

Efficienza d'uso dell'acqua nelle produzioni vegetali a diverse scale spazio-temporali

Bruno Basso*

*Dipartimento di Scienze dei Sistemi Colturali, Forestali e dell'Ambiente,
Università della Basilicata
Via Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza*

Società Italiana di Agronomia

Riassunto

Il concetto di efficienza d'uso dell'acqua, *water use efficiency* (WUE), vale a dire la quantità di granella prodotta per mm di acqua utilizzata, ha origine da misurazioni di campo e gran parte del suo sviluppo teorico è dipeso dalla scala di applicazione. Per aumentare la produzione agricola in condizioni idriche limitate, è necessario abbinare alle cultivar migliori una gestione agronomica appropriata. Infatti, studi condotti in diverse parti del mondo hanno dimostrato che pratiche agronomiche in grado di ridurre perdite di acqua per evaporazione, ruscellamento e drenaggio ed incrementare la produzione, indirettamente incrementano anche la WUE. Lo scopo della presente review è quello di presentare lo stato dell'arte nel settore della WUE, i traguardi raggiunti e le prospettive future per una migliore gestione delle risorse idriche nelle produzioni vegetali. I risultati conseguiti saranno presentati considerando il ruolo fondamentale che la scala spazio-temporale ricopre nell'applicazione di tali innovazioni.

Parole chiave: efficienza d'uso dell'acqua, ET, coefficienti colturali, modelli, irrigazione.

Summary

WATER USE EFFICIENCY IN CROP PRODUCTION AT DIFFERENT SPATIAL AND TEMPORAL SCALES

Water is essential for plant life but it is also the most limiting factor for their growth. The temporal variation in the supply of soil water from precipitation, the spatial variability of soil factors and landscape irregularities influencing soil water supply for crop plants affect food production and create a risky environment for growing crops. Increases in crop production per unit of water used is imperative for supplying adequate food, feed and fiber in an environment where future water supplies are not expected to increase substantially. Field studies indicate that when yield from crops with common development patterns are increased by better crop management, water use efficiency (WUE) is also increased. Increased yields from genetic improvement usually result in an increased WUE with the possible exception where season length is different. The objective of this review is to present the state of the art of research in the field of WUE and future perspective to optimize water resources in agriculture. Significant results will be presented considering the important issue of spatial and temporal scale.

Key-words: Water use efficiency, ET, crop coefficients, models, irrigation.

1. Inquadramento del problema

L'acqua è un bene prezioso, rinnovabile ma limitato. È stata definita "l'oro blu del XXI secolo", vista la sua importanza ed il ruolo cruciale che riveste in tutti i settori primari. Volendo fornire alcuni dati si resta sbalorditi dalla limitata disponibilità d'acqua dolce presente

nel nostro pianeta. In totale l'acqua esistente sulla terra è pari a circa 1.400.000.000 km³; essa è in prevalenza salata ed è raccolta per il 97,2% negli oceani. Il rimanente, meno del 3%, è dolce; di questa, la parte più consistente (28.000.000 km³, pari al 2,15%) è bloccata nelle calotte polari e nei ghiacciai. I laghi di acqua dolce hanno un volume di 120.000 km³ (0,009%

* Autore corrispondente: tel: +39 0971 205387; fax: +39 0971 205378. Indirizzo e-mail: bruno.basso@unibas.it

del globo terrestre), quelli salati o i mari interni sono all'incirca equivalenti. I canali fluviali, in media, raccolgono 1.200 km³ (0,0001%); le acque sotterranee ammontano indicativamente a 8.064.000 km³ (0,62%). Questo significa che le acque dolci disponibili sono una parte piccola di tutta la massa idrica; esse sono all'interno del ciclo che, alimentato dall'energia solare, in un flusso continuo, combinato con la circolazione dell'aria, si muove dalle superfici degli oceani alla terra ferma e ancora agli oceani in uno straordinario movimento senza fine (FAO, 2006).

In effetti, se si considera che la disponibilità idrica minima per abitante è calcolata in 1.700 m³ l'anno, attualmente un miliardo e quattrocento milioni di persone non hanno accesso all'acqua nella misura minima pro-capite e secondo l'UNDP (Programma delle Nazioni Unite per lo Sviluppo) circa diecimila esseri umani muoiono ogni giorno per mancanza d'acqua. Si prevede che nel 2020 il numero delle persone che non avranno accesso all'acqua arriverà a quattro miliardi, cioè la metà della popolazione mondiale.

Su scala mondiale, l'applicazione dell'acqua in agricoltura e il consumo controllato delle risorse idriche sono stati fattori essenziali per l'incremento della produttività agricola e per assicurare la costanza dei risultati produttivi. L'acqua è una risorsa essenziale per esprimere il potenziale di resa del suolo e per permettere a specie di piante e di animali, con potenzialità produttive superiori, di sfruttare i fattori che ne accrescono il rendimento. Grazie all'incremento della produttività, la gestione idrica sostenibile (soprattutto se combinata con un'attenta gestione del suolo) contribuisce a garantire una produzione agricola di qualità superiore sia per il consumo diretto che per la vendita commerciale, generando surplus economici necessari alle economie rurali. A partire dagli anni '60, la produzione alimentare globale è riuscita per lo meno a stare al passo con la crescita della popolazione mondiale, fornendo maggiori quantità di cibo pro-capite a prezzi generalmente sempre più bassi, ma a un costo eccessivo per le risorse idriche del pianeta. Alla fine del XX secolo, a livello mondiale l'agricoltura consumava mediamente il 70% di tutti i prelievi idrici e la FAO calcola che entro il 2030 le estrazioni idriche mondiali per l'irrigazione aumen-

teranno di circa il 14%. Anche se si tratta di un tasso di crescita più basso di quello registrato negli anni '90, a livello locale e, in alcuni casi, a livello regionale, si prevede che la crisi idrica subirà un ulteriore inasprimento, riducendo la produzione alimentare locale (Tilman et al., 2002).

Il miglioramento della gestione dell'acqua nell'agricoltura irrigua e in quella non irrigua avrà un ruolo chiave nella lotta contro la crisi idrica prevista in futuro. Le organizzazioni delle Nazioni Unite per l'Agricoltura e l'Alimentazione (FAO) e CGIAR (Consultative Group for International Agriculture Research) hanno istituito reti di eccellenza e programmi di ricerca per combattere il problema della riduzione della disponibilità idrica per l'agricoltura ed altri usi, accompagnata dalla riduzione delle superfici di terreni coltivabili ed all'aumento di richiesta di alimenti dovuto all'incremento della popolazione mondiale. A tal proposito tali reti e programmi hanno come obiettivo principale il miglioramento della gestione delle risorse idriche nel mondo. Per produttività dell'uso delle acque, si intende il perseguimento del maggior raccolto utile possibile per volume d'acqua – *more crop per drop* (“più raccolto per acqua impiegata”). Gli agricoltori più attenti al profitto potrebbero mirare ad ottenere la massima redditività per unità d'acqua impiegate – *more dollars per drop* (“più dollari per acqua impiegata”), mentre gli amministratori e i politici delle comunità locali potrebbero essere più propensi al raggiungimento del massimo livello occupazionale e di profitto attraverso l'agricoltura – *more jobs per drop* (“più posti di lavoro per acqua impiegata”). Pertanto, in senso lato, sono molteplici i benefici economici che l'incremento della produttività in agricoltura può generare per ogni unità d'acqua prelevata dalle fonti naturali.

I cambiamenti climatici a cui stiamo assistendo di certo non aiutano a migliorare la drammatica situazione dell'acqua. Il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) ritiene che la temperatura media del pianeta sia aumentata di circa 0,6 °C dal 1861. Inoltre, sulla base delle tendenze attuali di emissione dei gas serra, si stima un ulteriore aumento della temperatura terrestre compreso tra 1,4 e 5,8 °C nel periodo 1990-2100 (Hasselmann, 1997;

Melillo, 1999). Le variazioni climatiche previste potrebbero far aumentare il rischio di erosione del suolo e accelerare i processi di desertificazione per aumento di aridità e degradazione dei suoli. I processi degenerativi del suolo sono direttamente legati alle caratteristiche delle precipitazioni, ossia la frequenza di eventi piovosi ed alla forza erosiva della pioggia stessa. La diminuzione prevista nel rapporto precipitazione-evapotraspirazione potenziale (P/ET_o) avrà un effetto particolarmente negativo su vegetazione e terreni in aree che si trovano già in un regime di disponibilità idrica marginale.

Gli impatti negativi dei cambiamenti climatici previsti dai *Global Circulation Models* (GCM) potrebbero essere in parte controbilanciati dall'incremento della concentrazione atmosferica di anidride carbonica (CO₂) (Robertson et al., 2002). È ormai dimostrato, infatti, che la risposta delle colture a concentrazioni di anidride carbonica superiori a quelle attuali è in generale positiva (Policy et al. 1993; Smith et al., 2000), specialmente per le specie C3, con un aumento dei raccolti da circa il 10-15% nel frumento (Kimball, 1995; Miglietta et al., 1996; Rosenzweig e Hillel, 1999; Tubiello et al., 2002), al 15-20% nella vite (Bindi et al., 1995), al 20-30% nella patata (Miglietta, 1997). A sua volta però l'effetto positivo dell'incremento della CO₂ sui raccolti è controbilanciato dall'incremento di temperatura dell'aria che influisce negativamente sulla produzione, a causa dell'accelerazione dello sviluppo fenologico, riducendo così i tempi di accumulo di carboidrati nella granello. Teramura et al. (2000) hanno inoltre dimostrato che se gli aumenti di CO₂ avvengono contemporaneamente ad aumenti di radiazioni ultravioletta-B, gli effetti positivi della CO₂ vengono cancellati.

Mentre la rivoluzione verde ha portato allo sviluppo di nuove cultivar di frumento e di riso adatte ad elevati input di fertilizzante e d'acqua, in molte regioni del mondo la sopravvivenza dipende dall'agricoltura in regime asciutto, cosiddetta *dryland e rainfed*. La mancata disponibilità di acqua prevista per il futuro (Seckler et al., 1999; Turner, 2001) accompagnata da un aumento della competizione per usi civili ed industriali, farà sì che l'agricoltura dipenda sempre di più dai soli apporti idrici naturali. La produzione agricola ottenuta mediante un'efficienza d'uso dell'acqua elevata sarà in futuro l'o-

biiettivo principale della gestione agronomica di qualsiasi agricoltore.

Quali sono i metodi e le conoscenze a disposizione delle scienze agronomiche che consentono di ottimizzare l'uso delle risorse idriche al fine di produrre con il minor consumo di acqua possibile? L'obiettivo di questa *review* è quello di rispondere a questa domanda discutendo i progressi ottenuti nelle scienze agronomiche ed affini negli ultimi anni che consentono di aumentare l'efficienza d'uso delle precipitazioni e dell'irrigazione, ovvero la quantità di granello per mm di acqua utilizzata, sia in ambienti aridi che umidi. Tali risultati saranno presentati considerando il ruolo fondamentale che la scala spazio-temporale ricopre nell'applicazione di tali innovazioni. Nella *review* non mi sono preoccupato di riportare la miriade di risultati ottenuti da vari scienziati nel settore della WUE, ma bensì di selezionare i principali studi pubblicati su riviste scientifiche del settore sulla WUE, dalla foglia alla singola pianta fino alla scala di campo (figura 1). Inoltre sono discusse singolarmente le componenti dell'equazione proposta da Passioura (1977) per incrementare la produzione in ambienti aridi. Relazioni tra evapotraspirazione, irrigazione supplementare, WUE sono descritte nei paragrafi successivi. Le ultime innovazioni sui progressi ottenuti nel settore della tecnologia legata all'agricoltura, come la gestione dell'irrigazione a dose variabile, sono descritte nell'ultimo paragrafo della *review*.

