

## Strategie di irrigazione ed efficienza d'uso dell'acqua nelle colture ortive da pieno campo

Giancarlo Barbieri\* e Stefania De Pascale

Dipartimento di Ingegneria agraria e Agronomia del territorio, Università di Napoli "Federico II", via Università 100, Portici (NA)

Ricezione: 17 novembre 2009; Accettazione: 18 dicembre 2009

### Irrigation strategies and water use efficiency of vegetable crops

**Abstract.** In commercial vegetables production, irrigation is crucial to achieve the crop return, both in term of yield quantity and quality. Therefore, irrigation of vegetable crops is often performed inefficiently since farmers tend to over-irrigate crops. The difficulty in estimating the vegetable crops water requirements, the different irrigation systems utilized, the large number of plant species/cultivars, and the peculiar production conditions (small-scale farm, high-intensive cultivation methods) are other variables that contribute to the such inefficiency. Many agronomic, engineering, and management technologies are discussed to improve crop performances and to reduce non-productive water use in irrigated agriculture, which in turn lead to higher WUE. Generally speaking, to maximize WUE, it is necessary both to conserve water and to promote maximal crop growth. The former requires minimizing losses through runoff, seepage, evaporation and transpiration by weeds. The latter task includes planting high-yielding crops/cultivars well adapted to the local soil and climate. It also includes optimizing growing conditions by proper timing and performance of planting and harvesting, tillage, fertilization and pest control. New precision irrigation technologies for scheduling irrigation and up-to-dated irrigation systems would enable growers to apply water and agrochemicals more precisely and site specifically to match soil and plant status and needs as estimated by wireless sensors.

**Key words:** Evapotranspiration, crop water requirements, irrigation water efficiency, irrigation method.

---

### Introduzione

La gestione delle risorse idriche è caratterizzata da una crescente complessità, in quanto sulla risorsa acqua convergono interessi e competenze più diversi: accanto ai tradizionali impieghi (usi civili, industriali,

agricoli) si sono aggiunti altri relativamente nuovi legati alla generale fruizione dell'ambiente. Questa complessità richiede una revisione delle strategie di utilizzazione delle acque, alla luce anche di recenti disposizioni legislative rivolte ad assicurare la destinazione più adeguata (privilegiandone alcune, es. l'impiego potabile), la tutela quantitativa e qualitativa delle risorse, la tutela idraulica del territorio.

La competizione tra le diverse destinazioni della risorsa acqua aumenterà e tutti gli utilizzatori sono chiamati ad attuare interventi di miglioramento delle efficienze di uso, in prima linea l'agricoltura, utilizzatore dominante, stante anche la percezione generale che l'uso dell'acqua in agricoltura è estremamente dispendioso ed altamente inefficiente (Hsiao *et al.*, 2007). Per l'agricoltura irrigua Wallace e Gregory (2002) hanno stimato che solo il 13-18% della risorsa idrica applicata è effettivamente usato dalle colture.

Nell'approccio agronomico il termine di efficienza di utilizzazione dell'acqua (WUE) è improprio, rappresentando piuttosto un indice di trasformazione e non di efficienza vera e propria, trattandosi di un rapporto tra grandezze non omogenee, solitamente rapporto tra biomassa ed acqua traspirata (o evapotraspirata). L'efficienza d'uso dell'acqua è quindi un soggetto complesso che attraversa una serie di discipline, dalla fisiologia vegetale all'agronomia, all'ingegneria ecc. Ogni settore si è concentrato su un particolare aspetto del processo di produzione, con particolari differenze in termini di "efficienza": così si parla di efficienza di traspirazione per i fisiologi, di efficienza del trasporto dell'acqua e nella rete aziendale per gli ingegneri, di efficienza produttiva dell'acqua, che interessa il complesso suolo-pianta-atmosfera, per gli agronomi (Hsiao *et al.*, 2007). Anche la scala spazio-temporale su cui il processo è misurato, presenta unità non facilmente comparabili: i fisiologi si concentrano a livello di foglia-pianta e la loro unità è  $\mu\text{g}$  o  $\text{mg}$  di  $\text{CO}_2$  assorbito per  $\text{g}$  di acqua traspirata e l'unità di tempo è il secondo; gli agronomi studiano la WUE in termini di  $\text{kg}$  di biomassa prodotta (o di resa agronomica) per  $\text{m}^3$  di acqua applicato e la scala temporale è

---

\* giancarlo.barbieri@unina.it

il giorno, lo stadio di crescita o il ciclo colturale; su scala aziendale l'efficienza di applicazione dell'acqua è misurata in m<sup>3</sup> per m<sup>3</sup> con scala temporale di stagione o di anno.

### Efficienza d'uso dell'acqua delle colture ortive

Il tema dell'efficienza di uso dell'acqua nelle colture ortive non può prescindere da alcune considerazioni. Innanzitutto, stime sui fabbisogni irrigui delle colture ortive risultano estremamente aleatorie: il consumo di acqua per l'Orticoltura può essere approssimativamente stimato tra 1,8 e 2,2 miliardi di m<sup>3</sup> (6% dei consumi destinati all'agricoltura). L'incertezza è dovuta sia alla molteplicità delle specie e degli ambienti pedo-climatici, sia ai molti usi dell'acqua nel processo produttivo orticolo (emergenza, trapianto, sviluppo iniziale; irrigazione climatizzante, fertirrigazione, in post-raccolta per il lavaggio e la preparazione dei prodotti ecc.), oltre che in risposta alle esigenze di alimentazione idrica. Vanno poi sottolineate l'assenza di risultati sperimentali sui consumi irrigui per molte specie ortive e la relativa stasi nella ricerca irrigua, che in questi ultimi anni si è peraltro indirizzata verso tematiche di carattere più teorico, dopo l'intensa attività sui consumi idrici a partire dal dopoguerra e fino ai passati anni '80. Un'altra considerazione riguarda il fatto che generalmente le ortive sono colture con valore economico e produttività per unità di acqua più elevati rispetto alle colture erbacee da pieno campo e che le strategie di impiego dell'acqua in orticoltura vanno confrontate con alcune caratteristiche imprescindibili, rappresentate non solo dalla quantità ma anche dalla qualità della produzione orticola, dalla ridotta dimensione di molte aziende orticole, dall'elevato grado di intensità del processo produttivo, tutti fattori che non possono essere trascurati parlando di efficienza (o "inefficienza") di uso dell'acqua in questo comparto.

A livello di pianta, il rapporto tra la sua biomassa e l'acqua evapotraspirata viene usato per definire l'efficienza d'uso dell'acqua (WUE) ed è considerato come una misura della sua efficienza nell'utilizzare l'acqua.

