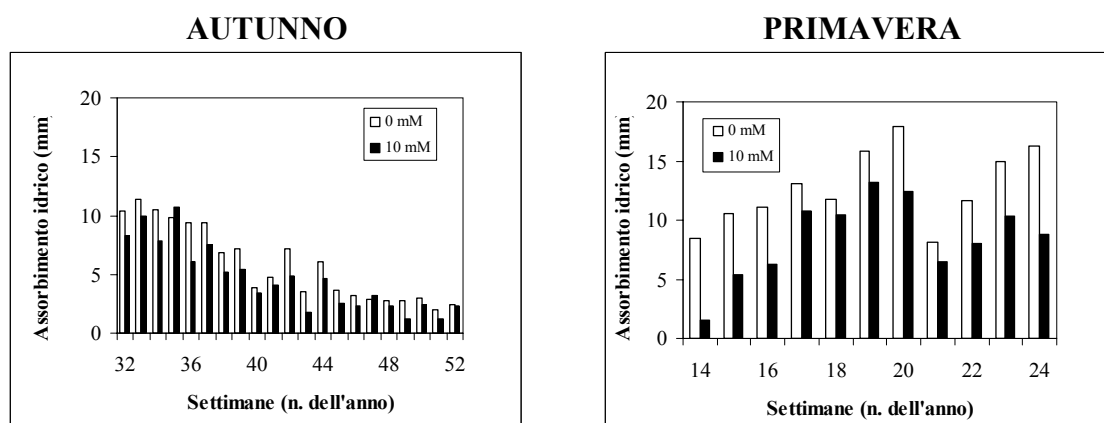


Figura 6.6. Variazione dell'assorbimento idrico (valori settimanali) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. Le figure si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi di 2 replicati.

Tabella 6.4. Valore cumulato dell'assorbimento idrico e efficienza di uso dell'acqua (WUE) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. I dati si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi di 2 replicati (\pm SE).

Autunno 2004	Autunno 2004	Primavera 2005	Primavera 2005
0 mM NaCl	10 mM NaCl	0 mM NaCl	10 mM NaCl
Assorbimento idrico (mm)			
133.40 \pm 0.70	108 \pm 1.97	179.80 \pm 8.60	116.60 \pm 2.60
WUE (fiori/mm)			
0.44	0.47	0.64	0.65

La Figura 6.7 riporta l'andamento orario tipico di una giornata autunnale oppure primaverile, nelle tesi S0 e S10.

Utilizzando un porometro, inoltre, è stata misurata, in entrambe le stagioni ed in diversi momenti della giornata, la resistenza stomatica (r_s). Non sono state rilevate differenze importanti né tra le stagioni, né tra le due tesi differenziate per il livello di salinità (Figura 6.8). I dati di r sono stati analizzati in funzione dell'intensità luminosa

determinata al momento delle misure con il porometro. La relazione, non-lineare, tra le due grandezze è mostrata nella Figura 6.9. La relazione è altamente significativa, ma nuovamente mostra come la salinità dell'acqua irrigua non abbia condizionato il comportamento degli stomi delle piante di gerbera.

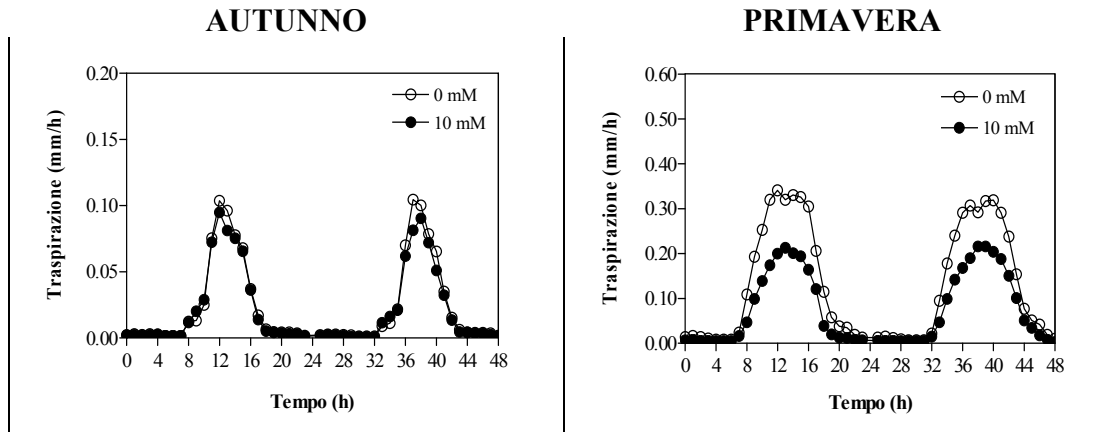


Figura 6.7. Andamento tipico della traspirazione oraria, determinata con una bilancia elettronica su piante-test, in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. I dati si riferiscono a due giorni nei due periodi di osservazione: 3 e 4 novembre 2004 per 0 mM NaCl; 30 ottobre e 1 novembre per 10 mM NaCl; 2 e 3 giugno 2005 per 0 mM NaCl; 28 e 29 maggio per 10 mM. La radiazione media nei vari giorni era la seguente: 3.77 MJ/m² – 3 novembre; 3.87 MJ/m² – 4 novembre; 3.71 MJ/m² – 30 ottobre; 3.25 MJ/m² – 1 novembre; 8.75 MJ/m² – 2 giugno; 9.05 MJ/m² – 3 giugno; 8.51 MJ/m² – 28 maggio; 9.04 MJ/m² – 29 maggio.

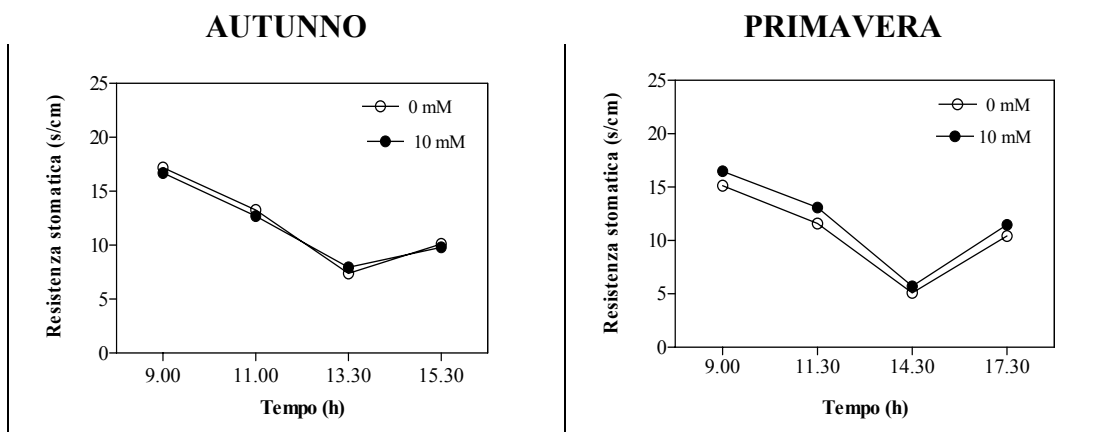


Figura 6.8. Andamento della resistenza stomatica in una giornata tipica in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. I dati sono i valori medi, espressi per singola pianta, di 6-10 misure su foglie di piante diverse.

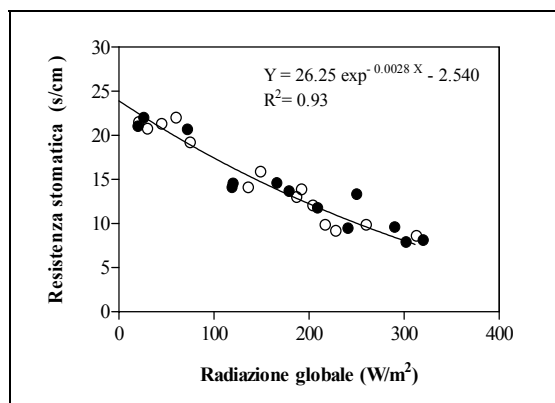


Figura 6.9. Relazione tra resistenza stomatica e radiazione solare in una giornata tipica in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra realizzata nell'autunno del 2005. Le piante sono state allevate utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. I dati sono i valori medi, espressi per singola pianta, di 6-10 misure su foglie di piante diverse nelle due tesi a confronto. Le misure sono state effettuate in orari, iniziando intorno alle ore 9.00 fino alle 17.00.

6.1.5 Concentrazioni ioniche delle soluzioni nutritive

Nella Tabella 6.5, sono riportati i valori della EC e delle concentrazioni dei vari elementi minerali nelle soluzioni nutritive impiegate per la prova. Per le due diverse tesi, i valori nominali delle soluzioni di reintegro sono stati leggermente diversi tra di loro, a causa di un bilanciamento ionico dovuto alla presenza di una diversa concentrazione di Na nelle due acque irrigue impiegate per la prova. I valori nominali, inoltre, differivano lievemente rispetto a quelli effettivamente presenti nelle soluzioni di reintegro, determinati mediante analisi di laboratorio di campioni raccolti durante l'intero periodo della prova (v. Materiali e metodi). Poiché nel sistema sperimentale adottato le concentrazioni dei vari ioni oscillavano, sono state anche riportate le medie dei valori minimi e massimi rilevati, nonché quelle dei valori medi, quest'ultimi calcolati su base settimanale.

6.1.6 Assorbimento minerale

In due dei tre periodi di osservazione della prova, nell'autunno del 2004 e nella primavera del 2005, sono stati prelevati campioni di soluzione nutritiva analizzati poi in laboratorio in un secondo momento (per ulteriori delucidazioni fare riferimento al capitolo 4). Attraverso un bilancio nutrizionale basato sulle analisi chimiche dei campioni delle nutritive ricircolanti raccolti nei vari impianti sperimentali (v. Materiali e metodi) sono

stati determinati i consumi minerali della coltura espressi su base settimanale; pertanto, non avendo analizzato i tessuti vegetali, i dati si riferiscono al cosiddetto assorbimento minerale *apparente*, cioè al lordo delle eventuali perdite di elementi nutritivi provocate da fenomeni diversi dall'assorbimento radicale, ad esempio precipitazioni chimiche nel substrato (verosimili e probabili per P e Ca) o per volatilizzazione (verosimile ma poco probabile per l'N, richiedendo questo fenomeno un ambiente assai asfittico, condizione difficilmente pensabile per gli esperimenti della tesi).

Tabella 6.5. Conducibilità elettrica (EC) e concentrazione dei vari elementi minerali nelle soluzioni nutritive impiegate in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. Sono riportati i valori nominali e quelli effettivamente rilevati nelle soluzioni nutritive di reintegro, cioè quelle impiegate per compensare l'assorbimento idrico delle piante. Poiché nel sistema sperimentale adottato, le concentrazioni dei vari ioni oscillavano, sono riportate anche le medie dei valori minimi e massimi rilevati, nonché quelle dei valori medi (media aritmetica tra minimo e massimo), questi ultimi calcolati su base settimanale nei vari impianti. I valori sono separati per periodo di osservazione e per tesi a confronto. I dati sono i valori medi di 2 replicati.

