

I GEORGOFILI

Quaderni
2005-IV



INNOVAZIONI NEL MIGLIORAMENTO
QUALITATIVO DELLA PRODUZIONE
DELLE SPECIE LEGNOSE DA FRUTTO
ATTRAVERSO L'IRRIGAZIONE

Firenze, 24 novembre 2005

SOCIETÀ EDITRICE FIORENTINA

Con il contributo di



Copyright © 2006
Accademia dei Georgofili
Firenze
<http://www.georgofili.it>

Proprietà letteraria riservata

Supplemento a «I Georgofili. Atti dell'Accademia dei Georgofili»
Anno 2005 - Serie VIII - Vol. 2 (181° dall'inizio)

Responsabile redazionale: dott. Paolo Nanni

Servizi redazionali, grafica e impaginazione
SOCIETÀ EDITRICE FIORENTINA
Via G. Benivieni 1 - Firenze
Tel. 055 5532924
Fax: 055 5532085
e-mail: info@sefeditrice.it
www.sefeditrice.it

INDICE

FILIBERTO LORETI <i>Introduzione</i>	7
PAOLO MANNINI <i>Qualità e uso dell'acqua di irrigazione</i>	II
ROSSANO MASSAI <i>Metodi per la determinazione delle esigenze idriche in frutticoltura, viticoltura e olivicoltura</i>	33
GIANCARLO SCALABRELLI <i>Razionale gestione dell'acqua di irrigazione in viticoltura</i>	77
RICCARDO GUCCI, MAURIZIO SERVILI <i>L'irrigazione in deficit controllato in olivicoltura</i>	II9

FILIBERTO LORETI*

Introduzione

Desidero innanzitutto esprimere, a nome dei relatori e mio personale, il più vivo ringraziamento al Presidente dell'Accademia dei Georgofili, Prof. Franco Scaramuzzi, per averci dato l'opportunità di illustrare e discutere in questa prestigiosa sede, uno degli argomenti che, soprattutto in questi ultimi anni, sta destando sempre maggiore interesse e non poche preoccupazioni nell'intero comparto delle specie legnose da frutto, e cioè l'utilizzo dell'acqua di irrigazione come strumento per ottenere produzioni di elevata qualità e per superare condizioni di stress idrico determinate dall'andamento delle precipitazioni.

Per alcuni il binomio 'innovazione-irrigazione' potrebbe sembrare non del tutto appropriato dato che l'irrigazione è una pratica colturale ormai consolidata per numerose specie da frutto. In realtà vedremo che ci sono molteplici motivi che hanno reso opportuna l'organizzazione di una giornata di studio dedicata a questo specifico tema. Innanzitutto, ed è ormai argomento di attualità anche per la pubblica opinione, la variabilità degli eventi climatici di questi ultimi anni ha determinato notevoli disagi e ingenti danni economici agli addetti del settore agricolo.

Ricordiamo ad esempio le alte temperature e la prolungata siccità dell'anno 2003 seguito da anni caratterizzati da estati decisamente piovose e con temperature molto al di sotto della media. Non entro nel merito dei cambiamenti climatici come aumento delle temperature medie, lasciando agli esperti di queste discipline la valutazione della reale entità del fenomeno; mi sento però di affermare che un cambiamento che sta avvenendo riguarda l'irregolarità della frequenza e dell'intensità di eventi climatici anomali, e mi riferisco soprattutto alle precipitazioni e alle temperature. È facile intuire a questo punto

* *Dipartimento di Coltivazione e Difesa delle Specie Legnose "G. Scaramuzzi", Università degli Studi di Pisa*

quanto importante sia l'irrigazione nella prevenzione di stati di stress idrico al verificarsi di questi eventi.

Naturalmente legato al problema del clima vi è quello della progressiva riduzione della disponibilità di risorse idriche in agricoltura, problema non recente ma che diventa progressivamente più grave fino a divenire emergenza in anni di particolare scarsità delle piogge. Questa scarsità impone la necessità di risparmiare acqua, essendo l'agricoltura il principale settore di consumo delle risorse idriche, problema a cui ricercatori, tecnici e amministratori devono porre adeguata attenzione.

Dal punto di vista della ricerca possiamo dire che il numero e il livello di conoscenze fisiologiche sull'utilizzazione dell'acqua da parte delle principali specie legnose da frutto è tale da poter ipotizzare la realizzazione di protocolli di gestione dell'irrigazione che ottimizzino l'efficienza di impiego dell'acqua. Tuttavia, questo è ancora lungi dal trovare pratica applicazione, non solo per i soliti problemi di trasferibilità dei risultati della ricerca al campo, ma direi anche per la suddetta imprevedibilità degli eventi climatici e per la inadeguatezza dei sistemi di monitoraggio a livello aziendale.

Possiamo comunque affermare che proprio le innovazioni tecnologiche nel settore del monitoraggio dello stato idrico delle colture ai fini della corretta gestione irrigua è uno dei campi che ha dato i maggiori risultati, e non a caso, è argomento che viene ampiamente trattato in una delle relazioni di questa mattina.

Un'efficiente utilizzazione dell'acqua di irrigazione non può prescindere dalle aspettative di qualità che gli attuali consumatori, sempre più esigenti, si attendono dai prodotti frutticoli, viticoli e olivicoli. Direi che questo aspetto è quello di maggiore attualità in quanto il miglioramento della qualità delle produzioni è ormai un imperativo per tutte le filiere agricole italiane e non solo italiane. Già a partire dagli anni '80 diversi lavori di ricerca misero in evidenza che il soddisfacimento totale dei fabbisogni evapotraspirativi, spesso non si traduceva nell'espressione di elevati livelli qualitativi della produzione, ma che modesti e controllati deficit idrici in determinati stadi fenologici potevano dare origine a prodotti di migliore qualità. In tal senso fu ripreso e rivisitato il concetto di irrigazione in deficit idrico controllato che era stato sviluppato e messo a punto nella seconda metà degli anni '70 per il controllo della vigoria degli alberi da frutto.

L'ulteriore novità della cosiddetta "irrigazione qualitativa" è rappresentata dalla possibile applicazione dei concetti sopra esposti anche a filiere di grandissima importanza per l'economia della nostra e di altre regioni italiane, la vite e l'olivo, tradizionalmente non interessate alla pratica irrigua, a causa

dell'errata opinione che il loro naturale adattamento a condizioni di stress idrico, anche prolungato, fosse da solo capace di fornire sempre e comunque la migliore qualità possibile nel vino e nell'olio. Seppure i risultati ottenuti in queste due filiere sulla qualità dei prodotti trasformati non siano conclusivi, dato il periodo ancora limitato di studio, emergono già con chiarezza alcuni vantaggi dell'irrigazione, che vengono illustrati nelle due specifiche relazioni di filiera.

Mi sembra che a questo punto siano evidenti a tutti le ragioni, sia scientifiche che applicative, alla base di questa giornata di studio.

Prima di congedarmi, però, volevo soltanto sottolineare alcuni aspetti salienti che verranno trattati dai singoli relatori.

Nella prima relazione il Dott. Mannini, dopo aver illustrato le principali caratteristiche qualitative dell'acqua di irrigazione, affronta i temi generali dell'ottimizzazione della scelta e della gestione dei sistemi e dei metodi irrigui, con particolare riguardo ai riflessi sulla qualità dei frutti. La trattazione sarà improntata prendendo in considerazione i più recenti principi ispiratori dei protocolli della "buona pratica irrigua" e della possibile realizzazione di sistemi esperti per il calcolo del bilancio idrico che consentono una gestione sempre più oculata e puntuale dell'irrigazione.

Successivamente il Prof. Massai illustrerà quali sono le più recenti evoluzioni dei sistemi di monitoraggio delle esigenze idriche e dello stato idrico delle colture arboree ai fini di una corretta gestione dell'irrigazione. Solo attraverso un'attenta e puntuale conoscenza del comportamento della pianta si riesce infatti a ottenere prodotti caratterizzati da elevata qualità delle colture legnose da frutto. Saranno pertanto passati in rassegna i principali metodi per la determinazione del contenuto idrico del suolo, dello stato idrico delle colture e dei flussi traspirativi delle piante utilizzabili ai fini della corretta gestione dei turni e dei volumi di adacquamento.

Seguono poi due relazioni direi di filiera, sull'irrigazione gestita ai fini del miglioramento della qualità di prodotti trasformati quali il vino e l'olio di oliva. Questi argomenti sono di per sé innovativi, dato che l'irrigazione non veniva considerata, fino a poco tempo fa, come una pratica necessaria o utilizzabile per l'ottimizzazione della qualità.

Per quanto riguarda la vite, Il Prof. Scalabrelli, dopo una breve illustrazione sugli effetti dello stress idrico sulla vite, prenderà in considerazione diverse strategie di gestione degli interventi irrigui messe in atto in questi ultimi anni, ovvero le tecniche già note come PRD (partial root dryng) e RDI (regulated idric deficit). Particolare attenzione sarà rivolta all'esame dei risultati conseguiti adottando diversi regimi idrici sulle componenti della qualità

delle uve con la prospettiva di migliorare le caratteristiche delle produzioni vitivinicole.

Infine, relativamente all'olivo il Prof. Gucci, dopo aver passato in rassegna le più recenti e significative esperienze condotte all'estero, presenta i risultati di un biennio di sperimentazione in Toscana. Da tali prove emerge l'importanza che l'irrigazione riveste nel modificare alcune caratteristiche organolettiche e analitiche dell'olio e l'utilità della gestione in deficit controllato per ottimizzare l'efficienza della risorsa idrica.

Ritengo opportuno terminare qui questa mia breve introduzione ai lavori di questa mattina per lasciare tutto lo spazio necessario alle relazioni e alla successiva discussione che mi auguro sia animata da numerosi interventi.

PAOLO MANNINI*

Qualità e uso dell'acqua di irrigazione

INTRODUZIONE

L'irrigazione delle specie legnose da frutto è una pratica che risulta in larga espansione in tutti gli ambienti italiani. I dati dell'ultimo censimento evidenziano, infatti, la forte dipendenza dei frutteti e della vite dall'irrigazione; oltre 302.000 ettari di piante da frutto e 182.000 ettari di vite sono stati irrigati nell'anno 2000.

Il rapido passaggio da una fruttiviteicoltura tradizionale a quella industriale ha comportato una più rilevante dipendenza dall'irrigazione del comparto: l'impiego di portinnesti poco vigorosi, assieme all'incremento della densità delle piante e alla diffusione dell'inerbimento interfilare, hanno portato a un minore sviluppo ed efficienza degli apparati radicali e a un deciso incremento della superficie fogliare traspirante del frutteto, rendendo le piante meno capaci di sfruttare le riserve idriche naturali del terreno e quindi più dipendenti dagli apporti artificiali d'acqua.

Naturalmente, anche la necessità di ottenere una rapida entrata in produzione, quella di ottenere elevate e omogenee pezzature commerciali dei frutti e di riduzione dell'alternanza di produzione, hanno ulteriormente reso necessario il ricorso a un'irrigazione sistematica, quale tecnica capace di consentire tali risultati.

L'irrigazione delle specie legnose da frutto è quindi ormai diventata una tecnica imprescindibile per l'ottenimento di buoni risultati quanti-qualitativi e per la sostenibilità economica delle aziende frutticole; per contro le sempre più pressanti necessità di risparmio idrico devono assolutamente

* *Consorzio di bonifica di secondo grado per il Canale Emiliano Romagnolo*

indirizzare l'irrigazione verso un uso molto attento, oculato ed efficiente dell'acqua distribuita. In poche parole occorre impiegare tutte le tecniche agronomiche e tecnologiche capaci di eliminare le perdite non produttive d'acqua per far sì che ogni metro cubo d'acqua irrigua porti ai massimi risultati produttivi.

MODALITÀ D'USO EFFICIENTE DELL'ACQUA IRRIGUA IN FRUTTICOLTURA

Per risparmiare acqua non si deve puntare su un'unica tecnica o soluzione, ma su un insieme di strategie ben integrate tra loro e capaci di raggiungere efficaci risultati. Puntare su una singola azione di risparmio idrico non consente, di solito, di ottenere risultati incisivi; in frutticoltura le principali modalità di risparmio idrico possono raggrupparsi in:

- riuso acque reflue o di cattiva qualità
- pratiche di aridocoltura
- scelta della specie, varietà e portinnesto
- strategie di gestione irrigua
- scelta e gestione sistema irriguo

Qualità dell'acqua e irrigazione

Per realizzare consistenti risparmi idrici è necessario da un lato ridurre e razionalizzare i consumi applicando tecnologie irrigue di alto livello e, dall'altro, garantire acqua di buona qualità per gli usi agricoli. Definita la qualità minima della risorsa idrica da impiegarsi in agricoltura la sfida sarà dunque il garantirne un sufficiente approvvigionamento approfittando di tutte le fonti idriche convenzionali e alternative. Una sfida che si accompagna con l'inevitabile soggiacenza dell'agricoltura agli usi pregiati, e in particolare con il riuso dei reflui urbani, che di questa rivoluzione è una delle conseguenze necessarie.

L'impiego di acque di scadente qualità per l'irrigazione deve prendere in considerazione numerosi aspetti:

- tecnologia irrigua impiegata;
- apporto irriguo in relazione alle caratteristiche del suolo;
- apporto irriguo in relazione ai fabbisogni della pianta;

- effettuazione della fertirrigazione.
- tutela della salute dell'operatore e del consumatore.

Quest'ultimo aspetto, legato ai riflessi igienico-sanitari dell'uso di acque imperfette, è oggi molto attuale anche perché la sensibilizzazione del consumatore sui problemi legati alla salubrità delle produzioni ha spinto le Autorità e i diversi soggetti della filiera agroalimentare a predisporre norme e regolamenti capaci di salvaguardare la qualità e la salubrità degli alimenti (2001/178/CE, EUREPGAP, HACCP, EMAS II, ISO 14001), sollecitando la certificazione delle produzioni agricole nei riguardi del rischio di contaminazione di inquinanti di varia origine, anche veicolati dalle acque irrigue. Oggi, l'accettazione da parte di alcuni mercati esteri e della grande distribuzione internazionale è vincolata alla conoscenza delle caratteristiche qualitative dell'acqua irrigua impiegata nel processo produttivo, con implicazioni commerciali ed economiche di estremo rilievo, perché la qualità dell'acqua irrigua utilizzata può portare alla esclusione dei prodotti agricoli e agroindustriali dai mercati più ricchi e avanzati.

I rischi prevalenti sono determinati dalla contaminazione microbica, dall'elevato livello di nitrati e dall'eventuale presenza di inquinanti organici di sintesi nei prodotti. La contaminazione microbiologica è potenzialmente possibile in prodotti agricoli irrigati con acque contaminate da un'ampia gamma di batteri, responsabili di diverse forme di gastroenteriti, salmonellosi, shigellosi, febbri tifoidee, colera ed enteropatie; di virus, tra cui gli agenti dell'epatite infettiva e della poliomielite; d'elminti, causa di ascariasi e trichiniasi; di protozoi agenti, tra l'altro, di amebiasi e coccidiosi.

I nitrati contenuti nelle acque irrigue sono rapidamente traslocati e accumulati nelle parti eduli, specialmente nelle fasi terminali del ciclo. Per molte colture ortive da consumo fresco o da industria, quali lattuga e specie da insalate in genere, spinacio, rucola, patata e pomodoro, il contenuto in nitrati dovrà essere progressivamente ridotto per poter collocare il prodotto sui mercati europei. Un'eccessiva od incontrollata disponibilità di nutrienti, che provochi indesiderati effetti di bioaccumulo nelle parti eduli, rischia quindi di rendere invendibile il prodotto.

Infine, l'acqua irrigua può contenere composti organometallici, organofosforici, organostannici, IPA, PCBs, pesticidi e loro metaboliti, quali composti organici e inorganici arseniati. Tutti questi composti possono entrare per mezzo di vegetali contaminati nella catena alimentare in quantità e con effetti difficilmente stimabili.

Tra gli altri aspetti da tenere in considerazione nell'uso di acque imperfette o reflue, quelli legati alla tecnologia irrigua impiegata sono importanti perché influenzano sia le caratteristiche di contatto o meno dell'acqua con la vegetazione, sia le problematiche e le disfunzioni che una cattiva qualità dell'acqua possono determinare sulle componenti degli impianti irrigui.

L'irrigazione per scorrimento rappresenta il più basso livello tecnologico e di efficienza nell'uso irriguo, ma offre la possibilità di utilizzare risorse idriche di qualità anche scadente. L'irrigazione per aspersione consente un aumento considerevole dell'efficienza nell'utilizzo della risorsa irrigua e può comunque utilizzare acque di qualità medio-bassa. La microirrigazione è senza dubbio il metodo attualmente più avanzato per ottenere la massima efficienza dell'apporto irriguo ma richiede al pari un'elevata qualità delle acque, specie se a questa tecnica è abbinata la fertirrigazione. La presenza di sali in soluzione o sospensione e quella di alghe e batteri devono essere determinate per attuare tutte le necessarie scelte tecnologiche specie in ordine alla necessità di filtrazione delle acque per la microirrigazione, e per la valutazione dei rischi di occlusione e incrostazione dei sistemi irrigui adottati.

L'impiego di metodi irrigui per aspersione con acque a elevata carica microbica, può determinare peggioramenti delle caratteristiche igieniche del prodotto destinato al mercato fresco al punto da non renderle idonee al consumo.

L'impiego di acque saline può sia determinare l'impossibilità di irrigare per aspersione sia provocare il progressivo accumulo di sali nel suolo con perdita di fertilità del terreno ed effetti di bioaccumulo di metalli pesanti e altri composti all'interno delle parti eduli, e il loro conseguente ingresso nella catena alimentare.

Livelli relativamente elevati di sodio nelle acque (SARa di 6.0÷9.0 meq/l) provocano una progressiva riduzione della capacità del terreno di infiltrare acque meteoriche od irrigue, mentre livelli elevati (SARa > 9.0 meq/l) rendono le acque poco idonee all'uso irriguo.

Altri effetti negativi determinati dall'uso di acque di scadente qualità sono quelli legati ai numerosissimi effetti di fitotossicità che possono essere determinati dalla presenza di boro e cloro, o da quella di metalli (Cu, Fe, Zn, Mn, Mo) che, se in eccesso, possono provocare fenomeni di tossicità da oligoelementi nella pianta, mentre altri risultano comunque tossici (Cd, Ni, Pb, Hg, Li).

L'apporto di macroelementi (N, P, K), mesoelementi (Ca, Mg, S) e microelementi (Cu, Fe, Zn, Mn, Mo) in forma facilmente assimilabile attraverso l'acqua irrigua può essere considerato positivamente o negativamente in

funzione della quantità, del momento rispetto al ciclo vegetativo della coltura e del loro equilibrio in termini di concentrazione. Possono infatti essere facilmente causa di squilibri nutrizionali in grado di danneggiare sensibilmente la quantità delle produzioni agricole e il loro valore mercantile, specie se correlato alle caratteristiche qualitative del prodotto (colore, forma, consistenza, serbevolezza, ecc.).

Tecniche agronomiche di risparmio idrico

L'insieme delle tecniche agronomiche mirate alla conservazione dell'acqua nel sistema agricolo è normalmente denominata "Aridocoltura". Originariamente pensata per ottenere i migliori risultati produttivi senza dover ricorrere all'irrigazione, può trovare applicazione anche negli ambienti sub-umidi e nell'agricoltura irrigua per favorire l'aumento delle disponibilità idriche naturali delle colture e ridurre le perdite non produttive d'acqua.

L'ottenimento di un'elevata capacità di accumulo idrico nello strato di suolo esplorato dagli apparati radicali delle legnose da frutto può essere raggiunto mediante una perfetta preparazione del terreno sul quale impiantare il nuovo frutteto; scassi e arature molto profonde sono assolutamente indispensabili per ampliare lo strato di terreno disponibile per l'approfondimento degli apparati radicali delle colture. Radici più profonde e sviluppate consentono alla pianta una maggiore possibilità di estrazione d'acqua dal terreno e una maggiore densità radicale, migliorando la resistenza alla siccità della coltura.

La riduzione delle perdite per evapotraspirazione dal sistema colturale può essere conseguita, ad esempio, riducendo l'evaporazione dal suolo o modificando parzialmente il microclima mediante l'impiego di frangivento.

Sulle arboree da frutto le ampie superfici di terreno interfilare rappresentano un importante elemento di perdita non produttiva d'acqua, e la più efficiente forma di aridocoltura sarebbe quindi legata alla eliminazione completa delle infestanti e dell'inerbimento per effettuare delle lavorazioni superficiali capaci di ridurre in maniera consistente l'evaporazione. La riduzione dell'evaporazione dal suolo avviene come effetto della drastica diminuzione della conducibilità idrica del terreno dello strato lavorato; in sostanza, la lavorazione superficiale interrompe la risalita capillare dagli strati di suolo profondi e umidi, determinando una consistente riduzione dell'evaporazione. La "rottura" della capillarità del terreno e l'effetto antievaporante dello strato lavorato avranno quindi un effetto di auto-pacciamatura sullo strato sottostante che conserverà meglio l'acqua in esso contenuta.

La lavorazione superficiale del terreno impedisce però la tecnica dell'inerbimento interfilare del terreno, determinando la perdita dei numerosi effetti vantaggiosi rappresentati dal miglioramento della transitabilità dell'interfilare, dalla prevenzione dell'erosione nei terreni declivi, e da un generale miglioramento delle caratteristiche fisiche del terreno che possono comportare sia un maggiore accumulo di riserve idriche naturali, sia l'ottenimento di apparati radicali più espansi ed efficienti.

D'altra parte, l'inerbimento comporta una maggiore perdita d'acqua per traspirazione da parte del cotico erboso che deve portare ogni azienda fruttivivicola a valutare, in base alla disponibilità di risorse idriche e al loro costo, se rinunciare o no agli aspetti positivi dell'inerbimento per giungere a un minor consumo d'acqua.

L'incremento dei consumi idrici dei frutteti sottoposti a inerbimento è ben evidenziato dai coefficienti colturali (Kc) che risultano mediamente più elevati del 10% nelle fasi iniziali di ripresa vegetativa dell'inerbimento e della pianta da frutto, per superare il 20% nelle fasi di massima fogliosità e durante l'accrescimento dei frutti (tab. 1).

Applicando i coefficienti colturali a un bilancio idrico di un frutteto di pomacee adulto posto, ad esempio, in Emilia-Romagna, si rileva che il maggior consumo d'acqua per evapotraspirazione dell'interfilare inerbito è di circa 1400 m³/ha, che porterà alla necessità di irrigazioni supplementari con minore efficienza produttiva nell'uso dell'acqua irrigua.

Prove condotte dal Consorzio per il Canale Emiliano Romagnolo hanno reso evidente la forte competizione per l'acqua determinata dal cotico erboso, nei confronti del pesco e del pero.

Sul pesco, la media dei primi quattro anni di produzione ha evidenziato una resa con inerbimento di 127 q/ha contro i 137 q/ha/anno del confronto mantenuto lavorato, una riduzione della sezione del fusto di circa l'8% e un più contenuto numero di frutti sulla pianta: 273 contro 302 del lavorato.

SPECIE/INTERFILARE	KC INIZIALE	KC INTERMEDIO	KC FINALE
MELO, PERO, CILIEGIO			
Inerbito	0.50	1.20	0.95
Lavorato	0.45	0.95	0.70
PESCO, ALBICOCCO, SUSINO			
Inerbito	0.50	1.15	0.90
Lavorato	0.45	0.90	0.65

Tab. 1 *Coefficienti colturali delle pomacee e delle drupacee in condizioni di interfilare inerbito o lavorato (F.A.O., ID 56)*

La prova ha anche reso evidente che in condizioni idriche ottimali determinate da irrigazioni a pieno soddisfacimento idrico (100%ETM) l'inerbimento consente maggiori rese rispetto al terreno lavorato (fig. 1). Inoltre, la produzione della tesi asciutto/lavorato eguaglia quella del confronto inerbito ma irrigato con 100mm, rilevando, di fatto, i maggiori consumi teoricamente ipotizzati (Mannini, Gallina, 1998).

In termini economici la perdita monetaria conseguente all'inerbimento è ancora più rilevante di quella osservata sulla resa, infatti, la riduzione di produzione è risultata anche accompagnata da minori pezzature commerciali delle pesche con forti riduzioni sul prezzo di pagamento delle stesse.

Anche sul pero, osservato in assenza di irrigazioni, l'effetto deprimente dell'inerbimento interfilare nei confronti della resa è risultato notevole con decrementi sulla cv. Conference del 25% e sulla cv. William del 12% (fig. 2).

Altre prove effettuate su vite Barbera nel nord-Italia hanno mostrato che l'inerbimento provoca consistenti riduzioni di vigoria e produzione (fig. 2), accompagnate da deficienze di maturazione dei grappoli determinate dalla carenza idrica indotta dai maggiori consumi del prato interfilare (Bovio et al., 2000), analoghe o ancor più drastiche perdite produttive sono descritte da altri autori in ambienti meridionali più aridi.

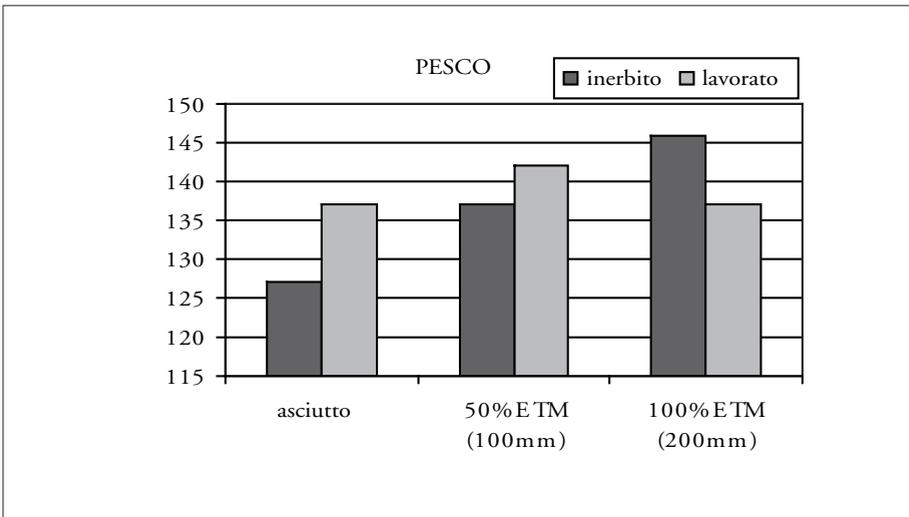


Fig. 1 Effetti dell'irrigazione per aspersione in interazione all'inerbimento interfilare del pesco. Media 1985-89 di due varietà e due portinnesti a Cesena (Mannini e Gallina, 1998)

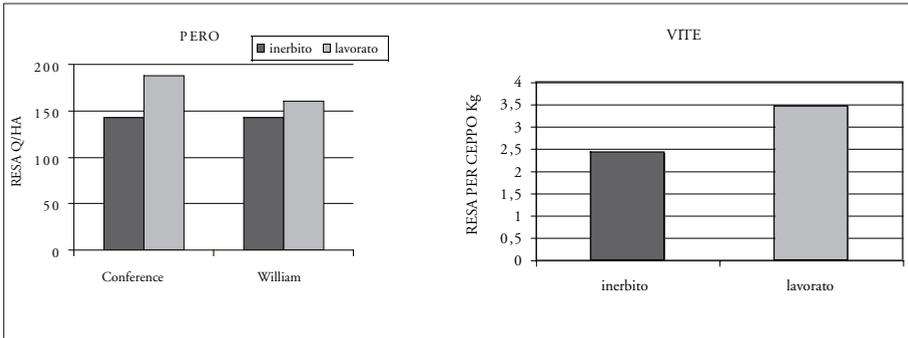


Fig. 2 Effetti dell'inerbimento interfilare del pero (Consorzio CER, 1989) e della vite (Bovio et al., 2000) in condizioni non irrigue

Le disponibilità irrigue presenti in azienda devono sempre indirizzare e influire nella scelta della specie, della varietà e di portinnesti capaci di ridurre le necessità idriche delle colture.

Un maggior ricorso a specie più aridoresistenti come la vite od il pesco, piuttosto che al melo od addirittura al kiwi, comporta un'ovvia minore necessità d'acqua. Le differenze di necessità irrigue tra le specie sono sia dipendenti dalle loro specifiche esigenze, sia dalla coincidenza delle fasi di massima idroesigenza con i periodi di minore piovosità e maggiore domanda evapotraspirativa dell'ambiente.

Per gli stessi motivi, anche la varietà impiegata può comportare discrete differenze di necessità idriche, in particolare la scelta di varietà che per la loro precocità permettono sia un miglior sfruttamento delle riserve idriche primaverili del suolo, sia di abbreviare le fasi biologiche di maggior necessità idriche.

Ad esempio, la scelta di varietà di pesco precoci riduce i volumi irrigui necessari anche in maniera molto considerevole. Infatti, le varietà più precoci dimezzano le necessità irrigue rispetto alle più tardive, consentendo un forte risparmio idrico (Mannini e Gallina, 2001). Ciò è soprattutto vero se gli impianti già in produzione vengono irrigati moderatamente in post-raccolta, con conseguente migliore equilibrio vegeto-produttivo della pianta e minori spese di potatura. In Emilia-Romagna, il volume stagionale d'irrigazione mediamente necessario per la varietà Fayette a maturazione agostana è stato di circa 2300 m³/ha, mentre l'irrigazione della Springlady a maturazione di fine giugno necessita mediamente di soli 1200 m³/ha, per oltre la metà distribuiti in estate dopo la raccolta dei frutti e quindi con volume irriguo moderato (fig. 3).

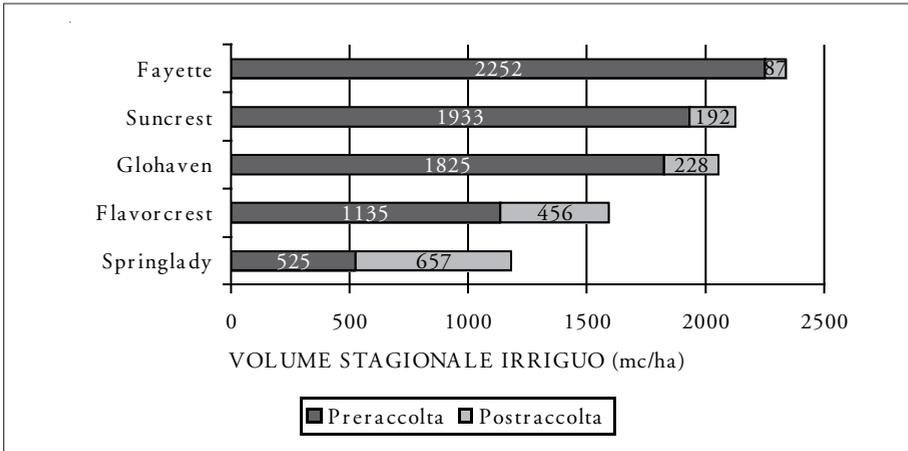


Fig. 3 Confronto dei volumi stagionali di irrigazione di varietà di pesco di differente epoca di maturazione

Effetti analoghi sono conseguibili su tutte le specie; oggi anche il kiwi dispone di alcune varietà più precoci della classica Hayward che determinano una certa riduzione dei consumi idrici e delle irrigazioni necessarie che, per la Summer 3373[®], più precoce di circa 50-55 giorni rispetto a Hayward, possono stimarsi in almeno 600-800 m³/ha.

Anche la resistenza alla siccità dei portinnesti e la loro capacità di esplorare gli strati più profondi e umidi del terreno, riveste grande importanza per il contenimento delle necessità idriche della specie. Radici molto profonde ed efficienti portano il frutteto a poter disporre di maggiori disponibilità idriche naturali nel suolo, conferendo alle piante una maggiore vigoria in caso di presenza d'acqua di pioggia od irrigazione, o una maggiore resistenza alla siccità in caso opposto.

L'impiego di portinnesti capaci di un elevato sviluppo ed efficienza radicale consente perciò di resistere alla siccità e di ridurre in maniera consistente il ricorso all'irrigazione. Volendo, o dovendo, ridurre le necessità irrigue non si potrà prescindere da questa scelta, che è forse l'arma migliore per ridurre in maniera consistente le necessità irrigue.

Sul pesco, ad esempio, è possibile impiegare l'ibrido interspecifico pesco/mandorlo GF677 dotato di un apparato radicale denso e profondo capace di sfruttare meglio degli altri portinnesti l'umidità presente nel suolo. Osservazioni effettuate hanno permesso di rilevare che, in situazione non irrigua le radici del GF 677 si sono spinte oltre i 3 metri dal fusto contro i 2,5 del Franco, inoltre la quantità di radici e di capillizio assorbente del GF 677 è risultata

di oltre il 60% superiore (Mannini et al., 1996). Per queste caratteristiche il GF677 consente di ottenere maggiori produzioni e più elevate pezzature dei frutti, con una riduzione delle necessità irrigue valutabile tra gli 800 e i 1000 m³/ha secondo le annate. In esperienze pluriennali condotte a Cesena è stato rilevato che in assenza di irrigazioni il GF 677 è più produttivo del Franco (fig. 4), e che questo in irriguo non raggiunge le rese del GF 677 in asciutto, evidenziando ulteriormente la possibilità di risparmiare acqua semplicemente mediante la scelta di un portinnesto molto efficiente, senza nessun costo aggiuntivo per l'azienda agricola (Mannini e Gallina, 1998).

Strategie di gestione delle irrigazioni

La corretta determinazione del momento di intervento irriguo e del volume d'adacquata sono scelte di estrema importanza per un'ottimale e parsimoniosa utilizzazione dell'acqua di irrigazione; in molti casi una corretta scelta del momento di irrigazione può consentire un risparmio idrico anche superiore a quello conseguibile con un'ottimale scelta del metodo e del sistema irriguo.

La scelta risulta sempre di notevole difficoltà, anche perché l'esperienza pratica dell'agricoltore è normalmente orientata a irrigazioni basate sull'osservazione dei sintomi di carenza idrica sulle piante (appassimenti, colore

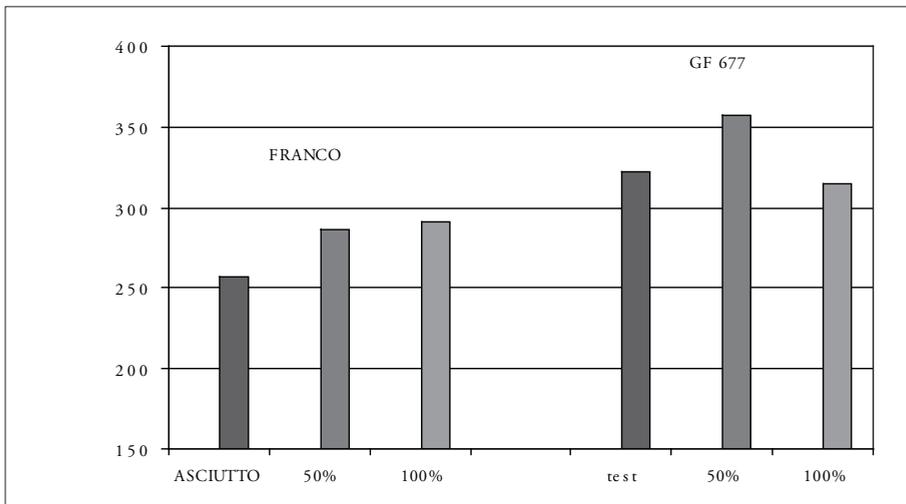


Fig. 4 Cesena. Effetti dell'irrigazione a goccia al 50% e 100% dell'ETM su due portinnesti di pesco (Mannini e Gallina, 1998)

della vegetazione, ecc.) o degli effetti visivi della siccità sul terreno (colore, ampiezza delle crepaccature, ecc).

Purtroppo però le irrigazioni effettuate al comparire di tali sintomi risultano spesso poco razionali; numerose osservazioni sperimentali hanno, infatti, verificato che normalmente tale metodo empirico di determinazione del momento irriguo porta o a irrigazioni troppo tardive, cioè effettuate quando il danno produttivo della carenza idrica è già ormai avvenuto, oppure a adacquate effettuate in momenti del ciclo biologico nei quali l'irrigazione influisce poco o nulla sulla resa.

Per una corretta individuazione del momento di intervento irriguo sono stati messi a punto dei misuratori dell'umidità del terreno e altre apparecchiature che si sono spesso rivelate scarsamente affidabili, o di complicata taratura e utilizzazione, o di eccessivo costo per trovare una pratica utilizzazione all'interno dell'azienda agricola.

Le uniche metodiche che hanno permesso una vasta applicazione nella pratica di campo sono basate sulla valutazione su base agroclimatica del bilancio idrico nel terreno per stabilire il migliore momento di intervento irriguo. Tale metodologia permette di considerare assieme le relazioni esistenti tra pianta, clima e terreno, riuscendo a individuare con una certa precisione tempi e volumi irrigui.

Naturalmente, la formulazione di un bilancio idrico in grado di stimare con una buona precisione le esigenze idriche delle colture, richiede numerose conoscenze difficilmente disponibili a livello di azienda agricola. Per tale motivo il Consorzio per il Canale Emiliano-Romagnolo ha realizzato un Servizio di assistenza alle irrigazioni denominato IRRINET, che tutte le aziende agricole emiliano-romagnole possono facilmente utilizzare, senza doversi singolarmente preoccupare del reperimento di dati meteorologici o di altri parametri di complicata individuazione o comprensione (www.consorziocer.it/irrinet); l'uso di tale modello di bilancio idrico ha permesso un deciso miglioramento nell'uso dell'acqua, rendendo le decisioni irrigue più precise ed esenti dagli errori che senza l'applicazione della metodologia sono sempre possibili e frequenti (Mannin et al., 2001).

Ulteriori possibilità di risparmio idrico sono state messe in evidenza dalla sperimentazione, che ha individuato forme ancora più efficienti d'uso dell'acqua fondate sul miglioramento delle conoscenze della fisiologia della pianta e sullo sviluppo di un nuovo approccio mirato sull'incompleta somministrazione d'acqua ai frutteti, cioè sulla restituzione di volumi inferiori all'evapotraspirazione massima delle colture, le due metodologie principali sono basate su:

- irrigazioni a deficit idrico permanente, cioè con parziale restituzione dell'ETM durante tutto il ciclo colturale;
- irrigazioni a stress idrico controllato, con piena restituzione nelle fasi di massima efficacia e uso di un parziale stress idrico nelle altre.

Impiegando un bilancio idrico della coltura, ma applicando una gestione irrigua basata sulla parziale restituzione delle esigenze della coltura durante l'intero ciclo colturale si ottiene una metodologia, apparentemente rozza, ma che permette di mantenere il terreno in condizioni subottimali di umidità; la pianta si adatta alla situazione di parziale deficit modificando il proprio rapporto tra apparato radicale e fogliare e limitando in parte gli effetti della carenza idrica. In tale situazione si riesce spesso a ottenere rese quasi equivalenti alle massime, ma con un rilevante miglioramento dell'efficienza d'uso dell'acqua ed economia nella distribuzione irrigua; naturalmente, la riduzione della frazione di evapotraspirato da restituire con le irrigazioni dipende fortemente dalla capacità della coltura a adattarsi alla carenza idrica.

In Emilia-Romagna i risultati ottenuti su molte colture da frutto indicano che la restituzione del 50% dell'evapotraspirazione massima porta spesso a produzioni praticamente equivalenti a quelle ottenibili con il pieno sussidio idrico, ma con consumi d'acqua dimezzati (fig. 5).