A livello di coltura, WUE è calcolato come l'efficienza di trasformazione dell'acqua attraverso il sistema di coltivazione applicato secondo la formula:

$$WUE = \frac{\text{Resa}}{W} = \frac{\text{Biomassa} \times HI}{E + T + P} = \frac{\text{Biomassa} \times HI}{ET + P}$$

dove W=volume totale di acqua disponibile (pioggia+irrigazione), T=traspirazione, E=evaporazione dal terreno, P=perdite di acqua a qualsiasi livello del

processo, HI=*harvest index*. Per le difficoltà operative di separare le componenti E e T, esse sono normalmente conglobate nel termine Evapotraspirazione (ET).

Le tecniche agronomiche orientate ad aumentare la resa (numeratore del rapporto) tendono a migliorare la WUE, a parità di perdite. Analogamente, a parità di produzione qualsiasi tecnica agronomica volta a ridurre il denominatore del rapporto a livello di metodo irriguo, di campo o di pianta aumenta la WUE. Relativamente all'incremento di resa, gli aumenti conseguiti nelle attuali produzioni possono essere in larga misura ascritti al maggiore *harvest index* piuttosto che all'aumento di produzione di sostanza secca in quanto tale: dove la sostanza secca è aumentata questo è stato raggiunto quasi sempre grazie ad una maggiore grandezza e durata degli apparati fotosintetizzanti, piuttosto che ad una maggiore efficienza fotosintetica per unità di area fogliare.

Gli sforzi compiuti dal miglioramento genetico negli ultimi cinquant'anni sono riusciti a mettere a disposizione cultivar più produttive, ma parallelamente all'incremento delle rese sono aumentati anche i tassi dei consumi idrici. Infatti, l'accrescimento e la resa sono linearmente correlati ai volumi di acqua traspirata dalla coltura durante la stagione di crescita (Lu *et al.*, 1998; Bassil e Kaffka, 2002; Serraj e Sinclair, 2002). Una semplice analisi eseguita su dati disponibili in letteratura (Hutmacher *et al.*, 1990; Smittle *et al.*, 1990a; Smittle *et al.* 1990b; Smittle *et al.*, 1994) rivela che la resa commerciale delle colture ortive aumenta linearmente all'aumentare dell'acqua somministrata indipendentemente da specie/cultivar, organi edibili, anno e località (fig. 1) e che la WUE è relativamente costante all'interno di un ampio intervallo di volume irriguo, sotto ogni condizione agronomica, fino al raggiungimento del regime di saturazione oltre il quale gli incrementi di resa tendono ad annullarsi (fig. 2).

Ci sono tre spiegazioni per la relazione lineare tra la resa delle colture e il consumo di acqua: (1) l'anidride carbonica ed il vapor d'acqua condividono un percorso comune di diffusione tra l'interno della foglia e l'atmosfera e, di conseguenza, gli stomi devono essere aperti e l'acqua traspirata, affinché le piante assimilino l'anidride carbonica; (2) sia la perdita d'acqua che la fotosintesi sono dipendenti dall'assorbimento della luce (Amthor, 1999); (3) la perdita d'acqua per evaporazione raffredda significativamente le foglie e la *canopy*, alleviando lo stress da alta temperatura (Lu *et al.*, 1998). In altre parole, gli stessi adattamenti che favoriscono la crescita veloce di piante (grandi superfici fogliari, brevi percorsi di diffusione

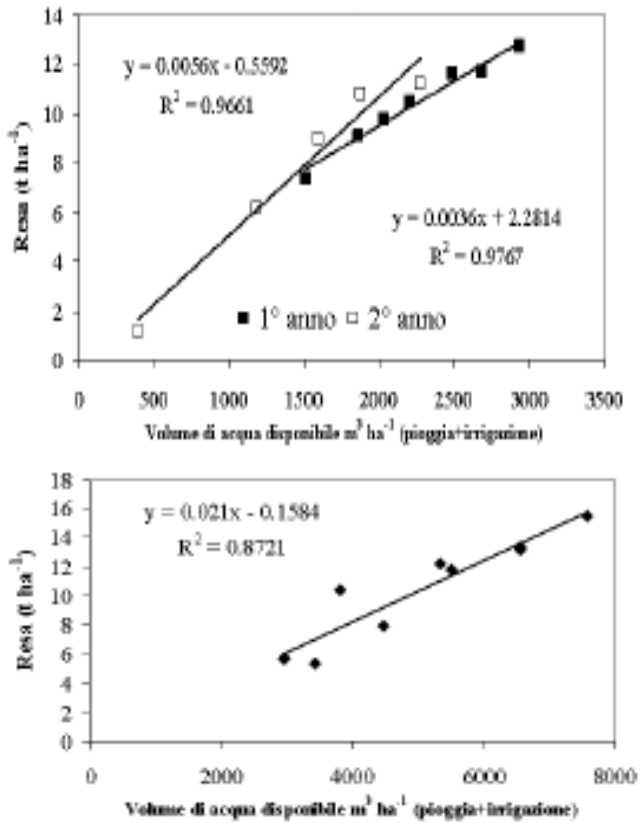


Fig. 1 - Regressione lineare resa-volume di acqua disponibile per fagiolino (in alto) e carota (in basso). Rielaborato da Smittle *et al.* 1990a e Hutmacher *et al.*, 1990, rispettivamente.  
 Fig. 1 - Linear regression between yield and water applied for snapbean (top) and carrot (down). Adapted from Smittle *et al.* 1990a and Hutmacher *et al.*, 1990, respectively.

dall'interno delle foglie all'atmosfera ed alte conduttanze stomatiche) favoriscono anche le perdite d'acqua.

Miglioramenti della WUE comprendono l'opportuna scelta di specie, cultivar ed ambienti, nonché l'attuazione di strategie "temporali" (calendario culturale) (fig. 3), che consentano di svolgere il ciclo o parte di esso durante periodi dell'anno in cui le condizioni meteorologiche (temperatura, umidità dell'aria) siano tali da ridurre il deficit di pressione di vapore, contribuendo ad aumentare la WUE. Ciò vale in particolare per le specie a ciclo invernale e primaverile: a parità di condizioni, infatti, una maggiore efficienza agronomica si ha nei mesi invernali rispetto a quelli estivi. L'obiettivo è quello di massimizzare la superficie coltivata durante il periodo di minore domanda di acqua e / o durante il periodo con maggiore probabilità di precipitazioni con un effetto benefico sulla WUE (Hsiao *et al.*, 2007, Hatfield *et al.*, 2001; Hobbs e Gupta, 2002).