Valore	Salinità (NaCl)	Stagione	EC (mS/cm)	N (mM)	P (mM)	K (mM)	Ca (mM)	Mg (mM)	Na (mM)
Nominale	0 mM	-	1.45	8.70	1.06	4.40	3.05	1.00	0
Nominale	10 mM	-	2.45	8.35	1.00	4.30	3.30	1.10	10
Effettivo	0 mM	Autunno	1.62	9.18	0.95	4.63	3.81	1.52	0.94
		Primavera	1.38	7.50	0.95	3.95	2.89	1.10	0.64
Effettivo	10 mM	Autunno	2.52	7.63	1.10	4.12	3.01	1.27	9.00
		Primavera	2.42	7.58	0.93	4.32	3.25	1.30	9.14
Minimo	0 mM	Autunno	2.32	13.58	0.92	5.56	5.63	2.76	2.29
		Primavera	2.26	10.30	1.07	3.92	4.71	1.82	1.06
Minimo	10 mM	Autunno	3.27	10.02	0.74	4.92	3.89	1.83	13.43
		Primavera	3.28	9.00	0.90	4.87	4.08	1.60	14.51
Massimo	0 mM	Autunno	3.30	15.89	0.96	5.92	7.37	3.27	3.20
		Primavera	2.99	11.50	1.10	4.45	6.89	2.85	2.07
Massimo	10 mM	Autunno	3.96	10.59	0.75	5.29	4.40	2.05	16.82
		Primavera	4.08	10.02	0.91	5.01	5.01	2.11	19.23
Medio	0 mM	Autunno	2.81	14.73	0.94	5.74	6.50	3.01	2.75
		Primavera	2.62	10.90	1.07	4.18	5.80	2.34	1.56
Medio	10 mM	Autunno	3.61	10.31	0.72	5.10	4.15	1.94	15.13
		Primavera	3.68	9.51	0.91	4.94	4.55	1.85	16.87

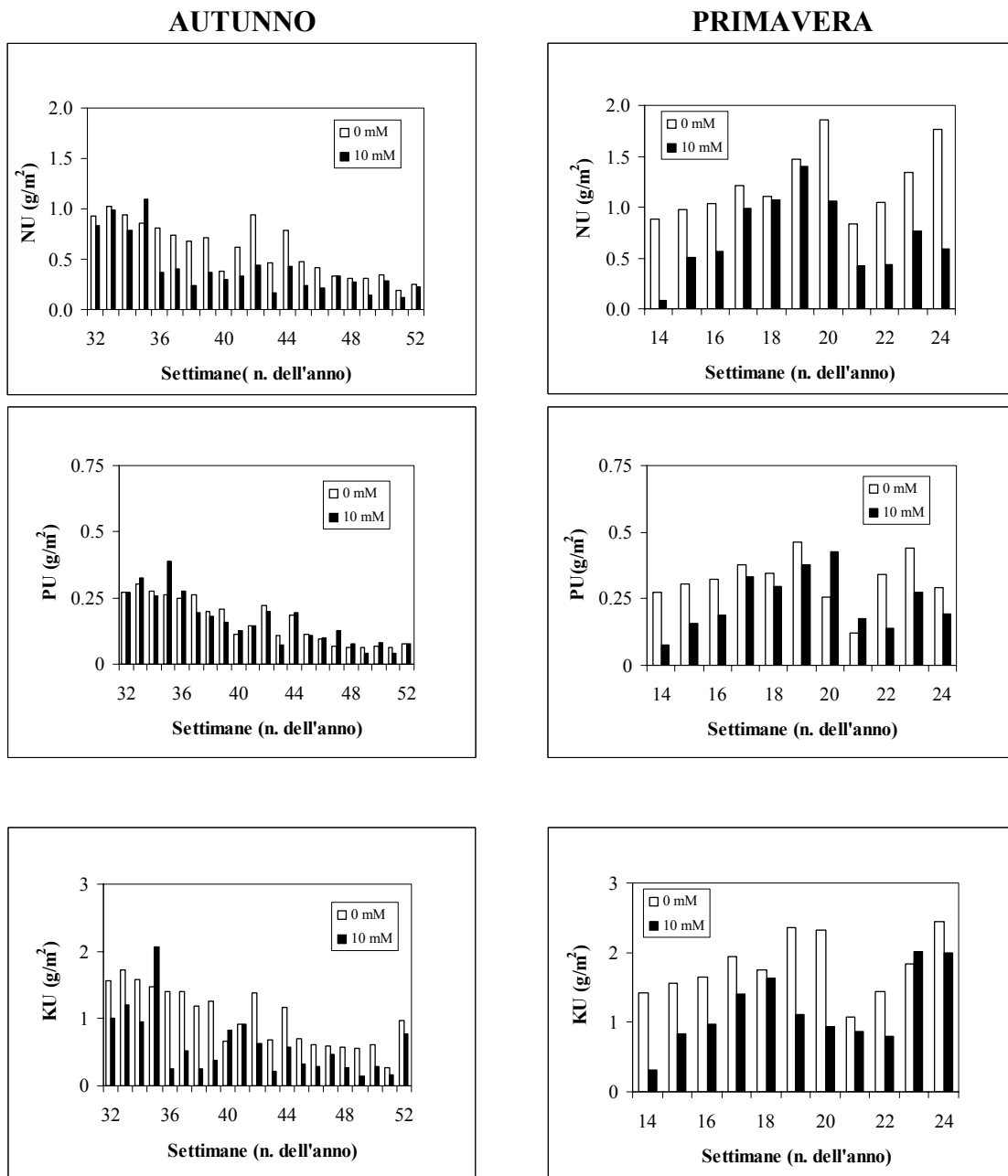


Figura 6.10. Variazione del tasso di assorbimento di N, P e K (espressi su base settimanale) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra (valori mensili). Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. Le figure si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi di 2 replicati.

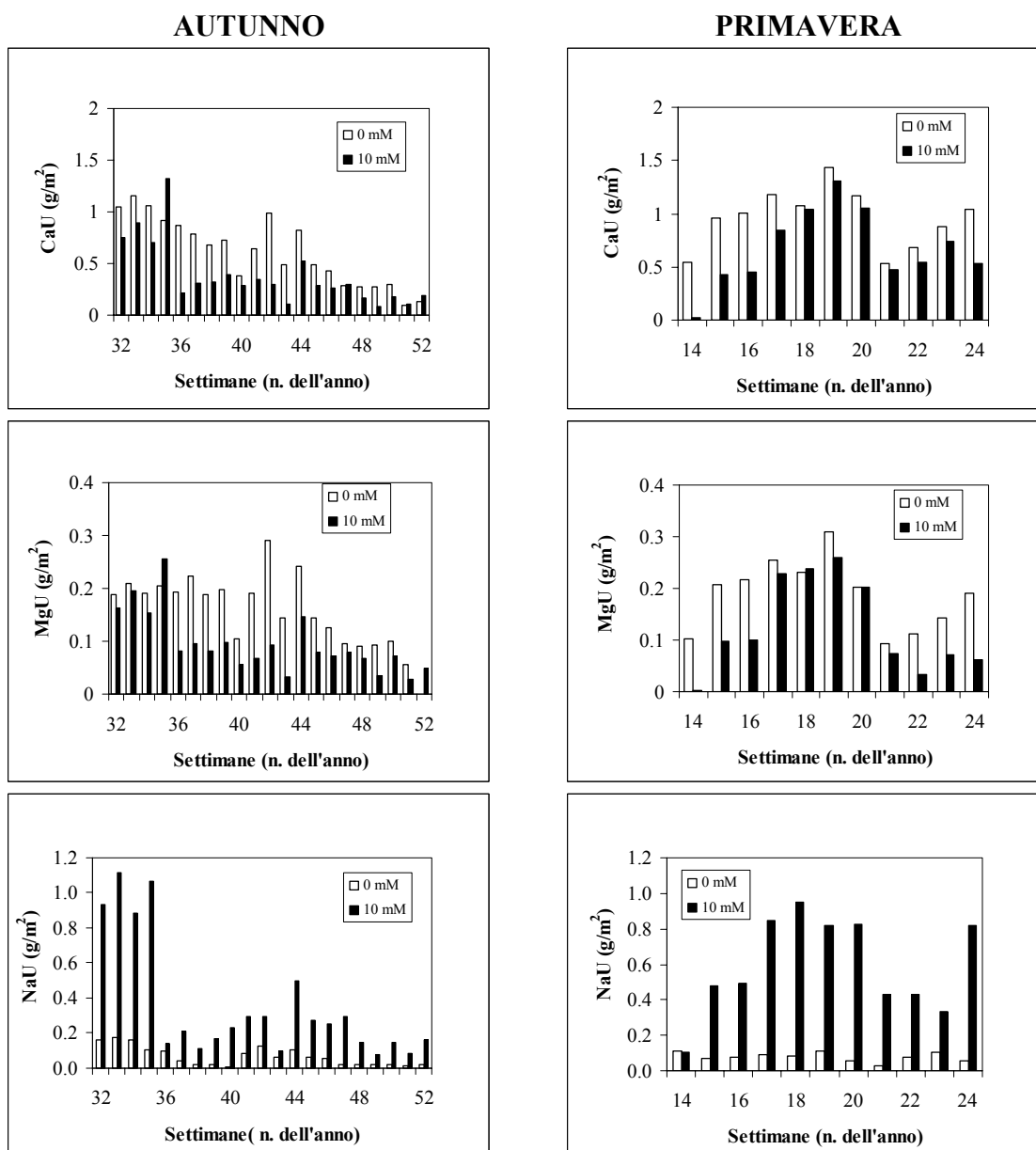


Figura 6.11. Variazione del tasso di assorbimento di Ca, Mg e Na (espressi su base settimanale) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. Le figure si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi di 2 replicati.

Nelle Figure 6.10 e 6.11 sono riportate le variazioni del tasso di assorbimento dei diversi nutrienti (N, P, K, Ca, Mg e Na), mentre nelle Tabelle 6.6 e 6.7 sono riportati, rispettivamente, i valori degli assorbimenti medi (calcolati su base settimanale) e cumulati dei diversi elementi nutritivi considerati.

Dai dati raccolti emerge come l'assorbimento minerale sia stato più elevato durante i mesi primaverili, quando le piante hanno fatto registrare il più alto tasso di produzione di

fiori (Figura 6.2) e di assorbimento idrico (Figura 6.6). Inoltre, dobbiamo aggiungere come la salinità abbia influito negativamente sul tasso di assorbimento minerale. Per entrambi i periodi della prova, infatti, nella tesi S10 sono stati osservati valori quasi sempre più bassi rispetto alla tesi S0.

Tabella 6.6. Valori medi del tasso di assorbimento minerale (espresso su base settimanale) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. Le figure si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi di 2 replicati.

Nutrienti	Autunno	Autunno	Primavera	Primavera
	0 mM NaCl	10 mM NaCl	0 mM NaCl	10 mM NaCl
	(g/m ² · settimana)			
N	0.60	0.41	1.23	0.72
P	0.16	0.16	0.32	0.20
K	1.00	0.60	1.80	1.17
Ca	0.61	0.38	0.95	0.68
Mg	0.16	0.10	0.19	0.12
Na	0.07	0.36	0.08	0.59

Tabella 6.7. Valore cumulato dell'assorbimento minerale in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. Le figure si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. I dati sono i valori medi di 2 replicati.

Nutrienti	Autunno 2004	Autunno 2004	Primavera 2005	Primavera 2005
	0 mM NaCl	10 mM NaCl	0 mM NaCl	10 mM NaCl
	(g/m ²)			
N	12.50	8.60	13.52	7.88
P	3.41	3.43	3.54	2.64
K	21.27	12.56	19.83	12.87
Ca	12.96	8.04	10.50	7.43
Mg	3.35	2.06	2.00	1.36
Na	1.40	7.48	0.87	6.53

Gli elementi asportati in maggiore quantità dalle piante di gerbera sono stati l'azoto, il potassio e il calcio (Tabelle 6.6 e 6.7). Ridotto è stato l'assorbimento di Na,

come previsto, in considerazione della natura glicofitica della gerbera. L'assorbimento pur piccolo ma significativo di Na anche nella tesi S0 è, evidentemente, spiegato dalla concentrazione non trascurabile, per quanto inferiore a 0.5 mM, di questo ione nell'acqua irrigua.

6.2 MODELLIZZAZIONE

6.2.1 Analisi della correlazione

Nella Tabella 6.8, è riportata l'analisi dei coefficienti di correlazione (r) tra le diverse variabili considerate dallo studio. Si può notare le diverse relazioni tra i parametri biologici (consumo idrico, tasso di crescita e tasso di assorbimento minerale) e i parametri climatici (radiazione globale e temperatura) e come tali parametri siano tra di loro correlati in modo significativo. Inoltre, è stata analizzata, per ogni ione, la relazione tra il tasso di assorbimento minerale e le quantità somministrate oppure le concentrazioni medie dei vari ioni nella soluzione ricircolante (entrambe espresse su base settimanale). Per il Na, sono stati considerati solo i dati relativi alla tesi S10. Nella Tabella 6.8, inoltre, devono essere messi in evidenza i valori di r particolarmente elevati per le seguenti interrelazioni:

- Wu vs RG e LAI
- AGR e AGRf vs RG e Wu
- i tassi di assorbimento minerale vs Wu e AGR, e tra di loro

Degna di nota anche l'assenza di correlazione tra AGRpv e praticamente tutte le altre variabili.

E' stata considerata anche la relazione tra l'assorbimento dei vari elementi e il loro rifornimento, calcolato sempre su base settimanale in base a Wu e la concentrazione della soluzione nutritiva di reintegro (v. Tabella 6.5). I valori sono risultati assai elevati nel caso dei macronutrienti, al contrario di quanto è avvenuto per il Na, il cui assorbimento è apparso non legato alla concentrazione media nel periodo considerato.