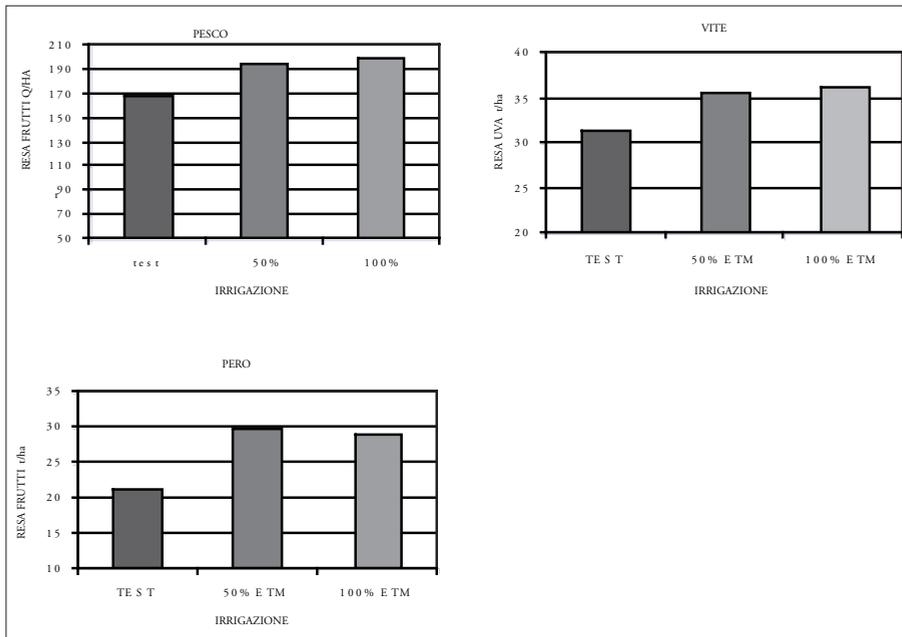


Fig. 5 Effetti di restituzioni irrigue crescenti di ETM su pesco, pero e vite (dati CER)

Una forma più avanzata di limitazione delle irrigazioni è basata sulla tecnica dello “stress idrico controllato” (Regulated deficit irrigation) che è fondata su una gestione “fisiologica” dell’acqua applicabile con successo sulle colture arboree da frutto e sulla vite in fase di piena produzione (Mitchell e Chalmers, 1984; Mannini e Zinoni, 1993.)

La tecnica è basata su conoscenze fisiologiche molto approfondite della pianta in relazione alla disponibilità d’acqua, e i suoi meccanismi di difesa dal deficit idrico nelle diverse fasi biologiche sono sfruttati in senso positivo, permettendo di ridurre l’uso dell’acqua senza sensibili limitazioni delle rese, e anzi, in molti casi migliorandole.

In pratica l’acqua e lo stress idrico vengono ambedue utilizzati per una positiva regolazione dell’attività vegetativa e riproduttiva della pianta con massimizzazione della resa, della sua qualità e del reddito agricolo. Impiegando lo stress idrico e l’irrigazione nelle diverse fasi biologiche si tenta di indirizzare gli assimilati dalle foglie verso i frutti, svantaggiando la crescita del legno.

Le irrigazioni saranno allora effettuate per mantenere un’umidità pari al 70-80 % dell’Acqua Disponibile nel terreno solo nelle fasi vantaggiose al frutto, e di solo il 20-25% nelle fasi maggiormente rivolte alla crescita degli organi legnosi della pianta.

In un’esperienza pluriennale su pero “Conference” in Emilia-Romagna sono stati evidenziati risultati veramente confortanti sia in termini produttivi, sia di risparmio idrico. Sono state confrontate con un test asciutto, quattro tesi irrigue; due irrigate durante tutto il ciclo produttivo (50 e 100%ETc), due a Stress Idrico Controllato (SIC). La gestione a SIC con restituzione del 100% dell’ETc, limitata al periodo intercorrente dai 60 giorni dopo la fioritura sino raccolta, è risultata la migliore, incrementando la resa rispetto all’asciutto del 57% (contro il 35% raggiunto dalla restituzione completa dell’evapotraspi-

	RESA FRUTTI		PESO MEDIO FRUTTI		FRUTTI PER PIANTA		P.L.V. PER ANNO	
	(t ha-1)	%/ test	(g)	%/test	numero	%/ test	(€)	%/test
TEST ASCIUTTO	21.5 C	-	172.1 B	-	93.9 B	-	7 504 c	-
SIC ₅₀	29.8 B	+38.6	189.6 A	+10.0	114.0 A	+21.4	12 369 b	+64.8
ET ₅₀	29.9 B	+39.2	189.3 A	+15.0	114.1 A	+21.5	12 473 b	+66.2
SIC ₁₀₀	33.8 A	+57.0	199.7 A	+16.1	122.4 A	+30.3	15 100 a	+101.2
ET ₁₀₀	29.0 B	+38.6	197.9 A	+10.2	103.9 AB	+10.6	12 877 b	+71.6

Test S.N.K. lettere maiuscole $P=0,01$, minuscole $p=0.05$

Tab. 2 Effetti dell’irrigazione a “stress idrico controllato” su pero conference, media 1996-1999 (Anconelli e Mannini, 2002)

rato), il peso medio dei frutti del 16% e la Pl.v. del 101%; con un risparmio idrico del 28% pari a circa rispetto alla piena restituzione dell'ETc.

Il risparmio idrico determinato dall'applicazione dello stress controllato è stato in grado di incrementare la resa rispetto all'asciutto del 57% rispetto all'incremento del 35% raggiunto dalla restituzione completa dell'evapotraspirato, determinando un risparmio idrico di quasi 1000 m³/ha, e cioè del 28% rispetto alla piena restituzione d'acqua (tab. 2).

Di notevolissimo interesse è aver osservato che l'irrigazione a Stress Idrico Controllato è stata produttivamente ed economicamente migliore rispetto a quella a pieno soddisfacimento idrico della coltura, pur determinando un forte risparmio della risorsa idrica; infatti, la maggiore resa in frutti e le migliori caratteristiche merceologiche degli stessi hanno determinato un valore della produzione della tesi sottoposta a stress idrico controllato di 2200 €/anno superiori a quella della tesi irrigata restituendo il 100% dell'evapotraspirazione (Anconelli e Mannini, 2002).

In un'altra esperienza emiliana effettuata su Vite cv. Ancellotta innestata su Kober 5bb è stato applicato uno stress idrico controllato dall'allegagione alla prechiusura del grappolo, e dall'invaatura alla raccolta. I risultati pluriennali hanno fatto verificare un risparmio idrico del 55% rispetto alla piena restituzione dell'evapotraspirato associato a una lieve riduzione di resa (statisticamente non significativo), ma associato a una migliore *water use efficiency* e a un contenimento dell'eccessivo sviluppo vegetativo della pianta.

Scelta e gestione del metodo irriguo

La sollecitazione a un uso più parsimonioso e corretto dell'acqua vede nella sostituzione dei metodi scarsamente efficienti, con quelli dotati di maggiori possibilità di ridurre gli sprechi, uno degli elementi principali capaci di ridurre i prelievi non produttivi d'acqua.

L'irrigazione a scorrimento e da solchi sono metodi assolutamente da evitare sulle piante legnose da frutto, infatti, oltre al rilevante spreco d'acqua, determinano consistenti rilasci di nutrienti in profondità e nelle acque superficiali, eterogeneità di umettamento tra le piante, anossie degli apparati radicali e l'insorgenza di un mediocre stato fitosanitario.

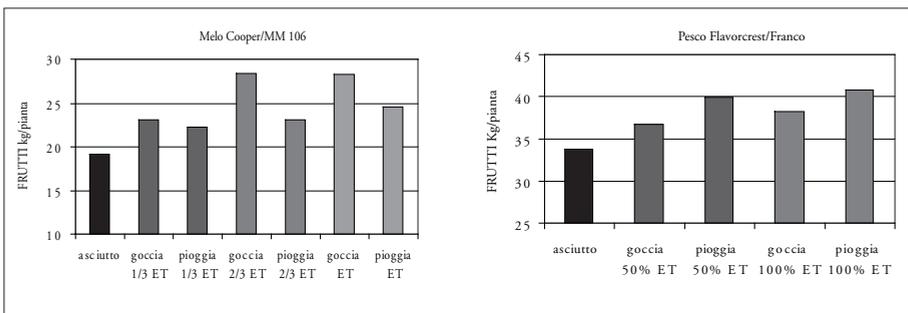
Viceversa, la microirrigazione a goccia o a spruzzo e l'aspersione sono metodi irrigui più idonei all'irrigazione dei frutteti, ambedue sono dotati di ottime caratteristiche di efficienza, se impiegati in maniera corretta.

Sotto il profilo produttivo, i numerosi confronti sperimentali tra la goccia e l'aspersione effettuati in Emilia-Romagna dal Consorzio per il CER, hanno mostrato un'estrema variabilità di risultati: ora favorevoli a un metodo ora all'altro, secondo il tipo di terreno e il clima dell'annata, o dal miglior abbinamento tra terreno e metodo più che da una reale forte superiorità del sistema irriguo adottato (figg. 6, 7).

Viceversa, se alla microirrigazione a goccia viene abbinata la fertirrigazione (di più difficile e meno efficiente applicazione nell'aspersione), i risultati produttivi diventano quasi sempre migliori rispetto all'aspersione abbinata alla fertilizzazione tradizionale. Questa osservazione indica che l'impiego dell'irrigazione a goccia senza la fertirrigazione fa perdere un notevole vantaggio nell'applicazione del metodo, che nell'abbinamento delle due tecniche trova la sua migliore utilizzazione ed efficienza.

L'irrigazione per aspersione è soggetta a perdite sia per evaporazione durante il lancio, sia per evaporazione dalla superficie del terreno irrigato e da quella delle foglie bagnate dopo l'irrigazione; inoltre, in caso di vento, il metodo è soggetto a perdite d'acqua per deriva e a un peggioramento dell'uniformità di bagnatura. Altri fattori negativi per il risparmio idrico sono dovuti all'incremento di sviluppo di erbe infestanti con aumento della traspirazione e all'eventuale percolazione profonda e ruscellamento superficiale in caso di volumi od intensità di precipitazione eccessivi.

Per irrigare ad aspersione con un'elevata efficienza di distribuzione dell'acqua, è quindi indispensabile attuare tecniche o comportamenti capaci di eliminare, o ridurre al minimo, le cause d'inefficienza del metodo: impiegare irrigatori di buona uniformità di distribuzione e con un sesto che porti a un'ottima sovrapposizione dei lanci, evitare un'eccessiva polverizzazione del



Figg. 6 -7 Confronto tra irrigazione a goccia e aspersione su pesco (Mannini e Gallina 1996) e su melo (dati CER).

getto per non incrementare l'evaporazione e la deriva, evitare irrigazioni nelle ore ventose calde e asciutte, evitare irrigazioni di modesto volume che non penetrano in profondità nel suolo e vengono rievaporate dalla superficie o, viceversa, volumi eccessivi che portano a percolazione profonda e non sono utilizzabili dagli apparati radicali dell'albero.

Con queste attenzioni, un impianto per aspersione può far raggiungere un'efficienza di irrigazione anche superiore all'85%.

Le peculiari caratteristiche dell'irrigazione a goccia di localizzare l'acqua senza bagnare l'intera superficie del terreno, e di irrigare con piccoli e frequenti volumi irrigui, sono le principali cause della sua capacità di ottenere un'elevata efficienza nell'uso dell'acqua.

Qualsiasi deroga o allontanamento da queste caratteristiche può però determinare notevoli perdite d'efficienza, con declassamento del metodo e spreco anche vistoso d'acqua.

Il metodo a goccia è abbastanza sofisticato, e ancor più degli altri metodi necessita di molte attenzioni per non incorrere in errori capaci provocare perdite di efficienza, che potrebbero squalificare completamente la bontà del metodo stesso.

Gli errori od i difetti più temibili, tutti possibili cause di perdita di efficienza, sono dovuti a:

- eterogeneità delle portate tra i gocciolatori
- eccessiva localizzazione dell'acqua
- percolazioni profonde d'acqua
- posizione dei gocciolatori inefficiente.

L'eterogeneità delle portate dei gocciolatori deve essere perseguita acquistando modelli di buona qualità, con un coefficiente di variazione tecnologica delle portate inferiore al 5%; tali caratteristiche devono essere mantenute in campo evitando l'intasamento dei gocciolatori mediante un accurato filtraggio dell'acqua. L'omogeneità di erogazione deve anche essere garantita da una perfetta scelta dei diametri delle tubazioni e, in caso di linee lunghe o con dislivelli accentuati, con l'impiego di gocciolatori autocompensanti di eccellenti qualità tecnologiche.

Un'eccessiva localizzazione dell'acqua può provocare una perdita di efficienza del metodo microirriguo, dovuta sia a un troppo basso rapporto tra radici della pianta e volume di terreno umettato, sia alla possibile percolazione profonda per continua erogazione su una troppo limitata superficie di terreno. Questo difetto di scelta del numero di erogatori conduce a una

drastica riduzione dell'efficienza, assolutamente negativa per un uso corretto dell'acqua; in linea generale, per evitare perdite di efficienza irrigua e di produzione, si ritiene opportuno pervenire a un umettamento di terreno esplorato dagli apparati radicali, variabile dal 15% negli ambienti umidi sino al 33% per quelli molto aridi caratterizzati da un'alta domanda evapotraspirativa. Sui terreni molto sciolti, un numero elevato di erogatori di bassa portata unitaria è, quindi, la migliore soluzione al problema, perché risulta capace di sfruttare meglio la capacità d'accumulo idrico nel terreno, di somministrare l'acqua in tempi molto lunghi e di consentire un maggior volume di terreno bagnato a contatto con gli apparati radicali delle piante. In altre parole il volume distribuito deve essere frazionato in molti punti di erogazione dell'acqua sia per aumentare il suo contatto con le radici, sia per evitare la percolazione in profondità.

Oltre che da una disforme distribuzione delle portate tra gli erogatori, le perdite di efficienza degli impianti a goccia possono anche essere determinate da un errato posizionamento dei gocciolatori rispetto alla pianta. Una posizione corretta consente alla pianta di possedere una grande massa radicale a contatto col suolo bagnato; una posizione troppo distante del gocciolatore riduce l'efficienza dell'acqua per impossibilità della pianta di assorbire l'acqua in posizioni non ben raggiunte dalle radici. I maggiori problemi emergono nelle colture frutticole con distanze tra le piante sulla fila considerevoli (peschi a vaso, aranci e olivi) sulle quali le radici non colonizzano completamente tutto il volume del terreno a disposizione, lasciando ampi spazi di suolo inutilizzati tra gli alberi. In questo caso è preferibile impiegare gocciolatori a inserimento (on line) piuttosto che ali gocciolanti integrali; queste, avendo distanze modulari tra gli erogatori, determinano una posizione casuale del gocciolamento rispetto all'albero, con perdita parziale o totale dell'efficienza degli erogatori troppo distanti.

In linea generale, su piante adulte, occorre assolutamente evitare che la distanza tra gli erogatori sia maggiore di quella tra le piante, e che in piante a distanza superiore ai 4 metri il gocciolatore non sia posto oltre i 150 cm sui terreni sabbiosi e sino a un massimo di 200 cm su quelli argillosi. Distanze superiori faranno perdere efficienza alla distribuzione dell'acqua con sprechi d'acqua molto importanti.

Nel caso di alberi giovani, durante la fase di allevamento, si è in presenza di radici ancora poco sviluppate e, con l'irrigazione localizzata vicino alla pianta, potranno essere ottenuti i valori più esaltanti di risparmio idrico rispetto all'aspersione, metodo che obbliga a bagnare tutto il terreno inutilmente; per raggiungere questo risultato è però indispensabile applicare i gocciolatori

molto vicino alla pianta per poi procedere a un loro definitivo posizionamento a pianta adulta, mediante lo scivolamento laterale di tutta la tubazione gocciolante e l'inserimento di almeno un altro erogatore sull'altro lato.

Le specie legnose agrarie sono, in ogni caso, le colture sulle quali l'irrigazione a goccia trova la migliore applicazione, anche per effetto delle recenti innovazioni tecnologiche consentite dalle ali gocciolanti integrali comuni e autocompensanti, come la SDI (Subsurface Drip Irrigation: Irrigazione a goccia sottosuperficiale), che determina un'ulteriore e concreta possibilità di risparmiare risorse idriche attraverso l'eliminazione delle perdite per evaporazione dell'acqua irrigua dalla superficie del suolo.

Ulteriori e recenti acquisizioni sperimentali hanno anche accertato la possibilità di impiegare l'energia fotovoltaica per la messa in pressione degli impianti a goccia, con la quale è possibile abbinare al risparmio idrico quello energetico e di gestione automatica delle irrigazioni (Mannini, 2003). Tali sistemi sfruttano la capacità degli impianti fotovoltaici *stand-alone* di fornire corrente continua in quantità corrispondente alle caratteristiche degli impianti a goccia di erogare piccole portate in tempi molto lunghi. Un buon dimensionamento del sistema fotovoltaico a goccia consente anche di "inseguire" le necessità idriche della coltura, infatti, la fornitura di corrente continua, e quindi d'acqua, è proporzionale sia alla quantità di radiazione solare della giornata sia alle necessità idriche della pianta.

CONCLUSIONI

Alla luce dei progressi della conoscenza agronomica, fisiologica e tecnologica oggi raggiunti può ormai essere affermato che irrigare, non significa più banalmente "bagnare il terreno", ma è una tecnica raffinata capace di seguire le necessità idriche e fisiologiche della pianta, regolandone l'attività vegeto-produttiva e indirizzando la fruttificazione verso rese commercialmente valide e di elevate caratteristiche qualitative. Da un'irrigazione sporadica ed empirica, eseguita con impianti generici, si è perciò passati a irrigazioni basate su tecniche fisiologiche di "stress idrico controllato" effettuate con tecnologie irrigue avanzate e di alta qualità nell'uso dell'acqua.

Per conseguire un uso veramente oculato e senza sprechi della preziosa risorsa idrica occorre, però, attuare ogni sforzo per permettere un'estesa applicazione delle conoscenze raggiunte. A tal fine occorre sviluppare l'impiego di sistemi esperti di bilancio idrico delle colture indirizzati alla fornitura giornaliera di indicazioni precise e personalizzate agli agricoltori sul momento di

intervento irriguo e sul volume d'adacquata necessari per ottimizzare l'uso dell'acqua.

RIASSUNTO

L'acqua, risorsa naturale, è un bene prezioso la cui carenza sta drammaticamente aggravandosi a livello planetario. Anche nei Paesi meglio dotati d'acqua il problema comincia a manifestarsi sempre più frequentemente, sia per l'incremento della domanda d'acqua potabile, industriale e irrigua, sia per i problemi derivanti dalla sempre più pronunciata irregolarità delle piogge provocate, è ormai certo, dal cambiamento climatico in corso. In Italia l'agricoltura consuma oltre il 60% dell'ammontare dell'acqua complessivamente attinga dai fiumi e dalle falde, e quindi entra spesso in competizione per l'uso della risorsa con gli altri settori idroesigenti. Il notevolissimo volume d'acqua impiegato in irrigazione focalizza l'esigenza di impiegare l'acqua con la massima razionalità, eliminando ogni spreco e attuando tecniche di conservazione e miglior uso delle risorse idriche disponibili. L'uso di acqua di mediocri caratteristiche qualitative e il reimpiego di quella scaricata dai depuratori civili sono efficaci forme di risparmio idrico, ma devono essere impiegate con tutte le precauzioni che occorre avere nei confronti di un'acqua potenzialmente capace di arrecare oltre ai problemi all'uomo, alle colture, al terreno e agli impianti irrigui, anche dubbi di accettazione dei prodotti da parte della grande distribuzione e dei mercati esteri.

Sulle piante da frutto l'irrigazione è una pratica ormai ampiamente sviluppata in tutti gli ambienti di coltivazione; secondo le statistiche oltre 302.000 ettari di frutteti e 182.000 ettari di vigneti sono stati irrigati nell'anno 2000.

L'irrigazione è diventata, infatti, una pratica imprescindibile per l'ottenimento di buoni risultati qualitativi e per la sostenibilità economica delle aziende frutticole; essa consente una rapida entrata in produzione e la riduzione dell'alternanza di produzione e, soprattutto, il raggiungimento di elevati standard di qualità delle produzioni, con omogenee ed elevate pezzature dei frutti.

L'impiego di portinnesti poco vigorosi con elevate densità d'investimento e dell'inerbimento interfilare, hanno portato a un minore sviluppo ed efficienza degli apparati radicali, con ridotte capacità di sfruttamento delle riserve idriche del terreno e, quindi, maggiore dipendenza del frutteto dagli apporti idrici artificiali.

Per contro le già sottolineate e improrogabili necessità di risparmio idrico devono assolutamente indirizzare l'irrigazione verso un uso molto attento, impiegando tutte le strategie agronomiche e tecnologiche capaci incrementare l'efficienza nell'uso dell'acqua.

Occorre allora attuare tutte le tecniche di aridocoltura possibili; riconsiderando, per esempio, l'opportunità di effettuare l'inerbimento interfilare, capace di consentire molti effetti positivi ma pure di incrementare fortemente i consumi d'acqua del frutteto.

Il risparmio idrico può e deve anche sollecitare alla scelta di varietà con ciclo biologico meglio allineato con la disponibilità naturali d'acqua nel terreno, o di portinnesti di elevata capacità di estrazione d'acqua dal più ampio e profondo volume di terreno.

L'applicazione d'idonee strategie di gestione delle irrigazioni è però certamente l'arma più efficace per risparmiare acqua salvaguardando le produzioni e la qualità dei frutti. La decisione del momento e del volume d'irrigazione effettuata tramite sistemi esperti di bilancio idrico consente senza eccezione di migliorare l'uso dell'acqua; l'impiego di

tecniche di Regulated Deficit Irrigation (RDI) sulle specie da frutto ha poi dimostrato che, rispetto alla piena restituzione d'acqua, è possibile risparmiare notevoli volumi idrici migliorando considerevolmente la resa e la pezzatura dei frutti e quindi la Produzione lorda vendibile.

Sotto il profilo tecnologico è ormai ampiamente assodato che l'irrigazione a goccia, se ben progettata e condotta, consente un'elevata efficienza delle irrigazioni. Il risparmio idrico è però vanificato dall'impiego di erogatori di scadente uniformità delle portate tra le piante, o da una gestione irrigua casuale e non guidata da sistemi esperti di bilancio idrico.

L'innovazione tecnologica rappresentata dalle ali gocciolanti integrali comuni e autocompensanti, e la conseguente possibilità di effettuare la SDI (Subsurface Drip Irrigation: Irrigazione a goccia sottosuperficiale), consentono ulteriori progressi nel buon uso dell'acqua in fruttiviteicoltura. Ulteriori e recenti acquisizioni sperimentali hanno anche accertato la possibilità di impiegare la cosiddetta irrigazione a goccia fotovoltaica (Solar-drip), con la quale è possibile abbinare al risparmio idrico quello energetico e di gestione automatica delle irrigazioni.

Alla luce dei progressi conseguiti può oggi essere quindi affermato che, irrigare, non significa più banalmente "bagnare il terreno", ma una tecnica raffinata capace di seguire le necessità idriche e fisiologiche della pianta, regolandone l'attività vegeto-produttiva e indirizzando la fruttificazione verso rese commercialmente valide e di elevate caratteristiche qualitative. Da un'irrigazione sporadica ed empirica, eseguita con impianti generici, si è perciò passati a irrigazioni basate su tecniche fisiologiche di "stress idrico controllato" effettuate con tecnologie irrigue avanzate e di alta qualità nell'uso dell'acqua.

BIBLIOGRAFIA

- ANCONELLI S., MANNINI P. (2002): *Effects of regulated deficit irrigation (RDI) on pear in an italian sub-humid area*, in *Pear symposium*, «Acta Horticulturae», 596, pp. 687-690.
- ANCONELLI S., GUIDOBONI G., MANNINI P., SOLIMANDO D. (2003): *Prime osservazioni sulla subirrigazione a goccia dei frutteti*, «Frutticoltura», 9, pp. 32-36.
- BOVIO M., CORINO L., Valentini L. (2000): *Effetti dell'inerbimento sulla vite*, «L'informatore agrario», 2, pp. 61-78.
- CHALMERS D.J., BURGE G., JERIE P.H., MITCHELL P.D. (1986): *The Mechanism of regulation of "Bartlett" Pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and Regulated Deficit Irrigation*, «J. Amer. Soc. Hort. Sci.», 111(6), pp. 904-907.
- MANNINI P., ZINONI F. (1993): *Possibilità di applicazione dello "Stress Idrico controllato" sul pesco in Emilia-Romagna*, «Frutticoltura», 4, pp. 73-77.
- MANNINI P., GALLINA D., ANCONELLI S. (1996): *Effetti dell'irrigazione per aspersione e a goccia sull'apparato radicale di due portinnesti di pesco*, «Irrigazione e Drenaggio», 4, pp. 20-29.
- MANNINI P., GALLINA D. (1998): *Effetti del metodo e del volume irriguo, della gestione del suolo e del portinnesto su pesco e nettarina*, «Atti del Convegno Nazionale "Irrigazione e Ricerca: Progressi nell'uso della risorsa acqua"», Bari, 1-2 ottobre 1998, pp. 238-247.
- MANNINI P., GALLINA D. (2001): *Influenza dell'irrigazione su varietà di pesco a diversa epoca di maturazione*, «Frutticoltura», 4, pp. 75-78.
- MANNINI P., GUIDOBONI G., GENOVESI R. (2001): *Trasferimento di supporti per l'assistenza*

- tecnica irrigua ai servizi di sviluppo agricolo*, «Atti del Convegno Modelli di agricoltura sostenibile per la pianura meridionale: gestione delle risorse idriche nelle pianure irrigue», Salerno, 6 novembre 2000.
- MANNINI P., ANCONELLI (2002): *Effetti della gestione irrigua a "stress idrico controllato" sul pero*, «Frutticoltura», 9, pp. 71-74.
- MANNINI P. (2003): *L'irrigazione del frutteto tramite energia solare*, «Frutticoltura», 9, pp. 55-60.
- MANNINI P. (2004): *Le modalità di risparmio idrico in frutticoltura*, «L'Informatore Agrario», 20, pp. 47-52.
- MANNINI P. (2004): *Le buone pratiche agricole per risparmiare acqua*, «Supplemento di Agricoltura», 18, Regione Emilia-Romagna: p. 178.
- MANNINI P., GENOVESI R. (2004): *Coltivare risparmiando acqua*, «Il Divulgatore», 7/8, pp. 62.
- MITCHELL P.D., JERIE P.H., CHALMERS D.J. (1984): *The effects of Regulated Deficit Irrigation on pear tree growth, flowering, fruit growth and yield*, «J. Amer. Soc. Hort. Sci.», 109(5), pp. 604-606.
- ROSSI F., NARDINO M., MANNINI P., GENOVESI R. (2004): *IRRINET Emilia Romagna: Online decision support on irrigation*, in *Online Agrometeorological Applications with Decision Support on the Farm Level*, «Cost Action», 718, pp. 99-102.

ROSSANO MASSAI*

Metodi per la determinazione delle esigenze idriche in frutticoltura, viticoltura e olivicoltura

INTRODUZIONE

Più della metà dell'acqua totale consumata ogni anno in Italia e nel mondo è utilizzata nel settore agricolo (Xiloyannis, 1992.a). Frequentemente i metodi di distribuzione e le tecniche adottate comportano notevoli sprechi d'acqua, di concimi e di risorse energetiche. In molti comprensori frutticoli i metodi irrigui maggiormente adottati sono ancora quelli gravitazionali; con tali metodi, in terreni leggeri e superficiali, un'elevata quantità d'acqua è persa per percolazione negli strati profondi e per evaporazione in quelli superficiali. La quantità d'acqua che finisce nel sottosuolo, o che è persa per ruscellamento, può, inquinando le falde o le acque superficiali, provocare danni ambientali. In conclusione una scelta non appropriata del metodo irriguo, e la sua non corretta gestione, contribuisce ad incrementare il tasso d'inquinamento congiuntamente all'azione inquinante delle acque reflue industriali e urbane.

L'utilizzo di metodi irrigui localizzati permette di diminuire le perdite per evaporazione e, praticamente, di annullare quelle per ruscellamento e percolazione profonda. In particolare, nei primi 2-3 anni dell'impianto si può risparmiare fino all'80-90% dell'acqua distribuita rispetto ai metodi irrigui che bagnano tutta la superficie del terreno (Xiloyannis, 1992.a; Mannini, 2004). I metodi irrigui localizzati consentono inoltre un risparmio energetico, nei confronti dell'irrigazione a pioggia, grazie alle basse pressioni necessarie per il loro funzionamento e ai più bassi volumi d'acqua erogata durante la stagione. Infine i metodi irrigui localizzati permettono un preciso dosaggio dell'acqua distribuita consentendo, in caso di necessità, l'induzione di leggeri stress idrici

* *Dipartimento di Coltivazione e Difesa delle Specie Legnose "G. Scaramuzzi",
Università degli Studi di Pisa*

al fine di controllare la vigoria della pianta (Chalmers et al., 1981; Chalmers et al., 1984; Behboudian e Mills, 1997).

Al fine però di definire in maniera accurata i turni e i volumi di adacquamento è necessario conoscere le esigenze idriche delle piante e la riserva utile del terreno bagnato dagli irrigatori.

La riserva utile (RU) del terreno (m^3/ha) si può calcolare, come differenza tra il contenuto idrico del terreno alla capacità idrica di campo (potenziale idrico di $-0,1$ bar, corrispondente a circa il 40% del peso secco dei terreni a tessitura fine e al 15% per quelli a tessitura grossolana) e quello al punto di appassimento (potenziale idrico di -15 bar, corrispondente a circa il 15% e il 4% del peso secco dei terreni, rispettivamente, a tessitura fine e grossolana), nel volume di suolo esplorato dalle radici:

$$RU = (CIC - PA) * V$$

dove V è il volume del terreno esplorato dalle radici.

È importante, inoltre, conoscere il contenuto di acqua, o il potenziale idrico, del terreno in corrispondenza del quale si verifica l'inizio dello stress idrico. L'acqua compresa tra la CIC e quella presente al momento dell'inizio dello stress si definisce riserva facilmente utilizzabile dalle piante (RFU). In generale le condizioni che provocano, nelle piante arboree, l'inizio di uno stato di stress (per terreni di medio impasto) si verificano quando l'umidità del terreno varia tra il 25% (olivo) e il 50% (actinidia) dell'acqua disponibile, e a potenziali idrici del terreno rispettivamente di $-0,1$ e $-0,04$ MPa (Xiloyannis, 1992a).

I consumi idrici sono in relazione alla domanda evaporativa dell'ambiente e all'area fogliare traspirante. Molti sono i metodi utilizzabili per valutare i consumi idrici delle piante ma il più utilizzato nella comune pratica irrigua, nonostante la sua approssimazione, è il metodo dell'evapotraspirazione potenziale (ETp). Per il calcolo dell'evapotraspirazione massima (ETm) è necessario, oltre alla stima dell'ETp, conoscere i fattori di correzione, da applicare su quest'ultima, che variano in funzione dell'area fogliare, e quindi in funzione della specie, dell'età delle piante, della fase fenologica, della densità di piantagione, della vigoria e della forma d'allevamento. In genere i coefficienti, da applicare sull'evaporato, per le specie a foglia caduca, variano dal germogliamento al completamento dell'area fogliare da 0,2 a 1,2 (Xiloyannis, 1992a).

Nel concetto tradizionale di irrigazione i volumi d'adacquamento stagionali erano concepiti in modo da soddisfare il deficit idrico dell'intero sistema pianta-suolo in pochi interventi irrigui con turni prolungati (7-10 o più giorni). La tendenza della moderna frutticoltura è, però, quella di somministrare frequentemente (turni di 1-2 giorni), con l'irrigazione localizzata, volumi di acqua inferiori all'ETe.

Il fabbisogno irriguo (I) può essere stimato attraverso la formula del bilancio idrico:

$$I = ETe + D + R - P - Af - Q$$

dove P sono le precipitazioni, Af gli apporti della falda, Q riserva idrica del terreno, ETe, D e R sono, rispettivamente, le perdite per evapotraspirazione, drenaggio e ruscellamento superficiale (Vaysse et al., 1990; Xiloyannis, 1992.a).

L'accurata conoscenza delle esigenze idriche delle colture arboree può, inoltre, consentire l'applicazione del cosiddetto deficit idrico controllato (RDI: Regulated Deficit Irrigation), un metodo di conduzione degli interventi irrigui conforme al comportamento fisiologico degli alberi da frutto nei riguardi dell'acqua. Il metodo si è sviluppato simultaneamente in Australia e Nuova Zelanda su pesco e pero, in Israele sugli agrumi, negli Stati Uniti sul melo (Decroix, 1992).

Il tentativo di razionalizzare l'irrigazione in frutticoltura scaturisce dall'esigenza di ottenere produzioni quanti-qualitativamente elevate limitando contemporaneamente lo sviluppo vegetativo degli alberi, al fine di evitare una eccessiva competizione tra frutti e organi vegetativi in accrescimento, di favorire una buona illuminazione all'interno della chioma e di ridurre gli interventi di potatura.

Studiando le curve di crescita dei germogli e dei frutti, in funzione del tempo, i ricercatori hanno dimostrato che queste si sovrappongono solo in parte (per il 25% e il 27% nel caso del pesco e del pero): il periodo di forte sviluppo dei germogli precede il periodo di forte crescita dei frutti (Chalmers et al., 1985). Il razionamento dell'approvvigionamento idrico, rispetto all'ETE, durante la fase di forte sviluppo dei germogli, fino al momento in cui i frutti raggiungono una piccola percentuale del loro volume definitivo (1,6% per il pesco e 2% per il pero) permette di contenere il vigore vegetativo e di ottenere, contemporaneamente, una migliore crescita dei frutti (Chalmers et al., 1981; Mitchell et al., 1984; Behboudian e Mills, 1997). Infatti è stato osservato che la crescita vegetativa è più sensibile al razionamento dell'acqua rispetto a quella dei frutti; quest'ultimi, diventando potenti sink di attrazione per i fotosintetanti, continuano a crescere anche quando i germogli rallentano o arrestano il loro sviluppo (Decroix, 1992; Boland et al., 1993; Behboudian e Mills, 1997).

APPROCCI METODOLOGICI ALLA GESTIONE IRRIGUA

Gli aspetti relativi alla corretta gestione dei sistemi e dei metodi irrigui e l'applicazione del deficit idrico controllato al fine dell'ottenimento di produzioni

ottimali dal punto di vista quanti-qualitativo è oggetto specifico delle altre relazioni presentate in questa giornata di studio.

Nel mio intervento, invece, vorrei mettere in evidenza quale è lo stato dell'arte sulle metodologie di stima delle esigenze idriche delle colture arboree, presupposto fondamentale per l'applicazione dei criteri di buona pratica irrigua e di deficit idrico controllato, senza il quale si ricadrebbe inevitabilmente nella scelta empirica delle modalità di intervento irriguo.

In linea teorica l'approccio alla gestione esperta dei sistemi e dei metodi irrigui può avvenire da quattro diverse angolature: i) mantenere il suolo ad un livello di umidità confacente alle necessità fisiologiche della pianta, ii) reintegrare l'acqua che l'ambiente ha richiesto per evaporazione e traspirazione durante la giornata, iii) mantenere la pianta in uno stato idrico ottimale per lo stadio fisiologico considerato e, infine, iiii) restituire al suolo la quantità di acqua che la pianta ha effettivamente consumato.

Di seguito, per ognuna delle quattro angolature verranno illustrati le principali applicazioni.

DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO IDRICO DEL SUOLO

Le condizioni pedoclimatiche, che influenzano l'equilibrio idrico della pianta, possono essere stimate tramite indicatori fisici. Il contenuto idrico del terreno e, contemporaneamente, la domanda evaporativa ambientale caratterizzano lo stato idrico delle piante. Il loro utilizzo, per valutare le condizioni fisiologiche delle piante, è subordinato alla stima dell'effettivo stato idrico delle colture interpretato attraverso l'utilizzo di opportuni indicatori fisiologici.

Contenuto idrico del terreno

Per misurare il contenuto idrico del terreno si può ricorrere a metodi diretti (analisi gravimetrica per pesata), e a metodi indiretti (utilizzo di sonde elettromagnetiche, neutroniche, ecc.) (Pettinelli et al., 1998).

L'analisi gravimetrica è il metodo tradizionalmente utilizzato per misurare il contenuto in acqua di un campione di terreno e consiste nel determinare la percentuale di acqua (in peso) presente nel campione. Quest'ultima è calcolata ricorrendo alla seguente espressione:

$$\% \text{ di acqua}_{(\text{in peso})} = \frac{\text{peso campione umido} - \text{peso campione secco}}{\text{peso campione secco}} \times 100$$

per determinare il peso del campione secco questo è essiccato in stufa a 105 °C fino a peso costante (24/36 h in stufa ad aria calda, 30' in stufa a microonde) (Testini, 1989). La tecnica, molto economica, è distruttiva e non permette la riproducibilità dei risultati in termini spaziali e temporali (Pettinelli et al., 1998) ed è pertanto impossibile da applicare nella gestione dei sistemi irrigui.

Il metodo conduttimetrico consente di determinare il contenuto idrico del suolo sfruttando l'attitudine di un mezzo poroso, come il terreno, a condurre corrente elettrica, in funzione sia della presenza di acqua, sia di elettroliti. Se si riescono a effettuare misure non condizionate significativamente da eventuali variazioni dello stato dei sali solubili, si può stabilire una relazione tra il contenuto in acqua del terreno e i valori di resistenza elettrica (Testini, 1989). Il metodo prevede l'utilizzo di blocchetti porosi (di gesso, fibra di vetro o tessuto di nylon) nei quali sono stati immersi due elettrodi, posti a distanza nota fra loro, collegati a un ohmetro. I blocchetti sono interrati alla profondità in corrispondenza della quale si vuole conoscere il contenuto idrico. La resistenza opposta al passaggio della corrente elettrica attraverso i blocchetti dipende dal loro contenuto idrico che è in equilibrio con quello del terreno circostante (Xiloyannis, 1992a).

Recentemente sono state proposte tecniche di monitoraggio automatizzato del contenuto idrico del suolo (Watermark) basate sul metodo conduttimetrico modificato; questi sensori, denominati "a matrice granulare" (Granular Matrix Sensors) (Shock, 2003; Shock et al., 2003; Shock et al., 2005) differiscono dai blocchetti di gesso per una maggiore dimensione dei pori che consente una più elevata sensibilità all'umidità del suolo in un range di lettura più ampio (da 10 a 200 kPa) e possono essere usati anche in terreni leggeri o ricchi di scheletro.

Tra i metodi elettromagnetici il più interessante è la riflettometria nel dominio del tempo (Time Domain Reflectometry: TDR). La tecnica TDR è stata sviluppata per misurare le caratteristiche dielettriche dei materiali, in un determinato intervallo di frequenze. Un sistema TDR è formato da un generatore di impulsi (avente una banda di frequenza che va, generalmente, da 1 MHz – 1 GHz), un campionatore in grado di trasformare gli impulsi dall'alta alla bassa frequenza, un oscilloscopio collegato a un computer e una sonda di misura. La sonda viene infissa nel materiale di cui si vuole misurare le proprietà dielettriche (Zerbi e LeCain, 1988; Amato et al., 1993.a; Dirksen e Dasberg, 1993; Pepin et al., 1995; Pettinelli et al., 1998). L'utilizzazione della TDR per la misura del contenuto idrico del terreno si basa, quindi,

sulla determinazione della sua costante dielettrica K , ottenuta misurando la velocità di propagazione di un segnale elettromagnetico (nella banda 1 MHz – 1 GHz) nel sistema stesso. Poiché la costante dielettrica dell'acqua (81,5 a 20 °C) è circa venti volte maggiore di quella del terreno secco (2-3), i valori misurati sono proporzionali al contenuto in volume di acqua nel terreno (Hook et al., 1992; Amato et al., 1993.b; Hook e Livingston, 1995 e 1996). L'informazione che si ottiene si riferisce a un volume di materiale avente una forma approssimativamente cilindrica, le cui dimensioni longitudinali sono quelle della lunghezza della sonda infissa nel materiale, mentre le sue dimensioni trasversali (raggio) sono leggermente superiori della metà della distanza tra gli elettrodi di misura. Possono essere utilizzati vari tipi di sonde (la scelta del tipo di installazione da operare è subordinata allo scopo delle misure): se si è interessati a un'indagine spaziale (di superficie), sono da preferire le sonde a due elettrodi, se l'informazione richiesta riguarda un profilo verticale del terreno possono essere utilizzate le sonde multilivello con differenti distanze tra gli elettrodi (Cereti et al., 1997; Ferreira et al., 1997; Pettinelli et al., 1998).