Anche in questo settore è da attendersi un intervento della ricerca nel settore della genetica con l'obiettivo di modificare i cicli: anche se l'efficienza agrono-

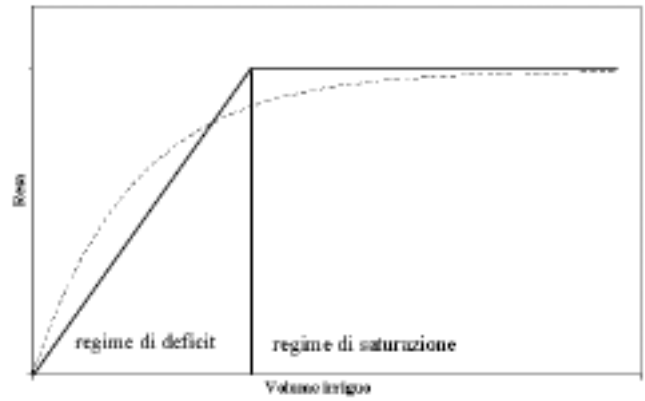


Fig. 2 - Modello semplificato bilineare della curva di risposta all'irrigazione. La WUE, è costante a fino al raggiungimento del regime di saturazione oltre il quale gli incrementi di resa si annullano.

Fig. 2 - Simplified bilinear model of the response curve of irrigation. WUE is constant up to the regime of saturation beyond which the yield increases tend to zero.

mica rimanesse invariata, uno spostamento dell'attività fisiologica nei mesi più umidi consentirebbe di ridurre i fabbisogni irrigui, liberando risorse per le colture estive. L'efficienza d'uso dell'acqua è, però un carattere complesso che non può essere facilmente migliorato tramite la *breeding* tradizionale e/o la stessa ingegneria genetica (Passioura, 2006). Anche se l'inserimento di specifici tratti in programmi di miglioramento genetico è avvenuto raramente, la WUE è aumentata soprattutto per un più alto *harvest index* e per più efficienti metodi di irrigazione piuttosto che per un aumento della produzione di frutti per unità di acqua consumata (Passioura, 2006). Negli ultimi 40 anni, per esempio, durante il miglioramento genetico del pomodoro in California, i tassi di ET si sono mantenuti costanti attorno ad una media di 650 mm, ma le rese sono aumentate più del 50% dal 1970 ad oggi, con oltre 80 t ha<sup>-1</sup> (Hanson e May, 2006).

Nell'orticoltura irrigua alcune operazioni colturali sono principalmente dirette alla riduzione dell'evapo-

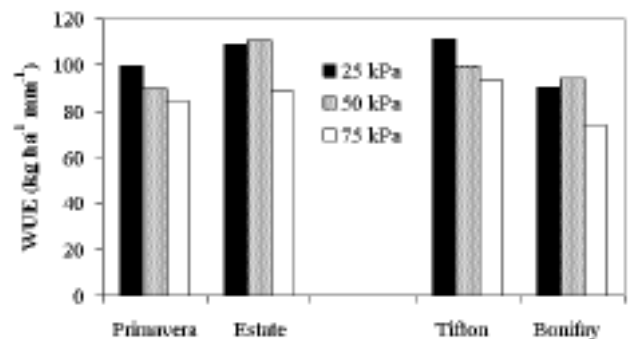


Fig. 3 - Efficienza d'uso dell'acqua (WUE) con irrigazione a diversi limiti di intervento in peperone in due cicli e due tipi di terreno. Rielaborato da Smittle *et al.*, 1994.

Fig. 3 - Water use efficiency (WUE) of pepper as affected by growing season, soil and irrigation regime. Adapted from Smittle *et al.*, 1994.

razione dal terreno (non coperto da vegetazione), che è a tutti gli effetti una componente della evapotraspirazione persa ai fini della produzione.

Una rapida e uniforme copertura del suolo da parte delle piante attraverso il trapianto e la scelta di corrette densità e geometrie di impianto possono rendere minime tali perdite di acqua (Hsiao *et al.*, 2007; Leskovar *et al.*, 2001). Nel pomodoro, alla riduzione della distanza tra le file da 70 a 50 e 35 cm corrisponde un aumento della resa impiegando l'irrigazione a goccia (Yohannes e Tadesse, 1998). Allo stesso modo, una più ridotta distanza tra le file con una densità di semina più elevata, in combinazione con un regime irriguo ridotto, fornisce una WUE maggiore ed una resa economica più alta nel fagiolo di Lima (Sirait *et al.*, 1994).

Il significato ed il valore della pacciamatura nella produzione di ortive sono ormai ben definiti e consolidati. La pacciamatura con film plastici è utilizzata per modificare le condizioni ambientali, il controllo delle infestanti e migliorare le rese, grazie all'aumento della temperatura del terreno, alla riduzione della lisciviazione dei nutrienti ed al mantenimento dell'umidità del terreno, che possono favorire una rapida ed uniforme copertura del terreno da parte delle colture. Anche se la pacciamatura con film plastici può risultare in un più complesso uso di acqua, fertilizzanti e lavoro, la fertilizzazione e la gestione dell'acqua effettuate tramite sistemi a goccia e la fertirrigazione possono aumentare le rese delle colture ortive pacciamate (Roberts e Anderson, 1994). È stato dimostrato inoltre che aumentare la disponibilità dei nutrienti del terreno ha un effetto positivo sulla WUE e nel caso di colture ortive la fertirrigazione è spesso raccomandata (Hatfield *et al.* 2001). Tra tutte le diverse tecniche di fertilizzazione, la fertirrigazione, infatti, ha dimostrato di essere una delle più efficaci per mantenere un corretto equilibrio di nutrienti, massimizzare le rese e ridurre le perdite di acqua e nutrienti (Hartz e Hochmuth, 1996; Hatfield *et al.*, 2001), anche se sono stati segnalati risultati contrastanti sugli effetti della fertirrigazione sulla efficienza d'uso dell'acqua e dell'azoto (Salo *et al.*, 2002). D'altro canto, in condizioni di deficit idrico l'efficacia dei fertilizzanti azotati minerali è ridotta a causa della ridotta mineralizzazione dell'azoto organico del terreno e difficoltà di trasporto dell'N alle radici (De Pascale *et al.*, 1998).

Anche le misure di controllo delle infestanti possono aiutare a migliorare la WUE eliminando la competizione per i nutrienti e l'acqua nella zona interessata dagli apparati radicali: Nelson e Thoreson (1981) hanno rilevato che le infestanti (58-311 piante m<sup>-2</sup>) in una coltura di patata possono ridurre la resa in tuberi

fino al 54% con una conseguente penalizzazione delle WUE.

Infine, anche se è stato dimostrato che gli antitranspiranti sotto la maggior parte delle condizioni agronomiche influenzano la fotosintesi ed inevitabilmente riducono la resa, la loro applicazione può avere un effetto positivo generale sulla performance delle colture quando utilizzati per alleviare lo stress idrico delle colture durante fasi transitorie sensibili (Nitzsche *et al.*, 1991; Gu *et al.* 1996).