Tabella 6.8. Analisi della correlazione tra le diverse variabili considerate dallo studio (v. Tabella 5.4 per le abbreviazioni). Sono stati sottolineati i coefficienti di correlazione non significativi almeno per $p < 0.05$.

n= 128												
n=64 (Na)	T	RG	Wu	LAI	AGRf	AGRpv	AGRtot	NU	PU	KU	CaU	MgU
T	-											
RG	0.35	-										
Wu	0.63	0.74	-									
LAI	<u>0.20</u>	0.55	0.65	-								
AGRf	0.46	0.76	0.72	0.67	-							
AGRpv	0.47	<u>0.01</u>	<u>0.20</u>	<u>0.02</u>	0.24	-						
AGRtot	0.53	0.70	0.71	0.67	0.97	0.44	-					
NU	0.52	0.66	0.93	0.62	0.64	<u>0.10</u>	0.61	-				
PU	0.55	0.67	0.84	0.43	0.63	<u>0.14</u>	0.62	0.74	-			
KU	0.48	0.58	0.82	0.54	0.59	<u>0.15</u>	0.58	0.81	0.69	-		
CaU	0.54	0.60	0.86	0.41	0.56	<u>0.08</u>	0.54	0.89	0.80	0.78	-	
MgU	0.35	0.43	0.68	0.23	0.37	<u>-0.05</u>	0.34	0.77	0.66	0.60	0.88	-
NaU	0.52	0.46	0.72	<u>0.17</u>	0.39	<u>-0.06</u>	0.35	0.78	0.65	0.46	0.83	0.81

n= 128; n=64 (Na)	NU	PU	KU	CaU	MgU	NaU
Rifornimento settimanale (XS)	0.92	0.85	0.82	0.89	0.70	0.71
Conc. media (XCm)	<u>0.10</u>	0.38	<u>0.08</u>	0.38	0.40	<u>0.07</u>

6.2.2 Modellizzazione dell'assorbimento minerale

La modellizzazione dell'assorbimento minerale ha preso in considerazione diversi tipi di modello, sia meccanicistico che empirico-statistico (modelli di regressione). Tra le variabili indipendenti sono stati considerati AGR (totale e riportato per i vari organi, quali fiori o foglie) e l'assorbimento idrico W. In particolare, per quanto riguarda lo sviluppo del modello meccanicistico, il presupposto di partenza è stato il seguente: l'assorbimento minerale (U) è funzione di AGR, dell'indice di raccolta (HI), che quindi determina la frazione di distribuzione della sostanza secca nelle parti vegetative (AGR_{pv}) e nei fiori (AGR_f), ed anche della concentrazione minerale delle suddette porzioni di pianta (C_f e C_{pv}). Pertanto, si può applicare la seguente equazione:

$$U = C_f^n AGR_f + C_{pv}^n AGR_{pv} = C_f^n AGR HI + C_{pv}^n AGR (1-HI)$$

Il modello così sviluppato è stato calibrato con i dati della concentrazione minerale sulla sostanza secca raccolti in una prova sperimentale su gerbera condotta presso il Dipartimento di Biologia delle Piante Agrarie dell'Università di Pisa da A. Ferrante (1997). Per stimare l'effettiva validità del modello in questione sono stati messi in relazione i valori previsti e quelli osservati. Come è messo in evidenza nella Tabella 6.9, i valori del coefficiente di determinazione (R^2) si sono mostrati abbastanza bassi, indipendentemente dal fatto di aver considerato assieme o separati i due periodi di osservazione.

Per verificare se lo scarso risultato della validazione del modello meccanicistico fosse dovuto ad una calibrazione inadeguata, si è proceduto ad una sorta di "autocalibrazione", cioè si è condotta un'analisi della regressione multipla di U contro AGR_f e AGR_{pv} , usando l'artificio di forzare la regressione per l'origine degli assi, in pratica annullando l'intercetta (a), che invece caratterizza una normale regressione multipla ($Y = a + b X + c Z$). In una regressione multipla del tipo $Y = b X + c Z$, i coefficienti di b e c rappresenterebbero proprio C_f e C_{pv} . Un alto R^2 e valori di b e c ragionevoli, cioè negli intervalli normali del contenuto minerale della gerbera, avrebbero comprovato la validità del modello meccanicistico in questione, suggerendo evidentemente una diversa e più adeguata calibrazione. I risultati di questo tentativo, riportati nella Tabella 6.10, sono stati solo leggermente migliori rispetto a quelli della Tabella 6.9. Peraltro, i valori di b e c sono risultati in linea con quelli ritrovati in letteratura, come evidenziato dalla Tabella 6.11, ad eccezione del Ca ed anche del P. In effetti, per questi elementi sono stati calcolati valori di C_f e C_{pv} più alti rispetto a quelli previsti in base alla letteratura.

Tabella 6.9. Modello meccanicistico del tasso d'assorbimento minerale (espresso su base settimanale) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Il modello è stato calibrato con i dati provenienti da una prova sperimentale condotta presso il Dipartimento di Biologia delle Piante Agrarie dell'università di Pisa (Ferrante A., 1997). I valori del coefficiente di determinazione sono: non significativi, NS; significativi per $p < 0.05$, *; significativi per $p < 0.01$,.**

Modellizzazione				Relazione v. previsti (Y) vs v. osservati (x)		
Y	Variabili		Stagione	Equazione	Equazione	R ² (p)
	X	Z				
NU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.025 X + 0.028 Z$	$Y = 0.648 X + 0.121$	0.39 (**)
NU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.022 X + 0.025 Z$	$Y = 0.144 X + 0.784$	0.04 (ns)
NU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.025 X + 0.028 Z$ (A); $Y = 0.022 X + 0.025 Z$ (P)	$Y = 0.544 X + 0.249$	0.36 (**)
PU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.0016 X + 0.0018 Z$	$Y = 0.148 X + 0.004$	0.48 (**)
PU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.0013 X + 0.0015 Z$	$Y = 0.029 X + 0.047$	0.04 (ns)
PU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.0016 X + 0.0018 Z$ (A); $Y = 0.0013 X + 0.0015 Z$ (P)	$Y = 0.118 X + 0.013$	0.37 (**)
KU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.031 X + 0.035 Z$	$Y = 0.407 X + 0.230$	0.29 (**)
KU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.029 X + 0.033 Z$	$Y = 0.148 X + 0.998$	0.06 (ns)
KU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.031 X + 0.035 Z$ (A); $Y = 0.029 X + 0.033 Z$ (P)	$Y = 0.440 X + 0.328$	0.33 (**)
CaU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.010 X + 0.012 Z$	$Y = 0.230 X + 0.076$	0.36 (**)
CaU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.009 X + 0.010 Z$	$Y = 0.043 X + 0.334$	0.02 (ns)
CaU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.010 X + 0.012 Z$ (A); $Y = 0.009 X + 0.010 Z$ (P)	$Y = 0.215 X + 0.121$	0.28 (**)
MgU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.0022 X + 0.0025 Z$	$Y = 0.165 X + 0.018$	0.18 (**)
MgU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.0020 X + 0.0023 Z$	$Y = 0.038 X + 0.079$	0.014 (*)
MgU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.0022 X + 0.0025 Z$ (A); $Y = 0.0020 X + 0.0023 Z$ (P)	$Y = 0.145 X + 0.035$	0.11 (**)
NaU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.0036 X + 0.004 Z$	$Y = 0.071 X + 0.037$	0.33 (**)
NaU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.0031 X + 0.0035 Z$	$Y = 0.020 X + 0.111$	0.09 (**)
NaU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.0036 X + 0.004 Z$ (A); $Y = 0.0031 X + 0.0035 Z$ (P)	$Y = 0.035 X + 0.059$	0.11 (**)

Tabella 6.10. Modello meccanicistico del tasso di assorbimento minerale (espresso su base settimanale) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Il modello è stato calibrato con i dati sperimentali raccolti durante la tesi utilizzando un'analisi della regressione multipla forzata per l'origine. Nel caso del Na sono stati considerati solo i dati raccolti nella tesi che prevedeva l'uso di acqua irrigua con 10 M di NaCl. I valori del coefficiente di determinazione sono: non significativi, NS; significativi per $p < 0.05$, *; significativi per $p < 0.01$,.**

Modellizzazione							Relazione v. previsti (Y) vs v. osservati (x)	
Y	Variabili		Stagione	Equazione	R ² (p)	SE	Equazione	R ² (p)
	X	Z						
NU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.024 X + 0.025 Z$	0.80 (**)	0.26	$Y = 0.631 X + 0.112$	0.40 (**)
NU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.023 X + 0.012 Z$	0.77 (**)	0.52	$Y = 0.161 X + 0.733$	0.05 (ns)
NU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.022 X + 0.025 Z$	0.78 (**)	0.37	$Y = 0.550 X + 0.215$	0.37 (**)
PU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.007 X + 0.010 Z$	0.83 (**)	0.07	$Y = 0.709 X + 0.026$	0.47 (**)
PU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.007 X + 0.002 Z$	0.78 (**)	0.14	$Y = 0.184 X + 0.204$	0.06 (ns)
PU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.006 X + 0.009 Z$	0.79 (**)	0.10	$Y = 0.567 X + 0.062$	0.36 (**)
KU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.034 X + 0.051 Z$	0.75 (**)	0.48	$Y = 0.473 X + 0.304$	0.28 (**)
KU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.034 X + 0.032 Z$	0.78 (**)	0.78	$Y = 0.171 X + 1,118$	0.06 (ns)
KU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.032 X + 0.049 Z$	0.77 (**)	0.60	$Y = 0.496 X + 0.397$	0.32 (**)
CaU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.027 X + 0.020 Z$	0.76 (**)	0.29	$Y = 0.554 X + 0.153$	0.38 (**)
CaU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.020 X + 0.003 Z$	0.76 (**)	0.45	$Y = 0.141 X + 0.620$	0.04 (ns)
CaU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.019 X + 0.026 Z$	0.74 (**)	0.36	$Y = 0.458 X + 0.246$	0.27 (**)
MgU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.005 X + 0.007 Z$	0.71 (**)	0.08	$Y = 0.391 X + 0.053$	0.17 (**)
MgU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.004 X + 0.003 Z$	0.72 (**)	0.10	$Y = 0.220 X + 0.106$	0.10 (*)
MgU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.003 X + 0.006 Z$	0.66 (**)	0.10	$Y = 0.245 X + 0.076$	0.08 (**)
NaU	AGRf	AGRpv	A	$Y = 0.028 X - 0.00006 Z$	0.70 (**)	0.27	$Y = 0.535 X + 0.114$	0.43 (**)
NaU	AGRf	AGRpv	P	$Y = 0.018 X + 0.004 Z$	0.48 (**)	0.57	$Y = 0.095 X + 0.557$	0.08 (*)
NaU	AGRf	AGRpv	A+P	$Y = 0.019 X + 0.009 Z$	0.56 (**)	0.40	$Y = 0.222 X + 0.277$	0.13 (**)

Tabella 6.11. Composizione minerale (% sostanza secca) di foglie o fiori (comprensivi dello stelo) di gerbera riportata da vari autori.

	N	P	K	Ca	Mg	Fonte bibl.
Parti verdi						
Valori sperimentali	2.5	0.9	4.9	2.6	0.6	
Dati riportati in letteratura	2.5 – 4.9	0.2 – 0.6	3.9 – 5.0	1.0 – 2.4	0.2 – 0.6	1
	3.3 – 3.9	0.10 – 0.14	2.9 – 4.3	-	-	2
	2.0 - 3.5	0.10 – 0.25	2.5 – 4.5	1.0 – 1.3	0.25 – 0.4	3
Fiori						
Valori sperimentali	2.2	0.6	3.2	1.9	0.30	
Dati riportati in letteratura	2.2	0.4	3.3	0.4	0.17	4

1) Mills et al. (2002); 2) Paradiso R. et al. (2003); 3) Ferrante A. et al. (1997); 4) Baas R. et al. (1995);

D'altra parte, lo studio ha considerato l'assorbimento apparente, essendo basato sulle analisi delle soluzioni ricircolanti. La discrepanza tra i valori sperimentali e quelli bibliografici suggerisce l'importanza di fenomeni quali presumibilmente la precipitazione di fosfati di Ca. È stata valutata anche l'efficienza di simulazione di alcuni modelli di regressione, semplice o multipla, considerando le seguenti variabili tra quelle indipendenti: Wu; AGR; AGR e Wu; AGR e S. Quest'ultima corrisponde alla quantità di elementi fornita settimanalmente alla coltura, quantità calcolata moltiplicando il valore di Wu per la concentrazione della soluzione nutritiva di reintegrazione dei sistemi idroponici (Tabella 6.5). Questa elaborazione è stata effettuata raggruppando insieme i dati raccolti in autunno ed in primavera. I risultati migliori, in termini di R^2 , sono stati quelli ottenuti considerando una regressione multipla del tipo $U = AGR + S$. Queste regressioni sono state, quindi, verificate per la capacità di simulazione (o interpolazione) confrontando i valori osservati con quelli ricalcolati sulla base delle misure corrispondenti di AGR e S (Tabella 6.12 e Figura 6.13). La capacità d'interpolazione della regressioni appare soddisfacente, tranne che per Mg e Na. In Tabella 6.12 è riportato invece il confronto tra valori stimati e misurati del tasso di assorbimento minerale prendendo in considerazione l'assorbimento idrico al posto del rifornimento nutritivo.