Il contenuto idrico del terreno può, infine, essere determinato anche tramite la sonda neutronica. La sonda neutronica è uno strumento costituito essenzialmente da una sorgente di neutroni veloci, da un rivelatore di neutroni lenti e da un contatore, che fornisce il numero di neutroni lenti osservati in un tempo unitario. La sonda è calata, attraverso un apposito tubo di alluminio, nel terreno sino alla profondità desiderata. I neutroni veloci, emessi dalla sorgente in tutte le direzioni dello spazio, entrano in collisione con i diversi nuclei atomici presenti nel terreno e perdono gradualmente parte della loro energia cinetica. Tale perdita è massima quando le collisioni si verificano fra neutroni e nuclei d'idrogeno, che hanno massa approssimativamente uguale a quella dei neutroni stessi. Alcuni dei neutroni così rallentati finiscono con il rimbalzare verso la sonda dove il rivelatore di neutroni lenti registra la loro presenza e consente il loro conteggio. Il metodo, in pratica, fornisce la misura della concentrazione degli atomi di idrogeno presenti nel terreno. Poiché la principale fonte degli atomi di idrogeno nel terreno è rappresentata dall'acqua, il metodo consente di risalire indirettamente al contenuto idrico dello stesso. Il metodo permette di rilevare, in modo veloce e preciso, le variazioni di umidità a varie profondità facendo scorrere la sorgente di neutroni all'interno di tubi metallici opportunamente installati nel terreno (Testini, 1989; Xiloyannis, 1992a).

Recentemente sono stati proposti anche metodi alternativi, molto sofisticati, basati sull'applicazione del radar (Ground Penetrating Radar: GPR) che consentono una lettura tridimensionale del profilo del suolo senza neces-

sità di posizionamento di sonde o tubi di pescaggio. Il GPR consente anche misure del contenuto idrico del suolo ma, al momento, l'elevato costo delle apparecchiature ne impedisce un uso applicativo più esteso.

Potenziale idrico della zona radicale

Il potenziale idrico del suolo nella zona radicale è misurato con il metodo tensiometrico; questo metodo richiede l'impiego di tensiometri, strumenti costituiti da un tubo di plastica trasparente che termina da una parte con una capsula porosa e dall'altra con un vacuometro, e permette la misura, in pieno campo, dello stato di tensione dell'acqua o, più precisamente, del potenziale di matrice (Testini, 1989). Il tubo, riempito con acqua distillata, è posto con la capsula porosa alla profondità alla quale si vuole effettuare la misurazione. Se il contenuto idrico del terreno è a livelli di capacità idrica massima si instaura, con la capsula porosa, una condizione di equilibrio. Con la diminuzione dell'umidità del terreno una parte dell'acqua contenuta nel tubo del tensiometro passa nel terreno creando una depressione rilevata dal vacuometro (Xiloyannis, 1992a).

Esistono in commercio alcuni tipi di tensiometri elettronici che consentono una misura continua dell'umidità del terreno e la lettura da remoto di queste informazioni (CommonSensor), consentendo di fatto anche l'automazione delle misure e dell'interpretazione dei risultati. Questi sensori sono stati applicati con buoni risultati su numerose specie da frutto consentendo un buon risparmio nell'acqua di irrigazione e la quasi totale scomparsa delle perdite per percolazione profonda (Klein, 2004).

La risposta tensiometrica è comunque relativa esclusivamente alla profondità di posizionamento della capsula porosa ed è, inoltre, poco affidabile sia in condizioni di elevato che di ridotto contenuto di umidità del suolo. I tensiometri richiedono anche interventi di manutenzione e di taratura frequenti.

In linea generale, i principali limiti di applicazione delle tecniche di misura dell'umidità del suolo ai fini della gestione esperta dei sistemi irrigui sono così riassumibili:

- risposta dei sensori limitata a un ridotto volume di suolo circostante il medesimo; l'errore di campionamento, soprattutto in suoli molto eterogenei o ricchi di scheletro e con impianti di irrigazione a microportata che bagnano solo limitate porzioni di suolo, può essere molto elevato;

- necessità di posizionamento dei sensori a profondità diverse e in diverse posizioni dell'appezzamento per avere un grado sufficiente di attendibilità delle letture;
- difficoltà o impossibilità di posizionamento dei sensori nell'interfilare, a causa della necessità di transito delle macchine agricole;
- difficoltà di lettura frequente e di interpretazione dei dati, a meno che non si faccia uso di batterie di sensori Watermark a matrice granulare, nel qual caso però il costo della strumentazione può essere notevolmente elevato;
- non tengono quasi mai in considerazione l'acqua contenuta negli strati profondi del terreno (apporti di falda), non interessati dalla posizione dei sensori, che può essere invece determinante ai fini della definizione del reale stato idrico della coltura. Questo, infatti, in presenza di meccanismi compensativi (come ad esempio fenomeni di "flusso inverso" o "hydraulic lift") può non essere strettamente correlato alle condizioni diurne di idratazione degli strati superficiali del suolo;
- necessitano di una accurata conoscenza delle caratteristiche idrologiche del suolo per la determinazione della quantità reale di acqua che il suolo, o meglio la porzione di suolo interessata dall'intervento irriguo, può trattenere.

DETERMINAZIONE DELLA RICHIESTA EVAPORATIVA E TRASPIRATIVA DELL'AMBIENTE

Visti i limiti esistenti nel corretto uso delle misure di umidità del suolo per la gestione dei sistemi irrigui, si può pensare di stimare opportunamente la richiesta evaporativa e traspirativa dell'ambiente.

La risposta delle piante alle variazioni dei parametri climatici varia con la specie: in generale le piante arboree iniziano a manifestare sintomi di stress con valori di temperatura dell'aria intorno a 30 °C ai quali si osservano sensibili riduzioni di conduttanza stomatica anche in condizioni idriche ottimali del substrato. Anche in presenza di basse temperature (5–10°C) si può osservare la chiusura degli stomi (Xiloyannis, 1992.b). Poiché nelle condizioni di campo non è facile distinguere l'effetto della temperatura da quello dell'umidità relativa (spesso al variare della prima varia anche la seconda), per determinare la domanda evaporativa dell'ambiente è preferibile esprimersi in termini di deficit di pressione di vapore (VPD) oppure di gradiente di pressione di vapore (VPG) tra la foglia e l'ambiente circostante.

Per calcolare il deficit di pressione di vapore si applica la formula:

$$VPD = [SV * (1 - RH)]$$

dove per SV si intende la Saturazione della pressione di vapore [kPa] a una determinata temperatura e per RH l'umidità relativa (%).

Per calcolare il gradiente di pressione di vapore si applica la formula

$$VPG = SV_f - (RH * SV_a)$$

dove per SV_f si intende la saturazione della pressione di vapore [kPa] alla temperatura della foglia e per SV_a la saturazione di vapore alla temperatura e umidità relativa (RH, %) dell'aria (Xiloyannis, 1992b).

Per calcolare la Saturazione della pressione di vapore si ricorre a tabelle che la indicano in funzione della temperatura dell'aria (Field et al., 1991).

Le piante arboree iniziano a ridurre la traspirazione quando il VPD raggiunge valori di 2,5-3,0 kPa (Xiloyannis, 1992b).

Stima dei consumi idrici in arboricoltura

Attualmente sono disponibili numerosi metodi, diretti e indiretti, di misura della traspirazione. Tra i metodi indiretti quelli microclimatici sono i più utilizzati per stimare l'evapotraspirazione delle colture erbacee ma è difficile la loro applicazione in arboricoltura, soprattutto a causa del disordine dei flussi che si generano al di sopra e al di sotto delle chiome (Sabatti et al., 1992; Cohen, 1991). Alcuni dei metodi diretti (lisimetri, porometri, scambi gassosi sull'intera pianta) permettono misure accurate ma sono metodi che perturbano le normali condizioni di vita della pianta, richiedono equipaggiamenti complessi e i dati raccolti sono difficilmente estrapolabili per l'intero frutteto.

Stima dell'evapotraspirazione effettiva

L'evapotraspirazione potenziale (ETP) è definita come la massima quantità d'acqua che è persa per evaporazione e per traspirazione da una coltura bassa, uniforme, in piena attività vegetativa, mantenuta in ottimali condizioni sanitarie, nutrizionali e di rifornimento idrico. La coltura standard a cui si fa riferimento è rappresentata da un prato di festuca (*Festuca arundinacea* Desf.). L'evapotraspirazione effettiva (ETe) è la quantità d'acqua che il sistema terreno-vegetazione ha effettivamente perduto per evaporazione e traspirazione nel periodo di tempo considerato. L'ETe differisce dall'ETP in quanto considera le reali condizioni in cui si trova la coltura. L'evaporazione effettiva massima (ETm) è una particolare ETe che corrisponde alla richiesta massima

d'acqua da parte della coltura considerata in un determinato periodo del suo ciclo (Bonari et al., 1994). Il rapporto tra l'ET_m e l'ET_p individua un coefficiente, denominato coefficiente colturale (K_c), differente da pianta a pianta e variabile durante le diverse fasi del ciclo biologico delle stesse (Ruggiero, 1986; Mitchell et al., 1991; Maracchi, 1992; Bonari et al., 1994; Caspari et al., 1993; Ferreira et al., 1997).

L'evapotraspirazione può essere misurata mediante l'impiego di impianti lisimetrici e stimata mediante l'utilizzazione degli evaporimetri o utilizzando dei metodi empirici costituiti da formule matematiche più o meno complesse, basate su parametri climatici (Bonari et al., 1994).

I lisimetri sono dispositivi che permettono di misurare le perdite evapotraspirative da un volume noto di terreno in funzione della copertura vegetale in essi allevata; sono costituiti da un cassone interrato, riempito di terreno, nel quale sono coltivate le piante di cui si vuole misurare l'evapotraspirazione. Sul fondo del lisimetro a drenaggio è realizzato un sistema che consente di misurare l'acqua drenata; il valore dell'evapotraspirazione si ottiene come differenza tra l'acqua in ingresso (pioggia, irrigazione) e quella in uscita (drenaggio) dal sistema. L'evapotraspirazione può essere anche misurata confrontando il peso del cassone in due istanti diversi (lisimetro a pesata). Un ultimo tipo di lisimetro è costituito da un contenitore nel quale è possibile fare affluire o drenare acqua fino a portare la falda all'altezza voluta (lisimetro a falda variabile); in questo caso il valore dell'evapotraspirazione è valutato misurando la quantità d'acqua reintegrata, o drenata, per mantenere la falda all'altezza prestabilita (Pearcy et al., 1991; Maracchi, 1992; Caspari et al., 1993).

Le limitate dimensioni dei lisimetri (generalmente interessano una superficie di circa 1 m² e sono profondi 1,5-2,0 m) permettono, nel caso di specie arboree, l'allevamento al loro interno di una sola pianta. In queste condizioni il loro sviluppo radicale è contenuto, rispetto a quanto avviene nelle condizioni di pieno campo, ed inoltre viene a mancare la naturale competizione radicale.

L'evapotraspirazione può essere stimata anche attraverso l'utilizzo di vasche evaporimetriche. La vasca evaporimetrica più usata è l'evaporimetro di classe A; esso è costituito da un cilindro di acciaio inossidabile di 120,7 cm di diametro e 25,4 cm di altezza. La vasca, sistemata su un telaio di legno che evita il contatto con il terreno, presenta al suo interno un pozzetto di calma (evita errori di lettura dovuti al movimento dell'acqua causato dal vento) sul bordo del quale è posta una vite micrometrica di precisione, od un galleggianti nelle capannine elettroniche, che permette di misurare il livello dell'acqua. Moltiplicando il valore misurato giornalmente (mm) per un coefficiente di

vasca, tabulato in funzione della posizione della vasca e di alcune caratteristiche ambientali, si risale all'ETp (Maracchi, 1992).

Esistono, inoltre, numerosi metodi empirici basati su relazioni matematiche esistenti tra il valore dell'ETp e quelli di alcuni elementi climatici opportunamente collegati tra di loro. Tra questi alcuni dei più importanti sono quelli di Blaney-Criddle, della Radiazione Solare, di Hargreaves e di Penman-Monteith. Il metodo di Blaney-Criddle assume che l'ETP è direttamente proporzionale alla temperatura media mensile dell'aria e alla percentuale di ore di insolazione media, rispetto a quelle totali annue. L'equazione, per il calcolo del valore medio giornaliero per il mese considerato risulta essere:

$$ETp = c [p (0,46 * T) + 8]$$

dove ETp è l'evapotraspirazione potenziale per il mese considerato (mm d⁻¹), T è la temperatura media giornaliera per il mese considerato (°C), p è la percentuale media giornaliera del totale annuale di ore di luce, c è un fattore di correzione che tiene di conto del valore minimo dell'umidità relativa dell'aria durante il giorno, dell'eliofanìa relativa e della velocità del vento (Bonari et al., 1994).

Il metodo della radiazione solare considera l'ETp direttamente proporzionale alla radiazione solare media del periodo considerato:

$$ETp = c * W * R_s$$

dove ETp è l'evapotraspirazione potenziale per il periodo considerato (mm d⁻¹), c è un fattore di correzione che tiene conto dell'umidità relativa media e della velocità del vento diurno, W è un fattore che tiene conto della temperatura media e dell'altitudine, R_s è la radiazione solare media giornaliera per il periodo considerato (W m⁻²) (Bonari et al., 1994). Infine è necessario ricordare anche la complessa formula di Penman-Monteith che stima l'evapotraspirazione della coltura di riferimento in funzione della radiazione netta a livello della coltura, del flusso di calore nel suolo, della densità atmosferica, del calore specifico dell'aria umida a pressione costante, del deficit della pressione di vapore, della resistenza aerodinamica, della resistenza alla diffusione del vapore della copertura vegetale, della pendenza della curva di pressione di vapore in funzione della temperatura e della costante psicrometrica (Bonari et al., 1994).

L'uso dei metodi agrometeorologici per la stima delle esigenze idriche in agricoltura è, indubbiamente, molto diffuso anche a livello di bacini irrigui molto ampi se non addirittura di territori regionali. Il motivo di questo successo è legato alla possibilità di modellizzare il comportamento di innumerevoli condizioni colturali, svincolandosi parzialmente dalle caratteristiche

idrologiche del terreno e, in parte, dalle caratteristiche della specie da irrigare. Questo fatto genera la possibilità di fornire informazioni sui presunti consumi idrici delle diverse colture, su scala giornaliera, direttamente ai tecnici e agli agricoltori in modo che, attraverso l'uso di semplici calcoli, ognuno possa costruirsi un proprio bilancio idrico e decidere, quindi, quando e come irrigare. Esistono, infatti, sia sul territorio nazionale che in molte altre regioni del mondo, innumerevoli esempi concreti di applicazione dei metodi agrometeorologici a livello territoriale vasto, come ad esempio il servizio Irrinet del CER (Canale Emiliano Romagnolo) o il programma Scientific Irrigation Scheduling Project (SIS) dello stato di Washington (Leib et al., 2000; Leib et al., 2002) oppure ancora il sistema esperto di gestione dell'irrigazione dell'uva da tavola in Cile (Gurovich, 2002); questo aspetto rappresenta sicuramente una concreta evoluzione dei criteri di gestione dei sistemi irrigui ma non è immune da problemi, primo fra tutti la necessità di determinare con molta precisione i coefficienti colturali da applicare, processo non molto semplice per le specie arboree caratterizzate da forte variabilità, tra gli anni e durante l'anno, delle esigenze idriche e da estrema variabilità dei sistemi colturali (portinnesto, forma di allevamento, densità di piantagione, tecniche di conduzione del suolo, potatura verde, ecc.).

Nonostante gli enormi passi avanti fatti nel settore dell'agrometeorologia e nell'affinamento delle tecniche di monitoraggio dei parametri climatici, l'uso dei modelli agrometeorologici può portare quindi a un basso livello di precisione delle stime delle esigenze idriche delle colture arboree.

In linea generale, i principali limiti di applicazione di tali metodi sono così riassumibili:

- il risultato della stima dell'ET_c, o dell'ET_o, è strettamente dipendente dal livello di precisione con cui vengono determinati i parametri ambientali e le caratteristiche della coltura da irrigare, tanto che, anche per le colture industriali di pieno campo, si ritiene che la determinazione dei K_c debba essere fatta con misure dirette in campo (Mastrorilli e Campi, 2004);
- più ci si allontana dalla zona di determinazione dei parametri climatici, più aumenta il livello di incertezza nel calcolo delle esigenze idriche;
- i risultati ottenuti con l'applicazione di modelli agrometeorologici diversi possono essere anche molto diversi per cui per ogni area geografica è necessario scegliere il modello che più si avvicina alle caratteristiche ambientali di quella zona;
- la forte influenza del microclima porta alla necessità di calibrazione del metodo a livello aziendale, processo non alla portata di tutti gli agricoltori;

- per le specie arboree esistono forti limiti nei processi di validazione del metodo agrometeorologico a causa dell'impossibilità di applicazione del metodo lisimetrico;
- i metodi agrometeorologici e i K_c sono quasi sempre orientati verso il mantenimento dello "stato idrico ottimale" delle colture che non sempre è quello più idoneo all'ottenimento di produzioni di qualità. In pratica si stimano le esigenze delle colture in condizioni idriche ottimali, e quindi con elevata disponibilità idrica nel suolo, ma queste condizioni determinano anche asportazioni "di lusso" da parte della coltura che non si traducono in aumenti produttivi né tanto meno in miglioramenti qualitativi;
- non sempre sono disponibili coefficienti di stress (K_s) che consentono di stimare il consumo idrico della coltura in condizioni idriche subottimali;
- per i motivi sopra enunciati, i K_c utilizzati per le piante arboree sono molto grossolani e si riferiscono esclusivamente al periodo dell'anno anziché allo stadio fenologico della coltura che, al contrario, è estremamente variabile tra una zona e l'altra e tra una cultivar e l'altra.

In definitiva l'applicazione di questo approccio nella gestione dei sistemi irrigui per le colture arboree è affetto da elevato grado di incertezza e non consente quasi mai di ottenere i vantaggi propri della gestione irrigua sostenibile (risparmio di acqua, miglioramento qualitativo delle colture, applicazione del deficit idrico controllato, ecc.) a meno che non si faccia ricorso a tecniche di validazione *in situ* delle stime dell'ETc su base temporale quanto più possibile vicina al ciclo fenologico della specie o della cultivar considerata (Dragoni et al., 2004).

DETERMINAZIONE DELLO STATO IDRICO DELLA PIANTA

Viste le difficoltà di misura diretta o indiretta del contenuto di umidità del suolo e delle esigenze idriche delle colture, un altro possibile approccio è la valutazione dello stato idrico delle piante al fine di programmare l'intervento irriguo solo quando e per quanto tempo necessario.

La determinazione dello stato idrico può essere effettuata per mezzo di indicatori di tipo fisiologico o fisico (Mastrorilli et al., 1993). Il primo tipo di indicatori caratterizza direttamente o indirettamente lo stato idrico della pianta; il secondo si riferisce a quei fattori dell'ambiente che influenzano l'equilibrio idrico delle piante (Katerji et al., 1988). Gli indicatori fisiologici che descrivono direttamente lo stato idrico della pianta sono quelli che

esprimono il contenuto idrico relativo (Bennett, 1990) o il potenziale idrico fogliare (Scholander et al., 1965; Meyer e Green, 1980). Gli indicatori fisiologici indiretti descrivono i fenomeni provocati dal cambiamento dello stato idrico della pianta. Tra questi, i fenomeni più importanti sono le variazioni di conduttanza stomatica (Katerji et al., 1988; Harrison et al., 1989; Sellés e Berger, 1990; Tan e Layne, 1991), temperatura fogliare (Glenn et al., 1989; Hatfield, 1990; Jones et al., 1997) e l'indice di stress a esso correlato (CWSI: "Crop Water Stress Index") (Idso et al., 1981), variazioni di diametro degli organi vegetali (Huguet, 1985; Huguet et al., 1992; Simmoneau et al., 1993) ed, infine, i sintomi osservabili visivamente (Baldini, 1986; Xiloyannis, 1992. b). I più importanti indicatori fisici, fattori dell'ambiente che influenzano l'equilibrio idrico delle piante, sono la domanda evaporativa dell'ambiente (VPD), il contenuto idrico del terreno e il potenziale idrico della zona radiale (Katerji et al., 1988).

Numerosi studi (Bordovsky et al., 1974; Stegman et al., 1976) hanno mostrato una migliore rispondenza degli indicatori fisiologici dello stato idrico delle colture nella programmazione irrigua; comunque le opinioni non sono concordi circa quale indicatore fisiologico sia il più idoneo nella pratica agricola (Katerji et al., 1988; Mastrorilli et al., 1993). A seconda degli Autori e della specie su cui si è indagato, è stato preferito il CWSI (Clark e Hiler, 1973) o il potenziale idrico delle foglie (Clark e Hiler, 1973; Jones, 1990; Sellés e Berger, 1990) o il potenziale idrico fogliare misurato prima dell'alba (Katerji et al., 1988; Tardieu et al., 1990; Mastrorilli et al., 1993; Ferreira et al., 1997; Valancogne et al., 1997) o il potenziale xilematico (McCutchan e Schackel, 1992) o la variazione di diametro degli organi della pianta (Garnier e Berger, 1985) o nessuno (Kamgar et al., 1980).

INDICATORI FISILOGICI

Potenziale idrico fogliare

Durante la giornata sono state registrate grosse variazioni di potenziale idrico fogliare tra le misure effettuate all'alba (PD: predawn) e i valori registrati nelle ore di massima traspirazione (MD: midday). In piante arboree ben irrigate i valori minimi registrati, di potenziale idrico MD, oscillano tra valori di $-1,0$ e $-2,5$ MPa (Goode e Higgs, 1973; Smart, 1974; Liu et al., 1978; Xiloyannis et al., 1980; Garnier e Berger, 1985; Li et al., 1990.a; Cohen, M. et al., 1993; Girona et al, 1993; Berman e DeJong, 1996; Massai e Gucci, 1997). Pian-

te in condizioni di elevata umidità relativa (UR) fanno registrare potenziali meno negativi nell'intero arco della giornata (Xiloyannis et al., 1986). In condizioni non limitanti di disponibilità idrica del suolo, il ritmo di traspirazione è determinante nell'influenzare il potenziale fogliare che risulta quindi essere dipendente anche dal deficit di pressione di vapore (VPD) (Faust, 1989).

In condizioni di carenza idrica del suolo i potenziali fogliari misurati nelle ore più calde della giornata possono raggiungere valori molto bassi. In piante di melo sottoposte a stress idrico sono stati misurati potenziali di $-2,5$ $-3,0$ MPa (Jones e Higgs, 1979) e i valori minimi giornalieri continuavano a diminuire con l'avanzare della stagione. Nel corso della stagione, su piante di melo, il potenziale idrico si abbassa, tra giugno e settembre, da -1 MPa a -2 MPa nelle piante irrigate e da $-1,5$ MPa a -3 MPa in piante non irrigate (Goode e Higgs, 1973). In piante di olivo è stata rilevata una buona correlazione tra il potenziale fogliare MD e la disponibilità idrica del terreno; le foglie di questa pianta continuano a traspirare fino a potenziali idrici fogliari di -8 MPa (Xiloyannis, 1992.b). La stessa correlazione non è stata rilevata per le piante di pesco per le quali solo il potenziale all'alba è risultato un eccellente parametro per valutare lo stato idrico della pianta e la disponibilità idrica del suolo (Garnier e Berger, 1985; Xiloyannis et al., 1988).

Attualmente per la misurazione del potenziale idrico sono adottati i metodi della camera a pressione o quello psicrometrico (Koide et al., 1991; Xiloyannis, 1992.b). L'impiego della camera a pressione è il metodo più utilizzato in quanto è semplice, rapido ed economico, anche se è distruttivo. La tecnica della camera a pressione consiste nell'esercitare su una foglia posta all'interno di una camera, con la parte del picciolo disposta verso l'esterno, una pressione crescente mediante l'immissione di gas. L'entità della pressione necessaria a fare fuoriuscire la linfa, dall'estremità rivolta verso l'alto, è assunta come valore del potenziale idrico del tessuto in esame. Nel corso della giornata tale valore è influenzato dalla richiesta evaporativa dell'ambiente, dal contenuto idrico del terreno, dalle resistenze che l'acqua incontra lungo il suo percorso dalle radici alle foglie e dalla capacitanza dei tessuti (Scholander et al., 1965; Xiloyannis, 1992b).

Altri indicatori fisiologici diretti

Il contenuto idrico dei tessuti può essere espresso anche come contenuto di acqua relativo a quello presente al massimo turgore (RWC) ed è indicato come valore percentuale (Koide et al, 1991):

$$\text{RWC (\%)} = \frac{\text{peso fresco} - \text{peso secco}}{\text{peso turgido} - \text{peso secco}}$$

Tale valore può essere calcolato sull'intera foglia o su parte di essa. È un metodo che ha scarsa validità qualora le variazioni d'acqua nel tessuto siano piccole (Xiloyannis, 1992.b).

Lo stato di idratazione dei tessuti può, inoltre, essere espresso come valore percentuale del loro contenuto in acqua, riferito al peso secco o al peso fresco. Il valore percentuale riferito al peso fresco ha poca validità, a causa delle notevoli variazioni del contenuto idrico dei vari tessuti nell'arco della giornata. Il valore riferito al peso secco non costituisce un parametro molto attendibile poiché presenta una notevole variabilità sia nell'arco della giornata, a causa della continua sintesi e traslocazione dei carboidrati, sia durante la stagione, a causa delle variazioni dello spessore delle pareti cellulari (Xiloyannis, 1992b).

Conduttanza stomatica

La regolazione degli scambi gassosi garantisce, alla pianta, la possibilità di crescere senza correre il rischio di disseccare in un ambiente in cui il gradiente per l'assorbimento della CO₂ atmosferica, tra aria e spazi intercellulari, è di circa - 0,00003 MPa/d (dove d rappresenta la lunghezza del cammino di diffusione) mentre il gradiente di diffusione del vapor d'acqua è di circa - 100 MPa/d (a 21 °C e con un'umidità relativa del 50%) (Bidwell, 1978).

Gli stomi, con il loro movimento, esercitano un controllo diretto sulla traspirazione; essi si aprono o si chiudono in risposta alla concentrazione di CO₂ nel mesofillo fogliare e all'aumento, o diminuzione, del potenziale osmotico delle cellule di guardia (quando l'acqua penetra, nelle cellule, queste si espandono e lo stoma si apre; quando l'acqua fuoriesce, dalle cellule di guardia, lo stoma si chiude) (Alpi et al., 1992). In studi effettuati su *Phaseolus vulgaris*, *Glycine max* e *Nerium oleander*, Mott e Parkhurst (1991) hanno descritto come l'apertura e la conduttanza stomatica siano direttamente dipendenti dal ritmo di traspirazione e non dalla concentrazione di vapore sulla superficie fogliare o dalle differenze nella concentrazione di vapore attraverso l'epidermide fogliare. La risposta degli stomi nei confronti delle variazioni di umidità è in realtà un adattamento a una variazione del tasso di traspirazione.

Un esempio dell'efficacia del controllo stomatico sul potenziale idrico fogliare in diverse situazioni di disponibilità d'acqua nel suolo è stato dato da alcuni lavori effettuati sul melo (Jones, 1983; Jones et al., 1983) in cui le differenze tra i potenziali idrici fogliari di piante ben irrigate e stressate si mantenevano entro 0,25 MPa, nonostante le grosse differenze di potenziale del suolo.

La resistenza degli stomi alla diffusione del vapor d'acqua è, quindi, inversamente proporzionale al grado di apertura stomatica; questo parametro può essere semplicemente determinato misurando la velocità di un flusso di aria che è forzato ad attraversare la foglia (Bidwell, 1978) ed è espressa come $s\text{ mm}^{-1}$. La conduttanza stomatica (g_s) è il reciproco della resistenza stomatica e si esprime, quindi in $[\text{mm s}^{-1}]$. Per la determinazione di questo parametro si può utilizzare il porometro, costituito da una camera fogliare, corredata di sensori di umidità, applicata alla superficie della foglia che consente di determinare il tempo richiesto per incrementare, all'interno di una cuvetta di volume noto, l'umidità tra due livelli prestabiliti o la variazione di umidità in un delimitato intervallo di tempo (Percy et al., 1991). Valori tipici di conduttanza stomatica per alcune piante arboree da frutto irrigate sono riportati nella tabella 1.

Su piante di pesco (Xiloyannis et al., 1980; Li et al., 1990.a; Tan e Layne, 1991), vite (Smart, 1974) e olivo (Xiloyannis et al., 1988) è stato osservato come, al diminuire della disponibilità idrica del suolo, aumentano le resistenze stomatiche.

Temperatura fogliare

La temperatura fogliare è un altro indicatore fisiologico indiretto che può essere utilizzato per la determinazione dello stato idrico di una pianta.

La temperatura fogliare è influenzata dalle condizioni ambientali (temperatura e umidità dell'aria, velocità del vento, ora del giorno), dalle carat-

SPECIE	g_s $[\text{mm s}^{-1}]$
Melo	3-8
Albicocco	2,7-11
Pesco	1,5-7
Ciliegio	7
Susino	7

Tab. 1 Valori di conduttanza stomatica di alcune piante arboree da frutto irrigate (da Faust, 1989, modificato).

teristiche della coltura (orientamento dei filari, stadio fenologico, grado di copertura del suolo) e dalla metodologia di misura (superficie rilevata, angolo di osservazione) (Vaysse et al., 1990).

Lo squilibrio tra l'assorbimento idrico, da parte delle radici, e la domanda evaporativa ambientale, che si verifica durante una giornata di pieno sole o in condizioni idriche non ottimali, si ripercuote sulla regolazione dell'apertura stomatica. Al rallentamento del ritmo traspiratorio segue una diminuzione dello scambio di calore latente (energia termica coinvolta nella variazione dello stato di aggregazione) e quindi un innalzamento della temperatura fogliare (Bidwell, 1978; Alpi et al., 1992); quest'ultima può essere facilmente misurata con un termometro a infrarosso (Glenn et al., 1989; Vaysse et al., 1990; Hatfield, 1990; Anconelli e Mannini, 1993; Jones, et al., 1997). Le differenze tra le temperature fogliari misurate su piante normalmente irrigate e su piante in condizione di stress idrico sono tanto maggiori quanto più elevato è il grado di stress (Vaysse et al., 1990; Gucci et al., 1996); le divergenze maggiori sono state riscontrate nelle ore di massima insolazione; il valore assoluto raggiunto dalla temperatura dipende comunque dalle condizioni ambientali (Vaysse et al., 1990).

Variazione del diametro degli organi vegetali

Le misure micrometriche (misure al millesimo di millimetro: μm), effettuate a brevi intervalli di tempo, permettono di evidenziare oscillazioni periodiche della variazione della dimensione degli organi vegetali (tronco, branche, germogli o frutti), una parte delle quali può essere messa in relazione con l'approvvigionamento idrico della pianta. In piena stagione vegetativa si verifica, giornalmente, una riduzione del diametro che, in condizioni di pieno sole, comincia all'inizio della mattina e termina nel primo pomeriggio, con un'ampiezza totale di qualche centinaio di μm . Dopo aver raggiunto il minimo, nel pomeriggio, comincia una fase di crescita regolare che riporta, durante la notte, l'organo vegetale in esame alla massima dimensione registrata il giorno precedente e che continua, poi, a crescere, in diametro, fino a raggiungere un nuovo massimo prima di cominciare una nuova fase di diminuzione (Huguet, 1985; Li e Huguet, 1990; Li et al., 1990a; Huguet et al., 1992; Simonneau et al., 1993).

Le "microvariazioni" dei diametri degli organi legnosi (o dei frutti) sono il risultato di tre componenti: crescita, scambi idrici tra i tessuti e variazioni termiche (Huguet, 1985; McBurney e Costigan, 1988; McBurney, 1990).

La crescita degli organi è la conseguenza dell'aumento delle dimensioni, o del numero, delle cellule in seguito all'arrivo dell'acqua e degli assimilati negli organi stessi; questa espansione cellulare si realizza solo se il potenziale idrico non è troppo basso, quindi, generalmente, alla fine del pomeriggio, durante la notte e all'inizio della mattina (Huguet, 1985).

La contrazione diurna degli organi vegetali è dovuta, inoltre, al consumo, da parte della pianta, delle riserve idriche dei tessuti floematici per compensare un transitorio disequilibrio durante la fase crescente di domanda traspiratoria (Huguet et al., 1992). Le dilatazioni e le contrazioni che si verificano giornalmente sono dovute essenzialmente a variazioni dello spessore dei tessuti corticali, mentre il legno (xilema) non subisce, praticamente, variazioni di diametro (Molz e Klepper, 1972; Huguet, 1985).

È necessario precisare che per quanto la temperatura dell'aria, e la temperatura della superficie, possano avere effetti diretti sulle dimensioni della superficie sottoposta a misura (dilatazione termica) in realtà il tronco sembra non essere sensibile a questo fenomeno (Huguet, 1985). Anche la respirazione e la traspirazione cuticolare influiscono sul bilancio delle variazioni del diametro degli organi vegetali ma il contributo dato da questi ultimi due fenomeni è trascurabile rispetto a quello dei precedenti (Huguet, 1985).

Attraverso la misura della variazione del diametro degli organi vegetali si possono quindi ottenere informazioni sull'accrescimento giornaliero e sull'ampiezza della contrazione diurna. In vari lavori è stato visto, su pesco (Li et al., 1990a; Huguet et al., 1992; Simonneau et al., 1993) e melo (Huguet et al., 1992), che la contrazione diurna del diametro degli organi vegetali è amplificata dallo stress idrico della pianta. In condizioni di abbondante disponibilità idrica la massima contrazione giornaliera registrabile è debole rispetto a quanto si verifica con disponibilità idriche sempre più decrescenti. Questo a causa dell'utilizzazione di sempre maggiori riserve idriche per sostenere la traspirazione fogliare.

Quasi tutti gli indicatori, fisiologici e fisici, diretti o indiretti, hanno mostrato, in numerosi lavori, una buona rispondenza nella determinazione dello stato idrico delle colture (Remorini e Massai, 2003.a, 2003.b). Potenzialmente quindi potrebbero essere utilmente impiegati per la gestione dei sistemi irrigui consentendo anche l'applicazione delle tecniche di deficit idrico controllato. Se si fa eccezione però solo per le misure di variazione diametrica degli organi legnosi o dei frutti, nessuno degli indicatori proposti si presta a essere automatizzato: è sempre necessario l'intervento diretto del tecnico o dell'agricoltore per la realizzazione delle misure in pieno campo. Così ad esempio, sia

le misure di potenziale idrico fogliare all'alba che le misure di potenziale xilematico sono risultate essere indicatori accurati dello stato idrico della coltura (Williams, 2002) ma le misure devono essere realizzate a cadenza giornaliera, o comunque con turni di pochi giorni, su tutto l'impianto con impiego di tempo elevato e con la necessità di attenta interpretazione dei risultati.

Queste letture sono inoltre affette da una certa soggettività di esecuzione delle misure per cui la definizione dei valori soglia per l'effettuazione dell'intervento irriguo può risultare abbastanza incerta. Un sensibile miglioramento dell'attendibilità delle misure potrebbe essere rappresentato dalla possibilità di monitoraggio in continuo del potenziale idrico dello stelo. Recentemente è stato proposto un metodo basato sulla misura della costante dielettrica del tronco (Stem Dielectric Constant; DCstem) che è risultato avere un elevato grado di correlazione con il potenziale idrico dello stelo (Bonany, 2003).

In alcuni lavori, inoltre, la misura dei potenziali, sia fogliari che xilematici, è risultata essere un indicatore meno "sensibile" dello stato idrico delle piante rispetto ad altri: variazioni anche di lieve entità, spesso al di sotto dell'errore strumentale di lettura e della variabilità di campionamento, nelle misure di potenziale corrispondono ad ampie oscillazioni nei consumi idrici della coltura (Remorini e Massai, 2003.b). Come si osserva dalla figura 1, a piccole variazioni di potenziale idrico all'alba corrispondono, in pesco, sensibili riduzioni dei consumi idrici fogliari.

In sostanza anche questo metodo richiederebbe una attenta calibrazione *in situ* per l'individuazione dei valori soglia e dei valori ottimali di mantenimento dello stato idrico delle piante per ottenere risultati soddisfacenti sul piano della riduzione degli sprechi irrigui e del miglioramento della qualità delle produzioni frutticole, ecc. (Améglio et al., 1997; Valancogne et al., 1997).

Anche se più semplice da realizzare, la misura della temperatura fogliare, su singola foglia o su pianta intera, spesso adottata nelle colture erbacee industriali per la definizione del Crop Water Stress Index (CWSI) e in alcuni casi anche su vite (Battilani et al., 2000), non si applica con facilità alle piante arboree da frutto a causa della elevata variabilità che si ottiene nelle letture. Questa variabilità è causata dalla complessità architettonica delle chiome e dalla variabilità del microclima interno alle chiome stesse. Inoltre, le temperature fogliari sono strettamente dipendenti dalle condizioni climatiche esterne (temperatura e umidità relativa) per cui l'interpretazione delle letture può essere molto complessa e difficilmente modellizzabile (Remorini e Massai, 2003a).

L'unico indicatore che ha avuto un'applicazione pratica abbastanza ampia è stata la misura delle variazioni diametrali del frutto o, più frequentemente,

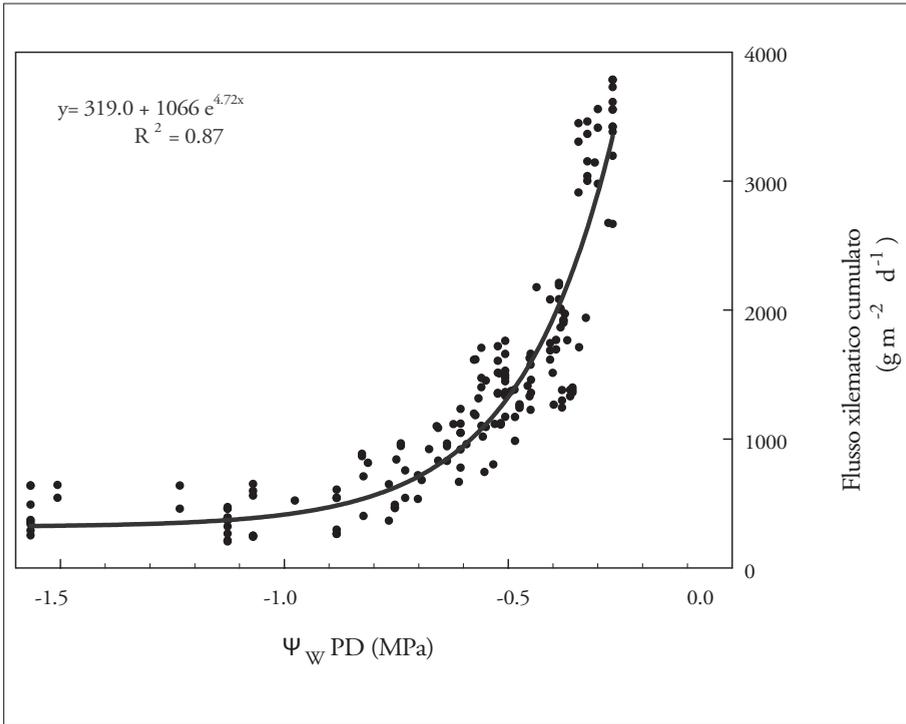


Fig. 1 *Andamento del flusso xilematico cumulato giornaliero in funzione del potenziale idrico fogliare misurato prima del sorgere del sole (da Remorini e Massai, 2003.b).*

degli organi legnosi (TDF; Trunk Diameter Fluctuation) (Moriana e Fereres, 2002). Esistono in commercio alcune apparecchiature che consentono di gestire gli impianti di irrigazione sulla base delle letture effettuate dai traduttori lineari LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) applicati ai frutti o alle branche degli alberi, letture trasmesse a un datalogger che viene interrogato da remoto tramite un opportuno software. La tecnica di gestione si basa principalmente su due parametri: l'incremento diametrico del frutto o tronco durante la stagione (dovuto alla distensione cellulare delle cellule del frutto o all'attività del cambio) e la contrazione massima diurna del diametro (Maximum Daily Shrinkage). Entrambe questi parametri sono però molto variabili tra una pianta e l'altra e influenzati dall'andamento climatico giornaliero, e perciò difficilmente modellizzabili e poco apprezzati dai frutticoltori (Miche-lakis, 1997; Goldhamer et al., 2000).