2. Scale temporali di risposte fisiologiche allo stress idrico

Le risposte fisiologiche da parte di piante soggette a diverse condizioni ambientali avvengono su scale spazio-temporali differenti. Per esempio, gli stomi variano in numero e densità in risposta a condizioni climatiche, quali la concentrazione di CO₂, la luce ecc (Hetherington and Woodward, 2003). Lake et al., 2002 hanno dimostrato che foglie mature sono in grado di trasmettere a foglie giovani informazioni relative alle condizioni ambientali che modificano lo sviluppo degli stomi. Gli stomi si adattano a modifiche climatiche locali e globali e a diverse scale temporali, da minuti a millenni (Hetherington e Woodward, 2003). Passioura (2004) pre-

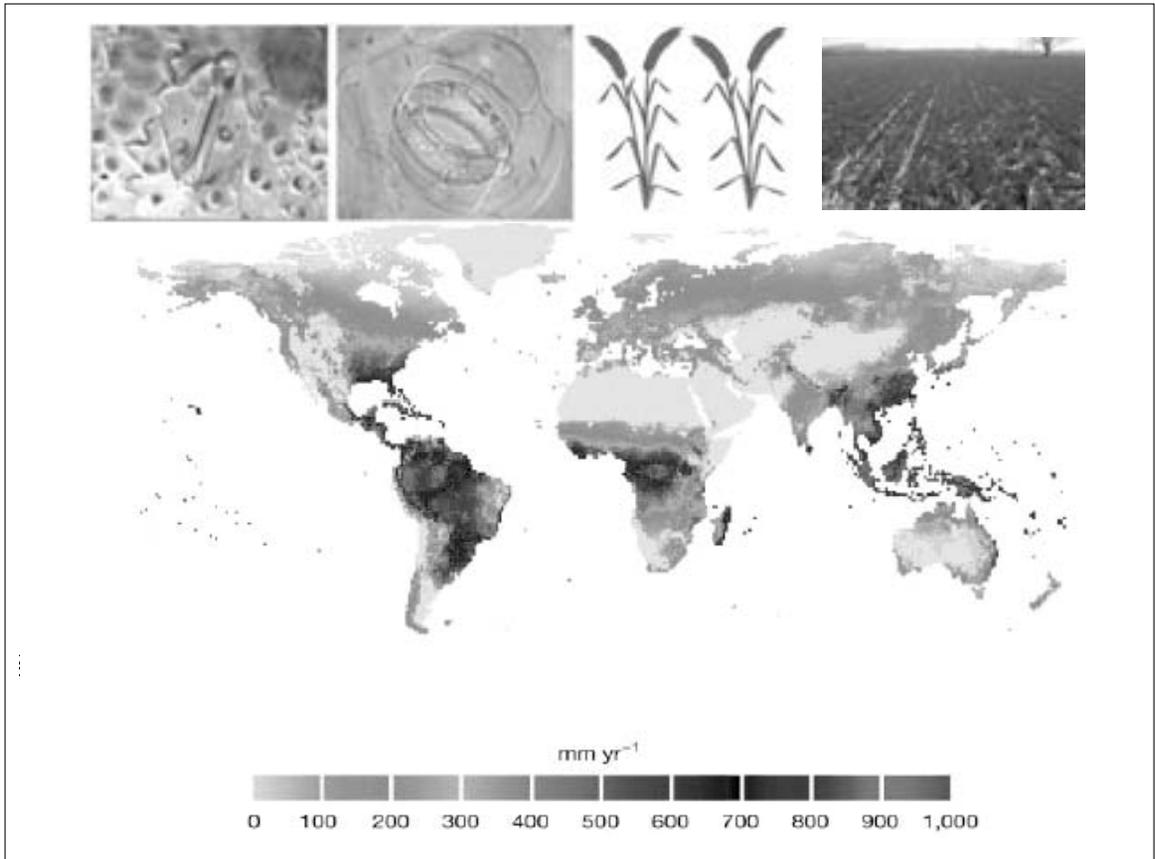


Figura 1. Scale spaziali: stomi, piante, campo (a). Traspirazione (mm yr^{-1}) della vegetazione terrestre simulata utilizzando il modello SDGVM e mediata per gli anni 90 (b). Da Hetherington and Woodward, 2003.

Figure 1. Spatial scales: stomata, plant and field (a). Transpiration (mm yr^{-1}) of terrestrial vegetation simulated with SDGVM model and averaged for the 90s (b). From Hetherington and Woodward, 2003.

senta una serie di esempi di processi e loro ripercussioni su scala spazio-temporali (tabella 1).

Mentre è chiaro che l'efficienza d'uso dell'acqua è bassa in colture affette da attacchi parassitari o infestate da malerbe, ci sono altri aspetti della gestione agronomica che influenzano in maniera sostanziale tale efficienza d'uso. Hatfield et al. (2001) nella loro dettagliata revisione sui vari aspetti di gestione conservativa del suolo e mantenimento dei residui colturali suggeriscono che tali pratiche influenzano, in maniera positiva il bilancio idrico del suolo, incrementando l'infiltrazione e riducendo l'evaporazione. Kirkegaard et al. (2004) sottolineano l'importanza della coltura precedente per migliorare il vigore vegetativo nei primi stadi di sviluppo e conseguentemente di ridurre la superficie di suolo soggetta ad evaporazione. Tutte queste tecniche, come qualsiasi altra corretta

forma di gestione del suolo (Rasmussen et al., 1998; Borin e Basso, 2004), influenzano l'efficienza d'uso dell'acqua, ma non coinvolgono direttamente le relazioni idriche delle piante.

Il ruolo delle relazioni idriche nel controllo della crescita fogliare in condizioni di stress idrico è stato argomento di studio di diversi fisiologi vegetali negli ultimi anni. Alcuni autori sostengono che il turgore cellulare ed il contenuto idrico della foglia influenzano significativamente la crescita fogliare (Frensch, 1997; Hsiao et al., 1998; Kramer, 1998), mentre altri hanno sottolineato il ruolo dei segnali inviati dalle radici (Passioura, 1988a,b; Termaat et al., 1988; Saab e Sharp, 1989; Gowing et al., 1990). Più in particolare, i segnali inviati dalle radici in presenza di stress potrebbero essere ormoni del tipo dell'acido abscissico (Davies e Zhang, 1991) o segnali di natura chimica come il pH (Bacon,

Tabella 1. Effetti di processi su varie scale sull'uso efficiente dell'acqua da parte delle colture per la produzione di granaia. Da Passioura, 2006.

Table 1. The effects of processes at various scales on the effective use of water by crop plants in producing grains. From Passioura, 2006.

Scale spaziale	Scala temporale	Effetto su WUE	Processo
Cloroplasto	secondi	moderato	conduttanza stomatica e tasso di scambio istantaneo tra CO ₂ e acqua
Stomi	minuti-ore	moderato	tasso di scambio istantaneo tra carbonio e acqua
Foglia	secondi-ore	moderato	effetto su strato superficiale, esposizione
Fiori	Ore-giorni-settimane	alto	harvest index, corrispondenza tra fasi fenologiche e apporto idrico, fertilità fiorale, trasferimento di assimilati
Parte epigea e sistema radicale	settimane-mesi	moderato	LAI, bilancio idrico, profondità radicale
Campo	stagioni	moderato	movimento laterale (runon-runoff), variabilità spaziale, effetto residuo colture precedenti

1998). I pareri sul ruolo del contenuto idrico nei tessuti vegetali sono molto discordi. Uno dei motivi per i quali c'è confusione è determinato dal ruolo fondamentale della scala temporale alla quale è stata fatta la sperimentazione.

Cambiamenti drastici e repentini delle condizioni ambientali sul contenuto idrico dei tessuti vegetali riducono il tasso di allungamento delle foglie, ma solo in maniera temporanea, cioè per poche ore. Se lo stress persiste, la riduzione si protrae anche più a lungo. Passioura e Munns (2000) hanno dimostrato che piante di orzo e frumento sottoposte a stress idrici e salini, ma con radici in pressione in modo tale da mantenere il turgore cellulare, non riducono il tasso di allungamento fogliare per diverse ore. Alla scala temporale di giorni, però, la pressurizzazione delle radici non è sufficiente a mantenere alti tassi di allungamento fogliare, indicando che i messaggi inviati dalle radici prevalgono sugli effetti del turgore cellulare e le relazioni idriche fogliari. Le modifiche rapide che avvengono nelle piante sottoposte a shock ambientali repentini non hanno ripercussioni su scala giornaliera o sulla produzione finale.

Esiste un'estesa letteratura sulle risposte fisiologiche agli stress, ma come osservato già da Slatyer (1969) è difficile associare le risposte delle piante alla produzione finale. Diversi studi sulla determinazione dello stato idrico delle foglie sono stati basati sull'idea che la diffusione stomatica fogliare dovesse essere il fattore primario da monitorare, visto che la chiusura degli stomi è strettamente legata alla fotosintesi ed alla traspirazione. Successivamente comparvero sul mercato sistemi di misura per la re-

sistenza stomatica (Kanemasu et al., 1969). Uno degli svantaggi di questo approccio stava nella difficoltà di ottenere un valore singolo per l'intera chioma da utilizzare nelle equazioni di evaporazione. Inoltre uno dei motivi per il quale misure di resistenza stomatica hanno fornito risultati limitati deriva dal fatto che la pianta subisce danni irreversibili, prima che misure di resistenza stomatica possano fornire indicazioni apprezzabili. Un'altra misura fisica molto utilizzata per il monitoraggio dello stato idrico delle piante è il potenziale idrico fogliare (Scholander et al., 1965). Esistono ormai seri dubbi sull'utilità fisiologica di misurare il potenziale idrico fogliare (Ritchie, 1980; Sinclair e Ludlow, 1985; Passioura, 1994). Quando le condizioni atmosferiche sono costanti, non ci sono variazioni nelle misure del potenziale idrico fogliare (anche se il contenuto idrico del suolo sta diminuendo), fino al raggiungimento di una soglia oltre la quale si osservano rapidi cambiamenti nei valori (van Bavel, 1967; Ritchie, 1973). Begg e Turner (1976) hanno visto che la soglia di potenziale idrico varia in funzione della posizione della foglia nella chioma, l'età della pianta e le condizioni di crescita, come per esempio il numero di cicli di stress subiti o se la pianta è coltivata in campo o in ambiente controllato. Jordan e Ritchie (1971) hanno osservato la chiusura di stomi di piante di cotone coltivate in camera di crescita a potenziale di -1,6 Mpa, mentre stomi di piante coltivate in campo restano ancora aperti al potenziale fogliare di -2,7 Mpa. Per questo motivo, misure di potenziali idrico hanno avuto poco successo nel quantificare stress idrici o nel fornire indicazioni su quando

irrigare. Le piante reagiscono agli stress idrici prima che sia possibile osservare un cambiamento nelle misure di potenziale idrico fogliare (Davies e Zhang, 1991). Quando il tasso di crescita delle foglie diminuisce, gli stomi si chiudono, apparentemente in risposta ai segnali ricevuti dalle radici che esplorano il suolo asciutto. Evidenza della mancata relazione tra potenziale idrico ed il tasso di estensione fogliare in una pianta di mais è fornita nella figura 2. Watt (1974) confrontò misure prese in campo con misure in ambiente controllato. Un ulteriore esempio per sottolineare le differenze riscontrabili tra studi su piante in vaso o in pieno campo provengono da Denmead e Shaw (1962) che coltivarono piante di mais in vasi mentre Ritchie (1973) coltivò piante in grandi lisimetri a pesata. Nello studio dei vasi, la traspirazione fu ridotta in condizioni di alta richiesta evapotraspirativa da parte dell'atmosfera ed in seguito ad una lieve riduzione del contenuto idrico del suolo. Nello studio di pieno campo di Ritchie (1973) le piante non ridussero la traspirazione anche se il 70% dell'acqua estraibile era già stato utilizzato. Studi di stress idrico in ambiente controllato possono considerarsi corretti ed estrapolabili in pieno campo purché la quantità di suolo a disposizione delle piante non sia limitata, condizione tipica del pieno campo.

Vista la difficoltà nell'usare informazioni su resistenza stomatica o potenziale idrico fogliare per fini operativi, per determinare gli effetti dello stress idrico sul comportamento della coltu-

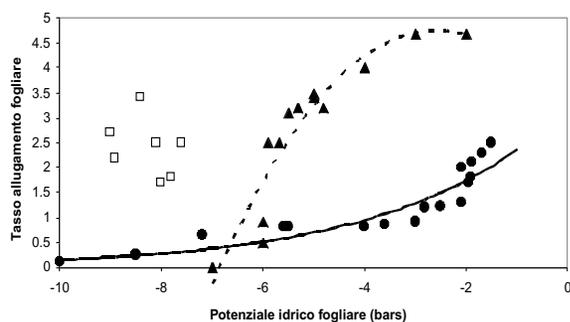


Figura 2. Relazione tra allungamento fogliare e potenziale idrico fogliare per una coltura di mais in campo \square , o in ambiente controllato buio a 28 °C \blacktriangle , o in ambiente controllato alla luce a 30 °C \bullet . Da Watts (1974).