## Efficienza dell'irrigazione

Le domande chiave per la gestione dell'acqua di irrigazione sono: quanta acqua è necessaria per soddisfare i fabbisogni delle colture, quando l'irrigazione è necessaria, e come somministrare l'acqua alle colture (ad esempio, la scelta del metodo irriguo).

### Quanta acqua

La prima questione è stata ampiamente studiata concentrandosi sulle curve di risposta della resa all'aumentare dei volumi applicati che, in generale, possono essere descritte da un modello di tipo bilineare (fig. 2) o asintotico (fig. 4). Molti studi sono stati effettuati per le colture da pieno campo, e numerosi dati sono disponibili anche per il fabbisogno irriguo

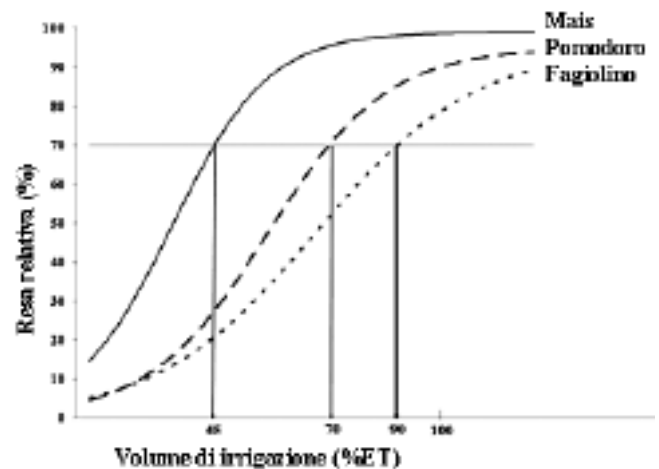


Fig. 4 - Curve generali di risposta al volume di irrigazione (come % di restituzione della ET). Per colture ad alta produttività marginale (mais), il 70% della resa massima si ottiene con un volume pari al 45% del fabbisogno evapotraspirativo. Per colture a bassa produttività marginale (pomodoro, fagiolino) la stessa resa è ottenuta con volumi irrigui tra il 70 e 90% della ET (Barbieri, 1995).

*Fig. 4 - The general dose-response curve of crop yield to irrigation. For high marginal productivity crops such as maize, 70% of the maximum yield is obtained with seasonal water supply corresponding to 45% of the full evapotranspiration requirements, while for low marginal productivity crops (tomato, snapbean) the same yield value is obtained with irrigation volumes varying between 70 and 90% of the full ET (Barbieri, 1995).*

delle principali colture ortive in piena aria (Tognoni *et al.*, 2002).

Sul quanto irrigare, in termini generali la risposta di una coltura al volume stagionale di irrigazione segue una curva a concavità verso il basso in cui tre possibili alternative possono presentarsi:

- massimizzazione della resa (punto di massimo della curva), raggiunta attraverso la restituzione dell'evapotraspirazione massima (ET<sub>m</sub>), nel caso di disponibilità non limitata di acqua di buona qualità e/o di suo impiego su piccola superficie;
- massimizzazione dell'efficienza di utilizzazione dell'acqua, cioè l'ottimizzazione della resa per unità di volume di acqua applicata; questo aspetto è particolarmente importante nelle zone aride dove l'acqua è scarsa e ha un costo elevato;
- massimizzazione del reddito dell'agricoltore; questo è l'obiettivo dell'imprenditore e coincide con la massimizzazione del valore economico della resa per unità di superficie (massima differenza tra reddito lordo e costi).

Nel caso delle colture ortive questa condizione di massimo reddito è molto vicina alla condizione di massima evapotraspirazione e rappresenta un vincolo: la resa di queste colture tende a diminuire in modo consistente dalle condizioni idriche ottimali (quelle che soddisfano le esigenze evapotraspiratorie) ad una disponibilità idrica gradualmente decrescente. Esprimendo l'andamento delle rese (R) come % della resa massima ottenuta in funzione dei volumi stagionali di irrigazione V (in % dell'ET<sub>m</sub>), la produttività marginale dell'acqua  $\Delta R/\Delta V$ , dopo un certo volume, tende a diminuire al crescere del volume stagionale (produttività marginale via via decrescente): per colture con alta produttività marginale come il mais, il 70% della resa massima è ottenuto con volumi stagionali di irrigazione corrispondenti al 45% dell'ET<sub>m</sub>, mentre per colture a bassa produttività marginale (pomodoro, peperone, fagiolino) lo stesso valore relativo di resa (70%) è ottenuto con volumi variabili tra il 70 ed il 90% dell'ET<sub>m</sub> (fig. 4).

La competizione per i diversi usi dell'acqua spesso implica che l'acqua per l'irrigazione non è sempre disponibile nella quantità e/o qualità richieste. Pertanto, gli agricoltori devono spesso gestire l'irrigazione in condizioni di moderata o grave carenza. La ripartizione di limitate risorse idriche è un elemento centrale delle decisioni di gestione irrigua a tutti i livelli (campo, azienda, distretto, bacino). La gestione irrigua comporta la distribuzione dell'acqua e degli altri input correlati nel processo produttivo, in modo che i risultati economici siano potenziati rispetto alle risorse idriche disponibili.

L'applicazione di volumi irrigui al di sotto del pieno soddisfacimento della ET (*deficit irrigation*) è uno strumento importante per aumentare l'efficienza dell'irrigazione: l'obiettivo è quello di ridurre l'ET con limitati effetti negativi sulle rese. Questa strategia di limitata irrigazione comporta in ogni caso un graduale aumento dello stress idrico delle colture, che deriva da una pur uniforme applicazione dei ridotti volumi (Feres e Soriano, 2007). Essa richiede inoltre un certo grado di flessibilità nella gestione aziendale degli altri fattori culturali, oltre che dei volumi, della frequenza e della durata dell'intervento irriguo per allocare con successo i limitati volumi di acqua. Questa pratica è sempre più applicata su colture arboree da frutto (Evans e Sadler, 2008).

Per quanto riguarda le colture ortive, in genere, la resa diminuisce in maniera significativa a seguito della mancanza di acqua sufficiente a soddisfare le esigenze evapotraspirative e, a causa degli effetti negativi della limitata irrigazione sulla qualità delle colture ortive, la resa commerciale diminuisce ancor più rapidamente. Le colture ortive sono più (es. fagiolino) o meno (es. pomodoro) sensibili alla restrizione dei volumi con lievi differenze tra le cultivar della stessa coltura (FAO, 1987). Strategie di *deficit irrigation* richiedono comunque una valutazione accurata della tolleranza nelle diverse fasi di crescita delle colture ed un'attenta gestione delle risorse idriche supportata da avanzati e flessibili sistemi di irrigazione e di consegna dell'acqua (Upchurch *et al.*, 2004; Evans e Sadler, 2008).