A causa di ciò i risultati che si sono ottenuti fino ad oggi con l'applicazione di questo metodo non sono stati superiori a quelli ottenibili attraverso l'appli-

cazione dei Kc sulla base dell'evaporato giornaliero. Inoltre la necessità di automazione del sistema limita enormemente il numero delle aziende in grado di applicarlo convenientemente (Bonany, 2003; Moriana e Fereres, 2004).

DETERMINAZIONE DEI CONSUMI IDRICI EFFETTIVI DELLA PIANTA

Rimane infine la possibilità di irrigare sulla base della quantità di acqua effettivamente consumata dalla coltura monitorata attraverso una delle tecniche di seguito illustrate.

Scambi gassosi su pianta intera

La tecnica della Camera di Assimilazione e Traspirazione (CAT) permette di misurare gli scambi gassosi, e la traspirazione, di un'intera pianta. Il metodo prevede l'utilizzo di una copertura trasparente, di dimensioni sufficienti a racchiudere l'intera pianta in esame, all'interno della quale è immessa aria esterna. Sia l'aria in entrata che quella in uscita, che presenta caratteristiche differenti in funzione dell'attività traspirativa e assimilativa della pianta, è prelevata e analizzata per determinare la concentrazione di CO₂ e di H₂O (Daudet, 1987; Giuliani et al., 1998).

Conoscendo il flusso di aria (Q), in entrata e in uscita, e la differenza tra le due diverse concentrazioni di H₂O ($\Delta[H_2O]$) è possibile calcolare la traspirazione della pianta (T_r):

$$T_r = Q * (\Delta[H_2O]) \quad (\text{g s}^{-1})$$

Il limite principale di questo metodo è la presenza della copertura trasparente che perturba inevitabilmente le condizioni microclimatiche della pianta nonché la geometria della chioma che deve essere, necessariamente, adattata al fine di consentire l'installazione dell'involucro plastico (Daudet, 1987).

Metodi termoelettrici

L'impiego del calore per stimare il flusso di linfa negli alberi ha dato origine a una serie di tecniche che possono essere distinte in due gruppi principali in base a come il calore è rilasciato nel tronco: tecniche che utilizzano un impulso di calore (Heat Pulse Velocity: HPV) e tecniche che si basano sulla emissione di calore in modo continuo (Stem Heat Balance: SHB) (Sabatti et al., 1992; Cohen, Y. et al., 1993; Swanson, 1994; Smith e Allen, 1996).

Tecniche che utilizzano un impulso di calore

Il primo esperimento in cui è stato utilizzato il calore per stimare la velocità della linfa è stato effettuato da Huber, nel 1932, su una liana tropicale, caratterizzata da un elevato flusso di linfa grezza. Huber, dopo aver fatto due piccoli fori nel fusto della pianta, distanziati tra loro di circa 30 cm, inserì nel foro inferiore una sorgente di calore, mediante la quale era in grado di generare un impulso della durata di 1-2 secondi, e in quello superiore una termocoppia. Il tempo impiegato dall'onda di calore per raggiungere la termocoppia fu assunto da Huber pari a quello impiegato dalla linfa per superare lo spazio prefissato (Sabatti et al., 1992). Successivamente, per misurare velocità di flusso più basse, sono state utilizzate distanze inferiori tra l'elemento riscaldante e la termocoppia. In questo modo è diventato essenziale distinguere l'effetto di convezione, dovuto al movimento della linfa, da quello di conduzione termica, dipendente dalla velocità di diffusione del calore e dalla densità del legno; lo scopo è stato raggiunto aggiungendo una seconda termocoppia sotto la sorgente di calore.

Nel 1958 Marshall ha esaminato il problema sotto l'aspetto teorico attraverso una dettagliata analisi fisica del movimento del calore nello xilema. I numerosi lavori successivi (Closs, 1958; Doley e Grieve, 1966; Lassoie et al., 1977; Cohen et al., 1981; Green e Clothier, 1988; Jones et al., 1988a; Senock e Ham, 1993), pur utilizzando approcci differenti per stimare la velocità della linfa attraverso il metodo dell'impulso di calore, sono tutti derivati dal suo studio (Sabatti et al., 1992; Swanson, 1994). Nel modello proposto da Marshall, l'aumento di temperatura T (K), prodotto dall'impulso di calore dopo il tempo t (s), alla distanza x (mm), è:

$$T = \frac{Q}{4\pi\rho ckt} \exp \frac{-(x - vt)^2}{4kt}$$

dove: Q è la quantità di calore liberato dall'elemento riscaldante, per unità di lunghezza, per far crescere la temperatura dell'unità di volume di legno fresco ($J\ mm^{-1}$); ρ ($mg\ mm^{-3}$), c ($J\ mg\ K^{-1}$) e k ($mm^2\ s^{-1}$) sono rispettivamente la densità, il calore specifico e la diffusività termica del legno; v è la velocità convettiva dell'impulso di calore ($mm\ s^{-1}$) (Marshall, 1958).

Per velocità di flusso ridotte ($< 0,22\ mm\ s^{-1}$) la velocità dell'impulso di calore è stimata:

$$v = \frac{X_1 - X_2}{2t_0} \quad (mm\ s^{-1})$$

dove X_1 e X_2 sono le distanze (mm), rispettivamente sopra e sotto l'elemento

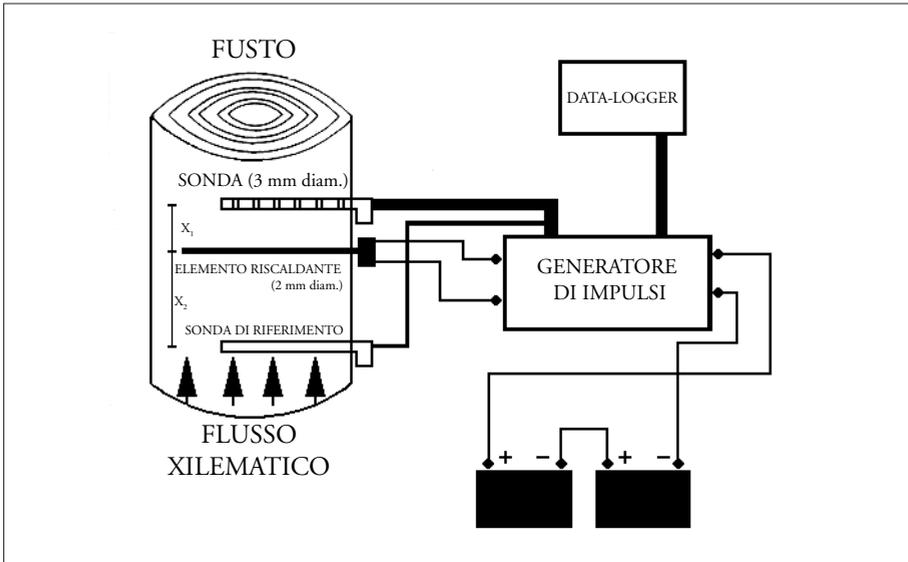


Fig. 2 Schema del metodo dell'impulso di calore non compensato (Non compensated Heat Pulse Method) utilizzato per misurare il flusso linfatico (Cohen, Y. et al., 1993, modificato).

riscaldante, a cui sono posti i sensori di temperatura; t_0 (s) è il tempo trascorso, dal rilascio dell'impulso di calore, per ristabilire la precedente differenza di temperatura (Cohen, Y. et al., 1993).

Per velocità superiori a $0,22 \text{ mm s}^{-1}$ il tempo t_0 non può essere misurato, dalle sonde, con sufficiente precisione; la velocità dell'impulso di calore è stimata:

$$v = \frac{(X_1 - 4kt_m)^{0,5}}{t_m} \quad (\text{mm s}^{-1})$$

dove k ($\text{mm}^2 \text{ s}^{-1}$) è la diffusività termica e t_m (s) è il tempo trascorso, dal rilascio dell'impulso di calore, affinché la temperatura del sensore superiore raggiunga il massimo (Cohen, Y. et al., 1993).

Le tecniche che utilizzano un impulso di calore per stimare il flusso xilematico presentano alcuni vantaggi e svantaggi. In particolare, uno dei limiti principali nella loro applicazione dipende dalla presenza, nel fusto, di un gradiente termico indotto da condizioni diverse (irraggiamento del tronco, vicinanza al terreno, ecc.) Le misure di velocità della trasmissione dell'impulso termico pertanto necessitano di una accurata calibrazione per poter fornire risultati attendibili. A questo proposito sono stati proposti metodi alternativi in cui si utilizza una seconda termocoppia al di sotto dell'elemento riscaldan-

te che, misurando il gradiente di temperatura nel tronco, danno la possibilità di compensare le misure in tempo reale.

La presenza della seconda termocoppia permette l'autocalibrazione del sistema eliminando gli effetti negativi dovuti a gradienti di temperatura all'interno del tronco, mentre in sua assenza è invece necessaria una complessa calibrazione in funzione dei diversi tipi di legno. Questa tecnica, definita come Compensated Heat Pulse Method (CHPM) o Compensation Heat-Pulse Velocity (CHPV) ha consentito di ottenere risultati di notevole interesse su olivo e su specie arboree da frutto (Giorio e D'Andria, 2002; Giorio e Giorio, 2003; Tognetti et al., 2004)

Inoltre, essendo le sonde inserite radialmente è possibile misurare la conducibilità xilematica di diversi anelli di xilema ed effettuare misure su tronchi di 15-20 cm di diametro. La tecnica utilizza impulsi di calore di brevissima durata (millisecondi) e quindi, consumando poca corrente elettrica, permette una lunga autonomia nelle condizioni operative di pieno campo.

Il metodo necessita però di fori di profondità e dimensioni notevoli che possono determinare, in alcune specie (agrumi ad esempio) reazioni di cicatrizzazione che rendono difficoltoso l'utilizzo della tecnica e l'interpretazione dei dati nel tempo. I valori di flusso linfatico sono espressi in funzione della differenza di temperatura tra le sonde ed è quindi necessario tenere in considerazione la diffusività termica, il calore specifico e la densità del legno. Infine l'installazione delle sonde deve necessariamente essere effettuata la mattina, quando il potenziale xilematico è elevato, per evitare fenomeni di cavitazione.

A carico di questa tecnica di monitoraggio dei flussi idrici, però, è stata spesso riportata l'affidabilità solo in condizioni di elevato flusso idrico negli organi legnosi e una sostanziale perdita di sensibilità per ritmi di flusso molto bassi. Per ovviare a questo inconveniente è stata recentemente proposta una modifica (Heat Ratio Method; HRM) che dovrebbe consentire un ampliamento del range di velocità di flussi linfatici misurati, la predisposizione di protocolli di correzione degli errori fisici e termici di installazione dei sensori e la definizione di funzioni lineari semplici per la correzione degli errori dovuti alle reazioni del legno alle ferite prodotte per l'installazione dei sensori (Burgess et al., 2001).

Tecniche di emissione continua di calore *Tecniche di bilancio termico*

Il flusso di linfa all'interno dei vasi conduttori può essere stimato con un metodo basato sul bilancio di calore in una porzione di fusto (Cermak et al.,

1973; Sakuratani, 1981; Baker e van Bavel, 1987; Steinberg et al., 1989; Valancogne e Nasr, 1989; Ham e Heilman, 1990; Ham et al., 1990; Steinberg et al., 1990a; Lascano et al., 1992; Shackel et al., 1992; Angelocci e Valancogne, 1993; Améglio et al., 1993; van Bavel, 1993; Weibel e de Vos, 1994; Grime et al., 1995; Herzog et al., 1997; Dichio et al., 1998; Eastham e Gray, 1998). Il metodo del “bilancio termico” stima la traspirazione della pianta, che è proporzionale alla quantità di linfa che scorre nel fusto, isolando termicamente, con una guaina, una porzione di fusto (o di branca). All’interno di questa guaina un elemento riscaldante, che può essere costituito da una serie di piastre di acciaio (Cermak et al., 1973) o da una fascia contenente una resistenza piatta (Sakuratani, 1984), aderisce al fusto fornendo energia al sistema; diverse serie di termocoppie sono utilizzate per quantificare la ripartizione del calore fornito dall’elemento riscaldante: flusso di calore verso l’alto, verso il basso e radialmente (Figura 3). La differenza tra il calore fornito, alla porzione di fusto, e le perdite, quantificate dalle termocoppie, si suppone essere dissipata per convezione col flusso di linfa lungo il fusto e può essere correlata direttamente al flusso di acqua (Kjelgaard et al., 1997). Il flusso di linfa F [$g\ h^{-1}$] è, dunque, espresso dalla relazione:

$$F = \frac{Q_i - Q_v - Q_r}{c_w * \delta T}$$

dove Q_i [W] è il calore fornito in ingresso, Q_v è il calore condotto verticalmente (verso l’alto e verso il basso), Q_r è il calore condotto radialmente, c_w [$J\ g^{-1}\ K^{-1}$] è il calore specifico dell’acqua e δT è la differenza di temperatura tra le due termocoppie poste a monte e a valle dell’elemento riscaldante (Steinberg et al., 1989; Valancogne e Nasr, 1989; Steinberg et al., 1990.a; Braun, 1997; Rana et al., 1998). Dividendo il flusso di linfa ascendente così calcolato per l’area fogliare della porzione di pianta posta al di sopra del sensore si può stimare la traspirazione unitaria.

La tecnica prevede l’applicazione esterna degli elementi riscaldanti e, grazie ai sensori applicati sopra e sotto questi ultimi, permette un’autocalibrazione del sistema (Massai e Gucci, 1997; Massai et al., 1998). Il principale limite di questa tecnica è dovuto al fatto che essa considera che tutto il cilindro riscaldato sia attivo dal punto di vista della conduzione xilematica, mentre, nelle specie eteroxile (tra cui le specie da frutto), sono soltanto gli anelli xilematici più giovani (3-4 anni) a essere attivi; quindi, nel caso di fusti di grosse dimensioni il metodo tende a sovrastimare l’effettivo flusso xilematico. Inoltre, nel caso di corteccia di notevole spessore deve essere fornita una elevata quantità di calore con il rischio di provocare danni alla corteccia e al

cambio. Un altro svantaggio del sistema è dovuto al fatto che stima con scarsa sensibilità la ripresa mattutina dei flussi xilematici a causa del dissipamento del calore accumulato durante tutta la notte; questo difetto del sistema può essere superato utilizzando la variante proposta da Valancogne (4 coppie di termocoppie e una termocoppia inserita all'interno del fusto) ma con questo metodo il sistema diventa molto complesso e di difficile gestione.

I sensori applicati sulle branche, o sul tronco, devono essere accuratamente isolati dall'esterno per evitare che la radiazione diretta del sole sugli stessi provochi un innalzamento della temperatura del sistema. Poiché le termocoppie devono essere collocate a stretto contatto della corteccia il sistema può essere utilizzato soltanto su specie con corteccia liscia.

Con gli accorgimenti del caso, però, questa tecnica si è dimostrata di sicura efficacia per la determinazione dei consumi idrici delle colture, soprattutto quando applicata su fusti di ridotta dimensione (Chandra et al., 1994; Dichio et al., 1998; Massai e Remorini, 2000; Massai et al., 2000; Remorini e Massai, 2003a, 2003b).

Una modifica al metodo appena descritto è stata proposta da Chermak et al. (1973) per adattare il metodo a tronchi di notevoli dimensioni; essa consiste nel mantenere costante la differenza di temperatura T attraverso il controllo del calore fornito al sistema legno-linfa. In questo caso si ha il

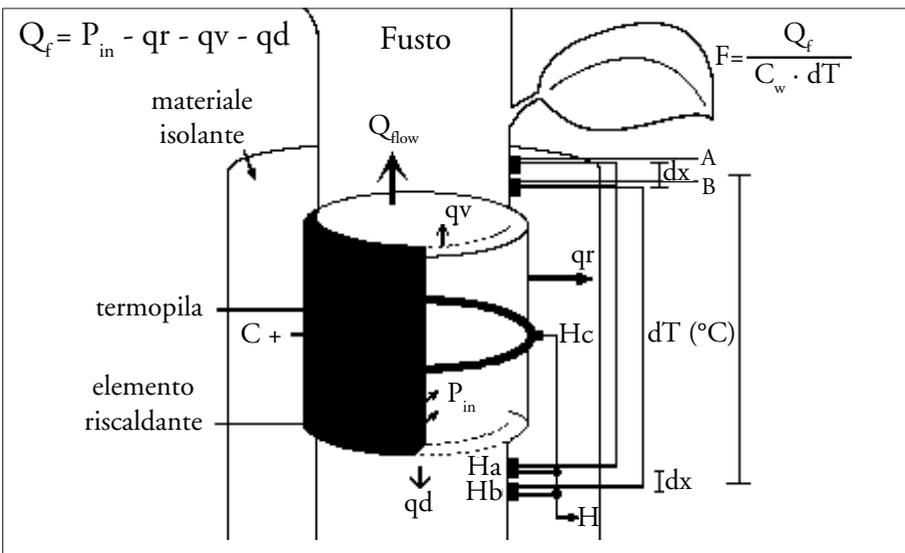


Fig. 3 Schema del metodo del bilancio termico utilizzato per misurare il flusso linfatico proposto da Sakuratani (van Bavel e van Bavel, 1990, modificato).

vantaggio di determinare come valore costante le perdite di calore quando il flusso idrico è nullo (Sabatti et al., 1992). Tuttavia il metodo procura profonde ferite, provocate dalle piastre metalliche, ed è di difficile e complessa calibrazione (Braun, 1997).

Tecniche di dissipazione del calore

Un metodo che utilizza il principio del bilancio di calore ma impiega sonde simili a quelle del metodo HPV è stato messo a punto da Granier nel 1985 (Cabibel, 1991; Cabibel e Do, 1991; Smith e Allen, 1996; Lu e Chacko, 1998). Due sonde cilindriche, con un diametro di 2 mm e una lunghezza di 20 mm, sono inserite radialmente in posizione sovrapposta, a una distanza di 10 cm, nel tronco di un albero (Figura 4). La sonda superiore è riscaldata in permanenza con una alimentazione costante, quella inferiore, non riscaldata, è utilizzata come riferimento della temperatura del legno. Due termocoppie, una per sonda, collegate in serie, misurano la differenza di temperatura (ΔT) tra le due sonde. Poiché il calore fornito è costante, la differenza di temperatura dipende dal flusso di linfa circolante: se quest'ultimo aumenta, il calore è dissipato più velocemente, e quindi ΔT diminuisce e viceversa (Thermal Dissipation Method; TDM). Granier ha trovato, sperimentalmente, su campioni di legno di specie diverse, che la densità di flusso linfatico (u , $m^3 m^{-2} s^{-1}$), per unità di sezione conducente, è legata al ΔT dalla relazione:

$$u = 0,000119 Z^{1,231}$$

con:

$$Z = \frac{(\Delta T_0 - \Delta T)}{\Delta T}$$

dove ΔT_0 è la differenza di temperatura misurata tra le due sonde in assenza di flusso di linfa. A questo punto è possibile calcolare il flusso di linfa totale (F) moltiplicando il valore della superficie conducente per il valore di densità di flusso (u).

Il metodo TDM proposto da Granier, essendo intrusivo, presenta gli stessi svantaggi evidenziati anche per le tecniche che utilizzano un impulso di calore e deve sempre essere calibrato in funzione del tipo di legno, nonostante questo è risultato molto affidabile, soprattutto quando applicato su specie forestali (Ewers e Oren, 2000). Questo metodo però, ideato per misurare i bassi flussi xilematici delle conifere, non è molto sensibile agli elevati flussi registrabili nelle specie arboree da frutto soprattutto durante le ore centrali della giornata.

Questo problema deriva in particolare dal fatto che, durante il giorno, l'immissione continua di calore nel tronco genera un gradiente termico che altera la risposta del sensore. Per ovviare a questo inconveniente è stata recentemente proposta una modifica del metodo originale che prevede l'applicazione del calore non in maniera continua ma a cicli di 15 minuti, intervallati con cicli di non riscaldamento di 15 minuti. In questo modo la sensibilità del metodo appare fortemente incrementata (Do e Rocheteau, 2002; Lu, 2002).

In linea generale, comunque, i metodi termoelettrici per la misura dei flussi idrici negli organi legnosi hanno dimostrato una ottima affidabilità in numerose condizioni di applicazione e vengono spesso utilizzati anche per la validazione delle stime sulle esigenze idriche delle coperture vegetali realizzate attraverso metodi agrometeorologici o tecniche di misura dei flussi turbolenti (Eddy's covariance).

Anche se messi a punto prevalentemente su specie forestali, hanno trovato buona applicazione nelle specie da frutto (Braun, 1997; Remorini e Massai, 2003.a; Nicolas et al., 2005), negli agrumi (Rana et al., 2005), nella vite (Lorenzi e Rana, 2000) e nell'olivo (Dichio et al., 1998). Recentemente l'uso dei metodi termoelettrici è stato proposto come strumento diretto di gestione dell'irrigazione proprio in queste due ultime specie (Eastham e Gray, 1998; Ginestar et al., 1998a; Ginestar et al., 1998b; Fernandez et al., 2001; Cifre et al., 2005).

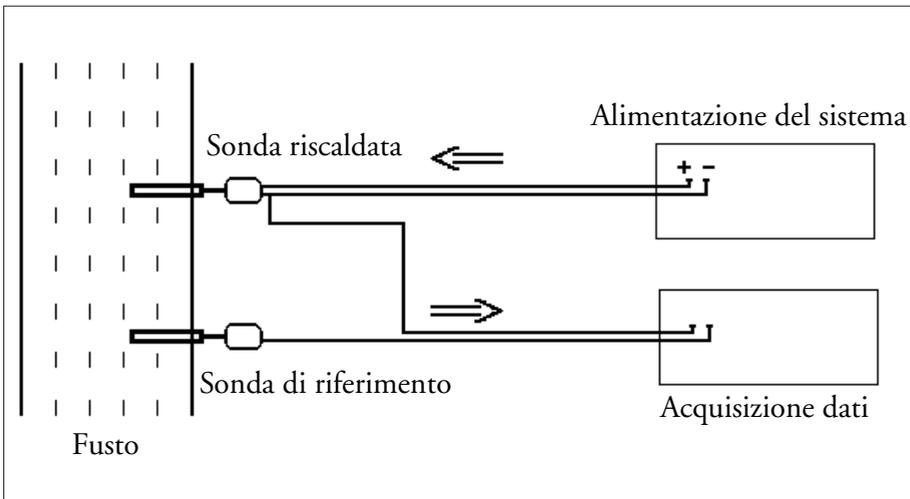


Fig. 4 Schema del metodo a bilancio termico proposto da Granier per misurare il flusso linfatico (Cabibel e Do, 1991b, modificato)

COMPARAZIONE DI ALCUNI INDICATORI FISIOLGICI
DELLO STATO IDRICO DELLA PIANTA E LORO POSSIBILITÀ APPLICATIVE

Lo stato idrico delle piante è stato convenientemente determinato per mezzo di numerosi indicatori fisiologici e fisici (Katerji et al., 1988; Jones et al., 1988; Mastrorilli et al., 1993; Cifre et al., 2005). Tra i primi, indicatori che caratterizzano direttamente o indirettamente lo stato idrico della pianta, il potenziale idrico fogliare e xilematico, il flusso xilematico, la variazione del diametro del tronco, la temperatura fogliare e la conduttanza stomatica sono stati spesso comparati tra di loro (Remorini e Massai, 2003.a). Tra gli indicatori fisici, fattori dell'ambiente che influenzano l'equilibrio idrico delle piante, il contenuto idrico del terreno e la domanda evaporativa dell'ambiente sono i più utilizzati.

Il potenziale idrico fogliare è indicato, in molti studi sperimentali, come un indicatore molto interessante dell'equilibrio suolo-pianta (Meyer e Green, 1980; Katerji et al., 1988; Mastrorilli et al., 1993; Améglie et al., 1997; Behboudian e Zora Singh, 2001). Inoltre, contrariamente agli altri indicatori dello stato idrico della pianta, questo parametro, misurato all'alba, è indipendente dalle condizioni micrometeorologiche osservate nel corso della giornata (Katerji et al., 1988). Per questa ragione è stato considerato come parametro di riferimento al quale comparare la sensibilità degli altri indicatori dello stato idrico.

I metodi termoelettrici di misura del flusso xilematico, sono stati utilizzati, oltre che per stimare i consumi idrici, anche come indicatori dello stato idrico della pianta (Cifre et al., 2005). A questo proposito sono risultati essere molto sensibili: è stato visto, infatti, che compaiono differenze significative tra i valori di flusso xilematico tra piante in diverso stato di idratazione del suolo già quando non si registrano differenze nei valori di potenziale idrico fogliare misurato prima del sorgere del sole.

Da alcune recenti ricerche risulta che l'indicatore fisiologico che consente di individuare più precocemente una variazione nella funzionalità idrica della pianta sembra essere la variazione del diametro del tronco (TDF) (Cohen, M. et al., 2001; Moriana e Fereres, 2002; Remorini e Massai, 2003.a). Nell'esempio riportato in figura 5, la TDF (espressa come Maximum Daily Shrinkage: MDS) ha evidenziato differenze di comportamento tra le piante di controllo e le non irrigate (espresso come valore del rapporto tra i valori del controllo e quelli delle piante non irrigate) dopo appena 10 giorni dall'inizio del trattamento. Gli altri parametri non indicavano, alla stessa data, sintomi di carenza idrica. Dopo circa 1 mese dall'inizio del trattamento di stress sono comparse

differenze significative, oltre che per MDS che aumentava il divario tra le due tesi rispetto al rilievo precedente, anche per il flusso xilematico (differenze nell'ordine del 20%), in assenza tuttavia di diversità nei valori di potenziali idrici all'alba. Solo dopo circa 2 mesi tutti i parametri presi in considerazione hanno indicato differenze nello stato idrico delle piante. In particolare i potenziali xilematici delle due tesi sono risultati differenti sia nella misura effettuata prima del sorgere del sole, sia nell'arco della giornata. La temperatura fogliare ha mostrato differenze, tra le due tesi, soltanto nelle ore centrali della giornata.

Anche le misure di flusso xilematico (SF) hanno mostrato notevoli differenze nel loro andamento; inoltre, già nei primi stadi di comparsa delle condizioni di stress idrico il picco traspirativo delle piante stressate si sposta verso le prime ore della mattina (ore 10.00) per poi decrescere costantemente, mentre le piante irrigate hanno mantenuto alti consumi idrici soprattutto nell'arco delle ore centrali del giorno.

Molto interessante appare, inoltre, il comportamento delle piante non irrigate alla ripresa degli interventi irrigui. Le misure effettuate circa 10 giorni dopo la ripresa dell'irrigazione continuano a mostrare, anche se notevolmente attenuate, differenze tra le piante dei due trattamenti irrigui nell'andamento dei flussi xilematici cumulati giornalieri. Nonostante il rapidissimo recupero dei potenziali idrici, i valori di flusso xilematico, continuavano a presentare differenze tra le due tesi di circa il 50%, indicando che la funzionalità del trasporto xilematico non era stata ancora pienamente recuperata (Massai e Remorini, 2000; Massai et al., 2000; Remorini e Massai, 2003.b). Al contrario del flusso linfatico nello xilema, le variazioni diurne del diametro del tronco, legate prevalentemente all'andamento del potenziale di turgore delle cellule del floema, mostrano un pieno recupero delle piante stressate rispetto al controllo.

La temperatura fogliare è stata il parametro meno tempestivo nell'indicare l'insorgenza di stati di stress. Infatti sono state misurate temperature diverse soltanto quando il w PD mostrava differenze accentuate tra le piante (Vaysse et al., 1990; Gucci et al., 1996). Inoltre, per questo indicatore, sembra di osservare un effetto di senescenza delle foglie che potrebbe mascherare situazioni di stress nella tarda estate.

In conclusione, l'uso di sensori di flusso xilematico si è dimostrato di notevole utilità sia nella determinazione delle esigenze idriche della coltura, e quindi nella stima dei Kc, sia nella definizione dello stato idrico delle piante (Jones et al., 1988; Braun et al., 2000; Cifre et al., 2005).

Sempre a titolo esemplificativo si riportano i valori dei coefficienti colturali determinati in una prova pluriennale di irrigazione su pesco mediante l'uso

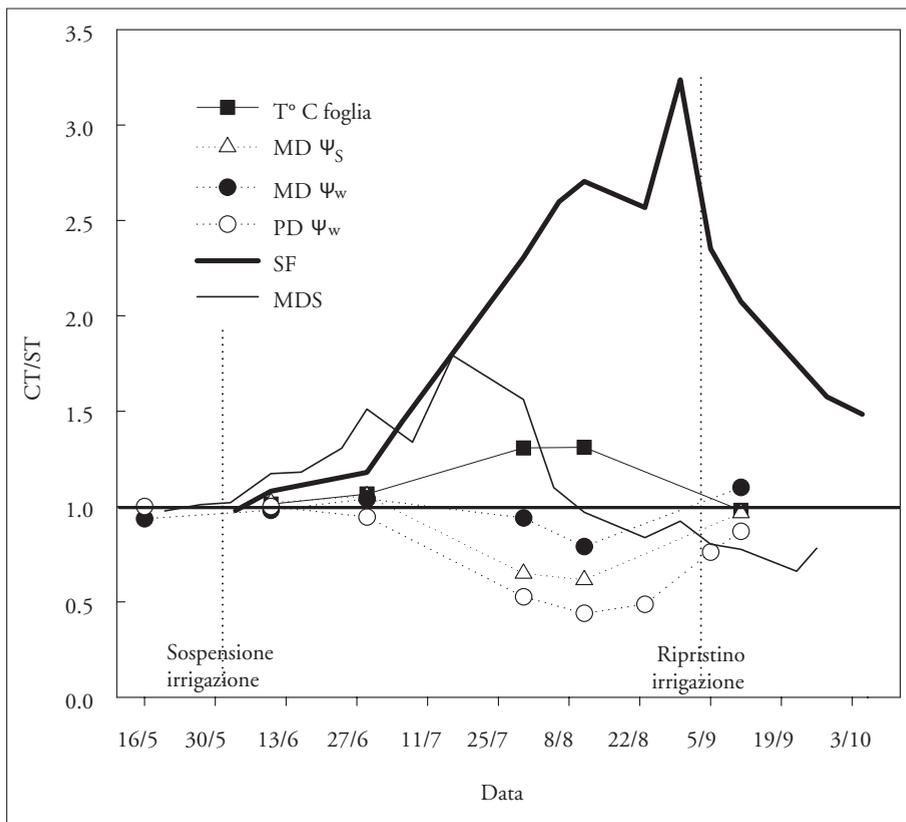


Fig. 5 Comparazione tra alcuni indicatori di stress idrico su piante di pesco irrigate (CT) e non irrigate (ST). I valori sono espressi come rapporto tra piante di controllo e piante stressate (da Remorini e Massai, 2003.a, modificato).

del metodo del bilancio termico comparati con i valori riportati dai quaderni FAO (tabella 2).

Come si può notare i valori di K_c determinati mediante l'uso del metodo termoelettrico è sempre costantemente più basso rispetto ai coefficienti pubblicati nei quaderni FAO, soprattutto durante i primi anni di vita dell'impianto. L'applicazione di questi coefficienti consentirebbe pertanto una sensibile riduzione dell'uso dell'acqua di irrigazione senza compromettere il risultato produttivo del frutteto.

L'applicabilità pratica di questi metodi, però, è resa difficoltosa dal loro elevato costo e dalla complessità operativa. Anche se si avverte l'esigenza di sistemi di monitoraggio continuo dei consumi idrici delle colture in pieno campo, al fine di una gestione accurata delle risorse idriche nel frutteto,

		APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT
ETP (MM)	1996	2.17	3.36	4.65	4.33	3.56	2.50	1.94
	1997	2.34	4.16	4.07	3.85	4.12	3.00	2.19
	1998	2.06	3.65	4.08	4.42	4.11	2.91	1.88
	1999	2.20	4.04	5.28	6.31	4.73	4.02	2.52
	2000	2.45	4.59	5.57	5.05	4.48	3.45	2.40
COEFFICIENTE COLTURALE (KC)	1996	0.03	0.04	0.08	0.17			
	1997		0.17	0.22	0.40	0.38	0.45	
	1998			0.26	0.50	0.58	0.65	0.44
	1999			0.29	0.54	0.61	0.51	
	2000				0.79	0.87		
	Quad. n° 24 FAO	0.70	0.80	0.80	0.70	0.70	0.75	
	Quad. n° 56 FAO		0.80		1.15			0.85

Tab. 2 *Evapotraspirazione potenziale e coefficienti colturali calcolati per 5 stagioni consecutive su pesco innestato su GF 677 e allevato a vaso libero (da Remorini e Massai, 2003.b modificato).*

siamo ancora, purtroppo, lontani dalla reale possibilità di adottare questi sistemi su larga scala. Un possibile miglioramento delle prestazioni e dell'affidabilità di questi metodi potrebbe essere rappresentato dalla messa a punto di sistemi, a basso costo, capaci di misurare la traspirazione dell'intera chioma, possibilmente integrati dal monitoraggio in continuo, e automatizzato, delle condizioni climatiche e del contenuto idrico del terreno. Recentemente in alcuni paesi a frutticoltura evoluta (Spagna, Italia e Israele) sono state proposte delle vere e proprie centraline esperte in grado di monitorare contemporaneamente su una pianta tutti gli indicatori sopra esposti ("Phytomonitoring technique"; Ton et al., 2004.a; Ton et al., 2004b) in grado di gestire in maniera completamente automatizzata l'impianto di irrigazione sulla base dell'interpretazione integrata di tutti i dati raccolti a cadenza oraria o giornaliera. L'applicazione di questi sistemi è però troppo recente da poter esprimere anche un sommario giudizio sulle loro reali potenzialità applicative, anche in virtù dei non trascurabili costi che essi impongono.

Non si deve dimenticare, inoltre, la possibilità che un adeguato controllo delle risorse idriche nel frutteto possa consentire anche un buon controllo dell'attività vegetativa e produttiva dell'impianto contribuendo, così, al contenimento dei costi e al miglioramento della qualità della produzione.

Date le notevoli limitazioni tecniche e la complessità di gestione di questi sensori non sembra al momento ipotizzabile un loro impiego diretto nella gestione dei sistemi irrigui, anche perché l'attuale crisi della nostra frutticoltura, legata strettamente agli elevati costi di produzione, non consente l'adozione di sistemi di misura di elevato costo per realizzare un risparmio idrico spesso non determinante sul bilancio complessivo della coltura. Le motivazioni nella necessità di adottare sistemi più sofisticati per la gestione dell'irrigazione, così come per la fertilizzazione e la difesa dai parassiti, devono essere ritrovate nella tendenza a produrre frutta di elevata qualità, sia dal punto di vista organolettico che salutistico, e con il minor impatto ambientale possibile della produzione frutticola. In tal senso una "irrigazione di precisione" può consentire molteplici vantaggi contribuendo alla riduzione degli sprechi di acqua, alla riduzione degli inquinamenti delle falde, al controllo dell'attività vegetativa delle piante (attraverso il deficit idrico controllato, ecc.), al miglioramento della qualità dei frutti. Per fare in modo che questi vantaggi siano alla portata dei frutticoltori si ritiene che l'uso dei metodi termoelettrici per la misura dei consumi idrici delle colture possa essere convenientemente applicato al fine di una corretta definizione dei coefficienti colturali per ogni specie frutticola e per ogni situazione colturale, contribuendo così a un maggior dettaglio rispetto a quello dei quaderni FAO. In tal modo si potrebbe giungere, mediante l'applicazione degli opportuni coefficienti, a conoscere le reali esigenze idriche di un impianto da frutto, su base territoriale o addirittura aziendale, anche in funzione della sua età, del portinnesto utilizzato, della densità di piantagione ecc. nell'ottica di una gestione integrata del sistema arboreo da gestire. L'uso dei sensori può consentire, inoltre, di valutare preventivamente il probabile livello di stress raggiunto dalle piante durante la stagione vegetativa laddove si abbiano a disposizione risorse idriche limitate, al di sotto comunque delle esigenze reali della coltura, e conseguentemente il livello produttivo raggiungibile.

Non va dimenticato, infine, che i coefficienti colturali stimano il consumo idrico della coltura supponendo di mantenere uno stato idrico ottimale della stessa; da quanto sopra esposto si evince invece come leggeri abbassamenti del potenziale idrico delle piante possano consentire, attraverso il sensibile aumento dell'efficienza dell'uso dell'acqua (Water Use Efficiency: WUE; Dichio et al., 1998; Xiloyannis et al., 1999; Dichio et al., 2001; Remorini e Massai, 2003.b; Cifre et al., 2005) una sensibile riduzione dei consumi idrici senza determinare perdite produttive significative e contribuendo, spesso, al miglioramento della qualità dei frutti. La determinazione di un "coefficiente di stress" potrebbe quindi consentire di mantenere le piante in uno stato idrico sub-ottimale senza avere riduzioni di produzione.

Si ringrazia il Dott. Remorini Damiano, con cui condivido la mia attività di ricerca ormai da molti anni, per la preziosa collaborazione nella raccolta del materiale bibliografico e documentale e per la stesura del testo.