D'altra parte, da un punto di vista statistico, i vari modelli appaiono meno validi, considerando i risultati del test IRENE (Tabella 6.13). Questo test, per tutte le regressioni lineari tra i valori previsti e quelli osservati, ha indicato una significatività sia della

differenza tra l'intercetta e 0, sia di quella tra il coefficiente angolare ed 1. Un modello ideale dovrebbe avere un'intercetta pari a 0 ed un coefficiente angolare pari ad 1, per un'esatta corrispondenza tra valori simulati e osservazioni.

Tabella 6.12. Modello empirico – statistico: analisi della regressione lineare o multipla relativa al tasso di assorbimento minerale (espresso su base settimanale) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Nel caso del Na sono stati considerati solo i dati raccolti nella tesi che prevedeva l'uso di acqua irrigua con 10 mM di NaCl. I valori del coefficiente di determinazione sono: non significativi, NS; significativi per $p < 0.05$, *; significativi per $p < 0.01$, **.

Y	Variabili X	Z	Stagione	Equazione	R ² (p)
NU	Wu		Autunno + primavera	$Y = 0.003 + 0.093 X$	0.87 (**)
NU	AGRtot		Autunno + primavera	$Y = 0.278 + 0.015 X$	0.38 (**)
NU	AGRtot	Wu	Autunno + primavera	$Y = 0.016 - 0.002 X + 0.100 Z$	0.87 (**)
NU	AGRtot	NS	Autunno + primavera	$Y = - 0.0139 - 0.00058 X + 0.871Z$	0.85 (**)
PU	Wu		Autunno + primavera	$Y = 0.035 + 0.023 X$	0.79 (**)
PU	AGRtot		Autunno + primavera	$Y = 0.094 + 0.004 X$	0.38 (**)
PU	AGRtot	Wu	Autunno + primavera	$Y = 0.034 + 0.0002 X + 0.022 Z$	0.71 (**)
PU	AGRtot	PS	Autunno + primavera	$Y = 0.0256 + 0.00023 X + 0.806Z$	0.73 (**)
KU	Wu		Autunno + primavera	$Y = 0.1255 + 0.1289 X$	0.68 (**)
KU	AGRtot		Autunno + primavera	$Y = 0.4656 + 0.0229 X$	0.34 (**)
KU	AGRtot	Wu	Autunno + primavera	$Y = 0.126 - 0.0002 X + 0.1297 Z$	0.68 (**)
KU	AGRtot	KS	Autunno + primavera	$Y = 0.081 + 0.0013 X + 0.787 Z$	0.68 (**)
CaU	Wu		Autunno + primavera	$Y = 0.047 + 0.078 X$	0.75 (**)
CaU	AGRtot		Autunno + primavera	$Y = 0.298 + 0.012 X$	0.29 (**)
CaU	AGRtot	Wu	Autunno + primavera	$Y = 0.064 - 0.003 + 0.089 Z$	0.77 (**)
CaU	AGRtot	CaS	Autunno + primavera	$Y = 0.0135 - 0.0019 X + 0.7000Z$	0.80 (**)
MgU	Wu		Autunno + primavera	$Y = 0.0448 + 0.0130 X$	0.47 (**)
MgU	AGRtot		Autunno + primavera	$Y = 0.0968 + 0.0016 X$	0.11 (**)
MgU	AGRtot	Wu	Autunno + primavera	$Y = 0.0518 - 0.0014 X + 0.017 Z$	0.52 (**)
MgU	AGRtot	MgS	Autunno + primavera	$Y = 0.0363 - 0.0011 X + 0.5763Z$	0.57 (**)
NaU	Wu		Autunno + primavera	$Y = - 0.0467 + 0.0813 X$	0.51 (**)
NaU	AGRtot		Autunno + primavera	$Y = 0.207 + 0.0107 X$	0.12 (**)
NaU	AGRtot	Wu	Autunno + primavera	$Y = - 0.006 - 0.0055 X + 0.094 Z$	0.53 (**)
NaU	AGRtot	NaS	Autunno + primavera	$Y = -0.0017 - 0.0055 X + 0.449Z$	0.52 (**)

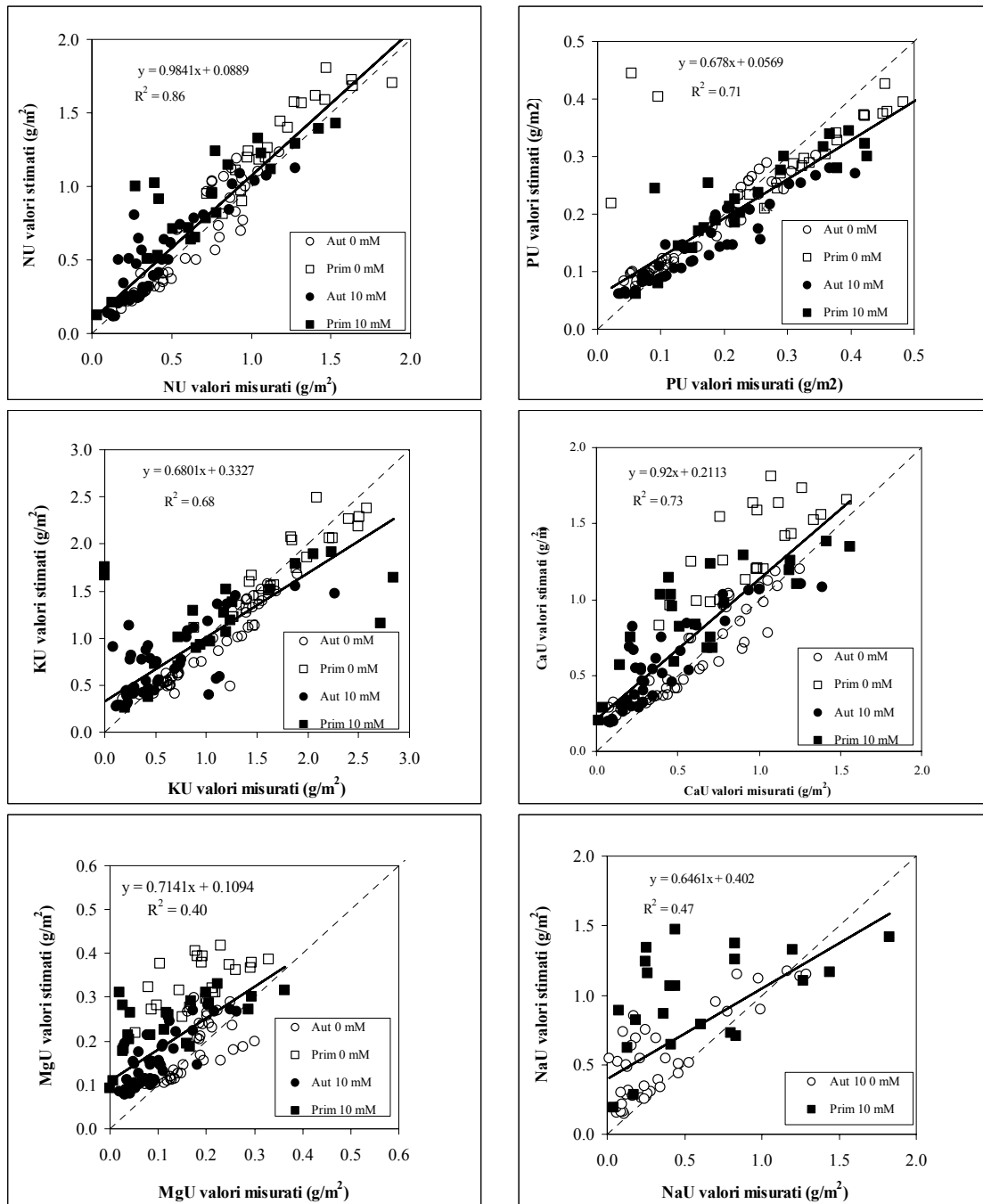


Figura 6.12. Modello empirico–statistico con AGR e W tra le variabili indipendenti: confronto tra valori stimati e misurati del tasso di assorbimento minerale (espresso su base settimanale) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. I dati si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. Nel caso del Na sono stati considerati solo i dati raccolti nella tesi che prevedeva l’uso di acqua irrigua con 10 mM di NaCl.

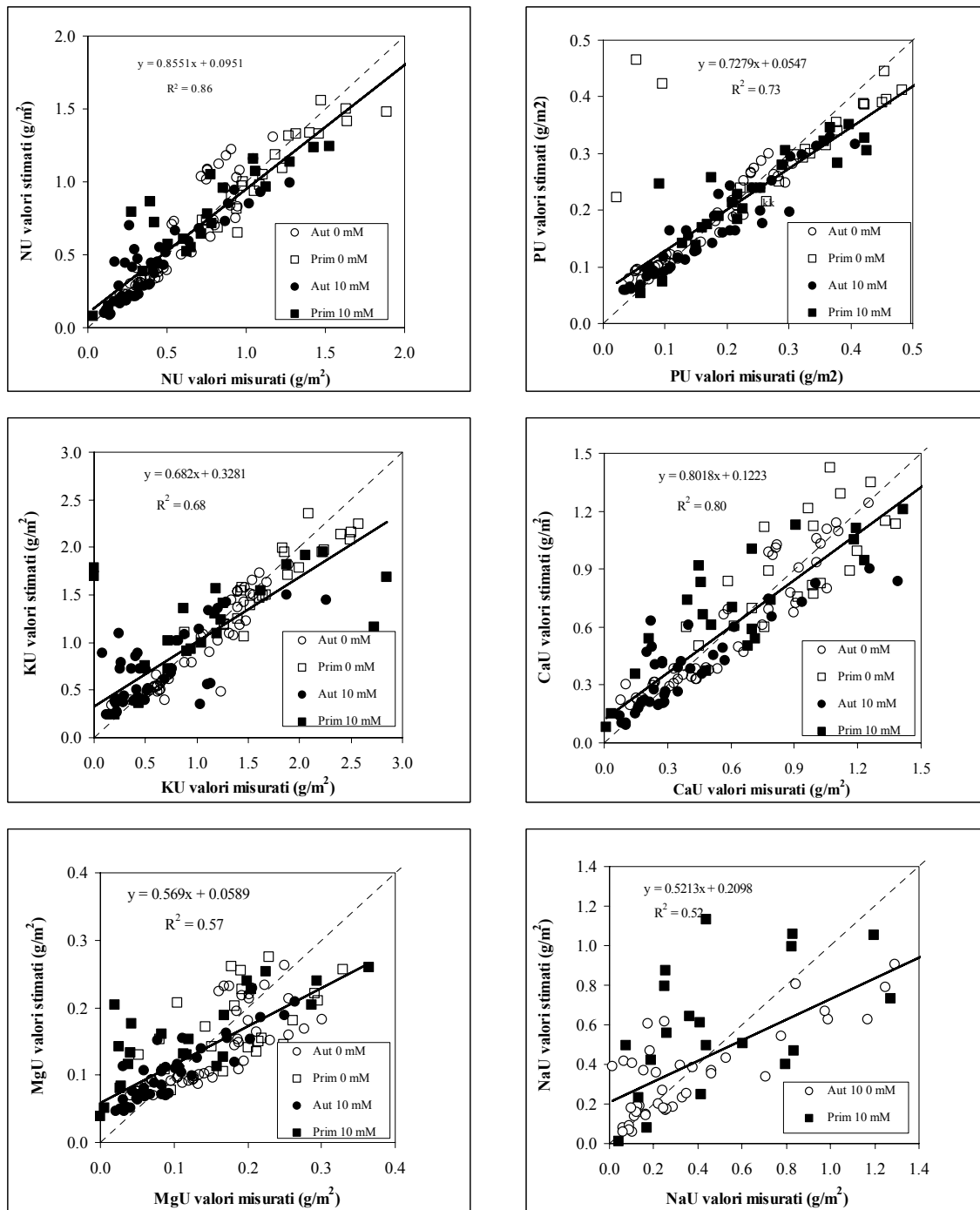


Figura 6.13. Modello empirico–statistico con AGR e S tra le variabili indipendenti: confronto tra valori stimati e misurati del tasso di assorbimento minerale (espresso su base settimanale) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. I dati si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (agosto – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – giugno) del 2005. Nel caso del Na sono stati considerati solo i dati raccolti nella tesi che prevedeva l’uso di acqua irrigua con 10 mM di NaCl.