Figure 2. Relationship between leaf extension and leaf water potential for corn growth in the field \square , or grown in controlled environment in the dark at 28 °C \blacktriangle , or in the light at 30 °C \bullet . From Watts (1974).

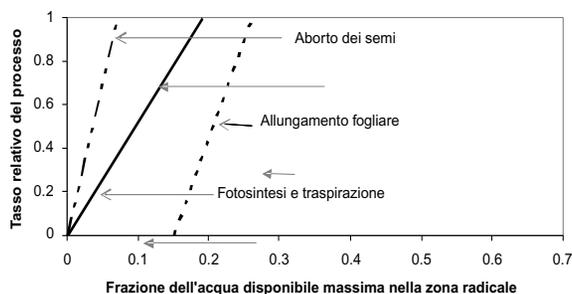


Figura 3. Influenza dell'acqua disponibile massima dal suolo sul tasso relativo di vari processi fisiologici. Da Ritchie, 1980.

Figure 3. Suggested possibilities for expressing the influence of extractable soil water on the relative rate of various physiological processes. From Ritchie, 1980.

ra, sono necessarie valutazioni empiriche di vari processi in relazione allo stress idrico. Questo tipo di valutazione è stata suggerita da Ritchie (1980). Riconoscendo che lo stress idrico causa risposte variabili per diversi processi fisiologici, la serie di relazioni fornite da Ritchie è riportata in figura 3. Il concetto generale è che non vi è riduzione nel processo considerato finché la quantità di acqua estraibile non va oltre una soglia, oltre la quale il processo è ridotto in proporzione all'acqua estraibile. Per esempio, il processo di allungamento fogliare è più sensibile al deficit del contenuto idrico del suolo rispetto ad altri processi e l'allungamento fogliare termina anche se dell'acqua nel suolo è ancora disponibile. Allo stesso modo, variazioni di processi possono essere causate da eccessivi contenuti idrici e problemi di aerazione.

Un problema pratico con le relazioni mostrate è rappresentato dalla definizione di acqua disponibile massima. Il metodo tradizionale usato dagli agronomi è quello di utilizzare il contenuto idrico della zona di esplorazione delle radici tra capacità di campo (CIC) e punto di appassimento (PA). I problemi legati a tale definizione sono dovuti alla difficoltà di stabilire la profondità della zona esplorabile dalle radici, i valori dei limiti idraulici CC e PA e la densità apparente del suolo della zona radicale dove le proprietà fisiche cambiano. Quando CC e PA sono determinati in laboratorio, c'è incertezza su quale potenziale utilizzare. Un potenziale di meno un terzo di bar è spesso più basso delle misure ottenute in pieno campo (Ritchie, 1980, Ritchie, 1998). La quantificazione dei limiti

idraulici in campo risulta essere più precisa rispetto ai metodi di laboratorio sia per i valori dei limiti che per la definizione di acqua estraibile in quanto tiene in considerazione il ruolo fondamentale delle radici nei vari strati del suolo. Inoltre misure in campo di limiti idraulici risultano essere meno variabili spazialmente, rispetto alle misure di potenziale effettuate in laboratorio. Ritchie et al. (1987) hanno individuato in diversi suoli una riduzione della capacità dell'apparato radicale ad estrarre acqua da regioni profonde del profilo. In tali zone, pur essendo presenti strutture radicali, è controverso se l'acqua possa essere classificata come disponibile perché le piante non riescono ad estrarla anche se essa si trova a valori di potenziale matriciale vicini a quelli della capacità di campo. Ritchie ed Amato (1990) individuano fra le possibili ragioni del ridotto accesso all'acqua in tali casi, la distribuzione spaziale delle radici profonde, che sono spesso confinate in biopori, crepe o comunque zone limitate e non hanno accesso all'intera riserva idrica.

3. Efficienza d'uso dell'acqua a livello stomatico

Le piante differiscono nella capacità di regolare quanta acqua viene persa per unità di carbonio assorbita. Tali differenze dipendono dalle diverse capacità d'uso dell'acqua. Il termine utilizzato per spiegare tale comportamento è *Intrinsic Water Use Efficiency* W_t (Condon et al., 2002) definito come:

$$W_t = A/T$$

dove A indica il tasso istantaneo dell'assimilazione di CO_2 a livello stomatico e T la traspirazione. Sia A che T possono essere espresse separatamente con le seguenti equazioni:

$$A = g_c (c_a - c_i)$$

$$T = g_w (w_i - w_a)$$

Il fattore g indica la conduttanza stomatica per la CO_2 (g_c) o per il vapore acqueo (g_w), il termine c_a indica la concentrazione di CO_2 o vapore acqueo w_a all'esterno della foglia, c_i e w_i indicano rispettivamente le concentrazioni di CO_2 e vapore acqueo all'interno della foglia. La concentrazione di vapore acqueo all'interno della foglia è maggiore rispetto all'esterno, mentre discorso inverso avviene per la CO_2 ,

dove la contrazione è maggiore all'esterno della foglia.

W_t può essere anche riscritta:

$$W_t = 0.6c_a \frac{(1 - \frac{c_i}{c_a})}{\frac{w_i}{w_a}}$$

Il fattore 0.6 indica la diffusività relativa di CO_2 e vapore acqueo nell'aria. Farquhar et al. (1989) hanno riportato che un valore tipico per specie C_3 del rapporto c_i/c_a è di 0.7. Tale valore è determinato dal bilancio tra conduttanza stomatica e capacità di fissazione fotosintetica. La conduttanza stomatica influenza l'apporto di CO_2 all'interno della foglia, mentre la capacità fotosintetica determina la richiesta di CO_2 . Un valore basso di c_i/c_a e quindi di una migliore W_t può essere ottenuto mediante bassa conduttanza stomatica o elevata capacità fotosintetica o la combinazione di entrambe.

Uno dei metodi più promettenti per migliorare l'efficienza traspirativa è la discriminazione isotopica del carbonio (^{13}C). Tale metodo è stato identificato come un'ottima tecnica alternativa alla W_t . Circa l'1% del carbonio della biosfera si trova nella forma di isotopo stabile ^{13}C . Le piante, durante la fotosintesi discriminano contro l'isotopo pesante ^{13}C e, pertanto, i prodotti fotosintetici risultanti sono alleggeriti isotopicamente rispetto alla CO_2 atmosferica. La composizione isotopica (^{13}C) esprime il rapporto tra $^{13}C/^{12}C$ nelle piante rispetto al valore dello stesso rapporto in un materiale standard internazionale come la calce Pee Dee Belemnite. La discriminazione isotopica del C, invece, è una misura del rapporto $^{13}C/^{12}C$ nelle piante rispetto al valore del rapporto nell'aria dove le piante vivono (Farquhar e Richards, 1984). La riduzione di $^{13}CO_2$ a favore di $^{12}CO_2$ durante l'ingresso della $^{13}CO_2$ negli stomi nella fotosintesi di piante C_3 è altamente correlata con l'efficienza traspirativa della pianta. La ^{13}C può essere utilizzata per esaminare stress idrici in piante C_3 perché il ribulosio difosfato carbossilasi (RuBisCO), che catalizza la reazione tra CO_2 e ribulosio bifosfato per formare 3 molecole di 3-acido fosfoglicerico, discrimina la $^{13}CO_2$. Se non vi è deficienza idrica, gli stomi sono aperti e la discriminazione è alta.

La teoria è stata studiata da Farquhar et al.

(1982) e altri scienziati (Hubick e Farquhar, 1989; Condon et al., 1992; Ismail e Hall, 1992) i quali hanno concluso che ^{13}C è correlata positivamente con il rapporto c_i/c_a e visto che W_t è correlata negativamente con il rapporto c_i/c_a , ^{13}C risulta anche essa correlata negativamente con W_t . Tale tecnica risulta semplice da utilizzare e più rapida rispetto alle stime dirette di efficienza traspirativa (TE), ma fornisce i risultati migliori quando la coltura dipende principalmente dall'umidità accumulata nel suolo nei periodi precedenti alla coltivazione. In questi ambienti, la traspirazione costituisce la maggior parte dell'uso dell'acqua, per cui una maggiore TE consente di conservare l'acqua fino e dopo l'antesi, fase cruciale per la determinazione della produzione finale in ambienti di estrema siccità. A tal proposito, la ^{13}C viene utilizzata per costituire nuove varietà di frumento con elevata efficienza traspirativa. Un esempio pratico è quello della varietà Hartog (Rebetzke et al., 2002) che ha fatto registrare aumenti di produzione del 10% in ambienti aridi con circa 250 mm di precipitazione stagionale. La tecnica di ^{13}C è stata anche utilizzata per determinare cause di variabilità della produzione dovute a stress idrico su scala di campo in una coltura di soia, come riportato da Clay et al. (2003).

Un limite all'uso della ^{13}C risiede nel costo. Tecniche alternative che consentano di identificare in maniera rapida le popolazioni da poter utilizzare nella ^{13}C sono: contenuto delle ceneri della sostanza secca (Masle et al. 1992); stime di riflettanza nel vicino infrarosso delle foglie (Clark et al., 1995; Aparico et al., 2002); conduttanza stomatica (Araus et al., 1997).

Gli studi condotti con l'obiettivo di costituire nuovi genotipi con tasso fotosintetico più elevato (Moss e Musgrave, 1971) hanno dimostrato che l'aumento di fotosintesi su scala fogliare non corrispondeva ad un aumento di produzione a livelli superiori (scala di pianta) (Sinclair et al., 2003). Ulteriori studi su diverse colture per la quantificazione della WUE a livello stomatico sono stati riportati da Rivelli et al. (1999), Moriana et al. (2002).

4. Efficienza d'uso dell'acqua su scala di campo

Il termine efficienza d'uso dell'acqua o *water use efficiency* (WUE) viene utilizzato per espri-

mere il rapporto tra la produzione di biomassa e la quantità di acqua evapotraspirata. La WUE viene generalmente espressa con la seguente equazione:

$$WUE = \frac{TE}{1 + \frac{Es}{T}}$$

Dove TE è l'efficienza traspirativa (sostanza secca epigea/traspirazione), Es è la quantità di acqua persa per evaporazione del suolo e T è l'acqua persa per traspirazione da parte della pianta (Steduto, 1996; Richards, 2002). Tale espressione mostra che un uso efficiente dell'acqua può essere raggiunto o aumentando TE o riducendo le perdite Es. Se la crescita di una coltura dipende dall'acqua presente nel suolo con basse probabilità di avere apporti aggiuntivi mediante precipitazioni, l'aumento di TE è più favorevole per incrementare la WUE della coltura. Se invece la crescita della coltura dipende dall'ammontare delle precipitazioni durante la stagione, allora la riduzione di perdite per evaporazione risulterà essere più conveniente ai fini dell'incremento della WUE della coltura. In ambiente mediterraneo, un valore tipico di Es di una coltura di frumento gestita con le pratiche agronomiche appropriate è di circa il 40% della evapotraspirazione (ET) e tende ad aumentare se la coltura viene gestita in maniera errata.

L'incremento della produzione delle colture attuate in condizioni di apporti idrici limitati è ottenibile mediante una corretta gestione agronomica e la costituzione di varietà migliori. Una più elevata WUE è ottenibile con colture che utilizzano più efficientemente l'acqua apportata, che a parità di apertura stomatica scambiano l'acqua con anidride carbonica più efficacemente e che convertono più assimilati (biomassa) in cariossidi. Tutto ciò può essere trascritto sottoforma di equazione come stabilito da Passioura (1977):

$$Y = T * WUE * HI$$

dove Y è la produzione in ambienti aridi, T è la traspirazione ovvero il consumo idrico della coltura, WUE è l'efficienza d'uso dell'acqua e HI è l'indice di raccolta, comunemente detto *harvest index*. I componenti di questa equazione sono indipendenti tra di loro per cui un aumento di uno dei termini comporta un aumento nella

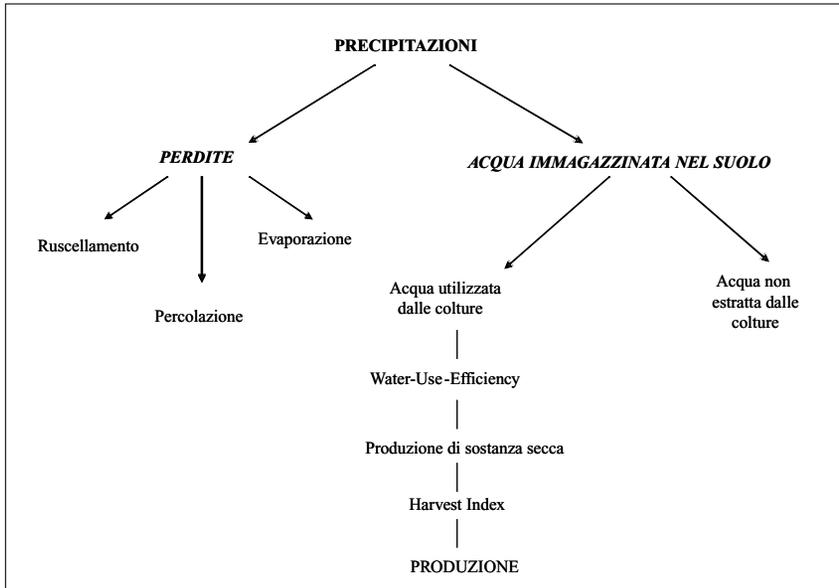


Figura 4. Bilancio idrico e WUE

Figure 4. Water balance and WUE.

produzione (Y) (Fisher, 1979; Ludlow e Muchow, 1990).