BIBLIOGRAFIA

- ALPI A., PUPILLO P., RIGANO C. (1992): *Fisiologia delle piante*, EdiSES, Napoli.
- AMATO M., DE LORENZI F., OLIVIERI B. (1993.a): *Riflettometria nel dominio del tempo (TDR) per la misura dell'umidità volumetrica del terreno. I: principi generali ed applicazioni*, «Rivista di Agronomia», 27 (1), pp. 1-8.
- AMATO M., DE LORENZI F., OLIVIERI B. (1993.b): *Riflettometria nel dominio del tempo (TDR) per la misura dell'umidità volumetrica del terreno. II: misura in terreni diversi e profili idrici*, «Rivista di Agronomia», 27 (2), pp. 97-105.
- AMÉGLIO T., ARCHER P., CRUIZIAT P., DAUDET F.A., COHEN M., VALANCOGNE C., DAYAU S. (1997): *A limit in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation*, «Acta Horticulturae», 449 (2), pp. 431-437.
- AMÉGLIO T., DAUDET F.A., ARCHER P., FERREIRA I. (1993): *Comparaison de trois méthodes de mesure de la transpiration de jeunes arbres*, «Agronomie», 13, pp. 751-759.
- ANCONELLI S., MANNINI P. (1993): *Impiego della termometria all'infrarosso e del "CWSI" per l'individuazione del momento di intervento irriguo su soia (Glycine max L. Merr.)*, «Rivista di Agronomia», 27, pp. 282-289.
- ANGELOCCI L.R., VALANCOGNE C. (1993): *Leaf area and water flux in apple trees*, «Journal of Horticultural Science», 68 (2), pp. 299-307.
- BAKER J.M., BAVEL C.H.M., VAN (1987): *Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants*, «Plant, Cell and Environment», 10, pp. 777-782.
- BALDINI E. (1986): *Arboricoltura generale*, Editrice CLUEB, Bologna.
- BATTILANI A., MANNINI P., ANCONELLI S. (2000): *La gestione irrigua della vite nell'ambiente sub-umido della pianura padana*, «Irrigazione e Drenaggio», 47 (4), pp. 15-19.
- BAVEL M.G. VAN (1993): *System solutions for real-time sap flow monitoring*, «Water & Irrigation Review», 13 (2), pp. 25-29.
- BAVEL M.G. VAN, BAVEL C.H.M. VAN (1990): *Dynagage installation and operation manual*, «Dynamax inc.»
- BEHBOUDIAN M.H., ZORA SINGH (2001): *Water relations and irrigation scheduling in grapevine*, «Horticultural Reviews», 27, pp. 189-225.
- BEHBOUDIAN M.H., MILLS T.M. (1997): *Deficit irrigation in deciduous orchards*, «Horticultural Reviews», 21, pp. 105-131.
- BENNETT J.M. (1990): *Problems associated with measuring plant water status*, «Hort-Science», 25 (12), pp. 1551-1554.
- BERMAN M.E., DEJONG T.M. (1996): *Water stress and crop load effects on fruit fresh and dry weights in peach (Prunus persica)*, «Tree Physiology», 16, pp. 859-864.
- BIDWELL R.G.S. (1978): *Fisiologia vegetale*, Piccin, Padova.
- BOLAND A.M., MITCHELL P.D., JERIE P.H., GOODWIN I. (1993): *The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach*, «Journal of Horticultural Science», 68 (2), pp. 261-274.
- BONANY J. (2003): *Stem dielectric constant measurement as an indicator of plant water stress*

- for fruit tree irrigation scheduling, «Acta Horticulturae», 618, pp. 383-390.
- BONARI E., MASONI A., ERCOLI L. (1994): *Agrometeorologia*, Servizio Editoriale Universitario di Pisa.
- BORDOVSKY D.G., JORDAN W.R., HILER E.A., HOWELL T.A. (1974): *Choice of irrigation timing indicator for narrow row cotton*, «Agronomy Journal», 66, pp. 88-91.
- BRAUN P. (1997): *Sap flow measurements in fruit trees – Advantages and shortfalls of currently used systems*, «Acta Horticulturae», 449 (1), pp. 267-265.
- BRAUN P., MAURER B., HEINEMANN G. (2000): *Scaling transpiration in apple orchards - meteorological versus plant based physiological measurements*, «Acta Horticulturae», 537 (Vol.1), pp. 45-51.
- BURGESS S.S.O., ADAMS M.A., TURNER N.C., BEVERLY C.R., ONG C.K., KHAN A.A.H., BLEBY T.M. (2001): *An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants*, «Tree Physiology», 21 (9), pp. 589-598.
- CABIBEL B. (1991): *Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. III. Influence sur les flux de sève des modalités d'apport d'eau en irrigation localisée sur sol fissuré*, «Agronomie», 11 (10), pp. 877-887.
- CABIBEL B., DO F. (1991): *Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. II. Évolution dans le temps des flux de sève et comportement hydrique des arbres en présence ou non d'une irrigation localisée*, «Agronomie», 11 (9), pp.757-766.
- CASPARI H.W., BEHBOUDIAN M.H., CHALMERS D.J., RENQUIST A.R. (1993): *Pattern of seasonal water use of asian pears determined by lysimeters and the heat-pulse technique*, «Journal of the American Society for Horticultural Science», 118 (5), pp. 562-569.
- CERETI C.F., PETTINELLI E., ROSSINI F. (1997): *Applicazione di sonda multilivello per il monitoraggio dell'umidità del suolo con la tecnica TDR*, «Rivista di Agronomia», 31 (3 Suppl.), pp. 781-785.
- CERMAK J., DEML M., PENKA M. (1973): *A new method of sap flow rate determination in trees*, «Biologia Plantarum», 15, 171-178.
- CHALMERS D.J., MITCHELL P.D., HEER L. VAN (1981): *Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning*, «Journal of the American Society for Horticultural Science», 106 (3), pp. 307-312.
- CHALMERS D.J., MITCHELL P.D., JERIE P.H. (1985): *The relation between irrigation, growth and productivity of peach trees*, «Acta Horticulturae», 173, pp. 283-288.
- CHANDRA S., LINDSEY P.A., BASSUK N.L. (1994): *A gauge to measure the mass flow rate of water in trees*, «Plant, Cell and Environment», 17 (7), pp. 867-874.
- CIFRE J., BOTA J., ESCALONA J.M., MEDRANO H., FLEXAS J. (2005): *Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (Vitis vinifera L.): an open gate to improve water-use efficiency?*, «Agriculture, Ecosystems and Environment», 106 (2/3), pp. 159-170.
- CLARK R.N., HILER E.A. (1973): *Plant measurements as indicators of crop water deficits*, «Crop Science», 13, pp. 466-469.
- CLOSS R.L. (1958): *Heat pulse method for measuring rate of sap flow in a plant stem*, «New Zealand Journal Science», 1, pp. 281-288.
- COHEN M., VALANCOGNE C., AMÉGLIO T., CRUIZIAT P., ARCHER P., GIRONA J. (1993): *Water consumption and optimization of the irrigation in orchards*, «Acta Horticulturae», 335, pp. 349-357.
- COHEN M., GOLDHAMER D.A., FERERES E., GIRONA J., MATA M. (2001): *Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring of trunk diameter changes*, «Journal of Horticultural Science and Biotechnology», 76 (1), pp. 55-60.
- COHEN Y. (1991): *Determination of orchard water requirement by a combined trunk sap*

- flow and meteorological approach*, «Irrigation Science», 12 (2), pp. 93-98.
- COHEN Y., FUCHS M., GREEN G.C. (1981): Improving the heat pulse method for a determination of sap flow in trees, «Plant Cell and Environment», 4, pp. 391-397.
- COHEN Y., TAKEUCHI S., NOZAKA J., YANO T. (1993): *Accuracy of sap flow measurement using heat balance and heat pulse methods*, «Agronomy Journal», 85, pp. 1080-1086.
- DAUDET F.A. (1987): *Un système simple pour la mesure in situ des échanges gazeux de couverts végétaux de quelques mètres carrés de surface foliaire*, «Agronomie», 7 (2), pp. 133-139.
- DECROIX M. (1992): *Esperienze francesi sull'irrigazione basata sul deficit idrico controllato*, «Rivista di Frutticoltura», 54 (6), pp. 49-54.
- DICHIO B., XILOYANNIS C., NUZZO V., MONTANARO G., CELANO G. (2001): *Risparmiare acqua attraverso lo stress idrico controllato: l'esempio della cultivar Springcrest nel Meta-pontino*, «Italus Hortus», (8)3, pp. 47-49.
- DICHIO B., XILOYANNIS C., CELANO G., ARCIERI M., PALESE A.M. (1998): *Flussi xilematici e consumi idrici in olivo in condizioni di diversa disponibilità idrica*, Atti del convegno "Irrigazione e ricerca: Progressi nell'uso della risorsa acqua". Bari, 1-2 ottobre 1998. 84-90.
- DIRKSEN C., DASBERG S. (1993): *Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements*, «Soil Science Society of America Journal», 57, pp. 660-667.
- DO F., ROCHETEAU A. (2002): *Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies*, «Tree Physiology», 22 (9), pp. 641-648.
- DOLEY D., GRIEVE B.J. (1966): *Measurement of sap flow in a eucalypt by thermo-electric methods*, «Australian Forestry Research», 2, pp. 3-27.
- DRAGONI D., LAKSO A.N., PICCIONI R.M. (2004): *Transpiration of an apple orchard in a cool humid climate: measurement and modeling*, «Acta Horticulturae», 664, pp. 175-180.
- EASTHAM J., GRAY S.A. (1998): *A preliminary evaluation of the suitability of sap flow sensors for use in scheduling vineyard irrigation*, «American Journal of Enology and Viticulture», 49 (2), pp. 171-176.
- EWERS B.E., OREN R. (2000): *Analyses of assumptions and errors in the calculation of stomatal conductance from sap flux measurements*, «Tree Physiology», 20 (9), pp. 579-589.
- FAUST M. (1989): *Physiology of temperate zone fruit trees*, Wiley Interscience, New York, USA.
- FERNANDEZ J.E., PALOMO M.J., DIAZ.ESPEJO A., CLOTHIER B.E., GREEN S.R., GIRON I.F., MORENO F. (2001): *Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress*, «Agricultural Water Management», 51 (2), pp. 99-123.
- FERREIRA M.I., PACHECO C.A., VALANCOGNE C., MICHAELSEN J., AMÉGLIO T., DAUDET F.A. (1997): *Evapotranspiration, water stress indicators and soil water balance in a Prunus persica orchard, in central Portugal*, «Acta Horticulturae», 449 (2), pp. 379-385.
- FIELD C.B., BALL J.T., BERRY J.A. (1991): *Photosynthesis: principles and field techniques*, in *Plant Physiological Ecology. Field methods and instrumentation*, Edited by R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney and P.W. Rundel, Chapman and Hall, pp. 209-251.
- GARNIER E., BERGER A. (1985): *Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress*, «Journal of Horticultural Science», 60 (1), pp. 47-56.

- GINESTAR C., EASTHAM J., GRAY S., ILAND P. (1998a.): *Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. I. Effects of post-veraison water deficits on water relations, vine growth, and yield of Shiraz grapevines*, «American Journal of Enology and Viticulture», 49 (4), pp. 413-420.
- GINESTAR C., EASTHAM J., GRAY S., ILAND P. (1998b.): *Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. II. Effects of post-veraison water deficits on composition of Shiraz grapes*, «American Journal of Enology and Viticulture» 49 (4), pp. 421-428.
- GIORIO P., D'ANDRIA R. (2002): *Sap flow estimated by compensation heat-pulse velocity technique in olive trees under two irrigation regimes in Southern Italy*, «Acta Horticulturae», 586, pp. 401-404.
- GIORIO P., GIORIO G. (2003): *Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge*, «Environmental and Experimental Botany», 49 (1), pp. 9-20.
- GIRONA J., MATA M., GOLDHAMER D.A., JOHNSON R.S., DEJONG T.M. (1993): *Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach*, «Journal of the American Society for Horticultural Science», 118 (5), pp. 580-586.
- GIULIANI R., MAGNANINI E., CORELLI-GRAPPADELLI L. (1998): *Whole canopy gas exchanges and light interception of the three peach training systems*, «Acta Horticulturae», 465, pp. 355-361.
- GLENN D.M., WORTHINGTON J.W., WELKER W.V., MCFARLAND M.J. (1989): *Estimation of peach tree water use using infrared thermometry*, «Journal of the American Society for Horticultural Science», 114 (5), pp. 737-741.
- GOLDHAMER D.A., SOLER M., SALINAS M., FERERES E., COHEN M., GIRONA J., MATA M. (2000): *Comparison of continuous and discrete plant-based monitoring for detecting tree water deficits and barriers to grower adoption for irrigation management*, «Acta Horticulturae», 537 (1), pp. 431-445.
- GOODE G.E., HIGGS K.H. (1973): *Water, osmotic and pressure potential relationships in apple leaves*, «Journal of Horticultural Science», 48, pp. 203-215.
- GREEN S.R., CLOTHIER B.E. (1988): *Water use of kiwifruit vines and apple trees by heat pulse technique*, «Journal of Experimental Botany», 39 (198), pp. 115-123.
- GRIME V.L., MORISON J.I.L., SIMMONDS L.P. (1995): *Sap flow measurements from stem heat balances: a comparison of constant with variable power methods*, «Agricultural and Forest Meteorology», 74, pp. 27-40.
- GUCCI R., MASSAI R., ANDREI R. (1996): *Traspirazione e temperatura fogliari in giovani piante di actinidia sottoposte a deficit idrico nel terreno*, «Rivista di Frutticoltura», 5, pp. 67-70.
- GUROVICH L.A. (2002): *Irrigation scheduling of table grapes under drip irrigation: an approach for saving irrigation water and energy costs in Chile*, «International Water and Irrigation», 22 (2), pp. 44-50.
- HAM J.M., HEILMAN J.L. (1990): *Dynamics of a heat balance stem flow gauge during high flow*, «Agronomy Journal», 82, pp. 147-152.
- HAM J.M., HEILMAN J.L., LASCANO R.J. (1990): *Determination of soil water evaporation and transpiration from energy balance and stem flow measurements*, «Agricultural and Forest Meteorology», 52, pp. 287-301.
- HARRISON R.D., DANIELL J.W., CHESHIRE J.M. JR. (1989): *Net photosynthesis and stomatal conductance of peach seedlings and cuttings in response to changes in soil water potential*, «Journal of the American Society for Horticultural Science», 114 (6), pp. 986-990.

- HATFIELD J.L. (1990): *Measuring plant stress with an infrared thermometer*, «HortScience», 25 (12), pp. 1535-1538.
- HERZOG K.M., THUM R., ZWEIFEL R., HÄSLER R. (1997): *Heat balance measurements to quantify sap flow in thin stems only?*, «Agricultural and Forest Meteorology», 83, pp. 75-94.
- HOOK W.R., LIVINGSTON N.J. (1995): *Propagation velocity errors in Time Domain Reflectometry measurements of soil water*, «Soil Science Society of America Journal», 60 (1), pp. 35-41.
- HOOK W.R., LIVINGSTON N.J. (1996): *Errors in converting Time Domain Reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content*, «Soil Science Society of America Journal», 59 (1), pp. 92-96.
- HOOK W.R., LIVINGSTON N.J., SUN Z.J., HOOK P.B. (1992): *Remote diode shorting improves measurement of soil water by Time Domain Reflectometry*, «Soil Science Society of America Journal», 56 (5), pp. 1384-1391.
- HUGUET J.G. (1985): *Appréciation de l'état hydrique d'une plante à partir des variations micrométriques de la dimension des fruits ou des tiges au cours de la journée*, «Agronomie», 5 (8), pp. 733-741.
- HUGUET J.G., LI S.H., LORENDAU J.Y., PELLOUX G. (1992): *Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation*, «Journal of Horticultural Science», 67 (5), pp. 631-640.
- IDSO S.B., JACKSON R.D., PINTER P.J., REGINATO R.J., HATFIELD J.L. (1981): *Normalizing the stress degree day for environmental variability*, «Agricultural Meteorology», 24, pp. 45-55.
- JONES H.G. (1983): *Estimation of effective soil water potential at the root surface of transpiring plants*, «Plant Cell and Environment», 6, pp. 671-674.
- JONES H.G. (1990): *Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops*, «HortScience», 25 (1), pp. 19-26.
- JONES H.G., AIKMAN D., MCBURNEY T.A. (1997): *Improvements to infra-red thermometry for irrigation scheduling in humid climates*, «Acta Horticulturae», 449 (1), pp. 259-265.
- JONES H.G., HAMER P.J., HIGGS K.H. (1988): *Evaluation of various heat-pulse methods for estimation of sap flow in orchard trees: comparison with micrometeorological estimates of evaporation*, «Trees», 2, pp. 250-260.
- JONES H.G., HIGGS K.H. (1979): *Water potential-water content relationship in apple leaves*, «Journal of Experimental Botany», 30, pp. 965-970.
- JONES H.G., LUTON M.T., HIGGS K.H., HAMER P.J.C. (1983): *Experimental control of water status in an apple orchard*, «Journal of Horticultural Science», 58 (3), pp. 301-316.
- KAMGAR A.A., HENDERSON D.W., PRUITT W.O. (1980): *Evaluating leaf water potential, stomatal resistance, and canopy surface temperature of tomatoes as indices for irrigation timing*, «Acta Horticulturae», 100, pp. 181-192.
- KATERJI N., ITIER B., FERREIRA I. (1988): *Etude de quelques critères indicateurs de l'état hydrique d'une culture de tomate en région semi-aride*, «Agronomie», 8 (5), pp. 425-433.
- KJELGAARD J.F., STOCKLE C.O., BLACK R.A., CAMPBELL G.S. (1997): *Measuring sap flow with the heat balance approach using constant and variable heat inputs*, «Agricultural and Forest Meteorology», 85, pp. 239-250.
- KLEIN I. (2004): *Scheduling automatic irrigation by threshold-set soil matric potential increases irrigation efficiency while minimizing plant stress*, «Acta Horticulturae», 664, pp. 361-368.

- KOIDE R.T., ROBICHAUX R.H., MORSE S.R., SMITH C.M. (1991): *Plant water status, hydraulic resistance and capacitance*, in *Plant Physiological Ecology. Field methods and instrumentation*, edited by R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney and P.W. Rundel, Chapman and Hall, pp. 161-179.
- LASCANO R.J., BAUMHARDT R.L., LIPE W.N. (1992): *Measurement of water flow in young grapevines using the stem heat balance method*, «American Journal of Enology and Viticulture», 43 (2), pp. 159-165.
- LASSOIE J.P., SCOTT D.R., FRITSCHEN L.J. (1977): *Transpiration studies in Douglas-fir using the heat pulse technique*, «For. Sci.», 23, pp. 377-390.
- LEIB B.G., HATTENDORF M., ELLIOTT T., MATTHEWS G. (2002): *Adoption and adaptation of scientific irrigation scheduling: trends from Washington, USA as of 1998*, «Agricultural Water Management», 55 (2), pp. 105-120.
- LEIB B.G., HATTENDORF M., ELLIOTT T., MATTHEWS G. (2000): *Market transformation of irrigation scheduling in Washington. Challenges facing irrigation and drainage in the new millennium Proceedings US Committee on Irrigation and Drainage*, Fort Collins, Colorado, USA, June 2000, pp. 291-305.
- LI S.H., HUGUET J.G. (1990): *Controlling water status of plants and scheduling irrigation by micromorphometric method for fruit trees*, «Acta Horticulturae», 278, pp. 333-380.
- LI S.H., HUGUET J.G., SCHOCH P.G., BUSSI C. (1990): *Réponse de jeunes pêchers cultivés en pots à différents régimes d'alimentation hydrique. I: Conséquences sur la transpiration, la résistance stomatique, le potentiel hydrique foliaire, la photosynthèse et les variations micromorphométriques des tiges*, «Agronomie», 10 (4), pp. 263-272.
- LIU W.T., WENKERT W., ALLEN JR. L.H., LEMON E.R. (1978): *Soil-plant water relations in a New York vineyard: resistances to water movement*, «Journal of the American Society for Horticultural Science», 103 (2), pp. 226-230.
- LORENZI F. DE, RANA G. (2000): *Sap flow transpiration measurements in a table grape vineyard growing in Southern Italy*, «Acta Horticulturae», 537 (1), pp. 69-75.
- LU P. (2002): *Whole-plant water use of some tropical and subtropical tree crops and its application in irrigation management*, «Acta Horticulturae», 575 (2), pp. 781-789.
- LU P., CHACKO E. (1998): *Evaluation of Granier's sap flux sensor in young mango trees*, «Agronomie», 18, pp. 461-471.
- MANNINI P. (2004): *Le modalità di risparmio idrico in frutticoltura*, «Informatore Agrario», 60 (20), pp. 47-52.
- MARACCHI G. (1992): *Elementi di agrometeorologia*, in *Frutticoltura generale*, Reda, pp.281-313.
- MARSHALL D.C. (1958): *Measurement of sap flow in conifers by heat transport*, «Plant Physiology», 33, pp. 385-396.
- MASSAI R., GUCCI R. (1997): *Transpiration and water relations in three peach x almond hybrid rootstocks*, «Acta Horticulturae», 449 (1), pp. 99-106.
- MASSAI R., GUCCI R., CASULA F. (1998): *Consumi idrici di specie legnose stimati mediante tecniche di monitoraggio del flusso linfatico*. Atti IV Giornate Scientifiche S.O.I. Sanremo, 1-3 aprile 1998, pp. 543-544.
- MASSAI R., REMORINI D. (2000): *Estimation of water requirements in a young peach orchard under irrigated and stressed conditions*, «Acta Horticulturae», 537 (1), pp. 77-86.
- MASSAI R., REMORINI D., FERREIRA M.I., PACO T.A. (2000): *Sap flow in peach trees during water stress and recovery in two environmental conditions*, «Acta Horticulturae», 537 (1), pp. 351-358.
- MASTRORILLI M., CAMPI P. (2004): *Il calcolo dell'evapotraspirazione delle colture*, in *Pro-*

- getto Editoriale PANDA, Vol. 5, "Irrigazione sostenibile: la buona pratica irrigua", Ed. P. Scandella e G. Mecella, pp. 37-66.
- MASTRORILLI M., LOSAVIO N., RANA G. (1993): *Indicatori fisiologici dello stato idrico delle colture*, «Rivista di Agronomia», 27 (4), pp. 303-310.
- MCBURNEY T. (1990): *Monitoring plant water status*, «Acta Horticulturae», 278, pp. 77-86.
- MCBURNEY T., COSTIGAN P.A. (1988): *Continuous measurement of plant water stress*, «Acta Horticulturae», 228, pp. 227-234.
- MCCUTCHAN H., SHACKEL K.A. (1992): *Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (Prunus domestica L. cv. French)*, «Journal of the American Society for Horticultural Science», 117 (4), pp. 607-611.
- MEYER W.S., GREEN G.C. (1980): *Water use by wheat and plant indicators of available soil water*, «Agronomy Journal», 72, pp. 253-257.
- MICHELAKIS N. (1997): *Daily stem radius variations as indicators to optimise olive tree irrigation scheduling*, «Acta Horticulturae», 449, pp. 297-304.
- MITCHELL P.D., BOLAND A.M., IRVINE J.L., JERIE P.H. (1991): *Growth and water use of young, closely planted peach trees*, «Scientia Horticulturae», 47 (3-4), pp. 283-293.
- MITCHELL P.D., JERIE P.H., CHALMERS D.J. (1984): *The effects of regulated water deficits on pear tree growth, flowering, fruit growth, and yield*, «Journal of the American Society for Horticultural Science», 109 (5), pp. 604-606.
- MOLZ F.G., KLEPPER B. (1972): *Radial propagation of water potential in stems*, «Agronomy Journal», 65, pp. 469-473.
- MORIANA A., FERERES E. (2004): *Establishing reference values of trunk diameter fluctuations and stem water potential for irrigation scheduling of olive trees*, «Acta Horticulturae», 664, pp. 407-412.
- MORIANA A., FERERES E. (2002): *Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees*, «Irrigation Science», 21 (2), pp. 83-90.
- MOTT K.A., PARKHURST D.F. (1991): *Stomatal response to humidity in air and below*, «Plant Cell and Environment», 14, pp. 509-515.
- NICOLAS E., TORRECILLAS A., ORTUNO M.F., DOMINGO R., ALARCON J.J. (2005): *Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements*, «Agricultural Water Management», 72 (2), pp. 131-145.
- PEARCY R.W.; SCHULZE E.D.; ZIMMERMANN R. (1991): *Measurement of transpiration and leaf conductance*, in *Plant Physiological Ecology. Field methods and instrumentation*, edited by R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney and P.W. Rundel, Chapman and Hall, pp. 137-160.
- PEPIN S., LIVINGSTON N.J., HOOK W.R. (1995): *Temperature-dependent measurement errors in Time Domain Reflectometry determinations of soil water*, «Soil Science Society of America Journal», 59 (1), pp. 38-43.
- PETTINELLI E., SORGE M., DI LENA B., TRABUCCO A. (1998): *Impiego della riflettometria nel dominio del tempo (TDR) per la determinazione del contenuto idrico dei suoli*, Atti del convegno "Irrigazione e ricerca: Progressi nell'uso della risorsa acqua". Bari, 1-2 ottobre 1998, pp. 39-45.
- RANA G., KATERJI N., LORENZI F. DE (2005): *Measurement and modelling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean conditions*, «Agricultural and Forest Meteorology», 128 (3/4), pp. 199-209.
- RANA G., MASTRORILLI M., HAMMAMI A., RINALDI M. (1998): *Misure di traspirazione di un vigneto di uva da tavola allevato a tendone in Italia meridionale*, Atti del convegno

- “Irrigazione e ricerca: Progressi nell’uso della risorsa acqua”. Bari, 1-2 ottobre 1998, pp. 79-83.
- REMORINI D., MASSAI R. (2003.a.): *Comparison of water status indicators for young peach trees*, «Irrigation Science», 22 (1), pp. 39-46.
- REMORINI D., MASSAI R. (2003.b.): *Stima dei consumi idrici e dello stato idrico del pesco*, «Rivista di Frutticoltura», 65 (9), pp. 46-52.
- RUGGIERO C. (1986): *Consumo idrico dell'albicocco irrigato a goccia, per aspersione e non irrigato durante i primi cinque anni dall'impianto*, «Rivista dell'Ortoflorofrutticoltura Italiana», 70, pp. 35-47.
- SABATTI M., SCARASCIA MUGNOZZA G., VALENTINI R. (1992): *La misura dei flussi idrici negli alberi e le sue potenzialità applicative in ecologia e selvicoltura*, «Monti e Boschi», 5, pp. 13-19.
- SAKURATANI T. (1981): *A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants*, «Journal Agriculture Meteorology», 37, pp. 9-17.
- SAKURATANI T. (1984): *Improvement of the probe for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method*, «Journal Agriculture Meteorology».
- SCHOLANDER P.F., HAMMEL H.T., BRANDSTREET E.D., HEMMINGSEN E.A. (1965): *Sap pressure in vascular plants*, «Science», 148, pp. 339-346.
- SELLÉS G., BERGER A. (1990): *Physiological indicators of plant water status as criteria for irrigation scheduling*, «Acta Horticulturae», 278, pp. 87-100.
- SENOCK R.S., HAM J.M. (1993): *Heat balance sap flow gauge for small diameter stems*, «Plant, Cell and Environment», 16, pp. 593-601.
- SHACKEL K.A., JOHNSON R.S., MEDAWAR C.K., PHENE C.J. (1992): *Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions*, «Journal of the American Society for Horticultural Science», 117 (2), pp. 351-356.
- SHOCK C.C. (2003): *Soil water potential measurement by granular matrix sensors*, in Stewart, B.A. and Howell, T.A. (eds) *The Encyclopedia of Water Science*, Marcel Dekker, pp 899-903. .
- SHOCK C.C., FEIBERT E.B.G., PEREIRA A.B., SHOCK C.A. (2005): *Automatic collection, radio transmission, and use of soil water data*, Oregon State University, Malheur Experiment Station, Special Report, 1062, pp. 211-222.
- SHOCK C.C., KIMBERLING K., TSCHIDA A., NELSON K., JENSEN L., SHOCK C.A. (2003): *Soil Moisture Based Irrigation Scheduling to Improve Crops and the Environment*, Oregon State University, Malheur Experiment Station, Special Report, 1048, pp. 227-234.
- SIMONNEAU T., HABIB R., GOUTOULY J.P., HUGUET J.G. (1993): *Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content: direct evidence in peach trees*, «Journal of Experimental Botany», 44 (260), pp. 615-621.
- SMART R.E. (1974): *Aspects of water relation of the grapevine (Vitis vinifera)*, «American Journal of Enology and Viticulture», 25 (2), pp. 84-91.
- SMITH D.M., ALLEN S.J. (1996): *Measurement of sap flow in plant stems*, «Journal of Experimental Botany», 47 (305), pp. 1833-1844.
- STEGMAN E.C., SCHIELE L.H., BAUER A. (1976): *Plant water stress criteria for irrigation scheduling*, «Trans. of the ASAE», 19, pp. 850-855.
- STEINBERG S., BAVEL C.H.M. VAN, MCFARLAND M.J. (1989): *A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants*, «Journal of the American Society for Horticultural Science», 114 (3), pp. 466-472.
- STEINBERG S., BAVEL C.H.M. VAN, MCFARLAND M.J. (1990.a.): *Improved sap flow gauge for woody and herbaceous plants*, «Agronomy Journal», 82, pp. 851-854.

- SWANSON R.H. (1994): *Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees*, «Agricultural and Forest Meteorology», 72, pp. 113-132.
- TAN C.S., LAYNE R.E.C. (1991): *Soil water content and stomatal conductance in a mature peach orchard as influenced by various irrigation regimes*, «Canadian Journal of Soil Science», 71 (2), pp. 253-258.
- TARDIEU F., KATERJI N., BETHENOD O. (1990): *Relations entre l'état hydrique du sol, le potentiel de base et d'autres indicateurs de la contrainte hydrique che le maïs*, «Agronomie», 10, pp. 617-626.
- TESTINI C. (1989): *I rapporti acqua-terreno*, in *Chimica del suolo*, Pàtron Editore, pp:197-214.
- TOGNETTI R., D'ANDRIA R., MORELLI G., CALANDRELLI D., FRAGNITO F. (2004): *Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees*, «Plant and Soil», 263 (1/2), pp. 249-264.
- TON Y., KOPYT M., NILOV N. (2004.a.): *Phytomonitoring technique for tuning irrigation of vineyards*, «Acta Horticulturae», (646), pp. 133-139.
- TON Y., KOPYT M., ZACHS I., BEN NER Z. (2004b.): *Phytomonitoring technique for tuning irrigation of fruit trees*, «Acta Horticulturae», 646, pp. 127-132.
- VALANCOGNE C., DAYAU S., AMÉGLIO T., ARCHER P., DAUDET F.A., FERREIRA GAMA M.I., COHEN M. (1997): *Relations between relative transpiration and predawn leaf water potential in different fruit tree species*, «Acta Horticulturae», 449 (2), pp. 423-429.
- VALANCOGNE C., NASR Z. (1989): *Une méthode de mesure du débit de sève brute dans le petits arbres par bilan de chaleur*, «Agronomie», 9 (6), pp. 609-617.
- VAYSSE P., SOING P., PEYREMORETE P. (1990): *L'irrigation des arbres fruitiers*, Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, Paris.
- WEIBEL F.P., DE VOS J.A. (1994): *Transpiration measurements on apple trees with an improved stem heat balance method*, «Plant and Soil», 116, pp. 203-219.
- WILLIAMS L.E. (2002): *L'irrigation des vignes en Californie*, «Progres Agricole et Viticole», 119 (2), pp. 37-46.
- XILOYANNIS C., NUZZO V., DICHIO B., CELANO G., MONTANARO G. (1999): *Disponibilità radiativa ed efficienza dell'uso dell'acqua in impianti arborei da frutto*, «Rivista di Irrigazione e Drenaggio», 46 (2), pp. 47-51.
- XILOYANNIS C. (1992.a.): *Irrigazione*, in *Frutticoltura generale*, Reda, pp. 597-630.
- XILOYANNIS C. (1992.b.): *Relazioni acqua-terreno-pianta*, in *Frutticoltura generale*, Reda, pp. 344-370.
- XILOYANNIS C., ANGELINI P., PEZZAROSSA B. (1988): *Leaf water potential as a parameter in defining plant water status and available soil water*, «Acta Horticulturae», 228, pp. 235-243.
- XILOYANNIS C., URIU K., MARTIN G.C. (1980): *Seasonal and diurnal variations in abscisic acid, water potential, and diffusive resistance in leaves from irrigated and non-irrigated peach trees*, «Journal of the American Society for Horticultural Science», 105 (3), pp. 412-415.
- ZERBI G., LECAIN D.R. (1988): *La "Time Domain Reflectometry" nella misura dell'umidità e della salinità del terreno*, «Rivista di Agronomia», 22 (2), pp. 71-74.

GIANCARLO SCALABRELLI*

Razionale gestione dell'acqua di irrigazione in viticoltura

I. INTRODUZIONE

Le problematiche relative alla nutrizione della vite, con particolare riferimento a quella idrica, sono ritenute di particolare interesse a livello internazionale, come emerge dalla intensa attività di ricerca svolta in un gran parte nei paesi caratterizzati da clima caldo. In Italia la limitazione dell'uso dell'acqua ai soli interventi di soccorso, imposta dai Disciplinari di produzione dei vini VQPRD, ha rappresentato un ostacolo all'approfondimento degli studi su questo settore, mentre la ricerca di soluzioni idonee che consentano un efficiente utilizzo dell'acqua è un obiettivo da perseguire, tenendo conto del crescente problema della riduzione delle precipitazioni nonché della distribuzione aleatoria delle stesse durante il ciclo vegeto-produttivo della vite. Gran parte della viticoltura delle zone centro meridionali e insulari è condotta in zone a scarsa piovosità (oscillante tra 400 e 600 mm annuali) che risulta insufficiente a coprire il fabbisogno idrico della vite (stimabile in almeno 500-800 mm/anno), considerato che le piogge sono distribuite soprattutto nel periodo autunno-primaverile. A questa carenza idrica non si sottrae neanche la Toscana che con una piovosità media annuale di 487 mm, presenta ampie zone a elevata potenzialità vitivinicola soggette a condizioni di semi aridità. Nelle regioni insulari, inoltre, la conduzione del vigneto senza apporto irriguo è praticata nella maggioranza dei casi, con ripercussioni negative sulla quantità e la qualità del prodotto.

In questi ultimi anni la necessità di produrre vini di elevata qualità ha posto in rilievo l'esigenza di introdurre nelle aree viticole emergenti caratterizzate da

* *Dipartimento di Coltivazione e Difesa delle Specie Legnose "G. Scaramuzzi", Università degli Studi di Pisa*

clima mite e da una limitata piovosità, nuovi vitigni e inoltre di modulare il processo produttivo, agendo sulle variabili che influiscono sui rapporti tra attività vegetativa e produttiva e sull'accumulo dei componenti nella bacca, al fine di ottenere uve rispondenti all'obiettivo enologico preposto. L'irrigazione della vite da vino è stata per lungo tempo una problematica molto dibattuta tra gli operatori e i ricercatori, per gli importanti riflessi che determina sulla quantità e qualità della produzione finale. Tuttavia, in ambienti caldo-aridi questa tecnica rappresenta un presupposto indispensabile per contribuire al raggiungimento di adeguati livelli produttivi e vini di elevata qualità che stanno ottenendo, sempre più frequentemente riconoscimenti a livello internazionale.

2. IL SISTEMA VIGNETO

Il fabbisogno idrico del vigneto vite dipende da una serie di fattori che possiamo qui di seguito riassumere (fig. 1).

Il clima, caratterizzato da temperatura, luce, vento e piovosità che determinano il deficit di pressione di vapore capace di alimentare la domanda evapotraspiratoria.

Il terreno, che in relazione alla sua struttura, tessitura, composizione, profondità presenta specifiche capacità idrologiche che vanno a determinare la quantità di acqua disponibile.

La pianta, con due parti ben distinte, la parte aerea e quella radicale, costituita normalmente dal portinnesto, che in relazione all'espansione, alla diffusione e alle caratteristiche specifiche (Novello e De Palma, 1997) l'assorbimento dell'acqua e dei nutrienti, allo stoccaggio delle sostanze di riserva e all'invio di segnali alla parte aerea. Lo sviluppo e la diffusione delle radici dipende dall'origine genetica della specie (Morton e Jackson, 1988) e anche dalle caratteristiche del suolo (Richards, 1983). Le ramificazioni sottili delle radici, sono ritenute responsabili dei processi di assorbimento anche se il flusso idrico dovuto al loro apporto sembra essere inferiore a quello che avviene direttamente dalle radici principali (Mapfuno et al., 1994). L'irrigazione a goccia sembra determinare una minore diffusione degli apparati radicali, rispetto ad altri sistemi (Araujo et al., 1995).

Il vitigno (o anche lo specifico clone), in base alle proprie caratteristiche genetiche e morfo-fisiologiche risponde alle condizioni ambientali mediante variazioni dei processi di traspirazione, fotosintesi e respirazione che possono modulare i processi di crescita e di accumulo dei composti primari della fotosintesi e la biosintesi dei composti secondari (Behboudian e Singh, 2001).

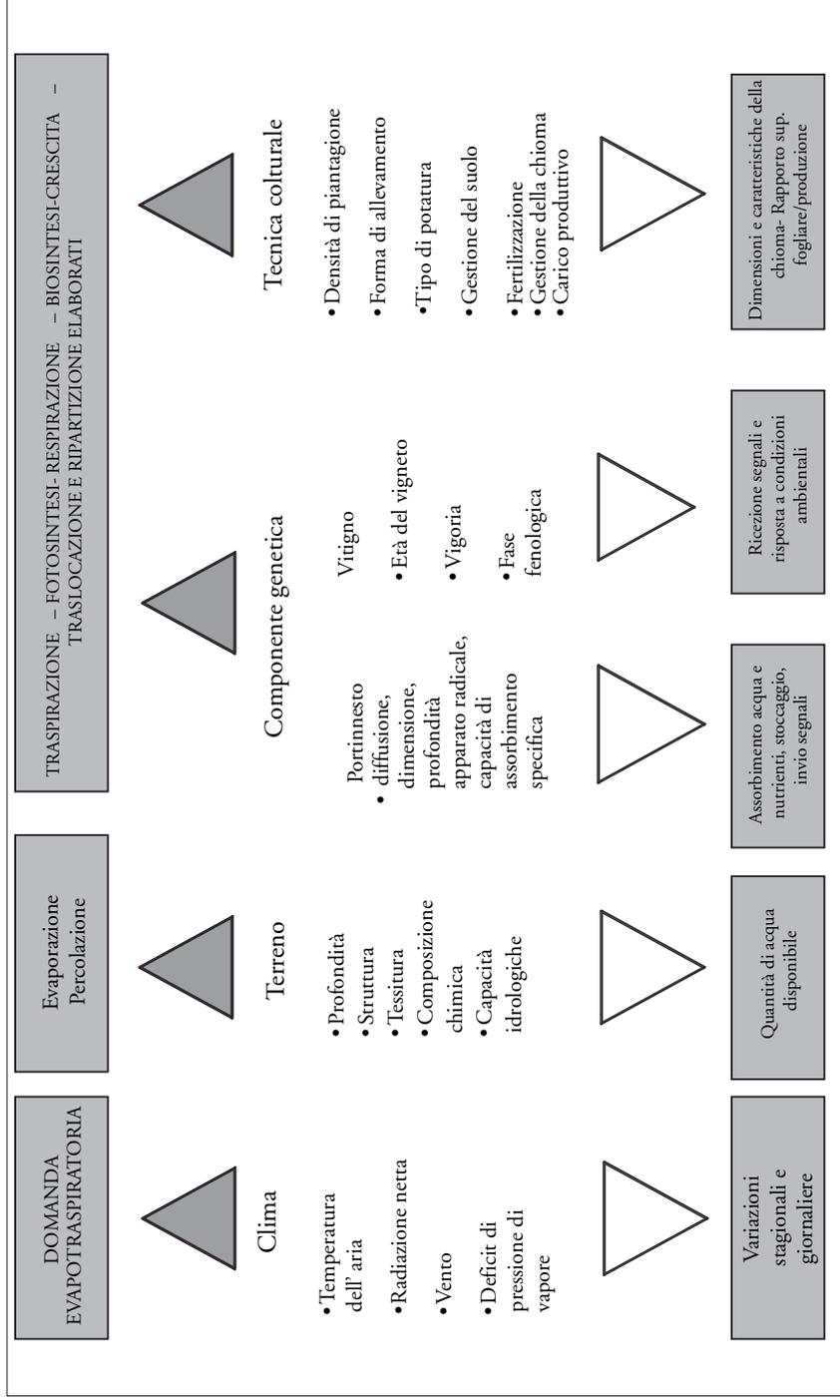


Fig. 1 Fattori che concorrono a determinare il Consumo idrico della vite

Gli interventi di tecnica colturale che si realizzano a partire dall'impianto del vigneto e che riguardano le distanze di piantagione, la forma di allevamento, il tipo e l'intensità della potatura, la gestione del suolo e della chioma, determinano la dimensione e le caratteristiche della chioma e il rapporto tra questa e il carico produttivo, che va a influire sulla spesa traspiratoria (Spano et al., 2000; Mattii e Orlandini, 2004; Schmid e Schultz, 2000) e sulla ripartizione degli elaborati.

Nel sistema terreno-pianta-atmosfera, l'acqua si muove dal suolo alle radici e da queste viene traslocata tramite lo xilema alle foglie, dove viene emessa sottoforma di vapore per traspirazione. Tale movimento è reso possibile dal gradiente di potenziale idrico esistente tra il terreno e l'atmosfera, incontrando una serie di resistenze lungo il tragitto (Cowan, 1965). In condizioni di insufficiente disponibilità idrica nella pianta si attivano una serie di meccanismi di risposta al deficit. La funzione della pianta che maggiormente viene influenzata dallo stress idrico è molto probabilmente la parziale chiusura degli stomi (minore conduttanza stomatica) la quale può determinare una diminuzione nella traspirazione e, verosimilmente, un aumento nell'efficienza della stessa.

Nel presente lavoro dopo aver passato in rassegna alcune delle conoscenze fondamentali sull'argomento, saranno esaminate le tecniche che possono contribuire a razionalizzare l'intervento irriguo in viticoltura.

3. EFFETTI DELLA CARENZA IDRICA SULLA VITE

Una serie di ricerche sono state condotte sulla risposta fisiologica della vite alla carente disponibilità idrica, indotta sia per sospensione immediata o graduale dell'acqua in determinati periodi, sia mediante restituzione di una parte dell'acqua consumata dalla coltura. In particolare la restrizione idrica a una parte dell'apparato radicale (esperimento con radici artificialmente suddivise) ha indotto una riduzione della conduttanza stomatica del 50% e la fotosintesi, soltanto del 30% (fig. 2), aumentando l'efficienza dell'uso dell'acqua (During et al., 1996).