In ambienti semi-aridi, un aspetto da considerare nella gestione irrigua è rappresentato dal fabbisogno di lisciviazione (la quantità di acqua necessaria per allontanare l'eccesso di sali al di sotto della zona interessata dalle radici) che può modificare in maniera significativa l'efficienza dell'irrigazione nei sistemi orticoli (fig. 5). In linea generale, le colture ortive sono più sensibili alla salinità rispetto ad altre colture e la scarsa qualità delle acque di irrigazione può influire negativamente sulla resa e sulla qualità delle colture ortive (Maas e Grattan, 1999), anche se su alcune specie (es. pomodoro, melone) l'applicazione di moderata salinità può avere risultati positivi sia in termini di qualità e redditività delle colture (De Pascale *et al.*, 2001).

#### *Quando irrigare*

Per quanto riguarda i metodi di programmazione dell'irrigazione, cioè per rispondere alla domanda "quando l'irrigazione è necessaria?", un certo numero di criteri sono stati proposti e testati in diverse ricerche e possono essere divisi in quattro gruppi: a) carat-

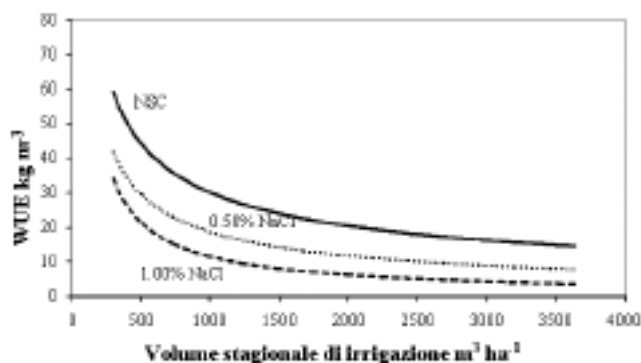


Fig. 5 - Andamento della WUE in cavolo cappuccio in funzione del volume stagionale di irrigazione a diversi livelli di salinità dell'acqua di irrigazione (0 (NSC), 0,5% e 1% NaCl). Rielaborato da Maggio *et al.*, 2005.

Fig. 5 - Water Use Efficiency of cabbage as affected by the salinity of irrigation water [0 (NSC), 0.5 and 1% NaCl concentration in the irrigation water]. Adapted from Maggio *et al.*, 2005.

teristiche del terreno (dalla semplice osservazione visiva del terreno ai tensiometri, blocchetti di resistività, sonda neutronica); b) caratteristiche delle piante (dall'osservazione visiva di sintomi di stress al contenuto idrico negli organi delle piante, all'apertura stomatica, alla misura dei potenziali idrici fogliari, alla risposta spettrale delle colture principalmente nell'infrarosso); c) caratteristiche micrometeorologiche (misure di evaporazione da evaporimetri e atmometri; stime della evapotraspirazione; modelli matematici basati su variabili meteorologiche); d) sistemi analogici (analisi di specie più resistenti alla siccità; analisi delle stesse specie ma allevate in condizioni che le rendono più soggette agli effetti della siccità).

Negli ultimi anni l'approccio si è spostato dall'analisi dello stato idrico del suolo (tensiometri, blocchetti di resistività, metodo gravimetrico) all'impiego di misure di temperatura della superficie vegetale (infrarosso, microonde) e di misure di tipo fisiologico (potenziali fogliari, apertura stomatica, grado rifratto-

metrico del liquido cellulare). Dalla introduzione dell'elettronica e dei personal computer anche in agricoltura, l'interesse verso i criteri di stress idrico è stato stimolato ulteriormente, in particolare nella direzione della misura di parametri meteo e nell'impiego dell'informatica per la stima dell'evapotraspirazione. Ancora più di recente, grazie alle innovazioni modellistiche, informatiche e telematiche, sono stati messi a punto alcuni sistemi di assistenza irrigua basati su un approccio agrometeorologico in grado di monitorare in continuo i parametri micrometeorologici a scopi previsionali e di consentire un efficiente scambio di informazioni tra gli utenti (a livello aziendale) ed i Servizi di assistenza. I vantaggi di questo approccio sono la sua ragionevole accuratezza, specifici servizi di supporto per i coltivatori e la capacità di essere completamente automatizzato (Balendonck *et al.*, 2008). La strategia di programmazione dell'irrigazione è in grado di incidere in modo marcato sui consumi irrigui: metodi per controllare il livello di stress idrico delle piante (utilizzando tensiometri, blocchetti di Bouyoucos, calcolo di un bilancio idrico) possono ridurre i volumi distribuiti fino al 53% (tab. 1).

#### Come irrigare

Rispondendo alla terza domanda (come somministrare l'acqua alle colture), l'efficienza misurata può variare da 25-50% dei sistemi di irrigazione da solchi al 50-70% dei sistemi ad aspersione, all'80-90% per i sistemi a microportate di irrigazione (goccia e similari), con ovvi riflessi anche sulla WUE (fig. 6).

L'irrigazione a microportate di erogazione è sempre più utilizzata nell'orticoltura di piena aria e in serra e nuovi sistemi sono stati sviluppati e attuati. Valori maggiori di rese, di WUE e di qualità dei prodotti in diverse colture ortive sono stati segnalati per i sistemi di irrigazione *a goccia*, rispetto ai convenzionali metodi di irrigazione, come nel caso della patata

Tab. 1 - Efficienza relativa (% rispetto all'irrigazione con intervallo fisso e volume costante) e riduzione percentuale dei volumi stagionali applicando diverse strategie di intervento.

Tab. 1 - Relative efficiency (%) and reduction of the irrigation volume (%) of different irrigation scheduling strategies compared to the fix interval and volume approach.