4.1 Ottimizzazione del bilancio idrico del suolo

Il bilancio idrico del suolo, inteso come la quantità di acqua presente all'interno di uno strato di suolo (ΔS) è definito dalla differenza tra le variabili di apporto idrico (precipitazioni e irrigazione) e quelle di perdita (evaporazione del suolo, traspirazione, percolamento e ruscellamento) (figura 4). Uno dei modi principali per incrementare l'uso dell'acqua da parte delle colture è quello di incrementare la profondità radicale. Un sistema radicale profondo è sinonimo di assorbimento idrico maggiore. Il metodo più semplice per incrementare la profondità delle radici e la loro distribuzione è quello di aumentare la durata del ciclo biologico anticipando le semine e utilizzando cultivar con vigore vegetativo precoce in modo da assicurare uno sviluppo di LAI più rapido. Inoltre la crescita veloce consente lo sviluppo di radici avventizie maggiore negli strati superficiali in modo da utilizzare l'acqua prima che venga persa per evaporazione. L'assorbimento idrico da parte delle radici può essere limitato da fattori fisici legati a struttura e densità apparente (Amato e Ritchie, 2004), tossicità (sale, pH, boro etc.), patogeni, disponibilità limitata di elementi minerali. Pratiche agronomiche che limitano questi ostacoli hanno dimostrato d'incrementare l'efficienza d'uso dell'acqua. Rotazioni con specie come

colza e rape con radici capaci di penetrare negli strati più profondi creano biopori utili per la coltura successiva (Angus et al., 1991; Kirkegaard et al., 2000). Ulteriori esempi provengono da lavorazioni ridotte (Asseng e Turner, 2003) e mantenimento sul campo dei residui colturali (Hatfield et al., 2001). L'introduzione della semina su sodo e l'uso di erbicidi come il glifosate, hanno consentito una riduzione dei costi, tempi e numero di lavorazioni. Lavorazioni eccessive con rimozione o bruciatura dei residui, distruggono la sostanza organica e quindi la struttura e la sua stabilità ed aumentano l'evaporazione nonché riducono l'infiltrazione. Basso e Ritchie (2006) hanno condotto uno studio con l'obiettivo di determinare il tasso d'infiltrazione nel suolo in diversi sistemi di lavorazione (convenzionale, minima e non lavorazione) e gestione dei residui (interrati o in superficie). Lo studio ha previsto l'apporto di acqua al tasso della conducibilità idrica del suolo, ma i tempi necessari per generare ruscellamento nei vari sistemi di lavorazione sono risultati molto diversi: da pochi minuti per la lavorazione convenzionale a ore per la non lavorazione con residui in superficie (figura 5). Le lavorazioni minime o la non lavorazione hanno mostrato di incrementare la WUE diminuendo l'evaporazione dal suolo ed aumentando le produzioni (Stewardt e Robinson, 1997). Correzioni per acidità ed alcalinità (Atwell, 1991, Tang et al., 1993) e riduzione dei patogeni (Roget et al.,

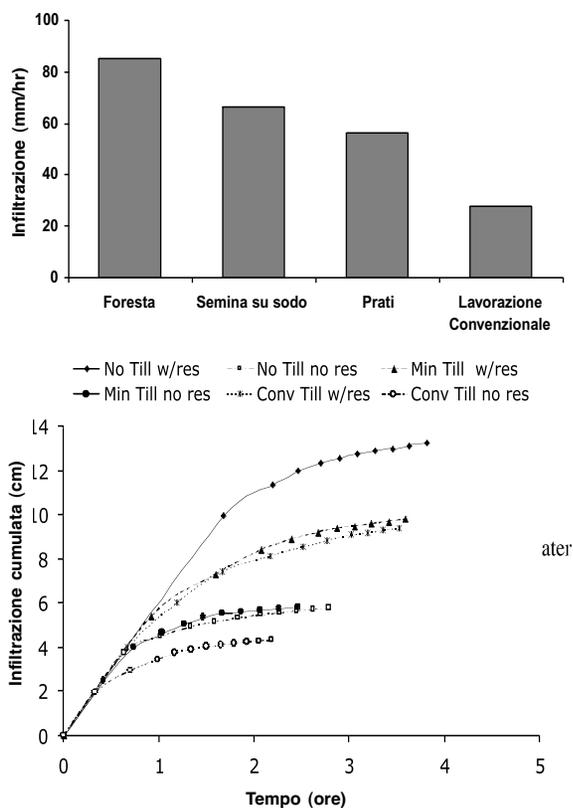


Figura 5. Influenza dell'uso del suolo a) e delle lavorazioni del terreno e residui colturali (b) sull'infiltrazione dell'acqua nel suolo.

Figure 5. Influence of land use (a), tillage and crop residues management (b) on soil water infiltration.

1996) sono altri esempi di gestione volta ad aumentare l'assorbimento idrico radicale e quindi la WUE.

In zone dove lo strato di suolo a disposizione delle radici è limitato, la possibilità di avere apparati radicali profondi non apporta alcun vantaggio (Turner, 2004).

Semine anticipate del frumento prima dell'inverno consentono d'incrementare l'efficienza d'uso dell'acqua e la produzione (Richards et al., 2002) grazie al rapido sviluppo di LAI, ad una ridotta perdita di acqua per evaporazione dal suolo (figura 4) (van Herwaarden e Passioura, 2001) e ad una ridotta presenza di erbe infestanti (Lemerle et al., 2001). Eastham e Gregory (2000) hanno mostrato che semine anticipate di frumento e lupino in ambienti mediterranei riducono l'evaporazione del suolo, rispetto a semine posticipate, grazie al LAI superiore nelle prime fasi del ciclo. In alcuni casi, le semine an-

ticipate hanno mantenuto invariata la produzione rispetto a quelle tardive, per un basso *harvest index* (Turner, 2004). Oggi varietà a ridotto accostamento, consentono di ridurre l'uso di carboidrati strutturali a favore di carboidrati solubili facilmente convertibili in granella. Le semine anticipate possono essere effettuate solo con cultivar adatte, cioè quelle con fioritura in periodi caldi altrimenti le gelate primaverili possono essere letali (Riffkin, 2003). Gregory e Eastham hanno dimostrato che le semine anticipate possono anche essere deleterie a causa della maggiore incidenza di malattie.

Varietà insensibili all'acido giberellico, cosiddette *semidwarf* o a taglia bassa, presentano oltre all'altezza limitata anche dimensioni ridotte di altri organi, come il coleoptile (Miralles et al., 1998). L'adozione di queste varietà con stentato vigore vegetativo iniziale determina un'emergenza lenta e spazialmente variabile. Nuove varietà di frumento, come quella costituita da Richards et al. (2002), presentano un lungo coleoptile, ma allo stesso tempo taglia bassa ed elevato vigore vegetativo iniziale tale da assicurare una crescita immediata di superficie fogliare. Piante con vigore vegetativo iniziale tendono ad assorbire più acqua perché l'apparato radicale è più profondo (Angus et al., 2001). In altri casi la senescenza prematura non consente un uso ottimale dell'acqua presente nel profilo del suolo. Il carattere *Stay Green*, studiato inizialmente nel sorgo e successivamente anche in altre colture, con la presenza di azoto nelle foglie verdi anche durante la fase di riempimento della granella, fissa più carbonio e quindi consente alle radici di continuare ad estrarre azoto ed acqua rafforzando l'intero sistema come dimostrato da Borrel et al. (2001).

Basso (2000) e Batchelor et al. (2002) hanno dimostrato che le perdite per ruscellamento ortotoniano (intensità della pioggia maggiore della capacità d'infiltrazione dell'acqua nel suolo) e scorrimento superficiale laterale possono essere elevate, ma parte di tali perdite diventa sorgente addizionale di acqua in aree con pendenza inferiore (figura 6). Silburn e Glanville (2002) hanno dimostrato che con copertura vegetale di residui maggiore del 50% dell'area, il ruscellamento viene notevolmente ridotto.

La quantità d'acqua normalmente persa per fenomeni di percolazione è inferiore a l'acqua persa per evaporazione del suolo, tranne in suo-

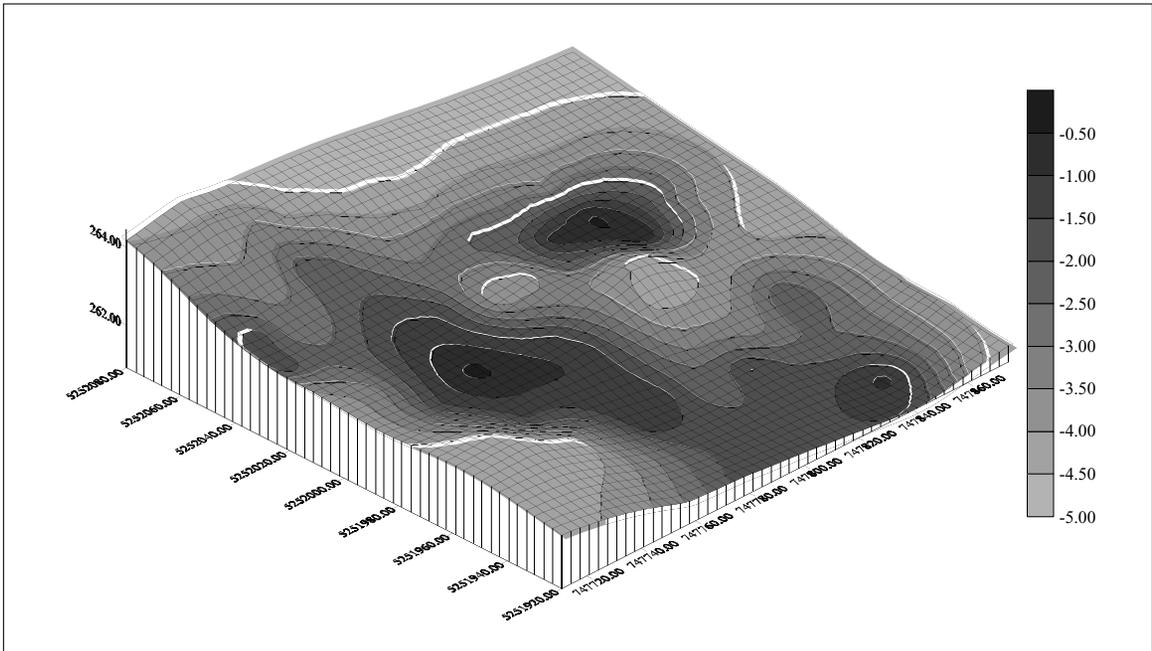


Figura 6. Mappa simulata del flusso netto superficiale ottenuto dalla differenza tra ruscellamento da un sito e apporto ad un altro (runoff-runon) utilizzando SALUS-Terrae (Basso, 2000).