In una indagine compiuta su una notevole mole di dati ottenuti su alcuni vitigni, in diverse condizioni ambientali (Flexas et al., 1999) è stato schematizzato il comportamento della vite in funzione della disponibilità idrica del suolo secondo tre tipi di risposta (fig. 3): un "consumo di lusso" in cui la conduttanza stomatica (gs), ovvero la perdita di acqua per traspirazione, aumenta senza che incrementi in maniera rilevante la fotosintesi; una fase di massima efficienza d'uso dell'acqua (WUE), in cui la limitazione idrica determina una diminuzio-

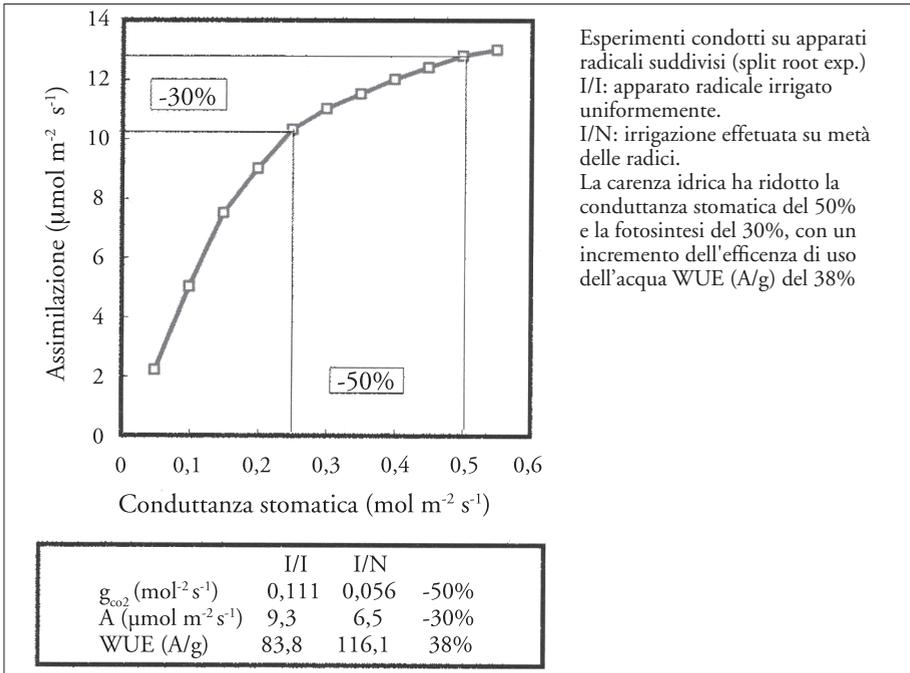


Fig. 2 Effetto della carenza idrica (During et. al., 1996)

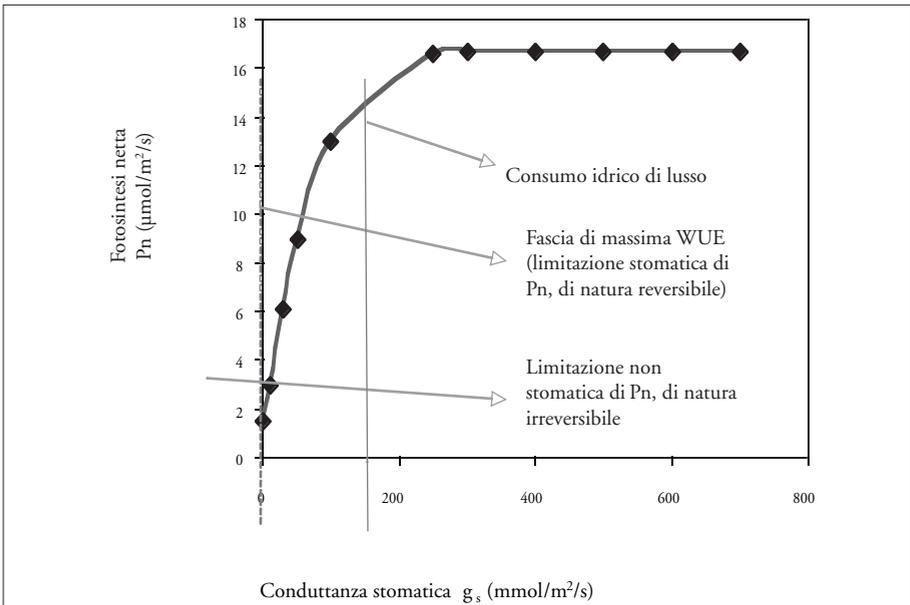


Fig. 3 Modello ipotetico di variazione della fotosintesi netta al variare della conduttanza stomatica (Rielaborato da Flexas et al., 1999)

ne di fotosintesi (P_n) a causa di una limitazione stomatica, che è reversibile a seguito del ripristino di un'adeguata disponibilità idrica; un terzo tipo di risposta, si ottiene a seguito di una limitazione più cospicua della disponibilità idrica alla quale corrisponde un calo repentino dell'efficienza fotosintetica in conseguenza di limitazioni non stomatiche, irreversibili anche dopo la reintegrazione delle disponibilità idriche. Concettualmente quindi il mantenimento nella fascia di risposta stomatica ($g_s = 100-200 \text{ mmol/m}^2\text{s}^{-1}$) consentirebbe di utilizzare efficacemente l'acqua senza ridurre cospicuamente la fotosintesi.

L'effetto del deficit risulta diverso in relazione al processo fisiologico considerato. In termini generali, si osserva una maggiore suscettibilità al deficit idrico dei processi di crescita vegetativa rispetto all'assimilazione e all'accumulo di carboidrati (Van Zyl, 1984; Naor e Wample, 1996; Dry e Loveys, 1998; Giulivo, 2000). Da questo emerge che, una volta raggiunta una sufficiente area fogliare, un moderato deficit idrico, che non sia tale da compromettere l'attività fotosintetica delle foglie (Carbonneau, 1987), può indurre un minor sviluppo dei germogli con una conseguente diminuzione della competizione nei confronti dei grappoli (Hsiao, 1973; Poni et al., 1993), determinando quindi condizioni più favorevoli ai processi di maturazione dell'uva. Affinché questi eventi si manifestino occorre che la resistenza dell'acino alla carenza idrica sia, anche di poco, superiore a quella fogliare (Poni, 2000), tuttavia, tale condizione non sempre si realizza in quanto dipende da molti fattori, quali lo stadio fenologico e il genotipo (Schultz et al., 1996; Barcelò et al., 1998; Spring, 1998; Escalona et al., 1999; Gomez del Campo et al., 1999; Tandonnet et al., 1999; Schultz, 2003). Infatti, fino all'invasatura l'acino essendo collegato al sistema xilematico del germoglio va incontro ad ampie fluttuazioni giornaliere del suo diametro, in risposta alla domanda evapotraspirativa (Huguet, 1985; Lang e Thorpe, 1989; Greenspan et al., 1994), dopodiché la funzionalità xilematica si riduce progressivamente (During et al., 1987; Findlay et al., 1987; Greenspan et al., 1994) rimanendo collegato per lo scambio idrico con il peduncolo (fig. 4) quasi totalmente per via floematica (Rebucci, 1994). L'acino, pertanto, dopo l'invasatura diventa più tollerante alla moderata disidratazione (Poni, 2000). Tuttavia, in osservazioni condotte su "Shiraz" non è stata riscontrata l'interruzione della funzionalità xilematica dopo l'invasatura dell'acino (Rogiers et al., 2001).

Studi di conducibilità idraulica hanno permesso di stabilire che i vasi xilematici di germogli di vite di piante stressate risultano di dimensioni inferiori a quelli di piante tenute in migliori condizioni idriche (Lovisolo e Schubert, 1998). A bassi livelli di stress idrico (potenziale idrico fogliare all'ora più calda = -0.6 MPa) non sono stati osservati fenomeni di embolismo, grazie alla ridu-

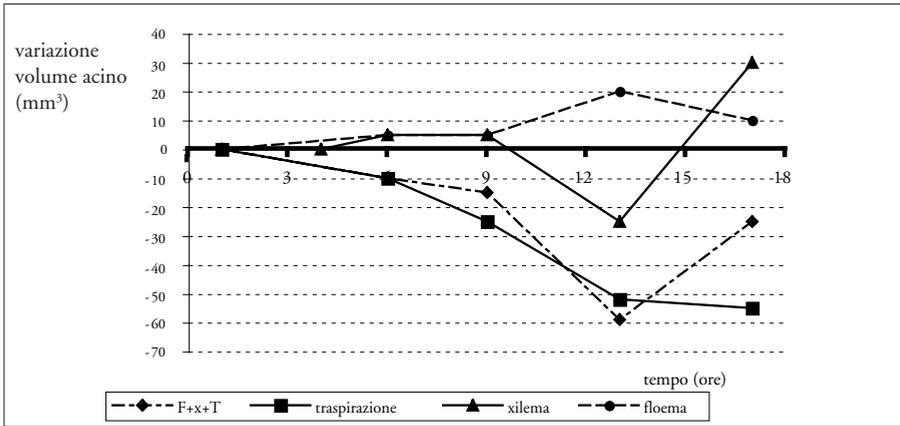


Fig. 4 *Variazione giornaliera dei componenti del flusso idrico dell'acino, misurati in pre-invaiaatura, su viti di Cabernet S. dopo un giorno di stress. Rielaborato da Greenspan et al., 1994*

zione delle cellule conduttive, mentre l'embolismo veniva osservato soltanto con stress più severi (potenziale idrico fogliare all'ora più calda = -0.8 MPa) (Tyree e Dixon, 1986; Schultz e Matthews, 1993). La presenza di proteine capaci di trasportare l'acqua (aquaporine) nelle membrane può assumere una notevole importanza nella regolazione della conducibilità idrica (Maurel e Chrispeels, 2001) soprattutto in condizioni di stress idrico.

Anche se l'origine genetica del portinnesto e la varietà sono in grado di esercitare un certo effetto sulla resistenza allo stress idrico (Iacono e Peterlunger, 1996; Schultz, 1996; Escalona et al. 1999, Hunter e Myburg, 2001; Silvestroni et al., 2004), il deficit idrico è considerato uno dei più efficaci e importanti fattori colturali di regolazione della qualità delle uve da vino. Moderati livelli di deficit idrico possono avere un'azione favorevole alla qualità finale del prodotto, sia attraverso il contenimento della produttività (Poni et al., 1993), conseguente allo stato di stress da deficit, che mediante il controllo dei meccanismi di ripartizione delle risorse tra i sinks vegetativi e quelli riproduttivi (Kliewer et al. 1983; Barbagallo et al., 1996), a favore dell'accumulo di assimilati nella bacca. Sebbene livelli di deficit idrico anche severi siano generalmente riconosciuti come fattori ambientali utili ai fini della qualità del prodotto, tale assunzione può non sussistere in ambienti dove a deficit idrici siano anche associati altri stress ambientali, tipici delle zone a clima caldo-arido mediterraneo, quali gli eccessi termici e luminosi.

Nel bacino del Mediterraneo, una parte considerevole della viticoltura è localizzata in aree caratterizzate da insufficiente piovosità annuale, concentrata

nel periodo invernale, e condizioni di deficit idrico durante l'intero ciclo vegetativo (De Palma et al., 2000). In tali ambienti, numerose sperimentazioni riportano netti miglioramenti dei parametri qualitativi in vigneti sottoposti a irrigazione, soprattutto in situazioni colturali ove il deficit idrico è evidente causa di riduzioni nell'attività fotosintetica (Naor e Wample, 1994; Schultz, 1996; Lopes, 1999). La risposta della vite al deficit idrico sembra variare in funzione dello stadio di sviluppo nel corso del quale si verifica e in funzione dell'organo considerato. Le differenze osservate a carico delle caratteristiche dell'acino sono state poste anche in relazione alla evoluzione della morfologia e della struttura delle connessioni vascolari dell'acino (Greenspan et al., 1996). Infatti, i deficit che si verificano prima della invaiatura sembrano influenzare soprattutto la dimensione della bacca e, come conseguenza indiretta, i parametri compositivi delle uve (fig. 5). In tale periodo l'acino mostra variazioni di volume direttamente legate allo stato di disponibilità idrica della pianta e contribuisce in misura significativa al bilancio traspirativo giornaliero. Nel

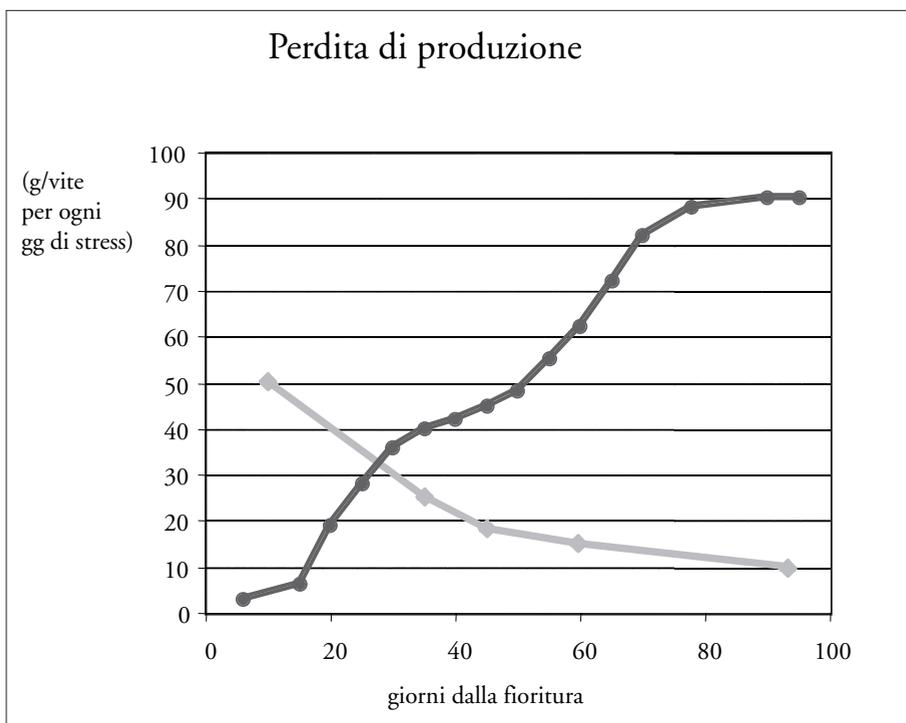


Fig. 5 *Effetto dello stress idrico sulla produzione in funzione della durata del periodo di stress (Ridisegnato da Hardie e Considine, 1976)*

periodo post-invaiatura, la dimensione dell'acino mostra minori dipendenze dallo stato idrico generale della pianta e, per questo, è meno direttamente legato a condizioni di deficit idrico che possano verificarsi nel corso della maturazione (Hardie e Considine, 1976). Gli effetti, in tale periodo, possono essere, invece, largamente ascritti alla riduzione dell'attività fotosintetica e dei processi di accumulo degli elaborati nella bacca. La minore area fogliare che si osserva in risposta al deficit è inoltre causa di una maggiore esposizione dei grappoli alla radiazione solare diretta che in ambiente caldo-arido può alterare notevolmente i processi di maturazione (Reynolds et al., 1986) per effetto di frequenti aumenti termici della bacca (Bergqvist et al., 2001).

4. IL MONITORAGGIO DELLO STATO IDRICO DELLA PIANTA

L'esigenza di una più precisa valutazione dello stato idrico delle piante in risposta ai deficit ha condotto, anche per la vite, a prendere in considerazione la misurazione di indicatori più strettamente legati ai processi fisiologici della pianta e aventi maggiore risoluzione temporale come le misure del flusso idrico, le variazioni di diametro del diametro degli organi vegetali che si verificano in conseguenza della perdita di acqua per traspirazione da parte della pianta (Huguet, 1985), la conduttanza stomatica (Naor et al., 1997), la temperatura fogliare (Hatfield, 1990), le variazioni la velocità di flusso xilematico (Massai e Remorini, 1999) e le variazioni delle caratteristiche ottiche delle foglie (Carter e Knapp, 2001). Da numerose ricerche è emerso che le misure di potenziale idrico del fusto e delle foglie, effettuate mediante camera a pressione ("midday"), oltre a essere indicatori affidabili dello stato idrico della pianta, sono caratterizzati da applicabilità immediata (Chonè et al., 2001) e tra questi indici il potenziale idrico fogliare misurato prima dell'alba è finora stato quello maggiormente adottato per individuare lo stato idrico della pianta (Ginestar et al., 1998, Lopes, 1999; Williams, 2001).

Il flusso d'acqua dalle radici alle foglie delle piante permette di equilibrare l'acqua persa per traspirazione, il mantenimento del turgore, e il movimento di nutrienti attraverso la pianta (Steudle, 2001). A una data differenza di potenziale, il flusso idrico è determinato dalla conduttività dei tessuti che è influenzata da diversi fattori, come la dimensione delle cellule conduttive (vasi xilematici; Lovisolo e Schubert, 1998), la presenza di fenomeni d'embolizzazione dei vasi (Schultz e Matthews, 1988) e la presenza di proteine in grado di trasportare l'acqua (aquaporine) nelle membrane (Maurel e Christeels, 2001).

In ambiente caldo-arido si registra una insufficiente disponibilità di dati riguardo alla intensità dei deficit idrici utilizzati nelle sperimentazioni svolte sulla irrigazione della vite, in quanto gran parte dei dati, riscontrabili in letteratura, riguardano esperimenti che utilizzano quale criterio di gestione dei trattamenti irrigui la disponibilità idrica del suolo o l'evapotraspirazione. Poche sono, invece, le ricerche che stabiliscono il criterio di irrigazione in base agli effetti sulla pianta e, quindi, su indicatori fisiologici dello stato idrico della stessa.

Una misura integrata dello stato idrico della vite è possibile per mezzo della tecnica della discriminazione isotopica del carbonio (Gaudillère et al., 2002). Tale tecnica pur non essendo praticamente utilizzabile per la gestione diretta dell'irrigazione può permettere una valutazione precisa degli effetti di trattamenti irrigui sullo stato idrico delle piante durante la stagione.

Dal punto di vista pratico risulta particolarmente importante definire il livello di stress che la pianta può sopportare o a cui viene esposta al fine di valutare la sua risposta fisiologica e produttiva. Dall'esame di una serie di lavori esistenti in letteratura, scaturiti da ricerche condotte in condizioni controllate e in pieno campo, si può notare una certa variabilità della risposta allo stress indotto, in relazione al genotipo, alla durata e all'intensità e della restrizione idrica, che rende difficilmente generalizzabile l'utilizzo di indicatori e di livelli precisi di stress. Pur con queste limitazioni il "potenziale idrico fogliare di base" (rilevato all'alba), è stato preso quale riferimento per stimare lo stato idrico e quindi i diversi possibili livelli di stress raggiunti dalla vite (tab. 1), con la individuazione di un intervallo entro il quale si può verificare lo "stress idrico moderato" (Carbonneau, 1987), ovvero una limitazione della disponibilità idrica che induce la pianta a rallentare l'attività traspiratoria, senza che si abbiano danni irreversibili al sistema fotosintetico (Carbonneau, 2002).

Per una più completa trattazione sui metodi di rilievo dello stato idrico delle piante si rimanda allo specifico lavoro sull'argomento (Massai, 2005).

5. STRATEGIE DI INTERVENTO

MEDIANTE DEFICIT IDRICO CONTROLLATO (RDI, PRD)

La riduzione della somministrazione idrica nel tempo o nello spazio può costituire un'interessante strategia per influenzare il bilancio idrico del vigneto; tale pratica è compresa nelle tecniche di "deficit idrico controllato" note come RDI (Regulated Deficit Irrigation) e PDR (Partial Rootzone Drying). Queste tecniche sono caratterizzate dalla strategia comune della restituzione di una

POT. IDRICO FOGLIARE (PD Ψ_w) MPA	STATO IDRICO DELLA VITE
0 > -0,2	Nessun stress idrico
-0,2 > -0,4	Stress idrico da leggero a medio
-0,4 > -0,6	Stress idrico da medio a elevato
-0,6 >	Stress idrico elevato

Tab. 1 *Potenziale idrico fogliare misurato prima dell'alba (PD Ψ_w) espresso in Mpa su foglie di vite e relativo stato idrico (Deloire et al., 2003)*

parte dell'acqua evapotraspirata dalla coltura (ETc) e più in particolare la tecnica RDI può essere realizzata in due modalità diverse: una strategia consiste nel somministrare quote differenziate di acqua (% ETc) in funzione della fase fenologica ("deficit idrico variabile"), in modo da modulare la componente desiderata, mentre un'altra modalità consiste nella distribuzione di una quota fissa della % della ETc a partire da un dato momento fisiologico, tipologia che potremmo definire "deficit idrico sostenuto".

5.1. *Partial Rootzone Drying*

La tecnica del Partial Rootzone Drying (PRD) è stata descritta in numerose ricerche condotte alla seconda metà degli anni '90 in Australia le quali concordemente indicano che, se una parte del sistema radicale della vite è sottoposta a stress idrico moderato, mentre le radici della restante parte sono mantenute in buone condizioni idriche, i segnali chimici (principalmente acido abscissico) prodotti dalle radici in stato di stress, inviati alle foglie, causano una riduzione dell'apertura stomatica mentre le radici bene idratate, invece, sono in grado di garantire un buon apporto idrico all'apparato aereo dell'intera pianta. L'applicazione del PRD è basata sull'adozione di due specifiche linee di gocciolatori disposte ai lati del filare, in modo da consentire il transito dei mezzi meccanici, che vengono attivate alternativamente ogni due settimane. È stato riferito che questo metodo è in grado di diminuire il vigore vegetativo e di incrementare l'efficacia dell'acqua determinando chio-me più aperte con miglioramento sensibile dell'esposizione dei grappoli, di aumentare la crescita delle femminelle e la forza sink degli acini con possibili miglioramenti qualitativi, senza ridurre la produzione e il potenziale idrico della pianta (Dry e Loveys, 2000; Davis et al., 2000; Loveys et al., 2000; Stoll et al., 2000; Davis et al., 2002).

Questo metodo è basato sulle conoscenze sviluppate negli ultimi due decenni, relative all'esistenza di comunicazioni tra radici e germogli mediante

segnali idraulici e chimici (in gran parte regolatori di crescita) che influenzano la conducibilità stomatica e l'attività di crescita vegetativa. Le conoscenze derivavano principalmente da esperimenti condotti su apparati radicali divisi artificialmente, su viti allevate in contenitore e irrigate separatamente, in modo da realizzare l'imposizione dello stress idrico sospendendo l'irrigazione soltanto a metà dell'apparato radicale (During, et al., 1996). Gli effetti più evidenti nei germogli e nelle foglie consistevano nella riduzione della conducibilità stomatica e della crescita senza apprezzabili variazioni nelle relazioni idriche (potenziale idrico, potenziale osmotico, turgore) nei germogli. Queste modificazioni sono state attribuite all'aumento di ABA nelle radici e nella linfa xilematica, inoltre vi sono sufficienti evidenze che questi effetti siano in realtà dovuti a segnali chimici e idraulici (Davies et al., 2002). Quest'ultimi sono conseguenti il progressivo disseccamento del suolo, in ogni caso il PRD realizzato in apparati radicali suddivisi, può regolare lo stato idrico in modo indipendente dal segnale idraulico. Per il segnale chimico, è stato ritenuto responsabile l'ABA, la cui attività dipende dal pH e entrambi vengono aumentati in condizioni di scarsa umidità dal suolo (Davies e Zhang, 1991; Davies et al., 1994). Anche citochinine e gibberelline prodotte dagli apici radicali possono essere coinvolti nelle relazioni idriche, anche se gli effetti riportati in letteratura indicano soprattutto l'influenza dello stress idrico sulla riduzione della sintesi di citochinine e sulla conducibilità stomatica (Davies e Zhang, 1991).

Dall'analisi delle conoscenze acquisite finora sembra che il PRD sia molto più efficace negli apparati radicali suddivisi di piante allevate in contenitore, dove il sistema veniva controllato interamente (During et al., 1996; Dry et al., 2000; Stoll et al., 2000), che in prove di pieno campo, dove venivano spazialmente separati da pannelli di plastica. Altri esperimenti condotti in Australia su viti in produzione, consistevano in una linea gocciolante con la quale si somministrava il 100% di acqua e una doppia linea con la quale si imponeva il PRD, distribuendo il 50% dell'acqua del controllo. In effetti sarebbe stato opportuno confrontare la distribuzione della stessa quantità di acqua (50%) con il sistema con una singola linea di gocciolatori (Bravdo et al., 2004).

Dalle ricerche condotte in Israele sembra che il sistema di irrigazione a goccia in realtà preveda l'instaurazione di uno stress analogo alla situazione dell'irrigazione parziale, in quanto sembra che le radici poste in ambiente più umido, possano secernere acqua per umettare il terreno mediante il un sistema di comunicazione denominato "hydraulic lift" (Dawson, 1993; Kramer e Boyer, 1995) e accrescersi ulteriormente (Bravdo, 2005). Lo stesso fenomeno può avvenire in contenitore dopo 10-14 giorni (Loveys, 2000).

Recenti studi sull'effetto del PRD, attuando un deficit di irrigazione con 0,8-0,4 ETc hanno messo in evidenza che i principali effetti sulla vite sono da attribuire alla quantità di acqua somministrata e non al metodo di distribuzione (Gu et al., 2004; Dos Santos et al., 2003; Souza et al., 2004). Ulteriori ricerche condotte da Collins et al., (2005) in Australia, hanno confermato che a parità di quantità di acqua somministrata mediante irrigazione a goccia o a doppia linea gocciolante non esistono differenze di comportamento produttivo e qualitativo. Perplessità sull'efficacia del metodo e analoghe considerazioni critiche sono state mosse da numerosi contributi provenienti da diversi paesi (Poni et al., 2005; Bravdo, 2005).

5.2. *Il deficit idrico controllato (RDI)*

L'applicazione del deficit idrico controllato è stata oggetto di intensa attività sperimentale in diversi paesi (Stati Uniti, Cile, Spagna, Italia, Portogallo, Francia) anche se con modalità di applicazione differenziate, dovute in gran parte alle diverse disponibilità idriche nel suolo durante il ciclo vegetativo della vite. Più in particolare nelle zone caratterizzate da scarsa piovosità durante un periodo più esteso dell'anno si è indagato maggiormente sugli effetti del diverso volume di acqua restituita alla coltura e sull'effetto della restrizione idrica in specifiche fasi fenologiche. Nelle condizioni dove la carenza idrica difficilmente si realizza prima dell'allegagione, in cui l'intervento irriguo viene considerato necessario per conseguire una produzione adeguata, gli studi si sono concentrati sia sull'effetto della sospensione degli interventi irrigui, sia verso l'attuazione del deficit idrico controllato, "variabile" o "sostenuto" (Ferreira et al., 2004). Infine nelle situazioni di condizioni pedologiche sfavorevoli o di inadeguata distribuzione delle piogge possono verificarsi stress idrici intensi (non sempre prevedibili), da compromettere la qualità del prodotto, gli studi si sono orientati soprattutto verso interventi mirati di restituzione di una quota dell'acqua consumata durante la fase di maturazione, cercando di mantenere sempre le piante a livelli elevati di efficienza. Si può pertanto comprendere come in funzione della quantità globale e del volume stagionale dell'acqua disponibile possano modificarsi le strategie di intervento in deficit idrico controllato, che tendono a seconda dei casi a evitare preoccupanti decrementi produttivi da un lato e a conseguire elevati livelli qualitativi dall'altro.

La sperimentazione condotta in California è stata indirizzata alla razionalizzazione degli interventi irrigui al fine di evitare eccessi di somministra-

zione idrica, che venivano rilevati abbastanza frequentemente (Williams e Matthews, 1990). Gli studi sono stati effettuati prevalentemente su vitigni a bacca nera (“Cabernet Franc” e “Cabernet sauvignon”) sottoposti a diversi tipi di gestione irrigua, ovvero restituzione idrica di una porzione costante della ETc (es. 0,5) oppure mediante la imposizione di livelli differenziati di deficit idrico dopo l'allegagione (precoce) o dopo l'invaatura (Matthews et al., 1987, 1988, 1989) corrispondenti a minori quote di restituzione della ETc (0,17-0,28). Le condizioni di deficit idrico continuo hanno provocato una riduzione della dimensione degli acini, con conseguente diminuzione della produzione. Il deficit precoce ha ridotto il volume dell'acino (-25%) e leggermente sia l'acido malico che l'acidità titolabile, senza influenzare significativamente il contenuto zuccherino. La concentrazione dei composti fenolici e degli antociani (espressi come concentrazione/superficie di buccia) è risultata incrementata sia dallo stress precoce (+30%) che da quello tardivo (+15%), con effetti positivi per la qualità delle uve (fig. 6).

Ulteriori ricerche condotte su “Cabernet sauvignon” confrontando diversi livelli irrigui hanno evidenziato che con la riduzione dei volumi idrici somministrati (50%) è stato ottenuto un incremento del contenuto di antociani, catechine e proantocianidine. Tale incremento era dovuto essenzialmente a un fenomeno di concentrazione, in quanto non vi erano differenze in tutte le componenti quando venivano espresse per singolo acino. Altro interessante

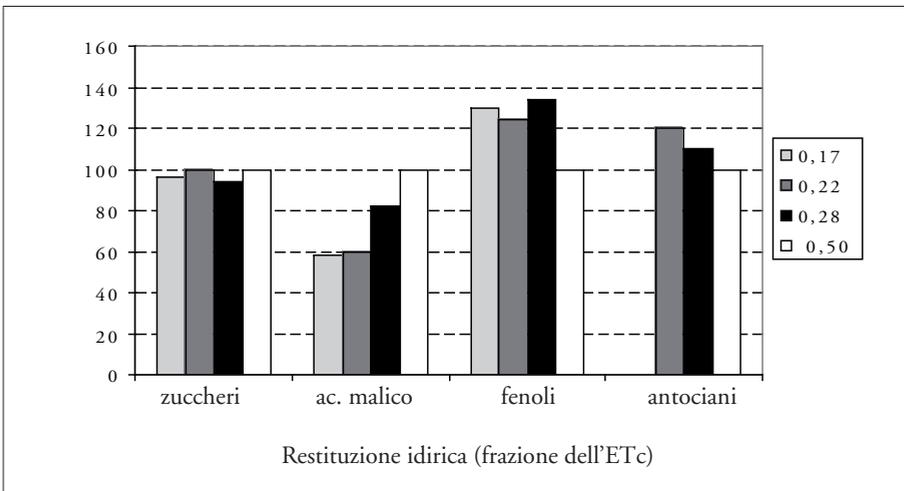


Fig. 6 *Influenza dell'apporto irriguo di quota della Etc (0,17-0,50) sulla qualità del mosto. Rielaborato da Matthews e Anderson, 1989*

aspetto è che mediante la minima irrigazione veniva incrementato il contenuto di antociani, flavonoli e proantocianidine nel vino. Ciò ha suggerito che i processi di copigmentazione tra antociani e flavonoli (Boulton, 2001) siano stati favoriti specialmente nei vini prodotti dalle tesi meno irrigate, che risultavano più stabili nel colore (Kennedy et al., 2002).

Analoghe sperimentazioni sono state effettuate sul vitigno bianco “Sauvignon”, sia confrontando diversi regimi idrici (ETc 0,4-0,8), sia attuando tipi di irrigazione differenziata in funzione dello stadio fenologico, allo scopo valutare la possibilità di ridurre gli apporti idrici e migliorare l'efficienza (Wample, 2000; Gu et al., 2004). Anche in questo caso si conferma che la minore somministrazione di acqua nel periodo allegagione-invaiaitura determina una riduzione produttiva senza alterare la gradazione zuccherina mentre l'acidità titolabile diminuisce sempre nel regime meno irrigato, anche se tale diminuzione è meno pronunciata negli apporti tardivi di volume inferiore. Il pH è risultato sempre più elevato nel regime meno irrigato, a cui seguiva il regime a restrizione precoce.

In ulteriori indagini condotte sul vitigno “Carbnet sauvignon”, le viti meno irrigate oltre a ridurre la dimensione dell'acino e la produzione, davano origine a vini maggiormente fruttati e meno ricchi di note sensoriali erbacee, tipiche di questo vitigno (Matthew, 2005).

In Israele numerose ricerche sono state condotte allo scopo condurre una efficiente gestione idrica e nutrizionale, dati i suoli prevalentemente sciolti e quindi aventi scarsa ritenuta idrica che venivano irrigati mediante sistemi di microirrigazione. I risultati ottenuti su diversi vitigni e con diverse modalità di restituzione sottolineano la diversa sensibilità varietale e la modulazione degli effetti produttivi e qualitativi, con particolare riferimento all'aroma varietale (Naor et al., 1994; Hepner et el. 1985; Bravdo et al., 1985; Bravdo e Naor, 1996, Bravdo, 2000; Bravdo et al., 2004, Bravdo, 2005).

In Australia le possibilità di applicazione del deficit idrico controllato sono derivate dall'esigenza di fornire nella gran parte delle zone viticole un adeguato rifornimento idrico durante quasi tutto il periodo produttivo, potendo verificarsi deficit idrici anche precoci. Numerosi studi sono stati intrapresi per individuare i momenti più critici in cui il deficit idrico può determinare le minori riduzioni produttive, non essendo in questo paese vigenti norme che limitano la produzione viticola. Da questi studi è emerso che occorre evitare stress idrici precoci, sia prima della fioritura che possono determinare la cascola dei frutti (Goodwin, 1995), sia immediatamente dopo l'allegagione, per non ridurre eccessivamente la dimensione dell'acino e quindi la produzione (Hardie e Considine, 1976; Smart e Coombe, 1983; Mc Carthy, 1997). In

ogni caso la perdita di produzione in questi due periodi fenologici può raggiungere livelli molto elevati, rispettivamente fino al 50 e al 40 % (Goodwin, 1995, Mc Carthy, 1997). Sebbene l'applicazione della strategia irrigua del deficit idrico controllato sia stata messa a punto (Hardie e Martin, 1990; Goodwin e Jerie, 1992; Goodwin, 1995) e abbia avuto una crescente diffusione (Behboudian e Singh, 2001) i risultati positivi conseguiti con la tecnica PRD, che si prospettava di notevole interesse in quanto consentiva migliorare la qualità delle uve senza diminuire la capacità produttiva del vigneto (Davies et al., 2000; Loveys et al., 2000; Davies et al., 2002), hanno fatto focalizzare l'attenzione verso quest'ultima pratica, anche se richiede maggiori investimenti per l'installazione. Parallelamente sono state avviate ulteriori indagini sulla verifica della validità del sistema PRD, analogamente a quanto compiuto anche in altri paesi (Gu et al, 2004; Souza et al., 2004; Poni et al., 2005). Confrontando diversi livelli di restituzione idrica (0,7-0,52-0,43 della ETc), applicati mediante il sistema a goccia, è emerso che il regime idrico inferiore riduceva la dimensione degli acini senza modificare il contenuto degli antociani e consentendo un leggero aumento dei polifenoli totali (Chalmers et al., 2005). È stata valutata, inoltre, la risposta dei vitigni "Chardonnay" e "Sirah" alla restituzione di volumi diversi di acqua (in un intervallo compreso tra 0,45 e 1,0 ETc) confrontando anche il metodo a goccia classico (con un'ala gocciolante) con quello a doppia ala, previsto dal sistema PRD (Collins et al., 2005). In ambedue le sperimentazioni è emerso che gli effetti sulla produzione sono da attribuire esclusivamente alla quantità di acqua distribuita e non ai sistemi di distribuzione, che presentavano in questo caso livelli di efficacia dell'uso dell'acqua praticamente identici (Pudney et al., 2004), avvalorando i dubbi avanzati sulla validità del PRD da diversi autori (Dos Santos et al., 2003; Bravo et al., 2004, 2005; Poni et al., 2005). Nelle viti di "Sirah", irrigate con il sistema PRD (a parità di volume somministrato), vengono segnalati valori di conduttanza stomatica, di traspirazione e di fotosintesi leggermente superiori al sistema a goccia che, tuttavia, non hanno influenzato in maniera differenziata la crescita e la produzione. Una diminuzione dell'acidità titolabile e un aumento del pH del mosto si registrava nel regime idrico inferiore, senza palesare differenze tra i due metodi (Collins et al., 2005). Secondo gli autori i risultati contrastanti ottenuti in differenti studi con PRD indicano che la risposta della vite può variare in funzione del tipo di suolo, della gestione del vigneto e della quantità di acqua somministrata, in particolare con elevati livelli di stress non ci si può attendere un effetto PRD. Al momento attuale, mentre l'applicazione della doppia linea gocciolante è già applicata a livello commerciale, la quale può essere giustificabile solo in terreni particolarmente

sciolti, è in atto una attenta revisione dei metodi di somministrazione idrica, soprattutto per diminuire la complessità del sistema.

Nell'ambito dei paesi viticoli emergenti del Sudamerica (Argentina e Cile), dove all'irrigazione costituisce una pratica agronomica in continuo sviluppo, in considerazione della scarsa piovosità di alcune aree, si stanno facendo notevoli progressi sulla razionalizzazione della gestione idrica sia per gli impianti destinati a uva da vino che per quelli a uva da tavola (Miranda et al., 2004; Ortega-Farias e Avevedo, 2004; Vallone et al., 2004; Vita Serman et al., 2004). Esaminando in questa sede prevalentemente l'applicazione del deficit idrico controllato su uve da vino, possiamo sottolineare come le indagini finora condotte in Cile abbiano indagato, sia gli effetti della diversa quota di restituzione dell'acqua consumata dalla coltura ETc (0-0,4-0,7-1,0), sia l'effetto della modulazione di tali livelli in diverse fasi fenologiche, combinando talvolta anche più sorgenti di variazione (Azevedo Opazo et al., 2004; Ferreyra et al., 2004). Riguardo al comportamento del vitigno "Cabernet sauvignon" è stato evidenziato che la migliore combinazione tra produzione, equilibrio vegeto-produttivo e qualità delle uve è stata ottenuta restituendo una quantità di acqua pari a 0,4 ETc dopo la fioritura, seguita dall'applicazione di apporti corrispondenti a 0,7 ETc nel periodo successivo all'invaiaura. A seguito della restrizione idrica dopo la fioritura si registravano acini più piccoli, con maggior rapporto buccia/polpa e incremento della concentrazione degli zuccheri, dei polifenoli totali e degli antociani a maturazione. Tali effetti sono stati attribuiti alla minore diluizione dei componenti e non all'incremento della loro biosintesi (Azevedo Opazo et al., 2004).

Un'altra sperimentazione effettuata restituendo quote diverse (0,4-1,0 ETc) dell'acqua consumata (su base lisimetrica), mediante sospensione selettiva dell'intervento irriguo nei due periodi topici, cioè allegazione-invaiaura e invaiaura-maturazione, ha permesso di conseguire un risparmio di volume irriguo variabile tra il 62% e il 40%. Nello stesso tempo il deficit idrico precoce ha indotto un minor peso dell'acino e dei grappoli, mantenendo inalterati il pH e la concentrazione zuccherina, mentre l'acidità totale è stata aumentata con la sospensione irrigua dopo l'invaiaura. È interessante osservare come il contenuto dei polifenoli e degli antociani sia stato più elevato nelle viti soggette a restrizione idrica. In particolare con l'interruzione precoce della somministrazione idrica sono risultati aumentati maggiormente i polifenoli, mentre con la sospensione dopo l'invaiaura è stato conseguito un maggior accumulo degli antociani (fig. 7). Complessivamente la qualità del vino è stata significativamente incrementata con la restrizione idrica, soprattutto quando la sospensione dell'irrigazione è stata praticata dopo l'invaiaura (Ferreyra et al., 2004).