Criterio di intervento	Efficienza Relativa	Riduzione percentuale dei volumi stagionali
intervallo fisso e volume costante	100	0
fisiologico (fenofasi)	115	13
climatico (dati storici)	130	23
pedologico (tensiometri)	140	29
pedologico (blocchetti di Bouyoucos)	150	33
climatico (dati misurati)	160	38
combinato (bilancio idrico)	170	41
fisiologico (camera a pressione)	175	43
combinato (evaporimetro + tensiometro)	215	53

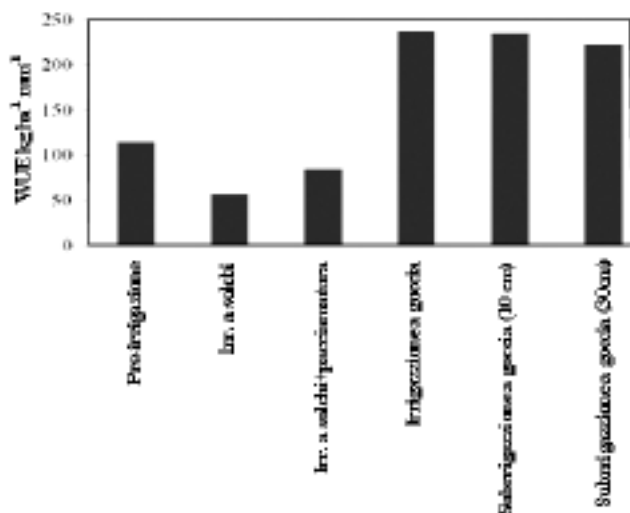


Fig. 6 - WUE di melone allevato con diversi metodi irrigui. Rielaborato da Leskovar *et al.*, 2001.

Fig. 6 - Water use efficiency (WUE) of muskmelon as affected by irrigation method. Adapted from Leskovar *et al.*, 2001.

(Unlu *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2005), cetrioli (Yuan *et al.*, 2006), peperone (Antony e Singandhupe, 2004; Sezen *et al.*, 2006), cipolla (Al-Jamal *et al.*, 2001; Rajput e Patel, 2006), cavolo (Tiwari *et al.*, 2003), melanzana (Aujla *et al.*, 2006) e cocomero (Srinivas *et al.*, 1989).

La subirrigazione a goccia, da novità impiegata nella ricerca, è ormai diventata un metodo irriguo accettato e diffuso nelle colture arboree ed ortive (Lamm e Camp, 2007). I risultati ottenuti con questo metodo in lattuga (Thompson e Doerge, 1995), pomodoro, mais dolce e cantalupo (Ayars *et al.*, 1999) hanno dimostrato significativi aumenti di resa e di WUE in tutte le colture. La subirrigazione a goccia può aumentare la WUE in condizioni saline in ambiente semi-arido grazie all'aumento di resa (Ayars *et al.*, 1999). Tuttavia, la scelta della tecnologia di irrigazione è altamente loco-specifica, riflettendo fattori specifici della località (caratteristiche del terreno e del clima), della tecnica (fornitura di acqua e caratteristiche delle colture) e di mercato (prezzi dei prodotti, costi di energia, offerta di lavoro) (Wichelns, 2007). La subirrigazione a goccia è potenzialmente in grado di fornire un ambiente più idoneo per la crescita ottimale della coltura in termini di acqua, ma problemi possono presentarsi nell'impianto delle colture, nella gestione della salinità, nella redistribuzione dell'acqua nel suolo e nell'applicazione di alcuni prodotti agrochimici (Lamm e Camp, 2007).

Nell'ambito di ciascun metodo è possibile prevedere interventi per migliorare l'efficienza distributiva del metodo. Per esempio, nel caso dell'infiltrazione laterale da solchi sono state proposte modifiche e miglioramenti che hanno riguardato la derivazione

dell'acqua dai canali mediante l'impiego di sifoni o di tubi finestrati (*watergates, gated pipes*), che richiedono un minimo di pressione e si prestano anche ad un minimo di automazione, il recupero dell'acqua di ruscellamento, le portate ed i tempi del flusso dell'acqua nei solchi (*cutback streams*, irrigazione intermittente o *surge irrigation*) mediante automatismi più o meno semplici a funzionamento idraulico o elettromeccanico.

L'evoluzione di questi metodi nel senso di una certa automazione e di una più elevata efficienza (anche dell'85%) può essere considerata motivo di riconsiderazione nella media e grande azienda, con possibili risparmi energetici e migliore risposta agronomica. Anche la tecnica a solchi alternati sembra essere molto promettente (Kang *et al.*, 2000).

In molti casi, l'efficacia di tecniche irrigue perfezionate può essere incrementata applicandole in combinazione corretta con altre pratiche agronomiche, come la gestione della fertilizzazione, con una riduzione dell'impatto ambientale. I risultati ottenuti da Aujla *et al.* (2006) su melanzana irrigata a goccia suggeriscono che la determinazione di differenti volumi irrigui a differenti livelli di N è essenziale per ottimizzare la combinazione di N ed acqua per ottenere non solo la resa massima ma anche la migliore efficienza d'uso dell'acqua e dell'azoto (fig. 7). Tecnologie

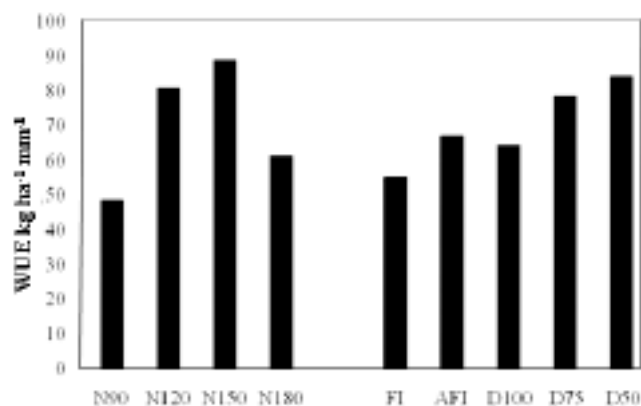


Fig. 7 - WUE in melanzana allevata a diverse dosi di azoto e condizioni di irrigazione. Rielaborato da Aujla *et al.*, 2006. (FI= irrigazione a solchi; AFI= irrigazione a solchi alternati; D100=irrigazione a goccia con restituzione del 100% di evaporazione; D75= irrigazione a goccia con restituzione del 75% di evaporazione; D50= irrigazione a goccia con restituzione del 50% di evaporazione; N90= 90 kg N ha<sup>-1</sup>; N120= 120 kg N ha<sup>-1</sup>; N150= 150 kg N ha<sup>-1</sup>; N180= 180 kg N ha<sup>-1</sup>).

Fig. 7 - Effects of different quantities of nitrogen (N) and water applied through drip and furrow irrigation on fruit yield and water use efficiency (WUE) of eggplant. Adapted from Aujla *et al.*, 2006. (FI= Furrow irrigation; AFI= Alternate furrow irrigation; D100=Drip irrigation 100% cumulative pan evaporation; D75= Drip irrigation 75% cumulative pan evaporation; D50= Drip irrigation 50% cumulative pan evaporation; N90= 90 kg N ha<sup>-1</sup>; N120= 120 kg N ha<sup>-1</sup>; N150= 150 kg N ha<sup>-1</sup>; N180= 180 kg N ha<sup>-1</sup>).

emergenti dell'irrigazione di precisione supportate da reti di sensori *wireless* potranno consentire ai coltivatori ad applicare acqua e prodotti chimici in modo più specifico ed accurato e per sincronizzare l'intervento irriguo con la domanda di acqua delle colture (Evans e Sadler, 2008).