Tabella 6.13. Modello empirico – statistico: relazione valori previsti (Y) verso valori osservati (X) relativi al tasso d’assorbimento minerale (espresso su base settimanale) in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Nel caso del Na sono stati considerati solo i dati raccolti nella tesi che prevedeva l’uso di acqua irrigua con 10 mM di NaCl. I valori del coefficiente di determinazione sono: non significativi, NS; significativi per $p < 0.05$, *; significativi per $p < 0.01$, **. Si riporta anche se l’intercetta ed il coefficiente angolare della retta di regressione sono significativamente diversi ($p < 0.05$, *; $p < 0.01$, **), o meno (NS), rispettivamente, da 0 e 1.

Elemento	Stagione	Variabili indipendenti	Relazione	R ² (p)	Test IRENE	
					coefficiente angolare	intercetta
NU	A+P	AGR, W	$Y = 0.984 X + 0.089$	0.86 (**)	NS	NS
		AGR, S	$Y = 0.855 X + 0.095$	0.86 (**)	**	**
PU	A+P	AGR, W	$Y = 0.678 X + 0.057$	0.71 (**)	**	**
		AGR, S	$Y = 0.855 X + 0.095$	0.73 (**)	**	**
KU	A+P	AGR, W	$Y = 0.680 X + 0.332$	0.68 (**)	**	**
		AGR, S	$Y = 0.855 X + 0.095$	0.68 (**)	**	**
CaU	A+P	AGR, W	$Y = 0.920 X + 0.211$	0.73 (**)	**	**
		AGR, S	$Y = 0.855 X + 0.095$	0.80 (**)	**	**
MgU	A+P	AGR, W	$Y = 0.714 X + 0.109$	0.40 (**)	**	**
		AGR, S	$Y = 0.855 X + 0.095$	0.57 (**)	**	**
NaU	A+P	AGR, W	$Y = 0.646 X + 0.402$	0.47 (**)	**	**
		AGR, S	$Y = 0.855 X + 0.095$	0.52 (**)	**	**

6.2.3 Modellizzazione della traspirazione e dell’assorbimento idrico

La Tabella 6.14 riporta l’analisi della correlazione tra i valori di E orario e alcune variabili climatiche, oppure il LAI.

In bibliografia sono riportati diversi modelli per la stima della E di colture in serra (Stanghellini, 1987) basati essenzialmente sul modello di Penman-Monteith (Monteith, 1973; Allen et al., 1998), il quale esprime la E in funzione della radiazione globale (RG), del deficit di saturazione (VPD) e di alcuni parametri fisiologici come la resistenza stomatica, aerodinamica ed il LAI (indice di area fogliare).

Baille (1994) ha proposto un modello per la stima della E, su base oraria, di colture ornamentali che di fatto consiste in una semplificazione del modello Penman-Monteith, il quale suddivide la E in due componenti, una funzione della radiazione assorbita dalla coltura e l’altra proporzionale al VPD:

$$E = A (1 - \exp^{-kLAI}) RG + B (VPD LAI)$$

dove E è espressa in mm, k il coefficiente di estinzione della radiazione (adimensionale), LAI l'indice di superficie fogliare ($m^2 m^{-2}$), RG la radiazione globale (mm), VPD il deficit di saturazione (KPa) e A e B sono due parametri (A adimensionale; $B = mmKPa^{-1}$) determinati attraverso la regressione statistica tra una serie di dati misurati di traspirazione (Y) e i valori di RG, VPD e LAI (Z).

Tabella 6.14. Analisi della correlazione tra la quantità di traspirazione oraria (E) (mm/h), registrata durante il giorno (E_d) o la notte (E_n), LAI, RG, VPD e T in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. I dati si riferiscono a due periodi di osservazione: autunno (settembre – dicembre) del 2004 e primavera (aprile – luglio) del 2005. Sono stati sottolineati i coefficienti di correlazione non significativi almeno per $p < 0.05$.

Periodo della prova	Salinità (NaCl)	E	LAI	RG	VPD	T
Autunno	0 mM	E_d	-	0.93	0.71	0.70
Autunno	10 mM	E_d	-	0.93	0.78	0.62
Primavera	0 mM	E_d	0.15	0.89	0.74	0.72
Primavera	10 mM	E_d	<u>0.07</u>	0.87	0.84	0.73
Autunno	0 mM	E_n	-	-	0.23	- 0.41
Autunno	10 mM	E_n	-	-	0.67	- 0.45
Primavera	0 mM	E_n	0.22	0.46	0.69	0.53
Primavera	10 mM	E_n	0.16	0.41	0.64	0.38

Nella modellizzazione i valori di E diurni ($RG > 0$) sono stati mantenuti separati dai valori notturni ($RG = 0$) ottenendo due valori del parametro B: B_d (day) e B_n (night). Il coefficiente di estinzione k, determinato sperimentalmente misurando la luce intercettata da un piranometro posto sopra la coltura oppure sul bancale, è stato pari a 0.60.

Mentre in autunno il LAI rimaneva praticamente costante, in primavera era stato osservata una variazione durante il periodo di osservazione ed anche una sostanziale differenza tra la tesi S0 e S10. Così, per la modellizzazione di E in autunno si è considerato un valore medio di LAI (0.98) per entrambe le tesi. Diversamente, in primavera sono stati sviluppati due semplici modelli di tipo empirico-statistico, riportati nella Figura 6.14.

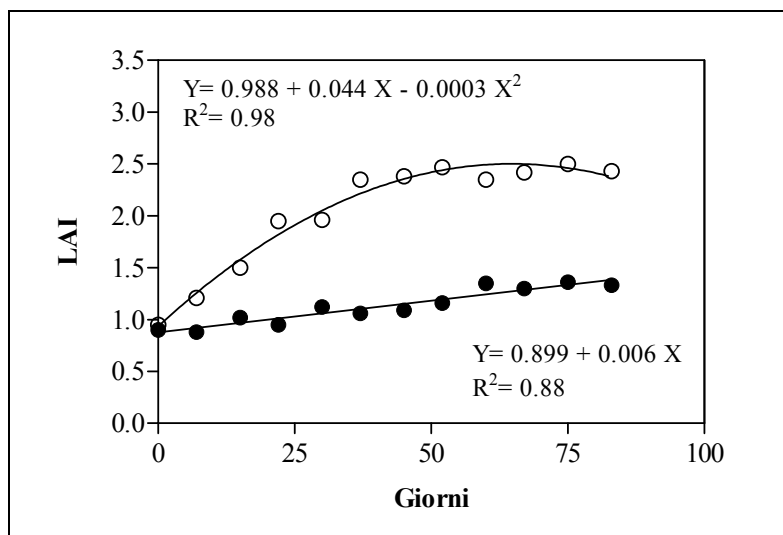


Figura 6.14 – Modellizzazione della variazione del LAI in funzione dei giorni in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra realizzata nella primavera del 2005. Le misure (non-distruttive) del LAI, indicate dai simboli, sono state interpolate con due diverse equazioni, riportate nel grafico. Le piante sono state allevate utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0), indicata da simboli vuoti, e 10 mM, indicata da simboli pieni.

L'assenza di un effetto significativo della salinità sulla resistenza stomatica suggeriva di analizzare assieme i dati raccolti nelle tesi S0 e S10. La salinità ha certamente influenzato, almeno in primavera, il LAI; d'altra parte il LAI è appunto considerato dal modello, quindi ogni fattore che condiziona lo sviluppo fogliare viene considerato dal modello stesso. E' anche vero, però, che nelle due stagioni le condizioni ambientali sono state assai diverse e hanno, ad esempio, condizionato l'incidenza relativa della E notturna su quella delle 24 ore.

Questo suggeriva, così, di tenere separate le due stagioni ma non i due livelli di salinità. In ogni caso, la calibrazione e quindi la validazione del modello di Baille (1994) è stata eseguita con tre diverse procedure: I) tenendo separate le quattro serie di dati; II) tenendo separati i dati autunnali da quelli primaverili; III) analizzando i dati tutti assieme.

I risultati della calibrazione sono riportati nella Tabella 6.15, in cui sono contenuti anche i valori del coefficiente di determinazione, dell'errore standard della stima e del

numero di osservazioni utilizzate. La validazione del modello è, invece, riportata nella Tabella 6.16.

La Figura 6.15, infine, riporta il confronto tra i valori misurati e quelli stimati con le tre procedure di modellizzazione sopra descritte in quattro giorni rappresentativi delle serie di dati oggetto di studio.

Il modello è stato validato anche considerando una ulteriore serie di dati raccolti nell'autunno del 2005; in questo caso, erano state prese in esame solo le piante della tesi S0, suddivise in due gruppi, uno dei quali con piante defogliante ad arte per ridurre il LAI. I risultati della validazione sono stati analoghi a quelli ottenuti nelle altre serie, ad ulteriore supporto della capacità di estrapolazione del modello.

Tabella 6.15. Valori dei parametri A (adimensionale), B_d (mm/h.kPa⁻¹), B_n (mm/h.kPa) calcolati durante la procedura di calibrazione del modello per la traspirazione in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. Le piante sono state allevate negli anni 2004 e 2005 utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. La calibrazione è stata condotta con tre diverse procedure: procedura I: la calibrazione ha considerato i dati separati per stagione e per livello di salinità; procedura II, i dati sono stati tenuti separati solo per stagione; procedura III, la calibrazione ha preso in considerazione tutti i dati, indipendentemente dalla stagione e dalla salinità. R^2 = coefficiente di determinazione; σ_M = errore standard della stima (mm/ h); n = numero di osservazioni.

Procedura di calibrazione e periodo della prova	Salinità (NaCl)	Traspirazione diurna					Traspirazione notturna			
		A	B_d	r^2	n	σ_M	B_n	R^2	n	σ_M
Procedura I										
Autunno 2004	0 mM	0.698	0.021	0.97	232	0.009	0.016	0.74	232	0.002
Autunno 2004	10 mM	0.604	0.021	0.95	230	0.009	0.020	0.81	280	0.002
Primavera 2005	0 mM	0.546	0.019	0.97	239	0.034	0.012	0.76	145	0.009
Primavera 2005	10 mM	0.456	0.026	0.97	224	0.023	0.015	0.72	136	0.007
Procedura II										
Autunno 2004	0 + 10 mM	0.657	0.021	0.96	462	0.009	0.019	0.63	579	0.003
Primavera 2005	0 + 10 mM	0.509	0.021	0.97	463	0.029	0.013	0.64	281	0.008
Procedura III										
Autunno/Primavera	0 + 10 mM	0.523	0.021	0.96	925	0.023	0.014	0.63	860	0.005

Esaminando questa Figura (6.15) e soprattutto i vari indici statistici delle tabelle 6.15 e 6.16 (compresi gli indici relativi alla regressione lineare tra i valori previsti e quelli osservati nelle varie stagioni e per i due livelli di salinità), in particolare quelli relativi alla E diurna, non emergono particolari differenze tra le diverse procedure di modellizzazione; dovendo scegliere, comunque, la procedura migliore, quella che considera separatamente le due stagioni sembra appunto quella in grado di simulare meglio i valori di E oraria.

Le ricadute a livello operativo sono, in questo senso, importanti. Un unico modello di simulazione (o di previsione) è sicuramente un vantaggio dal punto di vista, ad esempio, del controllo automatico dell'irrigazione oppure per condurre studi in simulazione.