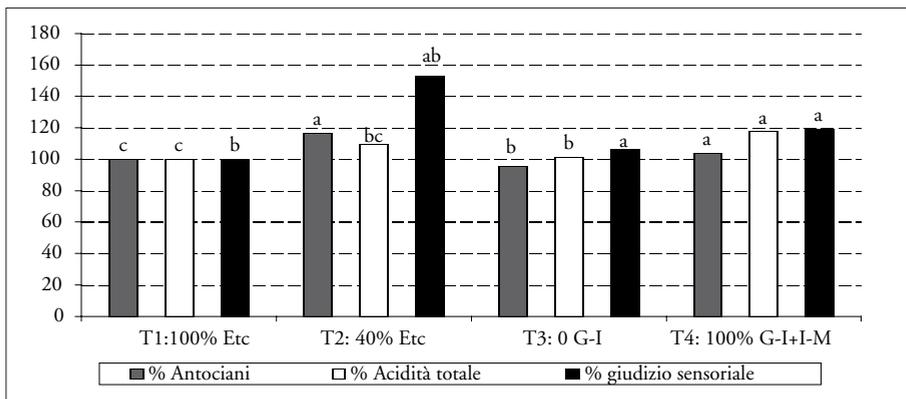


Fig. 7 Effetto del livello irriguo e della sospensione idrica in diverse fasi fenologiche (G:germogliamento; I:invaiaitura; M:maturazione) sulla composizione e sulle proprietà e sensoriali del vino (valori % riferiti a T1: 100% Etc). Rielaborato da Ferreyra et al., 2004

Le esperienze condotte in alcuni paesi dell'Europa sud occidentale quali Portogallo, Spagna e Francia, si riferiscono a zone tra loro poco uniformi in quanto sottoposte all'influenza climatica atlantica, continentale e mediterranea e, pertanto, saranno esaminate separatamente. Alcune delle più recenti ricerche condotte in Portogallo valutando la risposta fisiologica e produttiva di alcuni vitigni a bacca nera ("Tempranillo", "Manto Negro", "Castelao" e "Moscatel") a diversi volumi idrici (0,3-0,5 ETc) hanno indicato una differente risposta varietale, sia per quanto concerne la resa produttiva, che gli effetti sulla qualità delle uve (Medrano et al., 2003; Dos Santos et al., 2003; Souza et al., 2004) e nessuna differenza tra il metodo di distribuzione a goccia ad ala singola rispetto alla doppia ala gocciolante prevista adottando il PRD (Souza et al., 2004). Nel corso di uno studio pluriennale è emerso che l'irrigazione corrispondente alla restituzione di 0,3 ETP in "Manto Negro" ha determinato un aumento della produzione (circa il 45%), degli zuccheri e del pH ma non di antociani e polifenoli. In "Tempranillo", lo stesso intervento idrico ha determinato un maggior incremento produttivo (100%) senza modificare le principali componenti della qualità (Medrano et al., 2003). Gli autori concludono che le variazioni della qualità dell'uva indotte dalla siccità sono cultivar dipendenti.

In Spagna lo scopo principale è stato quello di mantenere adeguati livelli produttivi nelle zone esposte a notevole carenza idrica, pertanto, gli studi si sono orientati principalmente sul vitigno "Tempranillo", adottando sia regimi idrici in deficit sostenuto, sia restrizione idrica differenziata nei periodi allega-

gione-invaiatura e invaiatura-maturazione. L'irrigazione con restituzione pari a 0,6 ETc ha aumentato la dimensione degli acini e la produzione, mentre il maggior contenuto in polifenoli totali e di antociani è risultato inalterato se riferito per acino, palesando un chiaro effetto di diluizione (Esteban et al., 2001). Gli studi condotti su "Tempranillo", "Cabernet sauvignon" e "Bobal", mediante la sospensione o la riduzione degli apporti irrigui, nei due momenti fenologici sopraricordati, hanno confermato gli effetti negativi della sospensione irrigua dopo l'allegagione e una influenza leggermente positiva della sospensione idrica dopo l'allegagione sul contenuto di antociani delle uve e sulla loro estraibilità (Sipiora e Granda, 1998; Salon et al., 2004; Santesteban et al., 2005).

Le ricerche condotte in Francia hanno fatto riferimento al potenziale idrico di base (rilevato all'alba) quale indice per valutare lo stato idrico della pianta, fissando quindi gli intervalli critici entro cui si realizzano intensità diverse di stress idrico e i loro effetti (Carbonneau, 1998; Deloire et al. 2003; Carbonneau et al., 2003). Da questi studi è emerso che lo stress idrico che si verifica tra la fioritura e l'invaiatura è in grado di diminuire soltanto la distensione cellulare e non la divisione cellulare, che ha luogo nell'acino durante la fase erbacea (Ojeda et al., 1998, 1999; 2001). Tenuto conto che lo stress idrico che si verifica dopo l'allegagione è reversibile, grazie alla plasticità dell'acino, il fenomeno di diluizione o di concentrazione può essere considerato come la diretta conseguenza della disponibilità idrica del suolo (Deloire et al., 2002). Pertanto, la valutazione del contenuto dei metaboliti primari e secondari dovrebbe essere distinta tra la concentrazione, espressa di norma sul peso fresco (mg/g) e la quantità prodotta per biosintesi, espressa in peso per acino (mg/g). Studi in condizioni controllate sono stati effettuati per sul vitigno "Sirah" imponendo livelli differenziati di deficit idrico (Ojeda et al., 2002), sia temporali (dopo l'allegagione, dopo l'invaiatura) che di diversa intensità (forte, medio). La dimensione dell'acino e il peso delle bucce si riduceva maggiormente con gli stress precoci che determinavano anche un aumento del rapporto buccia/polpa. La concentrazione degli zuccheri non veniva influenzata dal regime idrico, mentre la quantità di zuccheri, espressa per acino, più elevata nel controllo irrigato (fig. 8). La quantità di composti fenolici dipendeva dall'intensità dello stress e dall'epoca, infatti stress moderati (precoci) e stress forti (tardivi) inducevano un più elevato livello di flavonoli e di flavan-3oli (figg. 9-10). Il contenuto dei tannini veniva diminuito da stress precoci e aumentato da stress tardivi. Gli stress precoci sono stati ritenuti responsabili della riduzione della biosintesi degli antociani e delle proantocianidine mentre con gli stress tardivi venivano aumentati il contenuto degli antociani, delle

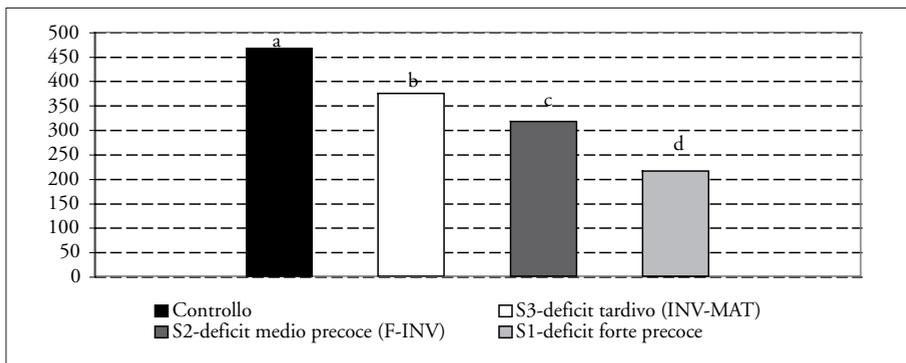


Fig. 8 *Influenza della diversa restrizione idrica sui solidi solubili rispetto al peso dell'acino, rilevato alla piena maturazione. Rielaborato da Ojeda et al., 2002*

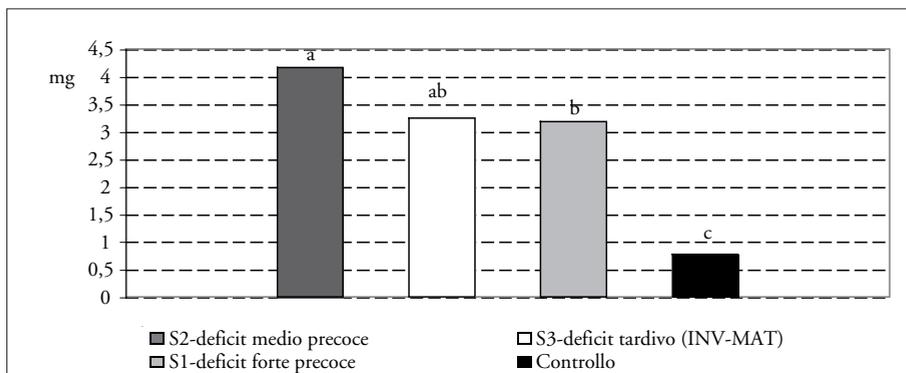


Fig. 9 *Influenza della diversa restrizione idrica sul contenuto di Flavonoli (espressi per grammo di buccia), rilevato alla piena maturazione. Rielaborato da Ojeda et al., 2002*

proantocianidine e la polimerizzazione dei tannini (figg. 11-12). Sulla base di queste variazioni si possono prevedere alcuni effetti sulla qualità principalmente legata al patrimonio fenolico. Infatti i flavonoli oligomeri e polimeri sono ritenuti responsabili dell'astringenza, mentre i monomeri (catechine ed epicatechine) sono maggiormente responsabili del sapore amaro, pertanto, dall'insieme dei risultati sopraesposti si può ragionevolmente desumere che gli stress tardivi e quelli moderati sono in grado di favorire maggiormente la qualità. L'effetto positivo dello stress moderato dopo l'invaiaitura è confermato dalla maggiore biosintesi degli antociani rilevabile sia dai contenuti espressi sul peso degli acini, sia per acino. Non si esclude tuttavia una maggiore bio-

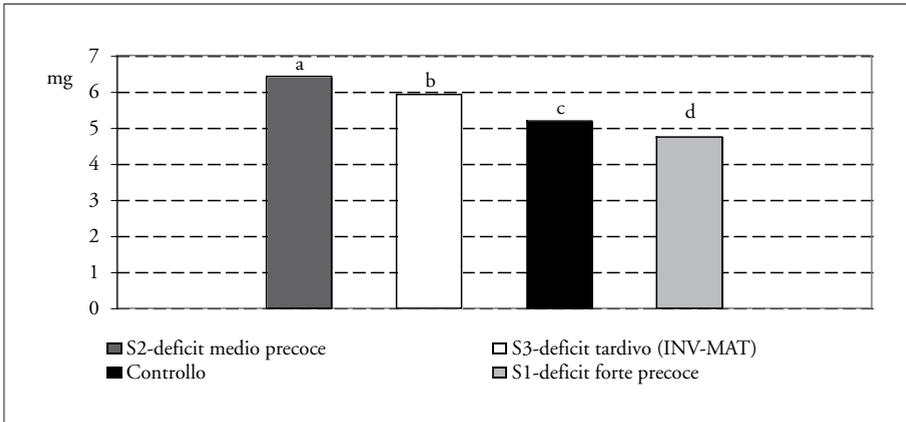


Fig. 10 *Influenza della diversa restrizione idrica sul contenuto di Flavon-3-oli (espressi per grammo di buccia), rilevato alla piena maturazione. Rielaborato da Ojeda et al., 2002*

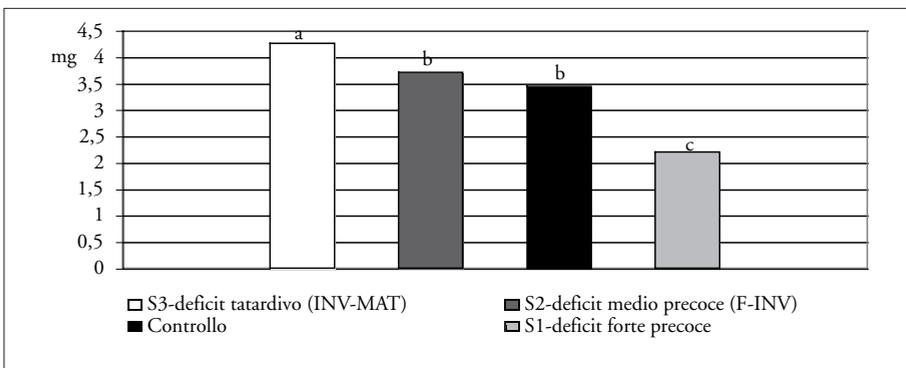


Fig. 11 *Influenza della diversa restrizione idrica sul contenuto di procianidina (espressa per grammo di buccia di singolo acino), rilevato alla piena maturazione. Rielaborato da Ojeda et al., 2002*

sintesi conseguente l'attivazione dell'enzima PAL per effetto del microclima luminoso (Riccomagno et al., 2004, Gholami, 2004). L'approccio dominante attuale è quello di considerare tutti i fattori statici e variabili che interagiscono sul funzionamento della pianta la cui conoscenza, abbinata alla determinazione del potenziale idrico di base, può fornire l'opportunità di modulare gli interventi colturali, compresa l'irrigazione, al fine di indurre tramite lo stress idrico moderato effetti positivi sulla qualità (Carbonneau, 2002). Un esempio delle possibili tipologie di vino ottenibili in funzione dei valori del potenziale idrico di base è schematizzato nella tabella 2.

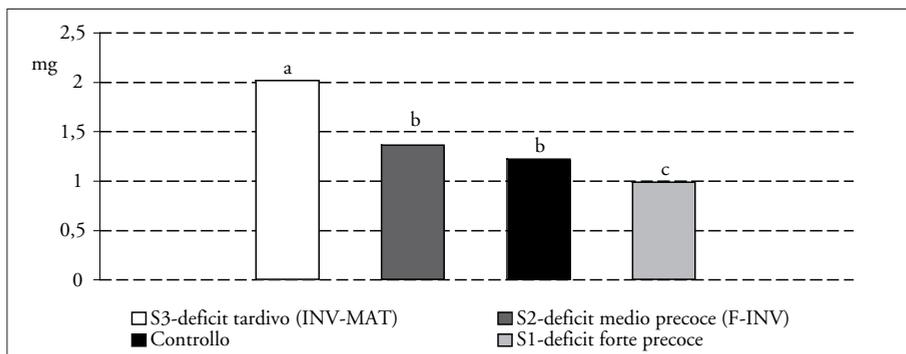


Fig. 12 *Influenza della diversa restrizione idrica sul contenuto di antocianine (esprese per grammo di buccia di singolo acino), rilevato alla piena maturazione. Rielaborato da Ojeda et al. 2002*

In Italia molteplici sono i gruppi di lavoro che hanno affrontato la problematica della razionalizzazione dell'irrigazione, sia studiando i fenomeni fisiologici di carattere generale, sia mediante specifiche ricerche sulla imposizione del deficit idrico controllato. La problematica è in ogni caso assai vasta in quanto comprende sia le aree dell'Italia centro-settentrionale, caratterizzata da media o buona piovosità, dove per motivi pedologici o per incostante disponibilità idrica possono verificarsi comunque deficit idrici in grado di penalizzare la produzione e soprattutto la qualità delle uve, pertanto, l'eventuale apporto idrico dovrebbe essere mirato non a incrementare la produzione, ma a mantenerla entro livelli accettabili migliorando, invece, la qualità delle uve e del vino (Battilani, 2000; Battilani e Mannini, 2000). Diversa è la situazione di

PD ψ_w (MPa)	CRESCITA VEGETATIVA	CRESCITA DELL'ACINO	FOTOSINTESI	BIOCHIMISMO DELL'ACINO	STILE DEL VINO
0 a -0,3	Normale	Normale	Normale	Normale	1
-0,3 a -0,5	Diminuita	Normale o legg. ridotta	Normale o legg. ridotta	Normale o aumentato	2-3-4
-0,6 a -0,9	Diminuita o inibita	Diminuita o inibita	Diminuita o inibita	Diminuita o inibita	4-5
< -0,9	Inibita	Inibita	Parziale o totale inibi- zione	Parziale o totale inibi- zione	5-6

Legenda sullo stile del vino: 1= "diluito" ad elevata acidità; 2= "fruttato" e bilanciato; 3= "fruttato" / "tannico"; 4= "fruttato" / "tannico", concentrato e molto bilanciato; 5= "tannico", non sempre bilanciato, alto contenuto alcolico; 6= "tannico", aspro, non bilanciato, alto contenuto alcolico.

Tab. 2 *Relazioni tra la soglia del potenziale idrico fogliare rilevato all'alba (o di base), funzionalità della pianta e stile del vino ottenibile (Rielaborato da Deloire et al., 2003)*

parte delle zone viticole dell'Italia meridionale e insulare, caratterizzate da insufficienti precipitazioni che possono pregiudicare fortemente la produzione e la qualità del prodotto, potendo verificarsi situazioni di stress idrico in fasi fenologiche piuttosto precoci o perdurare per lunghi periodi, costringendo la pianta a diminuire drasticamente o a cessare l'attività metabolica. È evidente quindi come nelle diverse situazioni possano essere messe in atto diverse scelte tecniche in grado di moderare i consumi idrici da un lato, o di consentire alla pianta di tollerare maggiormente gli stress. Non essendo possibile passare in rassegna in maniera esaustiva l'attività condotta a questo riguardo, si ritiene opportuno esaminare brevemente solo alcuni contributi riguardanti specifiche applicazioni del deficit idrico moderato, soprattutto per quanto riguarda il miglioramento della qualità.

Anche in situazioni come quella del Friuli, e in particolare nelle "Grave" esistono prospettive di migliorare la qualità delle uve mediante la attenta gestione del deficit idrico. Una serie di ricerche sono state condotte su piante del vitigno "Merlot", sottoposte a diversi livelli idrici di acqua nel suolo, allevate sia in contenitore che in pieno campo (20-30-80%). Il minore apporto irriguo distribuito nel periodo invaiatura-maturazione ha ridotto la dimensione dell'acino senza modificare la gradazione zuccherina, accanto a una leggera diminuzione dell'acidità titolabile e a un aumento del pH (fig. 13). Inoltre, l'accumulo degli antociani nelle bucce pur manifestando una ritardo nell'accumulo eguagliava il controllo alla maturazione (fig. 14). Nei vini, infine, il contenuto di antociani e di polifenoli (fig. 15) era leggermente maggiore nelle

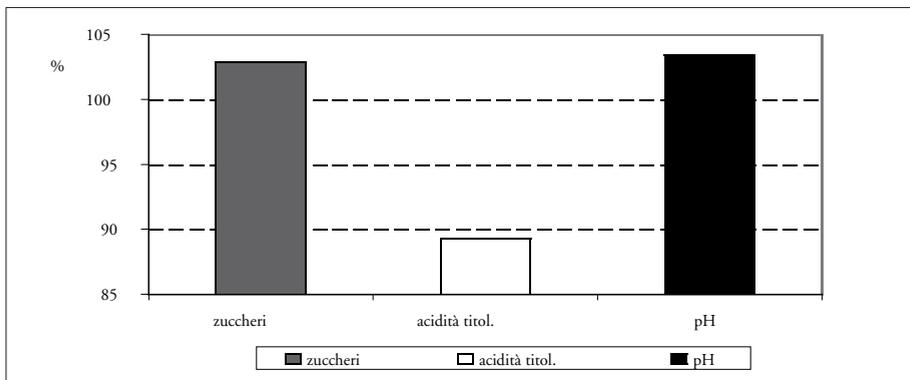


Fig. 13 Effetto dello stress idrico, durante la maturazione ottenuto con il livello del 20% di a.d.), sull'evoluzione degli zuccheri, dell'acidità titolabile e del pH (valori % riferiti al controllo C: 80% a.w.). Rielaborato da Peterlunger, 2002. (a.d. = acqua disponibile)

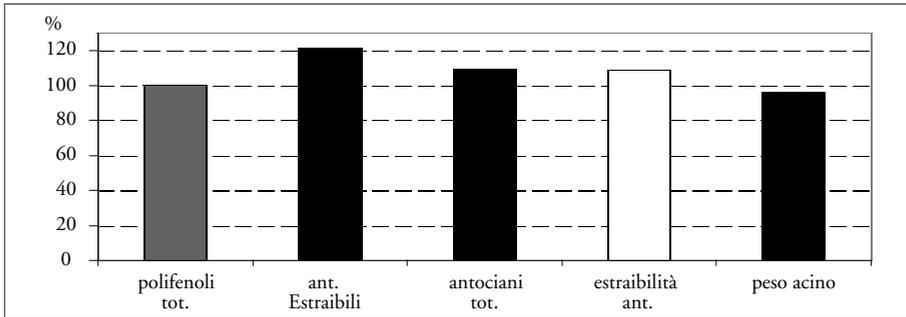


Fig. 14 Effetto dello stress idrico (ottenuto con il livello del 20% di a.d.) durante la maturazione sull'indice di polifenoli, antociani estraibili e totali, sull'estraibilità degli antociani e sul peso dell'acino (valori espressi in % rispetto al controllo C: 80% a.d.).

Rielaborato da Peterlunger et al., 2002

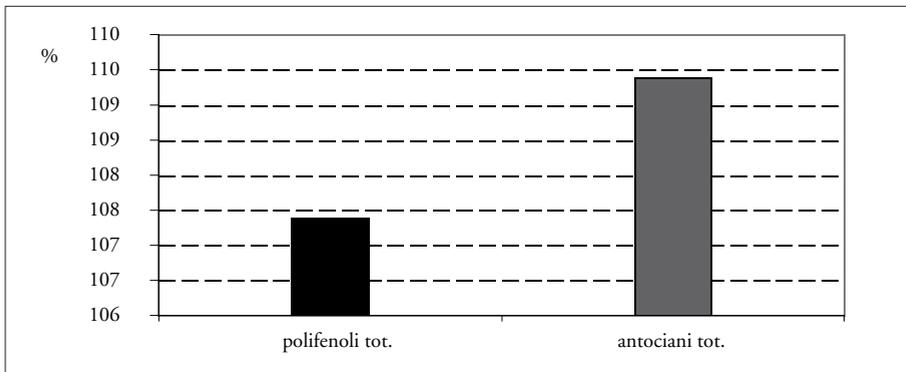


Fig. 15 Effetto dello stress idrico durante la maturazione sull'indice dei polifenoli totali e antociani totali dei vini (valori espressi in % rispetto al controllo C: 80% a.d.). Rielaborato da Peterlunger, et al. 2002

tesi sottoposte a minore apporto idrico (Peterlunger et al., 2002). Le prove di stress intenso effettuate in contenitore, mantenendo l'acqua disponibile nel suolo al disopra della soglia del 20%, a partire da una settimana prima dell'invaiaatura, hanno indotto una minore dimensione dell'acino e un aumento dei polifenoli totali dei vinaccioli e delle bucce, mentre zuccheri, pH e acidità titolabile sono rimasti invariati (figg. 16-17). Il contenuto in antociani tendeva a essere più elevato (fig. 18), anche se in maniera non sempre significativa (Peterlunger et al., 2004). Ulteriori esperienze condotte in pieno campo mantenendo due livelli idrici del suolo (80% e 30% a.d.) mediante

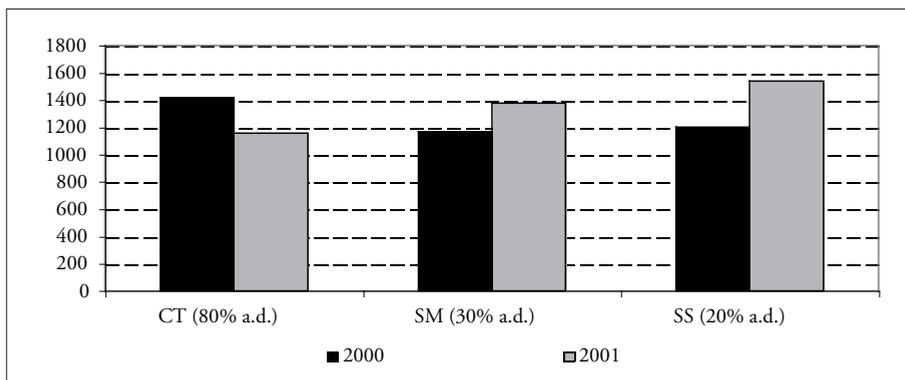


Fig. 16 Effetto dello stress idrico in piante allevate in vaso, sui polifenoli totali estratti dalle bucce con EtOH, negli anni 2000 e 2001. Rielaborato da Peterlunger et al., 2004

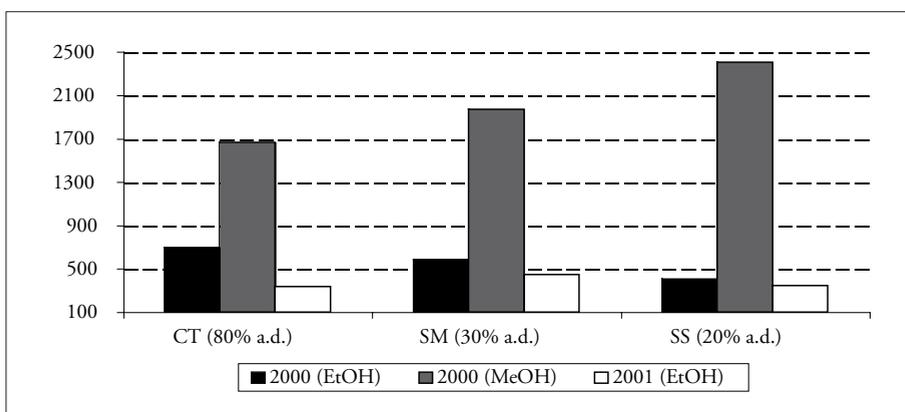


Fig. 17 Effetto dello stress idrico in piante allevate in vaso, sui polifenoli dei vinaccioli estratti con con diversi metodi (EtOH, MeOH), negli anni 2000 e 2001. Rielaborato da Peterlunger et al., 2004

subirrigazione, prendendo come riferimento due potenziali idrici del fusto (-0,6MPa, e -1,4 MPa, per i due livelli idrici) hanno confermato che lo stress moderato (SM) riduceva la dimensione degli acini (fig. 19) aumentando il contenuto dei polifenoli totali (di buccia e vinaccioli), degli antociani totali e delle proantocianidine (figg. 20-21), a cui corrispondeva una leggera diminuzione dell'acidità titolabile. I vini prodotti dalle viti mantenute in condizioni di stress moderato presentavano livelli di antociani e di proantocianidine superiori al controllo, evidenziando anche a livello sensoriale un maggiore

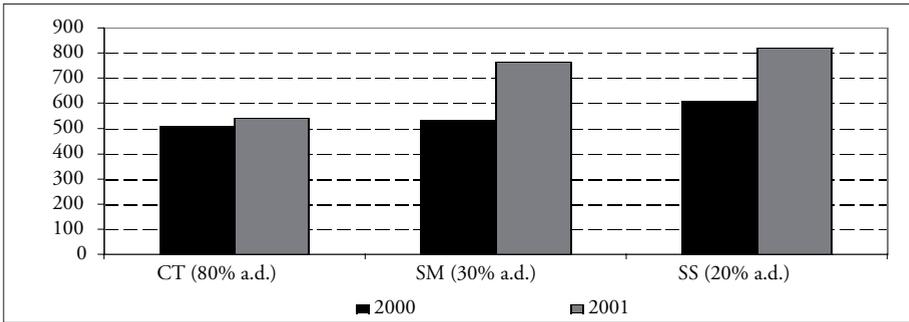


Fig. 18 Effetto dello stress idrico in piante allevate in vaso, sugli antociani totali estratti delle bucce con EtOH, negli anni 2000 e 2001. Rielaborato da Peterlunger et al., 2004

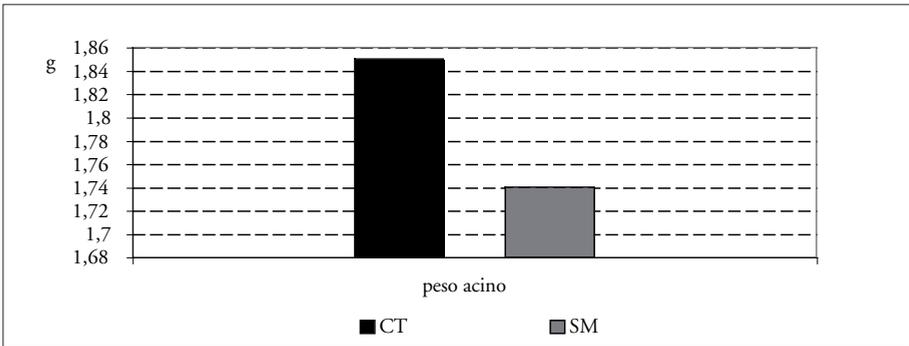


Fig. 19 Effetto dello stress idrico sull'evoluzione del peso dell'acino in piante allevate in pieno campo. Rielaborato da Peterlunger et al., 2004

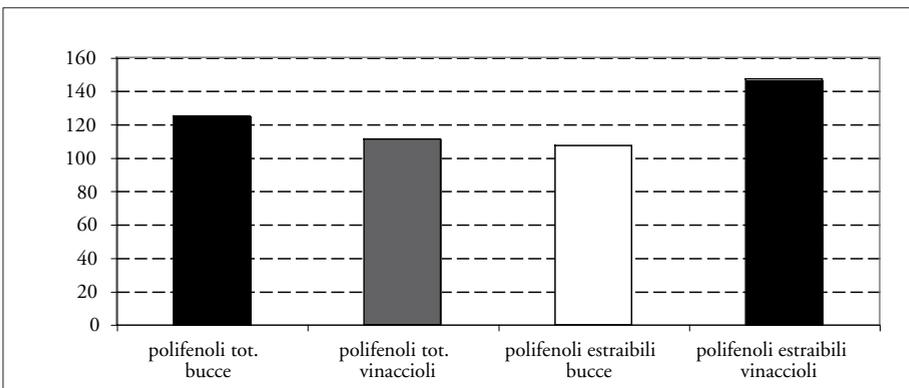


Fig. 20 Effetto dello stress idrico moderato (SM) sulle frazioni polifenoliche delle uve ottenute da piante allevate in pieno campo (valori % riferiti al controllo). Rielaborato da Peterlunger et al., 2004

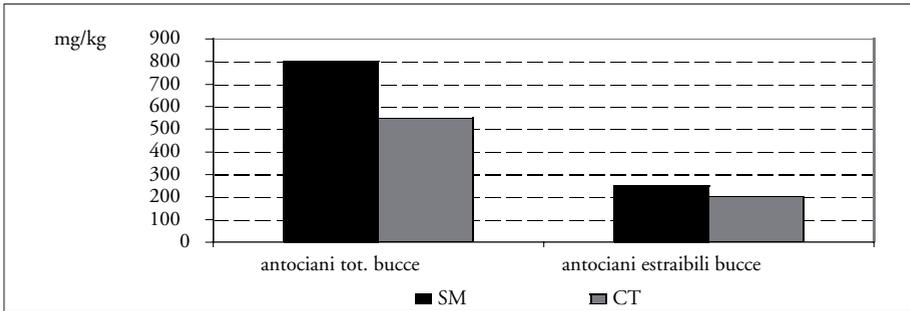


Fig. 21 *Modificazioni indotte dallo stress idrico sulla concentrazione di antociani nelle bucce di uve ottenute da viti allevate in pieno campo. Rielaborato da Peterlunger et al., 2004*

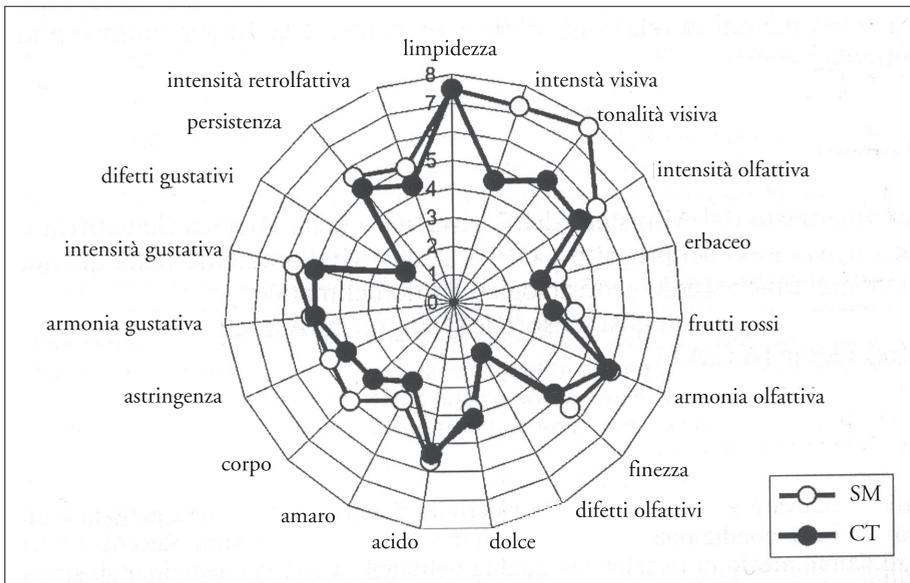


Fig. 22 *Effetti del Deficit idrico controllato (SM, stress moderato) sui caratteri sensoriali del "Merlot". (Fonte: Peterlunger et al., 2002)*

gradimento da parte del panel (fig. 22). Le uve caratterizzate da acini più piccoli e concentrazioni più elevate di alcune componenti fenoliche non facilmente estraibili dovrebbero beneficiare di una più prolungata macerazione per ottenere miglioramenti delle frazioni fenoliche nei vini (Peterlunger et al., 2004). Infine, secondo gli autori di questa ricerca si dovrebbe mantenere la quantità di acqua disponibile nel terreno tra il 15 e il 30%.

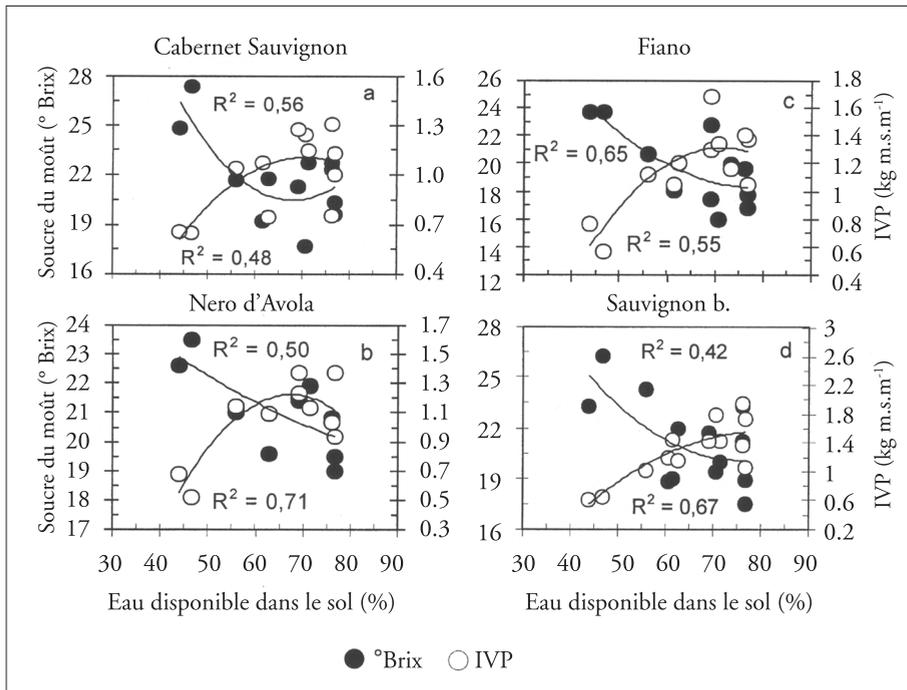


Fig. 23 Relazione tra acqua disponibile del suolo, zuccheri del mosto ($^{\circ}$ Brix) ed indice vegeto-produttivo (IVP) in 5 ambienti diversi (Fonte: Calò et al., 2002).

La stima dell'umidità del suolo mediante il bilancio idrico (Giorgessi et al., 2001) ha costituito la base per determinare le relazioni esistenti tra quantità di acqua disponibile nel terreno, parametri vegeto produttivi (IVP) e gradazione zuccherina del mosto ($^{\circ}$ Brix) alla maturazione nell'arco di triennio su quattro vitigni a uva da vino coltivati in 5 differenti ambienti di coltivazione della penisola (Calò et al., 2002). Le relazioni sono risultate in gran parte significative, evidenziando, tuttavia, differenze sostanziali nella risposta dei vitigni (fig. 23), come evidenziato anche dall'analisi fattoriale discriminante (fig. 24) e dall'analisi dei componenti principali per la espressione dei caratteri sensoriali (Calò et al., 2002).

Indagini compiute in Toscana (prov. di Siena) sulle relazioni esistenti tra disponibilità idrica dei suoli e maturazione delle uve "Sangiovese" hanno evidenziato che questo vitigno è particolarmente esigente in fatto di suoli. Infatti, in annate siccitose e in terreni a bassa disponibilità idrica il "Sangiovese" ha difficoltà a maturare bene, presentando bassi livelli di polifenoli negli acini (Storchi et al. 2005). Una maggiore disponibilità idrica tra l'inviatura e la ma-

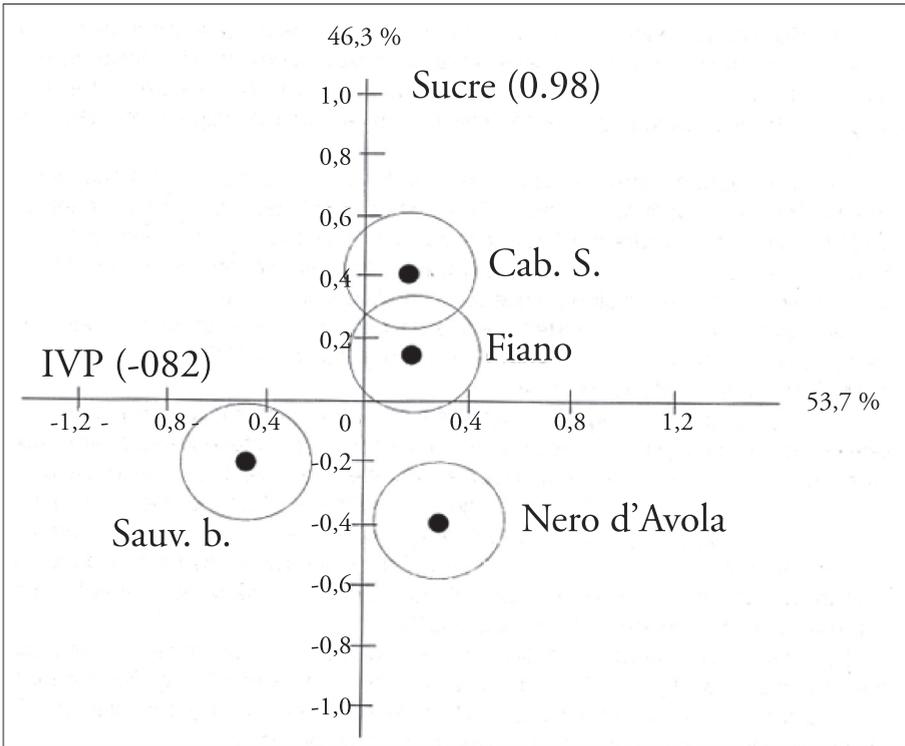


Fig. 24 *Analisi fattoriale discriminante: zuccheri del mosto e indice vegeto-produttivo eseguita su 4 vitigni in 5 ambienti (Fonte: Calò et al., 2002).*

turazione sembra avere effetto positivo sugli zuccheri, sul colore e sui composti fenolici. Infine, quando la disponibilità di acqua nei mesi di agosto e settembre scende sotto l'1,5% del volume si sono riscontrati effetti positivi sulla qualità.

Una serie di esperienze condotte prevalentemente in Puglia, Sicilia e Sardegna, finalizzate alla razionalizzazione dell'irrigazione sia delle uve da tavola che da vino è ampiamente documentata (Lombardo, 1979; Dettori, 1993; Crescimanno et al. 1989; De Palma et al., 2000). I contributi più recenti riguardano l'applicazione del deficit idrico controllato mediante l'apporto di minori quantitativi di acqua (-45%) rispetto al volume somministrato con la gestione tradizionale, che ha consentito di aumentare significativamente l'acidità titolabile, il contenuto di antociani e dei polifenoli degli acini (tab. 3), senza modificare la quantità di uva prodotta e gli altri parametri macrostrutturali del mosto (Di Lorenzo, comunicazioni personali; Boselli e Di Lorenzo, 2005).

PARAMETRO	VARIAZIONE PERCENTUALE RISPETTO AL REGIME TRADIZIONALE
Produzione uva (t/ha)	-7.2%
Quantità di acqua (mc/ha)	- 45%
Efficienza d'uso dell'acqua (t/mc)	+ 74%
PAR nella zona dei grappoli ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$)	+ 68%
Peso della bacca (g)	- 3%
Zuccheri ($^{\circ}\text{Brix}$)	0
Acidità titolabile (g/l)	+ 22.4
pH	- 3%
Antociani totali (mg/bacca)	+ 15%
Antociani totali (mg/g di uva)	+ 130%

Tab. 3 Risultati conseguiti in Sicilia adottando metodi irrigui mediante Deficit idrico controllato (% rispetto alla irrigazione tradizionale). Fonte: Boselli e Di Lorenzo, 2005

L'utilizzo di diversi metodi di irrigazione (goccia, subirrigazione e micro-getto) combinati con e diversi livelli di restituzione, applicati mediante interventi irrigui in base ai potenziali idrici di base, differenziati in funzione del periodo fenologico (da -0,2 a -0,4 MPa, tra allegagione e invaiatura; da -0,4 a -0,6 MPa, tra l'invaiatura e la maturazione) ha permesso di valutare l'efficienza dei diversi sistemi sia sulla produzione che sulla qualità delle uve, confermando che moderati livelli di stress consentono di raggiungere i migliori risultati (Santalucia et al., 2005). Questi risultati ottenuti su "Cabernet sauvignon" necessitano di essere ulteriormente verificati e i metodi di somministrazione idrica più promettenti, quali la subirrigazione, validati anche su altri vitigni e condizioni pedoclimatiche.