## Conclusioni

Un aumento della WUE è di fondamentale importanza, poiché l'agricoltura nel suo complesso sarà chiamata a rispondere ad un crescente aumento della produzione a fronte di una minore disponibilità di risorse idriche di qualità con minori risorse disponibili.

Finora sono stati ottenuti limitati successi attraverso l'approccio genetico nel modificare caratteri complessi come l'efficienza di traspirazione, e alcuni autori non prevedono un rapido e facile raggiungimento di questo obiettivo con la genomica funzionale. Alcuni motivi sono legati al fatto che i meccanismi biochimici e le risposte fisiologiche delle piante in condizioni di stress idrico devono ancora essere pienamente compresi.

L'approfondimento delle conoscenze sulla ecofisiologia dello stress ha aiutato a migliorare la WUE a livello pianta ed a ridurre l'impatto ambientale del processo di produzione.

Una gestione efficiente dell'irrigazione, per ottimizzare lo stato idrico del suolo e delle piante, può essere realizzata con la programmazione della frequenza degli interventi irrigui; il controllo dei volumi irrigui applicati alla zona radicale; l'attuazione del controllo della salinità del terreno.

L'adozione di metodi irrigui a maggiore efficienza e di criteri di programmazione dell'intervento irriguo (nel breve periodo) e il miglioramento dell'efficacia agronomica dell'utilizzazione sono le componenti per una corretta gestione irrigua con notevoli possibilità di risparmio della risorsa irrigua anche in Orticoltura.

Rilevanti contributi derivano anche da adeguate pratiche agronomiche: la scelta di idonee colture/cultivar, l'attuazione di strategie di localizzazione delle colture e dei relativi calendari, un aggiornato approccio alla fertilizzazione, alla gestione del suolo, al controllo delle infestanti.

## Riassunto

In orticoltura, l'irrigazione è essenziale per ottenere il ritorno economico delle colture, in termini di quantità e qualità della produzione. L'irrigazione è spesso eseguita in modo inefficiente, per la tendenza degli agricoltori ad impiegare volumi di irrigazione

superiori alle esigenze delle colture. La difficoltà di stimare il fabbisogno irriguo delle colture ortive, i diversi sistemi di irrigazione utilizzati, il gran numero di specie / cultivar e le peculiari condizioni di produzione (aziende agricole di piccole dimensioni, metodi di coltivazione ad alta intensità di input), sono altre variabili che contribuiscono a tale inefficienza.

In linea generale, al fine di massimizzare WUE, oltre che ridurre le perdite attraverso *runoff*, infiltrazione, evaporazione e traspirazione da parte delle infestanti, è necessario promuovere l'accrescimento delle colture, a partire dalla scelta di specie/cultivar, ben adattate al suolo ed al clima locale, alla corretta esecuzione dell'intero processo di produzione con l'impiego di nuove tecnologie per l'irrigazione di precisione.

**Parole chiave:** Evapotraspirazione, fabbisogni idrici, efficienza dell'irrigazione, metodi irrigui.

## Bibliografia

- AL-JAMAL M.S., BALL S., SAMMIS T.W., 2001. *Comparison of sprinkler, trickle and furrow irrigation efficiencies for onion production*. Agric. Water Manag., 46:253-266.
- AMTHOR J.S., 1999. *Increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, water use, and water stress: scaling up from the plant to the landscape*. In: Luo Y., Mooney H.A. (Eds.) Carbon Dioxide and Environmental Stress. Academic Press, San Diego: 33-59.
- ANTONY E., SINGANDHUPE R.B., 2004. *Impact of drip and surface irrigation on growth, yield and WUE of capsicum (Capsicum annum L.)*. Agric. Water Manag., 65:121-132.
- AUJLA M.S., THIND H.S., BUTTAR G.S., 2006. *Fruit yield and water use efficiency of eggplant (Solanum melongena L.) as influenced by different quantities of nitrogen and water applied through drip and furrow irrigation*. Scientia Horticulturae, 112:142-148.
- AYARS J.E., PHENE C.J., HUTMACHER R.B., DAVIS K.R., SCHONEMAN R.A., VAIL S.S., MEAD R.M., 1999. Agric. Water Manage., 42 (1):1-27.
- BALENDONCK J.J., HEMMING B.A.J., TUIJL VAN, INCROCCI L., PARDOSSI A., MARZIALETTI P., 2008. *Sensors and wireless sensor networks for irrigation management under deficit conditions*. Int. Conf. Agricultural Engineering/Agricultural & Biosystems Engineering for a Sustainable World. Conf. Proc. CD-ROM ref. OP-1985 (1130087), Vougas Associates Ltd. 29, Athens, Greece, 2008.
- BARBIERI G., 1995. *Restrizione delle risorse idriche e strategie di irrigazione*. Atti Accademia dei Georgofili, settima serie, vol. XLII, 589-599.
- BASSIL E.S., KAFFKA S.R., 2002. *Response of safflower (Carthamus tinctorius L.) to saline soils and irrigation: I. Consumptive water use*. Agric. Water Manag., 54:67-80.
- DE PASCALE S., BARBIERI G., RUGGIERO C., 1998. *Consumptive water use and plant growth of watermelon as affected by irrigation and N fertilization*. Acta Hort., 458: 49-56.
- DE PASCALE S., MAGGIO A., FOGLIANO V., AMBROSINO P., RITIENI A., 2001. *Irrigation with saline water improves carotenoids content and antioxidant activity of tomato*. J. Hortic. Sci. & Biotech., 7 (4):447-453.
- EVANS R.G., SADLER E.J., 2008. *Methods and Technologies to Improve Efficiency of Water Use*. Water Resources Research.