Figure 6. Simulated map of net surface flux obtained from the difference between runoff-runon using Salus-Terrae (Basso, 2000).

li molto sabbiosi. Perdite per percolazione sono difficili da stimare, ma normalmente variano da 0 a 100 mm per anno a seconda del tipo di suolo, gestione e stagione (Dunin et al., 2001). L'utilizzo da parte delle radici dell'acqua percolata può incrementare di molto le produzioni in quanto nella maggior parte dei casi ciò avviene dopo la fioritura quando i prodotti della fotosintesi vanno interamente traslocati verso la granella e sono minime le perdite di respirazione. La cattura di 30 mm di acqua percolata si traduce in un incremento di produzione di 1 t ha⁻¹ (Angus e van Herwaarden, 2001). In più, l'acqua drenata negli strati più profondi è ricca di nitrati lisciviati ed inutilizzati prima per il limitato apparato radicale nelle fasi iniziali del ciclo biologico (Angus, 2001).

I modelli previsionali del tipo CERES (Ritchie et al., 1985), SALUS (Basso, 2000; <http://salus.gis.fcu.edu.tw>) ecc. sono in grado di stimare il bilancio idrico con margine di errore molto limitato (Basso e Ritchie, 2005).

4.2 Efficienza traspirativa

L'altro componente dell'equazione della WUE è l'efficienza traspirativa (TE). Per efficienza

traspirativa delle foglie viene inteso l'ammontare di carbonio fissato per unità di acqua traspirata, e dipende sia dalla richiesta evapotraspirativa da parte dell'ambiente che dalla concentrazione della CO₂ all'interno delle foglie (Condon et al., 2002). In ambienti mediterranei l'efficienza traspirativa è alta durante l'inverno, quando tassi di evaporazione giornaliera da evaporimetri di classe A variano da 2 a 3 mm, che in primavera o estate. Un metodo per incrementare TE sarebbe quello di assicurare che il massimo accumulo di biomassa avvenga durante i periodi più freddi del ciclo biologico dato lo stretto legame tra il deficit di pressione del vapore saturo (richiesta evaporativa) e la TE. Il consumo idrico risulta più basso in periodi freddi a causa della bassa richiesta evaporativa. Ottenere una crescita veloce nei primi periodi del ciclo, mediante un anticipo delle semine di varietà con vigore vegetativo precoce, consente di ridurre la superficie di suolo esposta all'evaporazione e la presenza di erbe infestanti con conseguente minore competizione.

Ad una determinata richiesta evapotraspirativa e conduttanza stomatica, più bassa è la concentrazione di CO₂ all'interno della foglia e

maggiore è l'efficienza traspirativa. La bassa concentrazione spinge ad una rapida diffusione della CO_2 nella foglia senza modificare di molto il tasso di scambio e diffusione del vapore acqueo all'esterno.

L'incremento d'infiltrazione e la riduzione di ruscellamento, percolazione ed evaporazione e quindi maggiore disponibilità d'acqua per la traspirazione, sono efficaci ai fini del raggiungimento di una WUE elevata (Asseng et al., 2001).

Studi recenti condotti con l'obiettivo di identificare i geni responsabili della efficienza traspirativa e quindi capire il loro funzionamento, hanno portato all'isolamento del gene *ERECTA* (Masle et al., 2005), il quale partecipa a meccanismi legati alla densità stomatica, estensione di cellule epidermiche, proliferazione di cellule del mesofillo e contatto tra cellule. L'incremento dell'efficienza fotosintetica consente una maggiore WUE modificando la pendenza della curva proposta in figura 7.

4.3 Harvest Index (conversione di biomassa in granella)

Il rapporto tra produzione commerciabile e la biomassa totale prodotta viene definito *harvest index* o indice di raccolta. Tale rapporto varia in funzione del consumo idrico prima e dopo la fioritura (Fisher, 1981). Per esempio, colture invernali che raggiungono la fase di fioritura anticipatamente non accumulano biomassa sufficiente per poter formare e riempire un elevato numero di semi. Il rischio di danni da gelate pri-

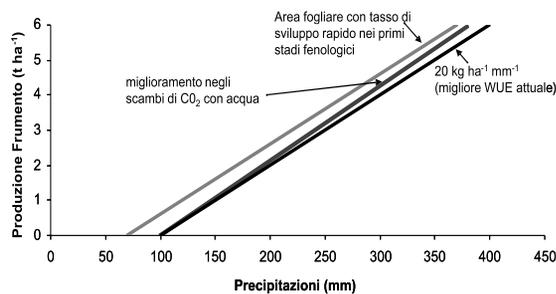


Figura 7. Esempi di WUE: la migliore attualmente; migliorata mediante scambi efficienti di CO_2 con acqua; migliorata mediante riduzione di evaporazione con varietà con vigore vegetativo e tasso di sviluppo di area fogliare rapido nei primi stadi fenologici.

Figure 7. Examples of WUE: best current; improved through better exchange of CO_2 and water; improved with varieties with early vigour and faster leaf area development rate.

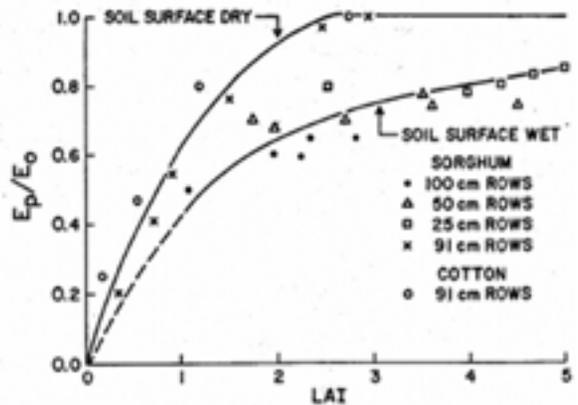


Figura 8. Evaporazione dalle piante (E_p) relativa alla stima di evaporazione di riferimento (E_o) influenzata da LAI quando il contenuto idrico del suolo nella zona radicale non è limitante, per superfici di suolo asciutte e bagnate. Da Ritchie, 1971.

Figure 8. Plant evaporation (E_p) relative to estimated E_o as influenced by LAI when soil water in the root zone is non-limiting for dry and wet soil surface. From Ritchie, 1971.

maverili in questo caso è anche elevato. Per le colture che fioriscono in ritardo, anche se hanno avuto la possibilità di formare un numero elevato di cariossidi, la limitata disponibilità di acqua nel suolo in quel periodo accompagnata da alte temperature, non consente il completo riempimento dei cariossidi (figura 8) (Fisher, 1979; Passioura, 1996, 2006). L'HI può essere considerato indipendente o dipendente dalla siccità. Un HI elevato, indipendente dalla siccità, si raggiunge grazie ad una maggiore traslocazione di sostanza secca delle cariossidi. Geni che contribuiscono alla riduzione della taglia o al momento migliore per la fioritura in un determinato ambiente sono esempi che consentono il raggiungimento di un alto HI.

L'uso dell'acqua dopo l'antesi, invece sembra essere il fattore determinante per un HI che dipende dalla siccità. Ad un elevato consumo idrico dopo l'antesi corrisponde un HI elevato (Passioura, 1972). Quindi in condizioni di apporti idrici limitati, conservare acqua fino alla fioritura per la riempitura dei cariossidi dovrebbe portare a un HI alto. Cultivar di frumento con vasi xilematici delle radici più sottili avrebbero un assorbimento idrico più lento, a causa della resistenza idraulica maggiore dei vasi più stretti, che in condizioni di disponibilità idrica limitata consentirebbe di lasciare dell'acqua disponibile anche dopo l'antesi.

5. Relazioni tra evapotraspirazione e WUE

La proporzione tra evaporazione del suolo e traspirazione della pianta varia in poco tempo. Quando una coltura presenta un LAI basso, l'evaporazione del suolo è la parte sostanziale dell'evaporazione totale, specialmente se la superficie del suolo è inumidita frequentemente. Quando la superficie del suolo è bagnata, anche con piena copertura vegetale, la traspirazione è ridotta in quanto una parte significativa dell'evapotraspirazione (ET) è ad opera dell'evaporazione del suolo. Quando la superficie del suolo è asciutta, la traspirazione può essere quasi al 100%. In uno studio dove traspirazione ed evaporazione del suolo furono misurati separatamente, Ritchie e Burnett (1971) quantificarono l'influenza della copertura parziale sull'ET e trovarono che il LAI di sorgo e cotone era più correlato con la traspirazione come frazione dell'evapotraspirazione potenziale (ET_o) che la copertura del suolo e sostanza secca della pianta. Normalmente la traspirazione è uguale all'evaporazione potenziale quando il LAI raggiunge il valore di 2.5 e quando la superficie del suolo è asciutta. L'aumento di LAI oltre 2.5, determina aumenti di ET minimi per la maggior parte delle colture con distanza tra le file di < 1 m (figura 8).

Ritchie e Johnson (1990) nella loro esemplare revisione sui fattori che influenzano traspirazione ed evaporazione del suolo illustrano questi concetti con diversi esempi ed inoltre presentano un semplice approccio per la previsione del LAI specifico per colture, ma indipendente da sito, suolo, ecc.

Esiste una stretta correlazione tra ET e WUE quando il fattore limitante la produzione è l'acqua. Tanner e Sinclair (1983) trovarono che quando la WUE veniva corretta inserendo un fattore di correzione che considerava le condizioni climatiche locali, essa poteva essere considerata costante per quella particolare specie. Il fattore di correzione climatica era la media stagionale del deficit di pressione di vapore. La giustificazione teorica della loro affermazione scaturisce dal fatto che la traspirazione è direttamente proporzionale alla produzione visto che gli stomi fungono da ingresso per la CO₂ (fotosintesi) e da uscita di acqua (traspirazione). Ritchie (1983) ha dimostrato che un valore costante di traspirazione non è corretto in quan-

to fotosintesi e traspirazione raggiungono il loro massimo a soglie di LAI differenti (LAI ~ 3 per la traspirazione e LAI ~ 7 per la fotosintesi). La causa principale di queste differenze risiede nella presenza di calore sensibile attorno alle piante a valori di LAI basso che causa un aumento della traspirazione rispetto alla fotosintesi. Quando la coltura in campo raggiunge valori di LAI ~ 3 in assenza di stress idrico ETo dipende essenzialmente dall'energia disponibile (richiesta evaporativa) ed è quindi non modificabile. Con LAI > 3 la ripartizione di ET tra suolo e pianta è influenzata dallo stato di umidità della superficie del suolo. Con LAI < 3 la ripartizione di ET tra suolo e pianta è ancora più influenzata dallo stato di umidità della superficie del suolo anche a condizione di ET potenziale. La ET potenziale si raggiunge solo con suolo bagnato e nello stadio dominato dall'energia (energy dependent stage of drying, secondo stadio, Ritchie, 1972). Con LAI = 3 l'intercettazione luminosa di molte colture erbacee è dell'80-85%; se si assume che la fotosintesi giornaliera è proporzionale alla luce intercettata, la WUE sarebbe inferiore del 15% a LAI = 3 rispetto LAI = 7.

Gran parte degli studi di pieno campo che hanno messo in relazione la traspirazione in funzione della biomassa prodotta sono basati solo su stime di biomassa epigea. Il rapporto tra parte epigea e ipogea può essere influenzato da diversi fattori e la proporzione di trasferimento del carbonio tra le due parti dipende dalla competizione delle piante per luce o da fattori limitanti nel suolo. Questo argomento risulta poco documentato in letteratura, ma diversi studi con misure di parte epigea e ipogea (shoot/root ratio) hanno dimostrato il rapporto dinamico delle differenze esistenti nella partizione degli assimilati tra shoot e root. La stima della biomassa epigea o della produttività delle colture basata solo su calcoli di ET e traspirazione deve necessariamente assumere un rapporto tra shoot e root costante, cosa non corretta né realistica.

Diversi autori hanno dimostrato che all'aumentare della produzione aumenta anche la WUE (figura 7). Payne et al. (1997) hanno studiato gli effetti della gestione agronomica ed in modo particolare concimazione azotata e densità di semina e dimostrato che esiste una relazione quasi lineare tra WUE e produzione. Esi-

stono però delle eccezioni. Ad esempio, se ibridi di mais sono messi a confronto in condizioni pedo-climatiche identiche e la loro produzione è differente, tali differenze possono essere dovute alla lunghezza del ciclo o semplicemente alla superiorità di un ibrido rispetto all'altro. Le differenze di produzione causate da lunghezza differente del ciclo possono portare alla stessa WUE, mentre l'ibrido superiore con la stessa lunghezza di ciclo se gestito alla stessa maniera presenterà una WUE maggiore (Ritchie e Basso, 2006).