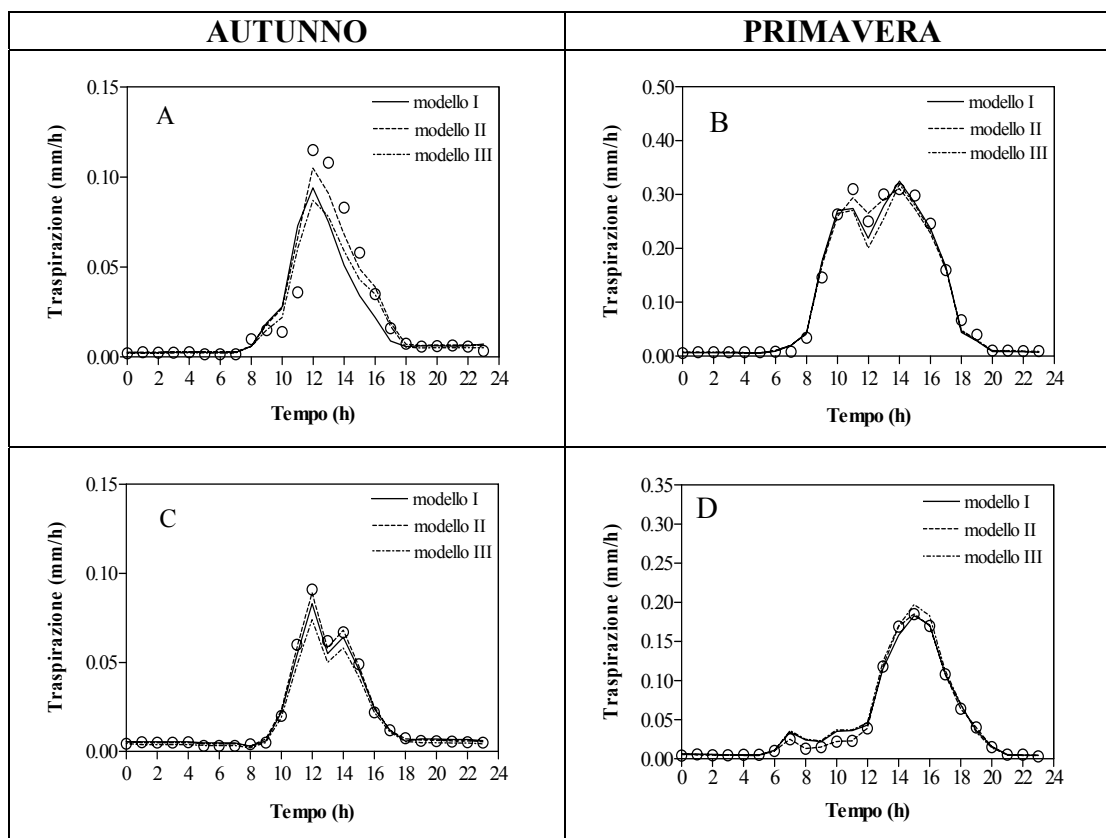


Figura 6.15. Validazione del modello di traspirazione oraria (determinata con una bilancia elettronica) in una coltura idroponica di gerbera in serra, condotta in due stagioni utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM. I simboli rappresentano i valori misurati sperimentalmente, mentre le linee i valori simulati utilizzando tre diverse procedure di calibrazione: procedura I: la calibrazione ha considerato i dati separati per stagione e per livello di salinità; procedura II, i dati sono stati tenuti separati solo per stagione; procedura III, la calibrazione ha preso in considerazione tutti i dati, indipendentemente dalla stagione e dalla salinità. I grafici si riferiscono a: A) autunno, 0 mM NaCl, 5 novembre 2004; B) primavera, 0 mM NaCl, 22 aprile 2005; C) autunno, 10 mM NaCl, 12 novembre 2004; D) primavera, 10 mM NaCl, 10 maggio 2005. sono state allevate utilizzando acqua irrigua con due diverse concentrazioni di NaCl: 0 (<1.0) e 10 mM.

Tabella 6.16. Equazioni delle rette di regressione ($Y = a + b X$) tra valori previsti (Y) verso valori osservati (X) della traspirazione oraria delle piante in una coltura idroponica sperimentale di gerbera in serra. procedura I: la calibrazione ha considerato i dati separati per stagione e per livello di salinità; procedura II, i dati sono stati tenuti separati solo per stagione; procedura III, la calibrazione ha preso in considerazione tutti i dati, indipendentemente dalla stagione e dalla salinità. R^2 = coefficiente di determinazione; σ_M = errore standard della stima (mm/ h); n = numero di osservazioni. R^2 = coefficiente di determinazione; r = indice di correlazione tra i residui ed I valori osservati.

Periodo della prova	Salinità (NaCl)	Procedura di modellizzazione	Traspirazione diurna				Traspirazione notturna			
			a	b	R^2	R	a	b	R^2	r
Autunno 2004 (22/09/04 - 09/01/05)	0 mM	I	0.935	0.002	0.910	0.213	0.863	0.001	0.750	0.253
		II	0.931	0.003	0.957	0.329	0.949	0.001	0.813	0.112
		III	0.789	0.003	0.955	0.775	0.754	0.001	0.765	0.630
Autunno 2004 (22/09/04 - 09/01/05)	10 mM	I	0.956	0.003	0.930	0.160	0.812	0.002	0.770	0.439
		II	1.006	0.003	0.945	-0.025	0.978	0.001	0.886	0.063
		III	0.855	0.003	0.926	0.514	0.760	0.001	0.875	0.640
Primavera 2005 (11/04 - 03/07)	0 mM	I	0.921	0.019	0.930	0.280	0.855	0.002	0.880	0.347
		II	0.928	0.018	0.934	0.280	0.916	0.003	0.862	0.233
		III	0.931	0.022	0.927	0.253	0.978	0.003	0.841	0.077
Primavera 2005 (11/04 - 03/07)	10 mM	I	0.879	0.015	0.941	0.539	0.892	0.002	0.830	0.334
		II	0.923	0.010	0.951	0.330	0.867	0.001	0.860	0.338
		III	0.911	0.013	0.932	0.340	0.890	0.001	0.867	0.299
Autunno 2005 (10/10 - 20/11)	0 mM	I	0.947	0.007	0.942	0.225	0.833	0.002	0.810	0.574
		II	0.948	0.008	0.967	0.288	1.035	0.001	0.733	-0.056
		III	0.792	0.008	0.966	0.814	0.805	0.001	0.733	0.372
Autunno 2005 (10/10 - 20/11)	0 mM	I	1.012	0.006	0.906	-0.038	0.816	0.001	0.785	0.159
		II	1.083	0.006	0.910	-0.235	1.035	0.000	0.773	-0.062
		III	0.900	0.005	0.918	0.347	0.805	0.000	0.772	0.408

6.3 DISCUSSIONE

L'alta salinità dell'acqua d'irrigazione va ad incidere in maniera negativa sulla crescita delle piante e sulla produzione delle colture. In particolar modo, la salinità può inibire la crescita delle piante attraverso un abbassamento del potenziale osmotico esterno, inducendo in questo caso uno stress idrico, oppure attraverso uno sbilanciamento ionico e, infine, mediante l'accumulo di ioni tossici nei tessuti della pianta stessa (Greenway e Munns, 1980).

La gerbera è classificata come specie moderatamente sensibile alla salinità, espressa dell'EC dell'acqua d'irrigazione o di fertirrigazione (Sonneveld, 1988; Sonneveld et al., 1999). Tale conclusione è basata sugli studi condotti da Baas et al. (1995), i quali hanno messo in evidenza come, all'aumentare della concentrazione di NaCl, si determini una diminuzione del numero di fiori prodotti e del loro peso secco, rispettivamente, del 13% e del 19% con valori di EC compresi tra 1.8 e 3.7 mS/cm. Tuttavia, De Kreij e Van Os (1989) non hanno osservato effetti negativi della salinità sulla produzione di fiori in gerbera fuori suolo; al contrario, questi autori riportano un aumento della produzione di fiori quando l'EC veniva incrementata da 0.8 a 1.5 mS/cm, in virtù di una maggiore concentrazione di elementi nutritivi.

Occorre, inoltre, dire che la risposta delle piante alla salinità è diversa in idroponica rispetto al terreno e può essere condizionata dalla stagione di crescita (Shannon and Grieve, 1999; Sonneveld, 2000).

In questo studio, è stato osservato un effetto negativo della salinità sullo sviluppo dell'area fogliare, quindi sul LAI (Tabella 6.2, Figura 6.3), sulla crescita (Tabella 6.3, Figura 6.4 e 6.5) e sulla produzione di fiori (Tabella 6.1, Figura 6.2). L'effetto sul LAI ha avuto ripercussioni anche e sulla traspirazione fogliare (Figura 6.7) e quindi sul tasso di assorbimento idrico (Tabella 6.4, Figura 6.6). L'effetto, però, non è stato osservato in autunno, né era legato ad una riduzione della resistenza stomatica, come evidenziato dalle misure con il porometro (Figura 6.8). Cioè, le piante allevate in primavera consumavano meno acqua in quanto ne traspiravano meno e questo per aver sviluppato una minore superficie fogliare rispetto alle piante di controllo allevate con acqua praticamente priva di NaCl, e non una minore attività degli stomi, che rispondono allo stato idrico fogliare, più esattamente al turgore, che la maggior salinità potrebbe aver diminuito.

L'inibizione dell'espansione fogliare provocata dallo stress salino è un fenomeno comune nelle piante ed è stato riportato in moltissimi lavori su specie diverse (e.g. su pomodoro, da Schwarz and Kuchenbuch, 1998; Li et al., 2001; Li e Stanghellini, 2001).

Lo studio considerava anche la stagione di coltivazione che, in effetti, ha condizionato in modo evidente tutti i parametri considerati. Nel periodo autunnale, rispetto a quello primaverile, le piante si sono sviluppate di meno ed hanno fatto registrare una minor produzione di fiori (Figura 6.2) e minori consumi idrici e minerali (Tabella 6.6 e 6.7, Figura 6.10 e 6.11).

Gli effetti fisiologici ora della stagione di crescita, ora della maggior salinità dell'acqua di fertirrigazione, non sembrano comunque aver condizionato la modellizzazione, nel senso che è stato possibile sviluppare dei modelli basati sull'insieme dei dati raccolti, quindi dotati di una buona "robustezza", cioè la capacità di simulare un determinato fenomeno o processo in condizioni diversificate.

Infatti, quando la modellizzazione ha considerato l'insieme dei dati raccolti nelle due stagioni e nelle due tesi S0 e S10, non sono stati ottenuti risultati, in termini di capacità d'interpolazione (modelli di assorbimento minerale; Tabelle 6.9, 6.10, 6.12 e 6.13; Figure 6.12, 6.13) oppure di estrapolazione (modelli di traspirazione oraria; Tabella 6.16, Figura 6.15), inferiori nella sostanza a quelli ottenuti tenendo separate ora le stagioni di coltivazione, ora i livelli di salinità dell'acqua irrigua.

Tuttavia, il modello d'assorbimento minerale, a differenza di quello della traspirazione, non ha mostrato una capacità di simulazione caratterizzata da sufficiente accuratezza, precisione e robustezza, perlomeno non per tutti gli elementi nutritivi considerati (Tabella 6.17). Tutto sommato, i risultati ottenuti con alcuni modelli empirico-statistici per N, P e Ca appaiono soddisfacenti (Figure 6.12 e 6.13). Questo tipo di modelli hanno come variabili indipendenti il tasso di crescita e l'assorbimento idrico, misurato quest'ultimo registrando il rifornimento di soluzione nutritiva al sistema, oppure il rifornimento nutritivo, stimato considerando i volumi e le concentrazioni delle soluzioni nutritive di reintegrazione. Assai meno soddisfacente è stato il risultato quando si sono considerate, quali variabili indipendenti, il tasso di crescita ripartito nelle due componenti (parti verdi e fiori), anche nel caso in cui il modello è stato, potremmo dire, "autocalibrato".

A questo proposito dobbiamo considerare il sistema di gestione della coltura da noi utilizzato. Il sistema, infatti, prevedeva un'automatica compensazione dell'assorbimento idrico delle piante con soluzione nutritiva completa. Così, l'assorbimento idrico potrebbe

aver influenzato quello dei nutrienti non tanto o non solo attraverso un genuino effetto fisiologico: il flusso di massa dei nutrienti dalla soluzione nutritiva esterna nella radice determinato dall'assorbimento di acqua, richiamato a sua volta dalla traspirazione fogliare. Infatti, potrebbe esserci stato un effetto indiretto: il maggior rifornimento idrico, conseguente ai maggiori consumi traspiratori, avrebbe determinato, come in effetti è stato, un maggior rifornimento di nutrienti e quindi un maggior assorbimento della pianta, cioè favorendo una sorta di consumo di lusso. In effetti, il risultato della modellizzazione è migliorato sensibilmente (cioè, è migliorato il risultato statistico della validazione) quando si è considerato il rifornimento settimanale di nutrienti legato ai rabbocchi sistematici del livello di soluzione nutritiva nei cassoni dei vari impianti (Figura 6.13, Tabella 6.13).