- 44,W00E04, doi:10.1029/2007WR006200.
- FERERES E., SORIANO M.A., 2007. *Deficit irrigation for reducing agricultural water use*. J. Exp. Bot., 58:147-159
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 1987. *Irrigation Water Management Training Manual No. 3*. Rome, Italy, pp. 26.
- GU S., FUCHIGAMI L.H., GUAK S.H., SHIN C., 1996. *Effects of Short-term Water Stress, Hydrophilic Polymer Amendment, and Antitranspirant on Stomatal Status, Transpiration, Water loss, and Growth in 'Better Boy' Tomato Plants*. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 121(5):831-837.
- HANSON B.R., MAY D.M., 2006. *New crop coefficients developed for high-yield processing tomatoes*. California Agriculture, vol. 60, n. 2, 95 pp.
- HARTZ T.K., HOCHMUTH G.J., 1996. *Fertility Management of Drip-Irrigated Vegetables*. HortTech., 6 (3):168-172.
- HATFIELD J.L., SAUER T.J., PRUEGER J.H., 2001. *Managing Soil to Achieve Greater Water Use Efficiency: A Review*. Agron. J., 93:271-280.
- HOBBS P.R., GUPTA R.K., 2002. *Resource conserving technologies for wheat in rice-wheat systems*. In: Ladha J.K., James E.H., Duxbury J.D., Gupta R.K., Buresh R.J. (Eds.), *Improving the Productivity and Sustainability of Rice-Wheat Systems: Issues and Impact*. ASA Special Publication. ASA, Madison, WI.
- HSIAO T.C., STEDUTO P., FERERES E., 2007. *A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture*. Irrig. Sci., 25:209-231.
- HUTMACHER R.B., STEINER J.J., AYARS J.E., MANTEL A.B., VAIL S.S., 1990. *Response of Seed Carrot to Various Water Regimes. I. Vegetative Growth and Plant Water Relations*. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 115(5):715-721.
- KANG S.Z., LIANG Z.S., PANY.H., SHI P.Z., ZHANG J.H., 2000. *Alternate furrow irrigation for maize production in an arid area*. Agric. Water Manag., 45:267-274.
- LAMM F.R., CAMP C.R., 2007. *Subsurface drip irrigation*. Developments in Agricultural Engineering, 13:473-551.
- LESKOVAR D.I., WARD J.C., RUSSELL W., SPRAGUE R.W., MEIRI A., 2001. *Yield, Quality, and Water Use Efficiency of Muskmelon Are Affected by Irrigation and Transplanting Versus Direct Seeding*. Hort Sci., 36(2):286-291.
- LU Z.M., PERCY R.G., QUALSET C.O., ZEIGER E., 1998. *Stomatal conductance predicts yields in irrigated Pima cotton and bread wheat grown at high temperatures*. J. Exp. Bot., 49: 453-460.
- MAAS E.V., GRATTAN S.R., 1999. *Crop yield as affected by salinity*. In: Skaggs R.W., van Schilfgaarde J. (Eds.), *Agricultural drainage*. Agron. Monogr. 38, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 55-110.
- MAGGIO A., DE PASCALE S., RUGGIERO C., BARBIERI G., 2005. *Physiological response of field-grown cabbage to salinity and drought stress*. Eur. J. Agron., 23(1):57-67.
- NELSON D.C., THORESON M.C., 1981. *Competition between potatoes (Solanum tuberosum) and weeds*. Weed Sci., 29:672-677.
- NITZSCHE P., BERKOWITZ G.A., RABIN J., 1991. *Development of a Seedling-applied Antitranspirant Formulation to Enhance Water Status, Growth, and Yield of Transplanted Bell Pepper*. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 116(3):405-411.
- PASSIOURA J., 2006. *Increasing crop productivity when water is scarce - from breeding to field management*. Agric. Water Manag., 80:176-196.
- RAJPUT T.B.S., PATEL N., 2006. *Water and nitrate movement in drip-irrigated onion under fertigation and irrigation treatments*. Agric. Water Manag., 79:293-311.
- ROBERTS B.W., ANDERSON J.A., 1994. *Canopy Shade and Soil Mulch Affect Yield and Solar Injury of Bell Pepper*. HortSci., 29(4):258-260. 1994.
- SALO T., SUOJALA T., KALLELA M., 2002. *The effect of fertigation on yield and nutrient uptake of cabbage, carrot and onion*. Acta Hort., 571:235-241.
- SERRAJ R., SINCLAIR T.R., 2002. *Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions?* Plant Cell Environ., 25:333-341.
- SEZEN S.M., YAZAR A., EKER S., 2006. *Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper*. Agric. Water Manag., 81:115-131.
- SIRAIT Y., PILL W.G., KEE W.E. JR, 1994. *Lima Bean (Phaseolus lunatus L.) Response to Irrigation Regime and Plant Population Density*. HortSci., 29(2):71-73.
- SMITTLE D.A., DICKENS W.L., STANSELL J.R., 1990a. *An Irrigation Scheduling Model for Snap Bean*. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 115(2):226-230.
- SMITTLE D.A., HALL M.R., STANSELL J.R., 1990b. *Effects of Irrigation Regimes on Yield and Water Use by Sweetpotato*. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 115(5):712-714. 1990.
- SMITTLE D.A., DICKENS W.L., STANSELL J.R. 1994. *Irrigation Regimes Affect Yield and Water Use by Bell Pepper*. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 119(5):936-939.
- SRINIVAS K., HEGDE D.M., HAVANAGI G.V., 1989. *Irrigation studies of watermelon (Citrullus lanatus (Thunb) Matsum et Nakai)*. Irrig. Sci., 10:293-301.
- THOMPSON T.L., DOERGE T.A., 1995. *Nitrogen and Water Rates for Subsurface Trickle-irrigated Romaine Lettuce*. HortSci., 30(6):1233-1237.
- TIWARI K.N., SINGH S., MAL P.K., 2003. *Effect of drip irrigation on yield of cabbage (Brassica oleracea L. var. capitata) under mulch and non-mulch conditions*. Agric. Water Manag., 58:19-28.
- TOGNONI F., LA MALFA G., BARBIERI G., SERRA G., MAGGIO A., LEONARDI C., 2002. *Some Aspects of the Vegetable Industry in Italy*. Acta Hort., 582: 121-133.
- UNLU M., KANBER R., SENYIGIT U., ONARAN H., DIKER K., 2006. *Trickle and sprinkler irrigation of potato (Solanum tuberosum L.) in Middle Anatolian Region in Turkey*. Agric. Water Manag., 79:43-71.
- UPCHURCH D.R., MAHAN J.R., WANJURA D.F., BURKE J.J., 2004. *Concepts In Deficit Irrigation: Defining A Basis For Effective Management*. Environmental And Water Resources Institute World Congress Proceedings. Paper No. 9028.
- WALLACE J.S., GREGORY P.J., 2002. *Water resources and their use in food production system*. Aquat. Sci., 64:363-375.
- WANG L., DE KROON H., BOGEMANN G.M., SMITS A.J.M., 2005. *Partial root drying effects on biomass production in Brassica napus and the significance of root responses*. Plant Soil, 276:313-326.
- WICHELNS D., 2007. *Economic implications of microirrigation*. Developments in Agricultural Engineering, 13:221-258
- YOHANNES F., TADESSE T., 1998. *Effect of drip and furrow irrigation and plant spacing on yield of tomato at Dire Dawa, Ethiopia*. Agric. Water Manag., 35:201-207.
- YUAN B-Z., SUN J., KANG Y., NISHIYAMA S., 2006. *Response of cucumber to drip irrigation water under a rainshelter*. Agric. Water Manag., 81:145-158.