La produzione di mais è altamente correlata con il numero di cariossidi per unità di superficie alla raccolta. Studi hanno dimostrato che il numero di cariossidi varia in funzione della radiazione solare intercettata nel periodo della fioritura (Andrade et al., 1983, Otegui e Bonhomme, 1988) e al tasso di crescita della coltura (Kiniry et al., 1997; Andrade et al., 1999). Quando il tasso di crescita è basso durante il periodo della fioritura la produzione viene altamente compromessa. Nuovi ibridi hanno la capacità di formare più di 700 cariossidi per spiga con alta densità di popolazione visto che sono necessari solo 25 MJ per pianta di radiazione fotosinteticamente attiva intercettata (IPAR) cumulata contro i 50 degli ibridi di vecchia generazione i quali formano solo 500 cariossidi.

L'adozione dei nuovi ibridi accompagnati da una densità di semina elevata consente il raggiungimento di produzioni record (21 t ha⁻¹ senza irrigazione ottenuta in Iowa negli ultimi 5 anni) e quindi una WUE elevata (Ritchie e Basso, 2006).

6. Irrigazione di soccorso, metodi di stima e WUE

L'irrigazione di soccorso viene utilizzata per stabilizzare la produzione, principalmente in regioni umide. La chiave dell'uso corretto risiede nello sfruttamento efficiente ed efficace delle precipitazioni. La gestione dell'irrigazione in regioni umide e regioni aride è molto diversa, in quanto dipende dalla probabilità delle precipitazioni. In ambienti aridi è pratica comune irrigare fino alla capacità di campo del suolo in modo tale da ridurre il numero di interventi. Se la stessa strategia venisse adottata nelle regioni umide, precipitazioni a pochi giorni dall'irrigazione causerebbero ristagno o eccessiva perco-

lazione e drenaggio, riducendo la WUE di quel determinato apporto. Per minimizzare drenaggio e ristagno bisogna mantenere un deficit idrico senza compromettere le produzioni. È quindi necessario conoscere la risposta delle piante al deficit idrico nelle varie fasi.

Zhang et al. (2006) hanno dimostrato che l'uso dell'irrigazione di soccorso nel frumento incrementa la WUE. Riducendo il numero delle irrigazioni da 4 ad 1, hanno osservato un aumento significativo del numero di cariossidi. Diversi sono gli studi con risultati simili e con diverse colture (Steduto et al., 1997).

Ritchie et al. (1987) hanno dimostrato in uno studio di simulazione sul mais che con irrigazioni di 6 mm invece di 32 mm, si otteneva una riduzione del 40% degli apporti idrici senza compromettere il reddito dell'agricoltore. Confrontando le misure con simulazioni con irrigazione a tasso variabile e uniforme in un terreno del Michigan coltivato a Mais, il risparmio di acqua raggiungeva il 30%. (Ritchie, 1998; Braga e Basso, 2003).

I metodi di stima utilizzati per determinare e prevedere la richiesta di acqua da parte delle piante sono svariati. Gran parte di questi si basano sull'uso di coefficienti colturali basati sulla stima di E_o (Wright, 1981, 1985). L'equazione generale dei coefficienti colturali per la stima della ET è la seguente:

$$K_c = E_t / E_o$$

quindi,

$$E_t = (K_c)(E_o)$$

K_c è un coefficiente senza dimensione per una determinata coltura in determinato stadio fenologico. Il coefficiente colturale rappresenta quindi la variazione stagionale dei valori di K_c determinati empiricamente. Purtroppo la variazione stagionale dei coefficienti colturali non è estrapolabile in altri luoghi, in quanto è dipendente dal tipo di gestione, dal sito, e dal clima specifico del luogo. Valori di K_c sono influenzati dal tipo di gestione agronomica risultante in variazioni di data di semina, numero di piante per m², distanza tra le file, cultivar, profondità delle lavorazioni e quindi volume di terreno esplorato dalle radici. Inoltre i valori di K_c sono sito-specifici a causa dell'elevata variabilità spaziale presente e non sono riproducibili nella stessa forma da un anno all'altro e da un

luogo all'altro in quanto variano in funzione del clima, più specificamente temperatura, radiazione solare e che la frequenza delle precipitazioni che come discusso precedentemente in questo lavoro di review, influenza direttamente l'evaporazione del suolo e la traspirazione. Inoltre variazioni di temperatura influenzano in maniera significativa il tasso di sviluppo delle piante. Hanks (1985) ha confrontato coefficienti colturali per la stessa coltura in due luoghi diversi riportando valori molto differenti, specialmente nella prime fasi fenologiche. Hanks conclude che le differenze erano dipese dall'evaporazione del suolo e i coefficienti variavano di anno in anno per la stessa ragione. Valori di Kc normalizzati, quantificando la percentuale di tempo tra fasi iniziali e copertura piena sono stati proposti da diversi autori (Barman et al., 1983). Neale e Bausch (1985) criticano il metodo della normalizzazione rispetto al tempo di crescita, in quanto condizioni climatiche diverse, specialmente periodi di freddo, possono farsi che la fase di crescita della coltura e i valori Kc non siano in piena corrispondenza, per cui Et può essere sovrastimata. Wright e Jensen (1978) riconoscono i limiti nell'uso dei coefficienti colturali e propongono una funzione generata utilizzando solo dati quando la superficie del suolo era asciutta. Tali coefficienti, definiti, "coefficienti colturali basali" si sono mostrati utili in ambienti aridi dove il numero di giorni in cui la superficie del suolo è facilmente quantificabile. Wright (1985) suggerisce di normalizzare i Kc con il tasso di sviluppo della coltura.

Kanemasu (1983) afferma che la mancanza di una tecnica rapida per la stima del calcolo del LAI è uno dei fattori limitanti al corretto approccio per la programmazione degli interventi irrigui.

Ritchie e Johnson (1990) propongono l'uso di modelli funzionali per la stima del LAI. Questo approccio considera gli effetti della temperatura sulla comparsa delle foglie (fillocrono, quando espressi in gradi giorno), prevede la crescita e l'allungamento fogliare e include l'effetto della variazione nella densità di semina. L'approccio proposto da Ritchie e Johnson (1990) è il seguente:

$$K_{s+p} = (Es+Ep)/Eo$$

dove K_{s+p} è il coefficiente colturale basato su stime separate di evaporazione del suolo e del-

la pianta, e Eo è il tasso potenziale di evaporazione. Il calcolo di Es, Ep e Eo, nonché il modello per la stima del LAI sono descritti dettagliatamente in Ritchie e Johnson (1990). La previsione del LAI consente di prevedere in maniera corretta la richiesta idrica delle colture e quindi programmare oculatamente l'intervento irriguo.

7. Impatto della variabilità spaziale

La tecnologia al servizio dell'agricoltura può contribuire ad aumentare il reddito agricolo sia attraverso la riduzione dei costi sia grazie all'incremento produttivo unitario: un esempio concreto di questa applicazione è rappresentato dall'Agricoltura di Precisione o Sito-Specifica (Basso et al., 2005). Le nuove tecnologie proposte dall'Agricoltura di Precisione possono assumere un ruolo di notevole importanza per l'ottimizzazione delle risorse idriche (acqua meteorica ed irrigazione) a livello aziendale perché costituiscono un insieme di strumenti che incrementano l'efficienza d'uso delle risorse e ottimizzano l'economica della gestione del processo produttivo nel rispetto delle risorse naturali e a garanzia di un elevato standard qualitativo degli alimenti.

Un presupposto fondamentale che giustifica, dal punto di vista tecnico ed economico, il ricorso ai principi, ai sistemi e alle tecnologie tipiche dell'agricoltura di precisione, è proprio la presenza di variabilità all'interno dell'appezzamento, che con l'agricoltura tradizionale ritiene invece una unità di coltivazione omogenea. La variabilità è nello specifico il risultato dell'interazione tra una variabilità spaziale, una variabilità temporale e una variabilità colturale, dal momento che gli stessi fattori (ad esempio quantità d'acqua disponibile, nutrienti ecc) che costituiscono dei limiti all'ottenimento della massima produttività risultano variabili non solo spazialmente ma anche temporalmente (Basso et al., 2001; Machado et al., 2002; Basso, 2003).

L'irrigazione a quantità variabile all'interno dello stesso appezzamento rappresenta un esempio di notevole efficienza d'uso dell'acqua ottenuto grazie al progresso tecnologico e scientifico nel settore dell'agronomia (figura 9). La somministrazione a dosi variabili consiste nel di-

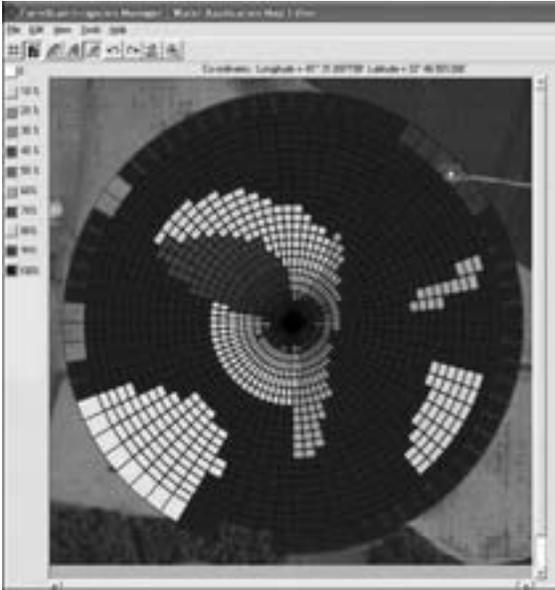


Figura 9. Mappa dell'apporto di acqua espressa in percentuale mediante irrigazione a tasso variabile (Da Farmscan).

Figure 9. Map of variable rate irrigation (From Farmscan).

istribuire il quantitativo di acqua mediante l'irrigazione solamente nelle aree e nelle quantità strettamente necessarie alle richieste della pianta e del terreno. È necessario quindi individuare zone spazialmente e temporalmente omogenee e stabili al fine di incrementare la WUE e la produzione. In questi ultimi anni abbiamo assistito a due significativi cambiamenti che hanno reso possibile la conoscenza in termini quantitativi della variabilità spaziale di tali fattori e l'utilizzo di questa informazione per scopi gestionali. Uno riguarda lo sviluppo di tecnologie che permettono di registrare con un'accuratezza e rapidità senza precedenti informazioni di tipo geo-spaziale, grazie all'introduzione di sistemi di posizionamento satellitare (GPS) ed agli sviluppi nella sensoristica e nel telerilevamento. L'altro riguarda l'impressionante progresso nelle possibilità di elaborare e gestire tali informazioni grazie a progressi scientifici teorici, come lo sviluppo della geostatistica e dei modelli di simulazione del sistema suolo-coltura, ma anche alla diffusione di sistemi informatici appropriati. La complessità di una analisi spazio-temporale del sistema suolo-pianta-atmosfera richiede necessariamente un adeguato strumento informatico che funga da sistema di supporto alle decisioni agronomiche. Esempio di tale sistema è il DSSAT (Jones et al., 2002)

che permette di trasformare i dati raccolti in informazioni e queste in concrete strategie. DSSAT permette di analizzare migliaia di interazioni tra gli elementi di input ed è quindi possibile analizzare le cause che hanno condotto ad una certa situazione, oppure prevedere una casistica futura, ipotizzando diversi tipi di intervento o scenari possibili. La capacità di interpretare processi multifattoriali con integrazioni incrociate permette di applicare con grande profitto i modelli all'agricoltura sito-specifica (Corra et al., 1999).

Diverse tecnologie sono state sviluppate negli ultimi decenni per l'acquisizione di informazioni sulle cause della variabilità spaziale delle capacità produttive delle colture. Particolarmente promettenti per questo scopo sono le tecniche basate su sistemi di telerilevamento per l'acquisizione di dati sullo stato delle piante, ad esempio per la diagnosi di stress idrico od azotato (Basso et al., 2004). Misure effettuate con sistemi di telerilevamento possono essere effettuate rapidamente su estese superfici, senza causare disturbo alla vegetazione. Si prestano ottimamente ad essere applicate nell'ambito dell'agricoltura di precisione essendo probabilmente più fattibili di sistemi intensivi di campionamento del terreno, più costosi e con ulteriori difficoltà di correlare le proprietà del suolo alla risposta delle colture. De Vita e Basso (2005) hanno dimostrato che è possibile prevedere stress idrici mediante l'uso di indici di vegetazione di riflettanza delle piante nelle bande di assorbimento dell'acqua (900, 1400 e 1900 nm) prima che siano visibilmente osservabili. Tale tecnica consente di ottimizzare gli interventi irrigui, apportando acqua al momento e posto giusto.