La discriminazione tra questi due tipi di meccanismi con i quali l'assorbimento idrico condiziona quello nutritivo non è fine a se stessa. Nel secondo caso, infatti, evidentemente il modello sviluppato nello studio resterebbe valido solo se applicato ad un sistema idroponico gestito come quello impiegato negli esperimenti. A livello commerciale, invece, sono diffusi anche dei sistemi in cui le perdite per traspirazione della coltura sono compensate solo con acqua. Questo aspetto sembra meritevole di uno specifico studio.

Tabella 6.17. Riepilogo dei valori del coefficiente di determinazione della relazione tra valori previsti ed osservati, per i tipi di modello dell'assorbimento minerale in una coltura sperimentale di gerbera.

Variabile	Modello meccanicistico	Modello m. 'ricalibrato'	Modello e.-s. $U = f(AGR; W)$	Modello e.-s. $U = f(AGR; S)$
NU	0.36	0.37	0.86	0.85
PU	0.37	0.36	0.71	0.73
KU	0.33	0.32	0.68	0.68
CaU	0.28	0.27	0.73	0.80
MgU	0.11	0.08	0.40	0.57
NaU	0.11	0.13	0.47	0.52

La modellizzazione della E oraria conferma la validità del modello di Baille, di natura empirico-statistica, ma con un forte carattere meccanicistico; infatti, presenta le due

componenti del modello fisico della traspirazione di Penman-Monteith: la componente radiativa e quella aerodinamica, legata al VPD.

I coefficienti A e B calcolati sono in linea con quelli riportati per altre specie da Baille et al., (1994), come indicato nella Tabella 6.18.

Il modello di E si è dimostrato valido anche per stimare il consumo idrico giornaliero attraverso l'integrazione dei valori orari. Questa verifica, non riportata nella tesi in dettaglio, è stata fatta con i dati dell'autunno 2005 confrontando i dati così calcolati con quelli misurati con il contalitri. Questo suggerisce la possibilità di utilizzare il modello di E non solo per il controllo automatico dell'irrigazione, ma anche per stimare, in studi di simulazione, i fabbisogni idrici delle colture previsti in base ad un atteso andamento climatico.

Tabella 6.18. Valori dei parametri A e B per alcune piante ornamentali. A è dimensionale, mentre B è espresso come Kg /h Kg/Pa. Fonte: Baille et al. (1994).

Coltura	LAI	A	B_d B_d (mm/h.kPa ⁻¹)	B_n (mm/h.kPa)
Gerbera	0.9 - 2.4	0.570	0.021	0.015
Begonia	2.7	0.202	0.026	0.032
Ciclamino	2.9	0.318	0.019	0.013
Gardenia	4.5	0.460	0.020	0.010
Gardenia	6.6	0.533	0.013	0.007
Hibiscus	2.4	0.369	0.037	0.014
Impatiens	5.1	0.667	0.013	0.009
Pelargonium	5.7	0.610	0.017	0.009
Poinsettia	2.0	0.120	0.017	0.015
Schefflera	4.4	0.608	0.014	0.007

6.4 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il modello di E e, pur meno soddisfacente, quello dell'assorbimento nutritivo basato sulla conoscenza del consumo idrico e del tasso di crescita, sembrano sufficientemente robusti e accurati, quindi idonei per essere implementati in sistemi di gestione degli impianti idroponici a ciclo chiuso, per determinare, ad esempio, il fabbisogno idrico e/o nutrizionale di una coltura.

Da un punto di vista pratico i modelli potrebbero essere facilmente implementati in algoritmi per il controllo della fertirrigazione anche delle colture a ciclo aperto, poiché richiedono la conoscenza di pochi parametri facilmente misurabili; oppure, in studi di simulazione dei fabbisogni di acqua e fertilizzanti utili, ad esempio, per pianificare l'uso delle risorse idriche (o il loro possibile inquinamento) a disposizione dell'azienda o addirittura di un intero comprensorio agricolo.

La tesi ha messo in luce anche l'interesse per un più dettagliato studio di stampo fisiologico sull'effetto dell'intensità della traspirazione e della disponibilità di nutrienti nel mezzo di crescita sul tasso di assorbimento nutritivo.

BIBLIOGRAFIA CITATA E CONSULTATA

1. ALLEN, R.G., PERIERA L.S., RAES D., SMITH, M. (1998). Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage 56, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
2. ANDRIOLO J.L. (1995). Analyse des flux de N-NO₃, H₂O, CO₂ au cours de la culture et du nycthemere chez la tomate adulte en hors-sol. These de Doctorat, Universite de Montpellier II, 101p.
3. ASHER, C. J., BLAMEY F.P. (1987). Experimental control of plant nutrient status using programmed nutrient addition. J. Plant Nutr. 10, 1371-1380.
4. BAAS R., NIJSSEN H.M.C., VA DEN BERG T.J.M., WARMENHOVEN M.G. (1995). Yeld and quality of carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) and gerbera (*Gerbera jamesonii* L.) in a closed nutrient system as affected by sodium chloride. Scientia Hort. 61, 273-284.
5. BAILEY B.J., J.I. MONTERO, C. BIEL, D.J. WILKINSON, A. ANTON, O. JOLLIET (1993). Evapotranspiration of *Ficus benjamina*: comparison of measurements with predictions of the Penman-Monteith model and a simplified version. Agric. For. Meteorol. 65, 229-243.
6. BAILLE M. ; BAILLE A., LAURY JC. (1994). A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs climate factors and leaf area. Scientia Horticulturae 59, 217-232.
7. BAILLE M., ROMERO-ARANDA R., BAILLE A. (1996). Stomatal conductance of rose whole plants in greenhouse conditions: analisys and modelling. J.Hort. Sci. 71, 957-970.
8. BAILLE, M., BAILLE A., LAURY J.C. (1994). A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs climate factors and leaf area. Scientia Hort. 59, 217-232.
9. BOULARD T., JEMAA R. (1993). Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control. Acta Hort 335. Irrigation of Horticultural crops.
10. CALOIN M., YU O. (1984). Analysis of the time course of change in nitrogen content in *Dactylis glomerata* L. using a model of plant growth. Ann. Bot. 54, 69-76.
11. CARMASSI G., INCROCCI L., MAGGINI R., MALORGIO F., TOGNONI F., PARDOSSI A. (2005). Modelling salinity buildup in recirculating nutrient solution culture. J. Plant Nutr. 28: 431- 445.
12. COOPER A. J. (1979). The ABC of NFT. Grower Books Publisher, London.
13. DE GRAFF R. (1988). Automation of the water supply of glasshouse crops by means of calculating the traspiration and measuring the amount of drainage water, Acta Hortic. 229, 219-231.
14. DE KREIJ C., VAN DE BERG T.J.M. (1990). Nutrient uptake, production and quality of *Rosa hybrida* in rockwool as affected by elettrical conductivity of the

- nutrient solution. In: van Beusichem (editor), Plant Nutrition, Physiology and Applications. Proceedings XIth Int. Plant Nutrition Coll., Kluwer, Dordrecht. 519-523.
15. DE KREIJ C., VAN OS P.C. (1989). Production and quality of gerbera in rockwool as affected by electrical conductivity of the nutrient solution. In: Proc. 7th Int. Cong. Soilles Culture, 13-21 may 1988, Kluwer, Wageningen. 255-264.
 16. DE TOURDONNET S. (1998). Maitrise de la qualité et de la pollution nitrique en culture de laitues sous abri plastique : diagnostic et modelisation des effets des systemes de culture. These docteur, INRA, Paris-Grignon, France.
 17. DE TOURDONNET S. (1999). Control quality and pollution in greenhouse lettuce production: a modelling study. Acta Hort., 507, 263-270.
 18. DE TOURDONNET S., LAFOLIE F., ESTRADE J.R., LAGIER J., SEBILOTTE M. (2001). Non uniformity of environmental conditions in greenhouse lettuce production increase the risk of N pollution and lower product quality. Agronomie 21, 297-309.
 19. DE VILLELE O. (1974). Besoins en eau des cultures sous serres. Essai de conduite des arrosages en fonction de l'ensoleillement. Acta Hort. 35, 123-135.
 20. DE WIT C.T. (1982). Simulation of living systems. In: Simulation of plant growth and crop production. F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar (Eds). Wageningen. Centre for Agricultural Publishing and Documentation.
 21. DORAIS M., PAPADOPOULOS A.P., GOSSELIN A. (2001). Influence of EC management on greenhouse tomato yield and fruit quality. Agronomie 21, 367-383.
 22. EPSTEIN, E., HAGEN C.E. (1952). A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. Plant Physiol. 27, 457-474.
 23. FERRANTE A. (1997). L'innovazione in floricoltura: il caso della gerbera. Tesi di laurea, Dipartimento di Biologia delle Piante Agrarie, Università degli Studi di Pisa.
 24. FINK M., SCHARPF H.C. (1993). N-expert: a decision support system for vegetable fertilisation in the field. Acta Hort. 339, 67-74.
 25. FISHER P.R., HEINS R.D., EHLER N., LIETH J.H. (1997). A decision support system for real-time management of Easter Lily (*Lilium Longiflorum* thunb.) scheduling and height. Agricultural System. 54, 23-27.
 26. FISHER P.R., HEINS R.D., LIETH J.H. (1996). Modeling flower bud elongation in Easter Lily (*Lilium Longiflorum* thunb.) in response to temperature. HortScience. 31, 349-352.
 27. FISHER P.R., HEINS R.D., LIETH J.H. (1997). Easter Lily Bud Development Meter. URL: [http:// lieth.ucdavis.edu/Research/dss/bud.htm](http://lieth.ucdavis.edu/Research/dss/bud.htm).
 28. FLOWERS T.J. (2004). Improving crop salt tolerance. J. Expt. Bot. 55, 307-319.
 29. GARY C., J.W. JONES, M. TCHAMITCHAIN (1998). Crop modelling in horticulture: state of the art. Scientia Hort. 74, 3-20.
 30. GERICKE W.F. (1937). Hydroponics: crop production in liquid culture medium. Science 85, 177-178.

31. GIELING Th., SCHURER K. (1995). Sensor and measurement. In: BAKKER, BOT, CHALLA, VAN DE BRAK, N.J., (eds). Greenhouse climate control: an integrated approach. Wageningen Pers, Wageningen, 211-223.
32. GIELING TH., VAN DEN VLEKKERT H.H. (1996). Application of ISFETs in closed-loop systems fo greenhouses, *Advances in Space Research* 18 (4/5), 135-138.
33. GOLDSBERRY K., LANG R. (1987). Response of gerbera to root zone heating in soil and grave substrate. *Hortscience* 22 (4). 595-597.
34. GRAVES C.J. (1983). The nutrient film technique. *Hortic. Rev.* 5, 1-44.
35. GREENWAY H., MUNNS R. (1980). Mechanism of salt tollerance in nonhalophytes. *Ann. Rev. Plant. Physiol.* 31, 149-190.
36. GREENWOOD D.J., LEMAIRE G., GOSSE G., CRUZ P., DRAYCOTT A, NEETESON .J.J. (1990). Decline in percentage N of C and C crops with increasing plant mass. *Ann. Bot.* 66, 425–436.
37. HAMMER G.L., KROPFF M.J., SINCLAIR T.R., PORTER J.R. (2002). Future contributions of crop modelling: from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *Europ. J. Agron.* 18, 15-31.
38. HANSEN S., JENSENH.E., NIELSEN N.E., SVENDSEN H. (1991). Simulation of nitrogen dynamics and biomass prouction in winter wheat using the danish simulation model DAISY. *Fertil. Res.* 27, 245-259.
39. HARDWICK R.C. (1987). The nitrogen content of plants and the self-thinning rule of plant ecology: a test of the core-skin hypothesis. *Ann. Bot.* 60, 439–446.
40. HEINEN M. (1997). Dynamics of water and nutrients in closed, recirculating cropping system in glasshouse hoticulture. With special attention to lettuce grown in irrigated sand beds. Phd thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
41. INGESTADT T., LUND A. (1992). Theories and methods on plant nutrition and growth. *Physiol. Plant.* 84, 177-184.
42. JEMAA R., BOULARD T., BAILLE A. (1995). Some results on water and nutrient consumption of a greenhouse tomato crop grown in rockwool. *Acta Hort* 408, 137-145.
43. JENSEN M.H. (1997). Hydroponics. *Hortscience* 32, 1018-1021.
44. JOLLIET O., BAILEY B.J. (1992). The effect of climate on tomato transpiration in greenhouse: measurements and models comparison. *Agric. Forest Meteor.* 58, 43-62.
45. KIPP J.A., WEVER G. (1993). Wortelmedia. Proefstation voor Tuinbouw onder glas te Naaldwijk, Series: Informatiereeks No. 103, 48.
46. KITTAS C., KATSOULAS N., BAILLE A. (1999). Transpiration and canopy resistance of greenhouse soilless roses: measurements and modelling. *Acta Horticulure* 507, ISHS.
47. KLARING H.P., SCHWARZ D., HEISSNER A. (1997). Control of nutrient