L'agricoltura di precisione fornisce uno stimolo sempre maggiore agli agricoltori che in diverse zone del mondo, Italia compresa, hanno capito che la gestione ottimale per incrementare il reddito e ridurre le spese può avvenire solo grazie a tale approccio (Passioura, 2002; Basso et al., 2006).

8. Considerazioni conclusive

La nozione di WUE è considerata molto utile per gli agricoltori di zone aride. Valori inferiori a 20 kg di granella ha⁻¹ mm⁻¹ (Passioura, 2006) sono il risultato di palese cattiva gestione agro-

nomica, che impone la ricerca di rimedi efficaci. L'intercetta della curva proposta da French and Schultz (1984) varia se l'evaporazione del suolo viene ridotta, mentre se si migliora l'efficienza traspirativa, varia solo la pendenza e non l'intercetta.

Cultivar con vigore vegetativo precoce, basso numero di culmi di accestimento, vasi xilematici radicali sottili, con elevata efficienza traspirativa, accompagnata da tecniche agronomiche conservative come lavorazioni minime e ritenzione dei residui e corretta gestione della concimazione, costituiscono le migliori opzioni a disposizione degli agricoltori per poter migliorare la WUE e la produzione utile in ambienti aridi.

La riduzione del numero di interventi irrigui, e la corretta gestione dell'irrigazione utilizzando i sistemi di supporto alle decisioni e le tecnologie innovative dell'agricoltura di precisione, consentono di ottimizzare l'uso dell'acqua. L'irrigazione a dose variabile diventerà una realtà sempre più necessaria per ridurre sprechi di acqua nei sistemi agricoli irrigui.

Bibliografia

- Amato M., Ritchie J.T. 2002. Spatial Distribution of Roots and Water Uptake of Maize (*Zea mays* L.) as Affected by Soil Structure. *Crop Sci.*, 42:773-780.
- Andrade F.H., Uhart S.A., Frugone M. 1993. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: shade versus plant density effects. *Crop Sci.*, 33:482-485.
- Andrade F.H., Vega C., Uehart S., Cirilio A., Cantarero M., Valentinuz O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.*, 39:453-459.
- Angus J.F., van Herwaarden A.F., Howe G.N. 1991. Productivity and break crop effects of winter-growing oilseeds. *Austr. J. Exper. Agric.*, 31:669-677.
- Angus J.F. 2001. Nitrogen supply and demand in Australian agriculture. *Austr. J. Exper. Agric.*, 41:277-288.
- Angus J.F., Gault R.R., Peoples M.B., Stapper M., van Herwaarden A.F. 2001. Soil water extraction by dryland crops, annual pastures, and lucerne in south-eastern Australia. *Austr. J. Agric. Res.*, 52:183-192.
- Angus J.F., van Herwaarden A.F. 2001. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat. *Agron. J.*, 93:290-298.
- Aparicio N., Villegas D., Araus J.L., Casadesu's J., Royo C. 2002. Relationship between Growth Traits and Spectral Vegetation Indices in Durum Wheat. *Crop Sci.*, 42:1547-1555.
- Araus J.L., Bort J., Ceccarelli S., Grando S. 1997. Relationship between leaf structure and carbon isotope discrimination in field grown barley. *Plant Physiol. and Biochem.*, 35:553-541.
- Asseng S., Dunin F.X., Fillery I.R.P., Tennant D., Keating B.A. 2001c. Potential deep drainage under wheat crops in a Mediterranean climate. II. Management opportunities to control drainage. *Austr. J. Agric Research*, 52:57-66.
- Asseng S., Fillery I.R.P., Dunin F.X., Keating B.A., Meinke H. 2001a. Potential deep drainage under wheat crops in a Mediterranean climate. II. Temporal and spatial variability. *Austr. J. Agric Research*, 52:45-56.
- Asseng S., Turner N.C., Botwright T., Condon A.G. 2003. Evaluating the impact of a trait for increased specific leaf area on wheat yields using a crop simulation model. *Agron. J.*, 95:10-19.
- Asseng S., Turner N.C., Keating B.A. 2001b. Analysis of water- and nitrogen-use efficiency of wheat in a Mediterranean climate. *Plant and Soil*, 233:127-143.
- Atwell B.J. 1991. Factors which affect the growth of grain legumes on a solonized brown soil. II. Genotypic responses to soil chemical factors. *Austr. J. Agric. Research*, 42:107-119.
- Bacon M.A., Wilkinson S., Davies W.J. 1998. pH-regulated leaf cell expansion in droughted plants is abscisic acid dependent. *Plant Phys.*, 118:1507-1515.
- Basso B. 2000. Digital terrain analysis and simulation modeling to assess spatial variability of soil water balance and crop production. Ph.D. Dissertation. Michigan State University, East Lansing, MI, USA. 174 pp.
- Basso B., Ritchie J.T., Pierce F.J., Jones J.W., Braga R.N. 2001. Spatial validation of crop models for precision agriculture. *Agric. Syst.*, 68:97-112.
- Basso B. 2003. Perspectives of Precision Agriculture. In: Garcia Torres L., Benitez J., Martinez Vilela A. (eds.): *Conservation Agriculture*, 255-262. Kluwer.
- Basso B., Cammarano D., De Vita P., Faraone Mennella R. 2004. Stima della riflettanza spettrale di frumento duro (*Triticum Durum* Desf.) con copertura vegetale variabile mediante indici di vegetazione. *Riv. Ital. di Telerilevamento*, 32:20-29.
- Basso B., Cammarano D., De Vita P. 2004. Remotely Sensed Vegetation Indices: Theory and Application for Crop Management. *Riv. di Agrometeorologia*, 1:34-54.
- Basso B., Ritchie J.T. 2005. Impact of compost, manure, and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan. *Agri. Ecosyst. Environ.*, 108: 329-241.
- Basso B., Ritchie J.T. 2006. System approach to evaluate tillage practices and residues management effects on soil quality. In preparation for *Ital. J. of Agron.*
- Basso B., Sartori L., Bertocco M. 2005. *Agricoltura di Precisione: concetti teorici ed applicazioni pratiche*. Collana Libri, L'informatore Agrario. Verona. 180 pp.

- Batchelor W.D., Basso B., Paz J.O. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Europ. J. Agron.*, 18:141-158.
- Begg J.E., Turner N.C. 1976. Crop water deficits. *Adv Agron.*, 28:161-217.
- Bindi M., Maracchi G., Miglietta F. 1993. Effects of climate change on the ontomorphogenic development of winter wheat in Italy. In: Kenny G.J., Harrison P.A., Parry M.L. (eds.): *The Effects of Climate Change on Agricultural and Horticultural Potential in Europe*. Environmental Change Unit. University of Oxford. Oxford.
- Borin M., Basso B. 2004. La sostanza organica nei suoli agrari. Articolo su invito. Numero speciale sostanza organica. *Mondo Macchina (Machinery World)*, 1:20-25.
- Borrell A., Hammer G., van Oosterom E. 2001. Stay-green: A consequence of the balance between supply and demand for nitrogen during grain filling? *Annals of Applied Biology*, 138:91-95.
- Braga R.N., Basso B. 2003. Assessing potential for site specific irrigation using CERES-Maize Crop model. In: Staffor J., Werner A. (eds.): *Precision Agriculture*, 260-265. IV European Conference on Precision Agriculture, Berlino.
- Clark D.H., Johnson D.A., Kephart K.D., Jackson J.A. 1995. Near infrared reflectance spectroscopy estimation of ¹³C discrimination in forages. *J. Range Manag.*, 48:132-136.
- Clay D.E., Clay S.A., Jackson J., Dalsted K., Reese C., Liu Z., Malo D.D., Carlson C.G. 2003. Carbon-13 Discrimination can be used to evaluate soybean yield variability. *Agron. J.*, 95:430-435.
- Condon A.G., Richards R.A. 1992. Broad-sense heritability and genotype x environment interaction for carbon isotope discrimination in field-grown wheat. *Aust. J. Agric. Res.*, 43:921-934.
- Condon A.G., Richards R.A., Rebetzke G.J., Farquhar G.D. 2002. Improving intrinsic water-use efficiency. *Crop Science*, 42:122-131.
- Cora J.E., Pierce F.J., Basso B., Ritchie J.T. 1999. Simulation of within-field variability of corn yield with Ceres-Maize model. In: Robert P.C., Rust R.H., Larson W.E. (eds.): *Precision Agriculture*, 1309-1319. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Davies W.J., Zhang J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Ann. Rev. Plant. Physiol. Plant Mol. Biol.*, 42:55-76.
- De Vita P., Basso B., Iannetta M. 2005. Vegetation indices to predict plant water stress. *Proceedings II Interdrought Conference*. Roma, 25-28 settembre 2005.
- Denmead O.T., Shaw R.H. 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.*, 45:385-390.
- Dunin F.X., Smith C.J., Zegelin S.J., Leuning R., Denmead O.T., Poss R. 2001. Water balance changes in a crop sequence with lucerne. *Aust. J. Agric. Res.*, 52:247-261.
- Eastham J., Gregory P.J. 2000. The influence of crop management on the water balance of lupin and wheat crops on a layered soil in a Mediterranean climate. *Plant and Soil*, 221: 239-251.
- Farquhar G.D., Ehleringer J.R., Hubick K.T. 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Ann. Rev. Plant. Physiol. Plant Mol. Biol.*, 40:503-537.
- Farquhar G.D. 1997. Carbon Dioxide and Vegetation. *Science*, 278, 543:1411.
- Farquhar G.D., O'Leary M.H., Berry J.A. 1982. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Aust. J. Plant Physiol.*, 9:121-137.
- Farquhar G.D., Richards R.A. 1984. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Aust. J. Plant Physiol.*, 11:539-552.
- Fischer R.A. 1981. Optimising the use of water and nitrogen through breeding of crops. *Plant and Soil*, 58: 249-279.
- Fischer R.A. 1979. Growth and water limitation to dryland wheat yield in Australia: a physiological framework. *Jour. Austr. Instit. Agric. Sci.*, 45:83-94.
- French R.J., Schultz J.E. 1984. Water use efficiency of wheat in a mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Aust. J. Agric. Res.*, 35:743-764.
- Frensch J. 1997. Primary responses of root and leaf elongation to water deficits in the atmosphere and soil solution. *J. Exper. Botany*, 48:985-999.
- Gowing D.J.G., Davies W.J., Jones H.G. 1990. A positive root-sourced signal as an indicator of soil drying in apple, *Malus domestica* Borkh. *J. Exper. Botany*, 41:1535-1540.
- Hasselmann K. 1997. Are We Seeing Global Warming? *Science*, 276:914-915.
- Hatfield J.L., Sauer T.J., Prueger J.H. 2001. Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. *Agron. J.*, 93:271-280.
- Hetherington A.M., Woodward F.I. 2003. The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature*, 424:901-908.
- Hsiao T.C. 1993. Effects of drought and elevated CO₂ on plant water use efficiency and productivity. In: Jackson M.B., Black C.R. (ed.): *Global environment change. Interacting stresses on plants in a changing climate*, NATO ASI Series I, 435-465. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York.
- Hsiao T.C., Frensch J., Rojas-Lara B.A. 1998. The pressure-jump technique shows maize leaf growth to be enhanced by increases in turgor only when water status is not too high. *Plant, Cell and Environ.*, 21:33-42.

- Hubick K.T., Farquhar G.D. 1989. Genetic variation in carbon isotope discrimination and the ratio of carbon gained to water lost in barley. *Plant. Cell. Environ.*, 12:795-804.
- Ismail A.M., Hall A.E. 1992. Correlation between water-use efficiency and carbon isotope discrimination in diverse cowpea genotypes and isogenic lines. *Crop Sci.*, 32:7-12.
- Jordan W.R., Ritchie J.T. 1971. Influence of soil water stress on evaporation, root absorption, and internal water status of cotton. *Plant Physiol.*, 48:783-788.
- Kanemasu E.T., Thurtell G.W., Tanner C.B. 1969. The design, calibration and field use of a standard diffusion parameter. *Plant Physiol.*, 44:881-885.
- Kiniry J.R., Williams J.R., Vanderlip R.L., Atwood J.D., Reicosky D.C., Mulliken J., Cox W.J., Mascagni H.J., Hollinger S.E., Wiebold W.J. 1997. Evaluation of two maize models for nine U.S. locations. *Agron. J.*, 89:421-426.
- Kirkegaard J.A., Sarwar M. 1999. Glucosinolate profiles of Australian canola (*Brassica napus annua* L.) and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars: implications for biofumigation. *Aust. J. Agric. Res.*, 50:315-324.
- Kirkegaard J., Christen O., Krupinsky J., Layzell D. 2004. Break crop benefits in temperate wheat production. In: *New Directions for a Diverse Planet: Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*, Brisbane, Australia.
- Kramer P.J. 1988. Changing concepts regarding plant water relations. *Plant, Cell and Environ.*, 11:565-568.
- Lake J.A., Quick W.P., Beerling D.J., Woodward F.I. 2001. Plant development: Signals from mature to new leaves. *Nature*, 411:154.
- Lemerle D., Gill G.S., Murphy C.E., Walker S.R., Cousens R.D., Mokhtari S., Peltzer S.J., Coleman R., Luckett D.J. 2001. Genetic improvement and agronomy for enhanced wheat competitiveness with weeds. *Aust. J. Agric. Res.*, 52:527-548.
- Ludlow M.M., Muchow R.C. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Adv. Agron.*, 43:107-153.
- Moriana A., Villalobos F.J., Ferreres E. 2002. Stomatal and photosynthetic responses of olive (*Olea europea* L.) leaves to water deficits. *Plant, Cell and Environ.*, 25:395-405.
- Masle J., Gilmore S.R., Farquhar G.D. 2005. The ERECTA gene regulates plant transpiration efficiency in Arabidopsis. *Nature*, 436:866-870.
- Masle, J., Farquhar G.D., Wong S.C. 1992. Transpiration ratio and plant mineral content are related among genotypes of a range of species. *Aust. J. Pl. Physiol.*, 19:709-721.
- Melillo J.M. 1999. Warm, Warm on the Range. *Science*, 283:183-184.
- Miglietta F., Lanini M., Bindi M., Magliulo V. 1997. Free air CO₂ enrichment of potato (*Solanum tuberosum*, L.): Design and performance of the CO₂-fumigation system. *Global Change Biology*, 3, 417-428.
- Miralles D.J., Calderini D.F., Pomar K.P., D'Ambrogio A. 1998. Dwarfing genes and cell dimensions in different organs of wheat. *J. Exp. Bot.*, 49:1119-1127.
- Moss D.N., Musgrave R.B. 1971. Photosynthesis and crop production. *Adv. Agronon.*, 23:317-336.
- Otegui M., Bonhomme R.E. 1998. Grain yield components in maize. 1. Ear growth and kernel set. *Field Crops Res.*, 56:247-256.
- Payne W.A. 1997. Managing yield, water use of pearl millet in the Sahel. *Agron. J.*, 89:481-490.
- Passioura J.B. 1972. The effect of root geometry on the yield of wheat growing on stored water. *Aust. J. Agric. Res.*, 23:745-752.
- Passioura J.B. 1977. Grain yield, harvest index and water-use of wheat. *Jour. Austr. Inst. Agric. Sci.*, 43:117-120.
- Passioura J.B. 1988a. Response to Dr Pj Kramer's article "Changing concepts regarding plant water relations". Vol. 11, pp. 565-568. *Plant, Cell and Environ.*, 11:569-571.
- Passioura J.B. 1988b. Root signals control leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. *Austr. J. Plant Phys.*, 15:687-693.
- Passioura J.B. 1994. The physical chemistry of the primary cell wall: implications for the control of expansion rate. *J. Exper. Bot.*, 45:1675-1682.
- Passioura J.B., Muns R. 2000. Rapid environmental changes that affect leaf water status induce transient surges or pauses in leaf expansion rate. *Aust. J. Plant Physiol.*, 27:941-948.
- Passioura J.B. 2002. Environmental biology and crop improvement. *Funct. Plant. Biol.*, 29:537-546.
- Passioura J.B. 2006. Increasing crop productivity when water is scarce: from breeding to field management. *Agric. Water. Manag.*, 80:176-196.
- Policy H.W., Johnson H.B., Marinot B.D., Mayeux H.S. 1993. Increase in C3 plant water-use efficiency and biomass over Glacial to present CO₂ concentrations. *Nature*, 361:61-64.
- Rasmussen P.E., Goulding K.W.T., Brown J.R., Grace P.R., Janzen H.H., Körschens M. 1998. Long-Term Agroecosystem Experiments: Assessing Agricultural Sustainability and Global Change. *Science*, 282:893-896.
- Rebetzke G.J., Condon A.G., Richards R.A., Farquhar G.D. 2002. Selection for reduced carbon-isotope discrimination increases aerial biomass and grain yield of rainfed bread wheat. *Crop Sci.*, 42: 385-391.
- Richards R.A., Rebetzke G.J., Condon A., van Herwaarden A.F. 2002. Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci*, 42:111-121.
- Ritchie J.T. 1971. Dryland evaporative flux in a subhu-

- mid climate: I. Micrometeorological influences. *Agron. J.*, 63:51-55.
- Ritchie J.T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.*, 8:1204-1213.
- Ritchie J.T. 1973. Influence of soil water status and meteorological conditions on evaporation from a corn capoy. *Agron. J.*, 64:168-173.
- Ritchie J.T. 1983. Efficient water use in crop production: Discussion on the generalità of relations between biomass production and evapotranspiration. In: Taylor H.M. et al. (ed.): *Limitations to efficient water use in crop production*, 29-44. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Ritchie J.T. 1980. Climate and soil Water. In: *Moving Up the yield Curve: Advances and Obstacles*. ASA Special Publication Number 39.
- Ritchie J.T., Godwin D.C., Otter-Nacke S. 1985. CERES-Wheat: A simulation model of wheat growth and development. Texas A&M University Press, College Station, TX.
- Ritchie J.T. 1985. Evapotranspiration empiricisms for minimizing risk in raified agriculture. In: *Advances in evapotranspiration*. Proc. Nati. Conf. On Advances in Evapotranspiration, Chicago. 16-17 Dec. ASAE, St. Joseph, MI, 139-150.
- Ritchie J.T., Burnett E. 1971. Dryland evaporative flux in a subhumid climate: II. Plant influences. *Agron. J.*, 63:56-62.
- Ritchie J.T., Ratliff L.F., Cassel D.K. 1987. Soil laboratory data, field descriptions and field measured soil water limits for some soils of the United States. *ARS Technical Bulletin*, 1-276.
- Ritchie J.T., Amato M. 1990. Field evaluation of plant extractable soil water for irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 278:595-615.
- Ritchie J.T. 2000. Soil water balance and plant water stress. In: Tsuji G.Y., Hoongenboom G., Thorton P.K. (eds.): *Understanding Options for Agricultural Production*, 41-54. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Ritchie J.T., Basso B. 2006. Managing crop for efficient water use. In preparation for *Jour. Exper. Botany*.
- Rivelli A.R., Perniola M., Nardiello I. 1998. Efficienza nell'uso dell'acqua di alcune colture erbacee sottoposte a differenti regimi irrigui: valutazione a livello fogliare. *Riv. Agron.*, 32:45-53.
- Robertson G.P., Paul E.A., Harwood R.R. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science*, 289:1922-1925.
- Roget D.K., Neate S.M., Rovira A.D. 1996. Effect of sowing point design and tillage practice on the incidence of rhizoctonia root rot, take-all and cereal cyst nematode in wheat and barley. *Aust. J. Agric. Res.*, 36:683-693.
- Rosenzweig C., Hillel D. 1998. *Climate Change and the Global Harvest*. Oxford eds.
- Saab I.M., Sharp R.E. 1989. Non-hydraulic signals from maize roots in drying soil: inhibition of leaf elongation but not stomatal conductance. *Planta*, 179:466-474.
- Scholand P.F., Hammel H.T., Bradstreet E.D., Hemmingsen E.A. 1965. Sap pressure in plants. *Science*, 149:920-922.
- Seckler D.W., Barker R., Amarasinghe U. 1999. Water scarcity in the twenty-first century. *Intern. Jour. Water Res. Develop.*, 15:29-43.
- Sinclair T.R., Ludlow M.M. 1985. Who taught plants thermodynamics? The unfulfilled potential of plant water potential. *Aust. J. Plant Physiol.*, 12:213-217.
- Sinclair T.R., Purcell L.C., Sneller C.H. 2003. Crop transformation and the challenge to increase yield potential. *Trends Plant Sciences*, 9:70-75.
- Silburn D.M., Glanville S.F. 2002. Management practices for control of runoff losses from cotton furrows under storm rainfall. I. Runoff and sediment on a black vertisol. *Aust. J. Soil Res.*, 40:1-20.
- Slatyer R.O. 1969. Physiological significance of internal water relations to crop yield, p. 55-83. In: Eastin J.D. et al. (ed.): *Physiological aspects of crop yield*. ASA and CSSA, Madison, WI.
- Smith S.D., Huxman T.E., Zitzer S.F., Charlet T.N., Housman D.C., Coleman J.S., Fenstermaker L.K., Seemann J.R., Nowak R.S. 2000. Elevated CO₂ increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem. *Nature*, 408:79-82.
- Steduto P. 1996. Water use efficiency. In: Pereira L.S., Feddes R.A., Giffley J.R. Lesaffre B. (eds.): *Sustainability of irrigated agriculture*, NATO ASI Series E; Applied Sciences, 193-209. Kluwer Academic Publ., Dordrecht.
- Steduto P., Hsiao T.C. 1998. Maize canopies under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. *Agric and For. Meteorol.*, 89:169-184.
- Steduto P., Katerji N., Puertos-Molina H., Unlu M., Mastrorilli M., Rana A. 1997. Water-use efficiency of sweet sorghum under water stress conditions. Gas exchange investigations at leaf and canopy scales. *Field Crops Res.*, 54:221-234.
- Stewart B.A., Robinson C.A. 1997. Are agroecosystems sustainable in semiarid regions? *Adv. Agron.* 60:191-228.
- Tang C., Buirchell B.J., Longnecker N.E., Robson A.D. 1993. Variation in the growth of lupin species and genotypes on alkaline soil. *Plant and Soil*, 155:513-516.
- Tanner C.B., Sinclair T.R. 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search? In: Taylor H.M., Jordan W.R., Sinclair T.R. (eds.): *Limitations to efficient water use in crop production*, 1-27. American Society of Agronomy, Wisconsin, USA.
- Teramura A.H., Sullivan J.H., Ziska L.H. 1990. Interaction of elevated ultraviolet-B radiation and CO₂ on productivity and photosynthetic characteristics in wheat, rice, and soybean 1. *Plant Physiol.*, 94:470-475.

- Termaat A., Passioura J.B., Munns R. 1985. Shoot turgor does not limit shoot growth of NaCl-affected wheat and barley. *Plant Phys.*, 77:869-872.
- Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418:671-677.
- Tubiello F., Rosenzweig C., Volk T. 1995. Interactions of CO₂, temperature and management practices: Simulations with a modified version of CERES-Wheat. *Agric. Syst.*, 49:135-152.
- Turner N.C. 2001. Optimising water use. In: Nösberger J., Geiger H.H., Struik P.C. (eds.). *Crop science: progress and prospects*, 119-135. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Turner N.C. 2004. Sustainable production of crops and pastures under drought in a Mediterranean environment. *Annals of Applied Biology*, 144:139-174.
- van Bavel C.H.M. 1967. Changes in canopy resistance to water loss from alfalfa induced by soil water depletion. *Agric. Meteorol.*, 4:165-176.
- van Herwaarden A.F., Passioura J.B. 2001. Improving estimates of water-use efficiency in wheat. *Aust. Grain*, 3:5.
- Wall G.W., Garcia R.L., Kimball B.A., Hunsaker D.J., Pinter P.J., Jr., Long S.P., Osborne C.P., Hendrix D.L., Wechsung F., Wechsung G., Leavitt S.W., LaMorte R.L., Idso S.B. 2006. Interactive effects of elevated carbon dioxide and drought on wheat. *Agron. J.*, 98:354-381.
- Watts W.R. 1974. Leaf extension in *Zea Mays*. III. Field measurements of leaf extension in response to temperature and leaf water potential. *J. Exp. Bot.*, 25:1085-1096.
- Zhang X., Suying C., Mengyu L., Dong P., Hongyong S. 2005. Improved Water Use Efficiency Associated with Cultivars and Agronomic Management in the North China Plain. *Agron. J.*, 97:783-790.