- solution concentration in tomato crop using models of photosynthesis and transpiration: a simulation study. *Acta Hort.* 450, 329-334.
48. LANDI S. (1992). La coltivazione fuori suolo del melone (*Cucumis melo* L.) con la tecnica del film nutritivo. Tesi di laurea, Facoltà di Agraria di Pisa.
 49. LE BOT J., ADAMOWICH S., ROBIN P., GARY C. (1998). Modelling nitrate uptake by greenhouse tomato crops at the short and long time scales. *Acta Hort.* 456, 237-245.
 50. LE BOT J., ADAMOWICH S., ROBIN P., GARY C. (1998). Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Scientia Hort.* 74, 47-82.
 51. LEA-COX J. D., G. W. STUTTE., BERRY W. L. and WHEELER R. M. (1999). Nutrient dynamics and pH/charge-balance relationships in hydroponic solutions. *Acta Hort.* 481, 241-249.
 52. LEMAIRE G., GASTAL F. (1997). N uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire, G. Ed., *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer-Verlag, Berlin.
 53. LENTZ W. (1998). Model applications in horticulture: a review. *Scientia Hort.* 74, 151-174.
 54. LI Y.L., C., STANGHELLINI. 2001. Analysis of the effect of EC and potential transpiration on vegetative growth of tomato. *Scientia Hort.* 89, 9-21.
 55. LI Y.L., STANGHELLINI C. CHALLA H.. 2001. Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato. *Scientia Hort.* 88, 11-29.
 56. LIETH J.H., LI L.Y. (1998). URL: <http://lieth.ucdavis.edu/Research/lily/sim/DDs.htm>.
 57. LOANGUE K., GREEN R.E. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7, 51-73.
 58. LORENZ H.-P., SCHLAGHECKEN J., ENGEL G., MAYNC A., ZIEGLER J. (1989). Kulturbegleitendes-Nmin-Sollwerte-(KNS)-System, Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten, Mainz.
 59. MALORGIO F. (2005). Uso razionale delle risorse nel florovivaismo: l'acqua. *Quaderno ARSIA 5/2004*, 49-58.
 60. MARCELIS L.F.M., VAN DEN BOOGARD R., MEINEN E. (2000). Control of crop growth and nutrient supply by the combined use of crop models and plant sensor. *Proceedings Int. Conf. Modelling and control in agriculture, horticulture and post – harvested processing*. IFAC 351-356.
 61. MARFA' O., BIEL C., BLANCH F., MONTERO J.I. (2000). Water consumption of a closed soilless culture of gerbera: usefulness of models to estimate evapotranspiration. *Proc. Int. Conf. and British-Israeli Workshop on Greenhouse Tech towards 3rd Mill.* *Acta Hort.* 534, ISHS.
 62. MEDRANO E., LORENZO P., SANCHEZ-GUERRERO M.C., MONTERO J.I. (2005). Evaluation and modelling of greenhouse cucumber crop transpiration under high and low radiation conditions. *Scientia Horticulture*.

63. MONTEITH J.L. (1973). Principles of environmental physics. Arnold Ed., London, 241 pp.
64. MONTEITH J.L. (1973). Principles of environmental physics. Arnold Ed., London, 241 pp.
65. MORRIS L.G., NEALE F.E., POSTLEWAITHE J. D. (1957). The transpiration of glasshouse crops and its relation to the incoming solar radiation. *J. Agric. Eng. Res.* 2, 111-122.
66. MUNNS R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress *Plant, Cell Environ.* 25, 239-250.
67. OKUYA A., OKUYA T. (1988). The transpiration of greenhouse tomato plants in rockwool culture and its relationship to climatic factors. *Acta Hort.* 230, 307-311.
68. OTTEN W. (1994). Dynamics of water and nutrients for potted plants induced by flooded bench fertigation: experiments and simulation, PhD thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
69. PARADISO R., DE PASCALE S., APREA F., BARBIERI G., (2003). Effect of electrical conductivity levels of nutrient solution on growth, gas exchanges and yield of two gerbera cultivars in soilless system. *Acta Hort.* 609, 165-171.
70. PARDOSSI A., TOGNONI F., INCROCCI L. (2004). Mediterranean greenhouse technology. *Chronica Hort.* 44 (2), 28-34.
71. PARIDA A.K., DAS A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60, 324-349.
72. ROUPHAEL Y., COLLA G. (2004). Modelling the transpiration of a greenhouse zucchini crop grown under Mediterranean climate using Penman-Monteith equation and its simplified version. *Australian J. of Agr. Research.* 55, 931-937.
73. SAVVAS D., PASSAM H. (2002). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo Publications, Athens: 463.
74. SAVVAS, D.; PASSAM, H. (2002). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo Publications, Athens:pp.463.
75. SCHWARZ, D., KUCHENBUCH, P. (1998). Water uptake by tomato plants grown in closed hydroponic systems dependent on the EC-level. *Acta Hort.*, 458, 323-328.
76. SHANNON M.C., GRIEVE C.M. (1999). Tolerance of vegetables crops to salinity. *Scientia Hort.*, 78, 5-38.
77. SHILLO R., DING M., PASTERNAK D., ZACCAI M. (2002). Cultivation of cut flower and bulb species with saline water. *Sci. Hort.* 92, 41-54.
78. SHIVE J.W., ROBBINS W.R. (1937). Methods of growing plants in solutions and sand cultures. *New Jersey Agr. Expt. Sta. Bul.* 636.
79. SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N. (2000) Criteria for publishing papers on crop modelling. *Field Crops Research*, 68, 165-172.
80. SONNEVELD C. (1981). Items for application of macro-elements in soilless cultures, *Acta Hort.* 128, 187-195.
81. SONNEVELD C. (1988). The salt tolerance of greenhouse crop. *Netherland J. Of*

- Agr. Sci. 36, 63-73.
82. SONNEVELD C. (2000). Effect of salinity on substrate grown vegetables and ornamentales in greenhouse horticulture. PhD Thesis, Agricultural University, Wageningen, 151.
 83. SONNEVELD C., BAAS R., NIJSSEN H.M.C., HOOG J. (1999). Salt tolerance of flower crops grown in soilless culture. *Jurnal of Plant Nutrition*. 22 (6), 1033-1048.
 84. SONNEVELD C., DE KREIJ C. (1999). Response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to an unequal distribution of salts in the root environment. *Plant and Soil* 209, 47-56.
 85. SONNEVELD C., VAN DER BURG A.M.M. (1991). Sodium chloride salinity in fruit vegetables crops in soilless culture. *Neth. J. Agric. Sci.*, 39, 115-122.
 86. SONNEVELD C., VOOGT W. (1983). Studies on the salt tolerance of some flower crops grown under glass. *Plant Soil*. 74, 41-52.
 87. STANGHELLINI C. (1987). Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, the Netherlands, 150 pp.
 88. STANGHELLINI C. (1987). Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. Dissertation Wageningen University, 150.
 89. STANGHELLINI, C. (1987). Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, the Netherlands, 150 pp.
 90. STEINER A.A. (1997). Foreword. In: proc. 9th Internat. Congr. Soilless Culture, Jersey, 1996. ISOSC, Wageningen, The Netherlands, 13-19.
 91. SUAY R., MARTINEZ P.F., ROCA D., HERRERO J.M., RAMOS C. (2003). Measurement and estimation of transpiration of a soilless rose crop and application to irrigation management. Proc. 6th IS on Protected Cult. Acta Hort 614, ISHS.
 92. VAN OS E., STANGHELLINI C. (2001). Diffusion and environmental aspects of soilless growing systems. *Italus Hortus* 8 (6), 9-15.
 93. VAN DER BURG A.N.M. (1990). Geen winst te behalen met nauwkeurig water geven. *Groenten en Fruit* 45 (30), 44-45.
 94. VAN NOORDWIJK M., RAATS P.A.C. (1980). Drip and drainage system for rockwool cultures in relation to accumulation and leaching of salts. Proceedings of the fifth International Congress on Soilless Culture, Wageningen, The Netherlands. 279-287.
 95. VAN OIJEN, M. (2002) On the use of specific publication criteria for papers on processed-based modelling in plant science. *Field Crop Research*, 74, 197-205.
 96. VAN OS E. (1982). Dutch developments in soilless culture. *Outlook on Agriculture* 11,165-171.
 97. VAN OS E., RUIJS M.N.A., VAN WEEL P.A. (1991). Closed business system for less pollution from greenhouse. *Acta Hortic.*, 294, 49-57.
 98. VAN OS E., STANGHELLINI C. (2001). Diffusion and environmental aspects of soilless growing system. *Italus Hortus* 8 (6), 9-15.

99. VOOGT W. (1993). Nutrient uptake of year round tomato crops. *Acta Horticulturae*, 339, 99-112.
100. VOOGT W., SONNEVELD C. (1997). Nutrient management in closed growing systems for greenhouse production. In *Plant production in closed ecosystems* (E. Goto, ed.) Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 83-102.
101. VOOGT W., SONNEVELD C. (1997). Nutrient management in closed growing system for greenhouse production. In *Plant*, 83-102.
102. YANG X., SHORT T., FOX R., BAUERLE W. (1990). Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of greenhouse cucumber crop. *Agric. Forest Meteor.* 5, 197-209.
103. ZERCHE S. (2000). Nitrogen demand of cut chrysanthemum in relation to shoot height and solar radiation. *Acta Hort.* 511, 99-106.

RIASSUNTO

L'elemento tecnico più importante nella coltivazione fuori suolo è l'alimentazione idrica e nutritiva della coltura effettuata attraverso la fertirrigazione, cioè la somministrazione congiunta di acqua e sali minerali. Lo studio delle relazioni tra le condizioni ambientali e la crescita, l'assorbimento idrico e nutritivo della coltura può consentire lo sviluppo di modelli matematici da implementare in software di gestione, anche relativamente semplici, o di simulazione da utilizzare, ad esempio, in fase di pianificazione produttiva a livello aziendale o addirittura di comprensorio produttivo. Lo studio condotto per la tesi ha avuto come obiettivo principale la modellizzazione dei consumi di acqua e di elementi nutritivi di una coltura su substrato (lana di roccia) a ciclo chiuso di gerbera, condotta simulando la disponibilità di acqua irrigua di diversa qualità (alta o bassa salinità). La scelta di questa specie è stata motivata dalla sua importanza commerciale e dalla sua relativa sensibilità allo stress salino. Più in particolare, per l'assorbimento minerale sono stati considerati diversi modelli, di tipo meccanicistico oppure empirico-statistici (modelli di regressione), con il tasso di crescita e di consumo di acqua tra le variabili indipendenti. Per l'assorbimento idrico, invece, è stato calibrato e validato il modello di traspirazione proposto da Baille et al. (1994), che è una semplificazione del modello fisico di Penman-Monteith e che è stato testato in numerose specie (cetriolo, Medrano et al., 2005; zuccino, Rouphael e Colla G., 2004; rosa, Kittas et al., 1999; Suay et al., 2003; pomodoro, Boulard e Jeema., 1993), compresa la gerbera, oggetto di uno studio di Marfà et al. (2000) pur meno dettagliato di quello riportato in questa tesi. Se soddisfacenti sono stati i risultati relativi alla calibrazione e validazione del modello della traspirazione, mentre i modelli di nutrizione minerale, di varia natura, hanno dimostrato una minore capacità di simulare (quindi, prevedere) il tasso (settimanale) di assorbimento di elementi minerali. Il fatto che, dal punto di vista statistico, i risultati migliori siano stati ottenuti considerando, in un modello di regressione, il tasso di crescita e di assorbimento idrico (peraltro, positivamente correlati tra di loro), suggerisce un'ipotesi per un ulteriore esperimento: verificare se quest'ultimo influenza la nutrizione minerale attraverso un genuino effetto fisiologico, legato al flusso di massa a livello radicale, oppure attraverso un effetto indiretto, cioè condizionando il rifornimento minerale, come in effetti è stato in questo studio, in cui il consumo idrico della coltura era automaticamente compensato aggiungendo soluzione nutritiva completa al sistema idroponico.