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La viticoltura italiana, per acquisire maggiore competitività sul mercato mondiale necessita di un rinnovamento tecnico in grado di adeguare la produzione alle esigenze di mercato nazionale e internazionale. La modernizzazione degli impianti viticoli riguarda sia la scelta del materiale genetico (portinnesto, vitigno, clone), sia le tecniche di impianto e di gestione del vigneto, tra le quali risulta di particolare rilievo la gestione delle risorse idriche. In particolare la scelta del vitigno varia in funzione della sua qualità potenziale, dall'ambiente di coltivazione, dell'adattamento alle tecniche colturali, e anche degli aspetti commerciali. Attualmente in Italia si assiste a due tendenze che potrebbero

sembrare contrapposte ma che a una analisi più attenta appaiono compatibili. In altre parole nelle zone aventi tradizione viticola si utilizzano in gran parte vitigni tipici della zona (vitigni locali), ai quali vengono affiancati sempre con maggiore frequenza una serie di vitigni alloctoni, per la produzione di vini da tavola o IGT. Tale introduzione non è sempre preceduta da un'adeguata valutazione della loro risposta alle diverse situazioni pedoclimatiche della nostra penisola e in particolare al clima semi-arido. A queste tendenze si aggiunge il rinnovato interesse per la coltivazione di alcuni vitigni locali, che in alcune zone specifiche potrebbero offrire l'opportunità di differenziare e tipizzare le produzioni vitivinicole. Ciò suggerisce l'opportunità di approfondire le conoscenze sul comportamento dei diversi vitigni, in diverse zone pedoclimatiche e in particolare di valutare la loro risposta alle tecniche di gestione in deficit idrico controllato. Tale esigenza scaturisce a seguito di numerose evidenze sperimentali sulle risposte della vite agli stress ambientali riguardanti il comportamento "quasi-isoidrico" o "anisoidrico" dei vitigni (Shultz, 2003) e ai meccanismi di fotoinibizione e "down-regulation" della fotosintesi (Silvestroni et al., 2005), fenomeno legati a caratteristiche morfo-fisiologiche che necessitano di essere ulteriormente approfonditi per guidare meglio gli interventi di tecnica colturale.

Oltre a questa problematica si sente l'esigenza di indagare maggiormente sulla messa a punto di metodi in grado consentire una più agevole quantificazione dello stato idrico della pianta e quindi del momento in cui effettuare l'intervento irriguo e possibilmente stabilire con quale frequenza e intensità. Nonostante alcuni miglioramenti al metodo di stima dei livelli di stress (tab. 4) siano stati recentemente proposti sulla base della sperimentazione condotta nel nostro paese (Boselli e Di Lorenzo, 2005), notevoli difficoltà permangono nel trasferimento di queste conoscenze nella gestione diretta dell'irrigazione. Alcune prospettive sono offerte dai metodi di rilevamento in continuo che di recente sono stati sperimentalmente introdotti nella vite (Massai, 2005), per i quali una ulteriore sperimentazione potrebbe consentire di monitorare continuamente lo stato del vigneto e di automatizzare la gestione dell'impianto di irrigazione.

Dall'esame della letteratura è emerso che la restrizione idrica precoce ha effetti importanti sulla dimensione dell'acino e anche sul contenuto delle componenti fenoliche, che appaiono in gran parte influenzate da effetti di concentrazione. Maggiore attenzione si incentra sul deficit idrico moderato prima o dopo l'invaiaatura, anche se difficilmente generalizzabile, in quanto ritenuto responsabile di un più elevato rapporto buccia/polpa, dell'aumento del contenuto di antociani e della polimerizzazione dei tannini, con possibi-

LIVELLO DI STRESS IN TERMINI DI POTENZIALI DI BASE (MPa)	EFFETTI SULL'ATTIVITÀ VEGETATIVA	EFFETTI SULL'ATTIVITÀ RIPRODUTTIVA	CONSIDERAZIONI
Allegagione-Invaiaitura			
0 -0,3	Crescita vegetativa sostenuta ed intensa	Andamento normale della fase 1 della crescita delle bacche	Possibili problemi connessi ad un elevato vigore da non favorire con l'irrigazione
-0,3 -0,5	Crescita vegetativa rallentata coerente con la curva normale di crescita (asse-femminelle)	Andamento rallentato della fase 1 di crescita delle bacche. Riduzione del volume	Stato idrico da mantenere e gestire in relazione all'obiettivo produttivo, enologico e qualitativo
> -0,5 (?)	Alterazioni anche gravi nella fisiologia delle foglie (fotosintesi, traspirazione).	Alterazioni gravi nello sviluppo della fase 1 di crescita delle bacche (< numero di cellule e pareti cellulari meno elastiche) e nei metaboliti principali del mosto.	Da evitare con corretta gestione dell'irrigazione, eventualmente con eliminazione apici in crescita e diradamenti precoci.
Invaiaitura-Maturazione			
0 -0,3	Crescita sostenuta a carico soprattutto delle femminelle. Rallentamento nei processi di maturazione del legno	Rapido ed intenso aumento di volume delle bacche. Metabolismo proteico. Rallentamento nei processi di accumulo degli zuccheri	Problemi connessi all'eccessivo vigore. Evitare di stimolare l'attività vegetativa delle piante
-0,3 -0,5	Crescita vegetativa rallentata coerente con la curva normale di crescita (asse-femminelle)	Influenza nella distensione cellulare delle bacche (fase 3). Concentrazione di metaboliti primari. Condizione idonea per la biosintesi dei metaboliti secondari	Stato idrico da gestire in relazione all'obiettivo enologico e qualitativo

Tab. 4 *Possibili effetti di intervalli di livelli critici suggeriti per i periodi Allegagione-Invaiaitura e Invaiaitura-Maturazione. Fonte Boselli e Di Lorenzo, 2005.*

li miglioramenti delle caratteristiche del vino. Va sottolineato che variando le caratteristiche della materia prima, appare necessario individuare caso per caso la tecnologia di vinificazione più rispondente al fine di ottenere un vino dalle caratteristiche desiderate.

L'utilizzo dell'irrigazione della vite in deficit idrico controllato permette di far risparmiare acqua, consentendo adeguati livelli produttivi e un miglioramento della qualità del vino negli ambienti caratterizzati da incostante o scarsa piovosità estiva. L'applicazione di tale tecnica richiede, tuttavia, adeguate

conoscenze fisiologiche per elaborare le strategie di intervento nonché la soluzione dei seguenti aspetti critici che possono limitarne la generalizzazione:

- la risposta sito specifica e vitigno specifica;
- la messa a punto dei livelli critici o di soglia di intervento;
- la eventuale validazione di nuovi sistemi per il monitoraggio dello stato idrico o di stress delle piante.

In considerazione degli effetti sullo sviluppo e sulla qualità del vino e dell'uva la gestione idrica del vigneto assume quindi una funzione cruciale all'interno della produzione integrata anche per garantire un razionale utilizzo delle risorse idriche e del territorio. L'interesse quasi generalizzato ad ampliare la gamma dei vitigni da affiancare alle varietà autoctone rende indispensabile l'approfondimento delle conoscenze sulle relazioni idriche su un ampio numero di cultivar al fine di giungere a una migliore valorizzazione delle loro potenzialità. Tali obiettivi sono prioritari nelle zone viticole dell'Italia centro meridionale e peninsulare, caratterizzate da limitate precipitazioni estive, dove la necessità di aumentare la qualità del vino a causa della concorrenza nazionale e internazionale è sempre maggiore.

RINGRAZIAMENTI

Lavoro condotto nell'ambito del progetto MIUR 2003 "Strategie per il miglioramento della qualità in viticoltura mediante la gestione dello stress idrico".

RIASSUNTO

L'esame della letteratura relativa alle ricerche condotte sull'attuazione delle strategie di irrigazione in deficit idrico (PRD) ha permesso di focalizzare l'attenzione su deficit idrico controllato (RDI). Negli ultimi anni il concetto di deficit idrico controllato è stato impiegato per sviluppare soluzioni pratiche per la gestione dello sviluppo vegetativo e riproduttivo della vite mediante l'impiego di sistemi di micro-irrigazione in grado di sincronizzare l'applicazione di precisi volumi idrici. Attualmente la tecnica dell'RDI, applicata in molte zone del mondo per aumentare la qualità dei vitigni a bacca rossa, consiste nel sottoporre a un breve periodo di stress idrico la bacca subito dopo l'allegagione al fine di controllarne la dimensione, oltre a regolare lo sviluppo vegetativo, cui segue, eventualmente, un breve periodo di stress idrico imposto dopo l'invaiaitura per favorire l'accumulo di antociani nell'acino. La restrizione idrica precoce (a partire dall'allegagione) tende ad aumentare maggiormente il contenuto di antociani rispetto a quella tardiva (dopo l'invaiaitura) soprattutto per effetto di diluizione dei componenti. Il più elevato rapporto buccia/polpa ottenibile con stress moderati prima o dopo l'invaiaitura

può determinare un più elevato livello di antociani nel vino grazie al probabile incremento dei fenomeni di copigmentazione riscontrabili nel vino nella fase di affinamento. In questi casi si può beneficiare dell'effetto favorevole indotto dal moderato stress con una macerazione più prolungata. La restrizione idrica precoce (a partire dall'allegagione) tende ad aumentare maggiormente il contenuto di polifenoli rispetto a quella tardiva (dopo l'invaiaura) soprattutto per effetto di diluizione dei componenti. I vari composti fenolici sono tuttavia variamente influenzati. Stress precoci determinano un calo della concentrazione dei tannini totali, mentre stress tardivi li aumentano, determinando anche un più elevato grado di polimerizzazione. L'utilizzo dell'irrigazione della vite non va considerato un fattore negativo per la qualità negli ambienti a scarsa piovosità estiva. Il deficit idrico controllato, attraverso l'induzione di uno stress moderato permette di far risparmiare acqua consentendo adeguati livelli produttivi ed elevata qualità del prodotto. L'applicazione di tali tecniche richiede tuttavia adeguate conoscenze fisiologiche per la messa a punto della strategia di intervento. Notevole difficoltà si incontra per stabilire il momento di intervento e il "livello di soglia" dello stress moderato, data la variabilità della risposta in funzione dell'ambiente del tipo di suolo del sistema di allevamento e del vitigno. Per giungere a ulteriori miglioramenti della tecnica di gestione si ritiene opportuno approfondire le ricerche sul comportamento dei vitigni e sulla messa a punto di nuovi indici per il monitoraggio dello stato idrico o di stress delle piante.

BIBLIOGRAFIA

- ANCONELLI S. e BATTILANI A. (2000): *Use of leaf temperature to evaluate grapevine (Vitis vinifera) yield and quality response to irrigation*, «Acta Horticulturae», 537, III International Symposium on Irrigation of Horticultural.
- ARAUJO F. J., WILLIAMS L. E., GRIMES D.W., MATTHEWS M.A. (1995): *A comparative study of young "Thompson Seedless" grapevines under drip and furrow irrigation. I. Root and soil water distribution*, «Scientia Hort.», 60, pp. 235-249.
- AZEVEDO-OPAZO C., ORTEGA-FARIAS S., MORENO Y. (2004): *Effect of Three levels of water application during post-setting and post-veraasion over vegetative development, productivity and grape quality on cv. Cabernet sauvignon*, «Acta Horticulturae», 646, International Symposium on Irrigation and Water Relations in Grapevine and Fruit Trees.
- BARBAGALLO M. G., DI LORENZO R., COLLEGANO G., SOTTILE I. (1996): *Effect of water regime on canopy characteristics in grapevine*, Proc. 9th GESCO Meeting, pp. 203-208.
- BARCELÒ J. M., ESCALONA J. M., FLEXAS J., SAVÈ R., MEDRANO H. (1998): *Variety effect on water relations changes in response to drought in field grown grapevines*, Gescos Changins-Suisse, 26-28 maggio, pp. 25-29.
- BATTILANI A. (2000): *Application of the regulated deficit of irrigation to grapevines (Vitis vinifera) in sub-humid area*, «Acta Horticulturae», 537, III International Symposium on Irrigation of Horticultural.
- BATTILANI A. e MANNINI P. (2000): *Grapevine (vitis vinifera), yield and quality response to irrigation*, «Acta Horticulturae», 537, III International Symposium on Irrigation of Horticultural.
- BEHBOUDIAN M. H. e SINGH Z. (2001): *Water relation and irrigation scheduling in grapevine*, «Horticultural Reviews», 27, pp. 189-225.
- BERGQVIST J. N., DOKOOZLIAN N., EBISUDA (2001): *Sunlight exposure and temperature ef-*

- fects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the Central San Joaquin valley of California*, «Am. J. Enol. Vitic.», 52, pp. 1-7.
- BOSELLI M. E DI LORENZO R. (2005): *Ruolo dell'irrigazione nella moderna viticoltura: vantaggi e criticità*, in *La viticoltura italiana nello scenario internazionale: aspetti tecnici scientifici*, Firenze, 7-8 novembre, in corso di stampa.
- BOULTON R. (2001): *The copigmentation of anthocyanins and its role in the color of red wine: a critical review*, «Am. J. Enol. Vitic.», 52, pp. 67-87.
- BRAVDO B. A. (2000): *Irrigation of temperate fruit trees in dry and warm condition*, Erez, A. Ed. temperate fruit crops in warm climates Kluwer Academy Publisher Dodrecht, The Netherlands, p. 463.
- BRAVDO B. A. (2005): *Physiological mechanisms involved in the production of non-hydraulic root signals by partial rootzone drying. A review*, «Acta Horticulturae», 689, VII Symposium on Grapevine Physiology and Biotechnology.
- BRAVDO B. A. E NAOR A. (1996): *Effects of water regime on productivity and quality of fruit and wine*, «Acta Hort.», 427, pp. 15-26.
- BRAVDO B. A., HEPNER Y., LOINGER C., CHOEN S., TABACMAN H. (1985): *Trickle irrigation management for grape production*, in Proc. 3rd Int. Drip/Trickle Irrig. Congr., Fresno, CA, 18 - 21 novembre. ASAE Publ. 10 - 85 Vol. I. ASAE, St. Joseph, MI, pp. 204 - 211.
- BRAVDO B. A., NAOR A., ZAHAVI T., GAL Y. (2004): *The effects of water stress applied alternately to part of the wetting Z along the season (PRD- Partial Rootzone Drying) on wine quality, Y and water relation of red wine grapes*, «Acta Hort.», 664, pp. 101-106.
- CALÒ A., COSTACURTA A., GIORGESSI F., UBIGLI M. (2002): *Importance de l'humidité du sol sur les équilibres végétatifs et productifs des vignes et sur la qualité des vins*, «Riv. Vitic. Enol.», n. 1 pp. 25-37.
- CARBONNEAU A. (1987) : *Stress modère sur feuillage induit par le système de conduite et regulation photosynthétique de la vigne*, OIV, Section IV, pp. 376-385.
- CARBONNEAU A. (1998) : *Aspects qualitatifs*, Traité d'irrigation, pp. 258-276.
- CARBONNEAU A. (2002): *Gestion de l'eau dans le vignoble: théorie et pratique*, Progrès Agricole et Viticole, n. 119, pp. 455-467.
- CARBONNEAU A. (2003) : *Qualità potenziale del raisin: modello pratico d'evaluation*, GESCO XIII Jornadas, 3-8 febbraio.
- CARBONNEAU A., DELOIRE A., COSTANZA P. (2003): *Le potentiel hydrique foliaire: sens des différentes modalités de mesure*, GESCO XIII Jornadas, 3-8 febbraio.
- CARTER G. A. E KNAPP A. K. (2001): *Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration*, «Am. J. Botany», 88, pp. 677-684.
- CHALMERS Y. M., DRY P. R., DOWNEY M. O., LOVEYS R., KRSTIC M. P. (2005): *Impact of sustained deficit irrigation on berry size and composition of Shiraz and Cabernet Sauvignon grapes*, International Workshop on Advances in Grapevine and Wine Research.
- CHONÉ X., VAN LEEUWEN C., DUBOURDIEU D., GAUDILLÈRE J. P. (2001): *Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status*, «Annals of Botany», 87, pp. 477-483.
- COLLINS M. J., BARLOW E. W. R., WOOD R., KELLEY G., FUENTES S. (2005): *Physiological, growth, yield and quality responses of "Shiraz" berries manipulated using PRD and drip irrigation*, «Acta Horticulturae», 689, VII Symposium on Grapevine Physiology and Biotechnology.

- COWAN I. R. (1965): *Transport of water in the soil plant atmosphere system*, «J. Appl. Ecol.», 2, pp. 221-239.
- CRESCIMANNO G., DI LORENZO R., OCCORSO G., SOTTILE I. (1989): *Ulteriori considerazioni sull'andamento dei potenziali idrici nel sistema terreno-pianta-bassa atmosfera in viti allevate a contropalliera ed a tendone*, «Vignevini», n. 9, pp. 47-54.
- DAVIS W. J. e ZHANG J. (1991): *Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil*, «Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology», 42, pp. 55-76.
- DAVIS W. J., BACON M. A., THOMPSON D.S., SOBEITH W., RODRIGUEZ G. (2000): *Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: Exploitation of the plant chemical signaling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture*, «Journal of Experimental Botany», 51, pp. 1617-1626.
- DAVIS W. J., TARDIEU F., TREJO C. L. (1994): *How to chemical signals work in plants that grow in drying soil?*, «Plant Physiology», 104, pp. 309-314.
- DAVIS W. J., WILKINSON S., LOVEYS B. (2002): *Stomatal control by chemical signaling and exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in Agriculture*, «New Phytologist», 153, pp. 449-460.
- DAWSON T. E. (1993): *Hydraulic lift and water use by plants: implication for water balance performance and plant-plant interactions*, «Oecologia», 95, pp. 565-574.
- DE PALMA L., SPANO D., NOVELLO V., DI LORENZO R. (2000): *Esigenze idriche di Vitis vinifera L. in ambiente caldo-arido*, «Riv. Di Irr. e Dren», 47, pp. 21-29.
- DELOIRE A., FEDERSPIEL B., OJEDA H., WANG Z., COSTANZA P., CARBONNEAU A. (2003): *La vigne et l'eau*, GESCO XIII Jornadas, 3-8 febbraio.
- DELOIRE A., LOPEZ F., CARBONNEAU A. (2002): *Response de la vigne et terroir: elements pour une méthode d'étude*, «Progrés Agricole et Viticole», n. 4, pp. 78-86.
- DETTORI S. (1993): *Influenza del regime idrico sullo sviluppo e la maturazione della bacca nel vitigno "Nuragus"*, «Vignevini», n. 20, pp. 77-81.
- DOS SANTOS T. P., LOPES C. M., RODRIGUES M. L., DE SOUZA C., MAROCO J. P., PEREIRA J. S., SILVA J. R., CHAVES M. M. (2003): *Partial rootzone drying: effects on growth and fruit quality of field-grown grapevines (Vitis vinifera)*, «Functional Plant Biology», n. 30, pp. 663-671.
- DRY P. R. e LOVEYS B. R. (1998): *Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying*, «Aust. J. Grape and wine Res.», 4, pp. 140-148.
- DRY P.R., LOVEYS B. R. STOLL M., STEWART D., MCCARTY M. G. (2000): *Partial rootzone drying - an update*, «Aust. Grapegrower & Winemaker», 438a, pp. 35-39.
- DURING H., DRY P.R., LOVEYS B.P. (1996): *Root signals affect water use efficiency and shoot growth*, «Acta Hort.», 427, pp. 1-13.
- ESCALONA J. M., FLEXAS J., SCHULTZ H. R., MEDRANO H. (1999): *Effects of moderate irrigation on aroma potential and other markers of grape quality*, «Acta Hort.», 493, pp. 261-267.
- ESTEBAN M. A., VILLANUEVA M. J., LISSARGUE J. R. (2001): *Effect of irrigation on changes in the anthocyanin composition of the skin of cv Tempranillo (Vitis vinifera L.) grape berries during ripening*, «J. Sci. Food Agric.», 81, pp. 409-420.
- FERREYRA R. E., SELLES G., PERALTA J. A., VALENZUELA J. B. (2004): *Effects of water stress applied at different development periods of Cabernet Sauvignon on production and Wine quality*, «Acta Horticulturae», 646, International Symposium on Irrigation and Water Relations in Grapevine and Fruit Trees.
- FINDLAY N., OLIVER K. J., NU N., COOMBE B. G. (1987): *Solute accumulation by grape*

- pericarp cells. IV. Perfusion of pericarp apoplast via the pedical and evidence for xylem malfunction in ripening berries*, «J. Exp. Bot.», 38, pp. 668-679.
- FLEXAS J., ESCALONA J. M., MEDRANO H. (1999): *Water stress induces different levels of photosynthesis and electron transport rate regulation in grapevines*, «Plant, Cell and Environment», n. 22, pp. 39-48.
- GAUDILLÈRE, J. P., VAN LEEUWEN C., OLLAT N. (2002): *Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status*, «J. Exp. Bot.», 53, pp. 757-763.
- GHOLAMI M. (2004): *Biosynthesis of anthocyanins in Shiraz grape berries*, «Acta Horticulture», 640, Living with limitations XXVI International Horticultural Congress.
- GINESTAR C., EASTHAM J., GRAY S., ILAND P. (1998): *Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. I. Effects of post-veraison water deficits on water relations, vine growth, and yield of Shiraz grapevines*, «Am. J. Enol. Vitic.», n. 4.
- GIORGESSI F., CALÒ A., TOMASI D., CATALANO V. (2001): *Bilan hydrique: une méthode proposée pour l'évaluation des réserves hydriques dans le zonage viticole*, «Riv. Vitic. Enol.», n. 1, pp. 3-15.
- GIULIVO C. (2000): *Basi biologiche dell'irrigazione e della fertilizzazione del vigneto*, «Irrigazione e Drenaggio», n. 47, pp. 8-14.
- GOMEZ DEL CAMPO M., RUIZ C., SOTES V., LISSARRAGUE J. R. (1999): *Water consumption in grapevines: influence of leaf area and irrigation*, «Acta Hort.», 493, pp. 279-286.
- GOODWIN I. (1995): *Irrigation of vineyard: a winegrape grower's guide to irrigation scheduling and regulated deficit irrigation*, Agriculture Victoria, Tatura Australia.
- GOODWIN S. D. E JERIE P. (1992): *Effects of trickle irrigation intervals on distribution and utilization of soil moisture in vineyard*, «Soil Science Society of American Proceedings», 35, pp. 127-130.
- GREENSPAN M., SCHULTZ H., MATTHEWS M. A. (1996): *Field evaluation of water transport in grape berries during water deficits*, «Physiol. Plantarum», 97, pp. 55-62.
- GREENSPAN M.D., SHACKEL K. A., MATTHEWS M. A. (1994): *Developmental changes in the diurnal water budget of the grape berry exposed to water deficits*, «Plant, Cell and Environment», n. 17, pp. 811-820.
- GU S., DU G., ZOLDOSKE D., HAKIM A., COCHARAN R., FUGELSANG K., JORGENSEN G. (2004): *Effects of irrigation amount on water relations, vegetative growth, yield and fruit composition of Sauvignon blanc grapevines under partial rootzone drying and conventional irrigation in the San Joaquin Valley of California, USA*, «Journal of Horticulture Scienze e Biotechnology», n. 1, pp. 26-33.
- HARDIE W. J. E CONSIDINE J. A. (1976): *Response of grape to water-deficit stress in particular stage of development*, «Am. J. Enol. Vitic.», 27, pp. 55-61.
- HARDIE W. J. E MARTIN S. R. (1990): *A strategy for vine growth regulation by soil water management*, Proc. 7th Aust. Wine Ind. Techn. Conf. Adelaide SA, 13-17 August 1989, pp. 51-57.
- HATFIELD J. L. (1990): *Measuring plant stress with an infrared thermometer*, «HortSci.», 25, pp. 1535-1538.
- HEPNER Y., BRAVDO B., LOINGER C., CHOEN S., TABACMAN H. (1985): *Effects of drip irrigation schedules on growth, yield, must composition and wine quality of Cabernet Sauvignon*, «Am. J. Enol. Vitic.», n. 36, pp. 77-85.
- HSIAO T. C. (1973): *Plant responses to water stress. Annual review of plant physiology*, n. 24, pp. 519-590.
- HUGUET J.G. (1985): *Appreciation de l'état hydrique d'une plante a partir des variations*

- micrometriques de la dimension des fruits on des tiges au cours de la journée*, «Agronomie», 5, pp. 733-741.
- HUNTER J. J. E MYBURGH P. A. (2001): *Bases ecophysiologiques pour la gestion de l'eau des vignes en Afrique du sud, avec référence particuliere aux limites de l'environnement (première partie)*, GESCO, Montpellier 3-7 juillet.
- HUNTER J. J. E MYBURGH P. A. (2001): *Bases ecophysiologiques pour la gestion de l'eau des vignes en Afrique du sud, avec référence particuliere aux limites de l'environnement (suite et fin)*, GESCO, Montpellier 3-7 juillet
- IACONO F. E PETERLUNGHER E. (1996): *Rootstock-scion interaction may effect drought tolerance in Vitis vinifera cultivars. Implications in selected cultivars*, «Acta Hort.», 493, pp. 543-549.
- KENNEDY J. A., MATTHEWS M. A., WATERHOUSE A. L. (2002): *Effect of maturity and vine water status on grape skin and wine flavonoids*, «Am. J. Enol. Vitic.», n. 53, pp. 268-274.
- KLEWER W. M., FREEMAN B. M., HOSSOM C. (1983): *Effect of irrigation, crop level and potassium fertilization on Carignane vines. I. Degree of water stress and effect on growth and yield*, «Am. J. Enol Vitic.», 34, pp. 186-196.
- KRAMER P. J. E BOYER J. S. (1995): *Water relation of plant and soil*, Academic Press.
- LANG A. E THORPE M. R., (1989): *Xylem, phloem and transpiration flows in a grape: application of a technique for measuring the volume of attached fruits to high resolution using Archimede's principle*, «J. Exp. Bot.», 40, pp. 1069-1078.
- LOMBARDO V. (1979): *Esperienze sull'irrigazione della vite allevata a tendone nella Sicilia occidentale*, Nota I: influenza dell'epoca e del numero di interventi irrigui sulla produttività di quattro varietà di vite ad uva bianca, «Vignevini», n. 6, pp. 47-54.
- LOPES C. M. A. (1999): *Relationships between leaf water potential and photosynthetic activity of field-grown grapevines under a mediterranean environment*, «Acta Hort.», 493, pp. 287-292.
- LOVEYS B. (2000): *Using irrigation management to improve the water use efficiency of horticultural crops*, «Land Management», 1, pp. 31-33.
- LOVEYS B. R., STOLL M., DRY P. R., MACCARTHY M. (2000): *Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops*, «Acta Hort.», 537, pp. 187-197.
- LOVISOLO C. E SCHUBERT A. (1998): *Effects of water stress on vessel size and xylem hydraulic conductivity in Vitis vinifera L.*, «J. Exp. Bot.», 49, pp. 693-700.
- MAPFUMO E. D., ASPINAL D., HANCOCK T. W. (1994): *Growth and development of roots of grapevine (Vitis vinifera L.) in relation to water uptake from soil*, «Ann. Bot.», n. 74, pp. 75-85.
- MASSAI R. (2005): *Determinazione delle esigenze idriche nelle colture arboree da frutto*, Innovazione nel miglioramento qualitativo della produzione nelle specie legnose da frutto attraverso l'irrigazione, Accademia dei Georgofili, giornata di studio 24 novembre.
- MASSAI R. E REMORINI D. (1999): *L'agrometeorologia per il monitoraggio dei consumi idrici*, Comparazione tra alcuni indicatori dello stress idrico nel pesco In Convegno Nazionale: Sassari, 3-4 Novembre, pp. 219-227.
- MATTHEWS M. A. (2005): *Initial observations on the berry size and yield pradigns of winegrape quality*, International Workshop on Advances in Grapevine and Wine Research, Venosa 15-17 settembre, p. 29.
- MATTHEWS M. A. E ANDERSON M. M. (1988): *Fruit ripening in Vitis vinifera L. responses to seasonal water deficit*, «Amer. J. Enology and Viticulture», 39, pp. 313-320.
- MATTHEWS M. A. E ANDERSON M. M. (1989): *Reproductive development in grape (Vitis*

- vinifera L.*): responses to seasonal water deficit, «Amer. J. Enology and Viticulture», 40, pp. 52-60.
- MATTHEWS M. A., ANDERSON M. M., SCHULTZ H. R. (1987): *Phenolic and growth response to early and late season water deficit in Cabernet Franc*, «Vitis», 26, pp. 147-160.
- MATTII G. B. E ORLANDINI S. (2004): *Misura della fotosintesi su pianta intera: due casi di studio*, Quaderni di Viticoltura ed Enologia dell'Università di Torino, 27.
- MAUREL C. E CHRISPEELS M. J. (2001): *Aquaporins. A Molecular Entry into Plant Water Relations*, «Plant Physiology», 125, pp. 135-138.
- MCCARTHY M. G. (1997): *The effects of transient water deficit on berry development of cv Shiraz*, «Aust. J. Grape and Wine Res.», 3, pp. 102-108.
- MEDRANO H., ESCALONA J. M., CIFRE J., BOTA J., FLEXAS J. (2003): *A ten-year study on the physiology of two Spanish grapevine cultivars under field condition: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality*, «Functional Plant Biology», 30, pp. 607-619.
- MIRANDA O., LIOTTA M., CORNEJO R. (2004): *Superior seedless table grape evapotranspiration under arid climates conditions*, «Acta Horticulturae», 646, International Symposium on Irrigation and Water Relations in Grapevine and Fruit Trees.
- MORTON L. T. E JACKSON L. E. (1988): *Myth of the universal rootstock: the fads and facts of rootstock selection*, Proceedings of the Second International Symposium for Cool Climate Viticulture and Oenology, 15-18 gennaio.
- NAOR A. E WAMPLE R. L. (1994): *Gas exchange and water relations in field-grown Concord (Vitis labruscana Bailey) grapevines*, «Am. J. Enol. Vitic.», 45, pp. 333-337.
- NAOR A., GAL Y., BRAVDO B. (1997): *Crop load affects assimilation rate, stomata conductance, stem water potential and water relations of field-grown Sauvignon blanc grapevines*, «J. Exp. Bot.», 48, pp. 1675-1680.
- NOVELLO V. E DE PALMA L. (1997): *Genotype rootstock and irrigation influence on water relations, photosynthesis and water use efficiency in grapevine*, «Acta Hort.», 449, pp. 467-473.
- OJEDA H. (1999): *Influence de la contrainte hydrique sur la croissance du péricarpe et sur l'évolution des phénols des baies de raisin (Vitis vinifera L.) cv. Syrah*, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, p. 161.
- OJEDA H., ANDARY C., KRAEVA E., CARBONNEAU A., DELOIRE A. (2002): *Influence of pre and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of Vitis vinifera cv. Shiraz*, «American Journal of Enology and Viticulture», 53, p. 4.
- OJEDA H., DELOIRE A., CARBONNEAU A. (2001) : *Influence of water deficit on grape berry growth*, «Vitis», 40 (3), pp. 141-145.
- OJEDA H., LEBON E., ROMIEU C., CARBONNEAU A., ANDARY C., DELOIRE A. (1998): *Relations entre le stress hydrique et la croissance des baies de Vitis vinifera L. cv. Syrah. Evolution des phénols*. GESCO XIème journées du groupe européen d'étude des systèmes de conduite de la vigne, Sicilia Italie, 6-12 giugno, pp. 185-192.
- ORTEGA-FARIAS S. O., AVEVEDO C. (2004): *Irrigation scheduling in vineyards (VII Region of Chile) by using time domain reflectometry*, «Acta Horticulturae», 646: International Symposium on Irrigation and Water Relations in Grapevine and Fruit Trees.
- PETERLUNGER E., SIVILOTTI P., BONETTO C., PALADIN M., COLUSSI V. (2004): *Effetto dello stress idrico sulla qualità polifenolica dell'uva cv. Merlot*, «Quad. Vitic. Enol. Univ. Torino», n. 27, pp. 46-66.
- PETERLUNGER E., SIVILOTTI P., BONETTO C., PALADIN M. (2002): *Lo stress idrico induce*

- cambiamenti nella concentrazione di polifenoli in uve e vini della cv. merlot*, «Riv. vitic. enol.», n. 1.
- PONI S. (2000): *La sensibilità della vite agli stress idrici*, «Riv. di Irr. e Dren.», n. 4, pp. 37-42.
- PONI S., BERNIZZONI F., CASALINI L. (2005): *Irrigazione parzializzata su vite*, «L'informatore Agrario», n. 38, pp. 73-79.
- PONI S., LASKO A. N., TURNER J. R., MELIOUS R. E. (1993): *The effects of pre- and post veraison water stress on growth and physiology of potted Pinot noir grapevines at varying crop levels*, «Vitis», 32, pp. 207-214.
- PUDNEY S. E. MCCARTHY M. G. (2004): *Water use efficiency of grapevines (Chardonnay) subjected to partial rootzone drying and deficit irrigation*, «Hacta Hortic.», 664, pp. 567-573.
- REBUCCI B. (1994): *Meccanismi di accumolo dei soluti nel corso della crescita e della maturazione in Vitis vinifera L.*, «Quaderni Scuola di Specializzazione in Viticoltura ed Enologia», 18, pp. 169-187.
- REYNOLDS A. G., POOL R. M., MATTICK L. (1986): *Influence of cluster exposure on fruit composition and wine quality of Seyval blanc grapes*, «Vitis», 25, pp. 85-95.
- RICCOMAGNO N., CARRA A., SCHUBERT A. (2004): *Espressione dei geni biosintetici dei polifenoli nell'acino di vite in relazione alla concentrazione di zuccheri e aba*, «Quaderni di Viticoltura ed Enologia dell'Università di Torino», 27.
- RICHARDS D. (1983): *The grape root system*, «Hort. Rev.», n. 5, pp. 127-168.
- ROGIER S. Y., SMITH J. A., WHITE R., KELLER M., HOLZAPFEL B. P., VIRGONA J. M. (2001): *Vascular function in berries of Vitis vinifera L. cv. Shiraz*, «Austr. J. of Grape and Wine Res.», 7, pp. 47-51.
- SALON J. L., MENDEZ J. V., CHIRIVELLA C., CASTEL J. R. (2004): *Irrigation and wine quality of Vitis vinifera cv. Bobal in Requena. Spain*, «Acta Horticulturae», 646, International Symposium on Irrigation and Water Relations in Grapevine and Fruit Trees.
- SALON J. L., MENDEZ J. V., CHIRIVELLA C., CASTEL J. R. (2004): *Response of Vitis vinifera cv. Bobal and Tempranillo to deficit irrigation*, «Acta Horticulture», 640, Living with limitations XXVI International Horticultural Congress.
- SANTALUCIA G., BARBAGALLO M. G., COSTANZA P., DI LORENZO R., PISCIOTTA A. (2005): *Vegetative and productive behaviour in Vitis vinifera L. (cv. Cabernet sauvignon) under non irrigated vines and moderate water stress level in different irrigation systems*, International Workshop on Advances in Grapevine and Wine Research.
- SANTESTEBAN L. G., MIRANDA C., ROYO J. B. (2005): *Regulated deficit irrigation effects in cv. Tempranillo vineyards grown under semiarid conditions in mid-ebro river valley (Spain)*, International Workshop on Advances in Grapevine and Wine Research.
- SCHMID J. E. SCHULTZ H. R. (2000): *Influence of two training systems and irrigation on water consumption of grapevines in the field*, «Acta Horticulturae», 537: III International Symposium on Irrigation of Horticultural.
- SCHULTZ H. R. (1996): *Water relations and photosynthetic responses of two grapevine cultivars of different geographical origin during water stress*, «Acta Hort.», 427, pp. 251-266.
- SCHULTZ H. R. (2003): *Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown Vitis vinifera L. cultivars during drought*, «Plant, Cell and Environment», n. 26, pp. 1393-1405.
- SCHULTZ H. R. E. MATTHEWS M. A. (1988): *Vegetative growth distribution during water deficits in Vitis vinifera L.*, «Austral. J. Plant Physiol.», 15, pp. 641-656.
- SCHULTZ H. R. E. MATTHEWS M. A. (1993): *Xylem development and hydraulic conduct-*

- ance in sun and shade shoot of grapevine (Vitis vinifera L.): evidence that low light uncouples water transport capacity from leaf area*, «Planta», n. 190, pp. 312-319.
- SILVESTRONI O., MATTIOLI S., NERI D. (2005): *Down-regulation of photosynthetic activity for Field-grown Grapevines*, «Acta Horticulturae», 689: VII Symposium on Grapevine Physiology and Biotechnology.
- SILVESTRONI O., MATTIOLI S., MANNI E., NERI D., SABBATINI P., PALLIOTTI A. (2004): *Seasonal dry matter production in field-grown Sangiovese and Montepulciano grapevines (Vitis vinifera L.)*, «Acta Horticulture», 640, Living with limitations XXVI International Horticultural Congress.
- SIPIORA M. J. E GRANDA M. G. (1998): *Effects of pre-veraison irrigation cutoff and skin contact time on the composition, color and phenolic content of young Cabernet sauvignon wines in Spain*, «Am. J. Enol. Vitic.», 49, pp. 152-162.
- SMART R. E. E COOMBE B. G. (1983): *Water relations of grapevines*, in *Water deficits and plant growth*, vol. II, pp. 137-196.
- SOUZA C. R., MAROCO J. P., CHAVES M. M., SANTOS T., RODRIGUEZ A. S., LOPES C., RODRIGUES M. L., PEREIRA J. S. (2004): *Effects of partial root drying on the physiology and production of grapevines*, «Acta Horticulturae», 646, International Symposium on Irrigation and Water Relations in Grapevine and Fruit Trees.
- SPANO D., DUCE P., SNYDER R. L., PAW U K. T., FERREIRA M. I. (2000): *Estimating tree and vine evapotranspiration with emphasis on surface renewal*, «Acta Horticulturae», 537, III International Symposium on Irrigation of Horticultural.
- SPRING J. L. (1998): *Comportement physiologique des cépages Chasselas, Sylvaner, Gamay et Pinot noir dans les conditions sèches du Valais central*, Xeme Gesco, Changins-Suisse, 26-28 maggio, pp. 60-66.
- STEUDLE E. (2001): *The cohesion-tension mechanism and the acquisition of water by plant roots*, «An. Rev. Plant Physiol. and Plant Mol. Biol.», 52, pp. 847-875.
- STOLL M., LOVEYS B., DRY P. (2000): *Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine*, «Journal of Experimental Botany», 51, pp. 1627-1634.
- STORCHI P., COSTANTINI E. A. C., BUCELLI P. (2005): *The influence of climate and soil on viticulture and enological parameters of Sangiovese grapevine under non-irrigated conditions*, «Acta Horticulturae», 689, VII Symposium on Grapevine Physiology and Biotechnology.
- TANDONNET J. P., OLLAT N., NEVEUX M., RENOUX J. L. (1999): *Effects of three levels of water supply on the vegetative and reproductive development of Merlot and Cabernet Sauvignon grapevines*, «Acta Hort.», 493, pp. 301-307.
- TYREE M. T., DIXON M. A. (1986): *Water stressed induced cavitation in some woody plants*, «Plant Physiol.», 74, pp. 1046-1049.
- VALLONE R. C., NIJENSOHN L., CAVAGNARO J. B., MERLO E. E., MAFFEI J. A., OJEDA H., MENDOZA E. E. A. (2004): *Validation of simple biological indicator of plant water status to determine irrigation timing of grapevines*, «Acta Horticulturae», 646: International Symposium on Irrigation and Water Relations in Grapevine and Fruit Trees.
- VAN ZYL J. L. (1984): *Responce of Colombard grapevine to irrigation as regards quality aspects and growth*, «S. Afr. J. Enol. Vitic.», 5, pp. 19-28.
- VITA SERMAN F., LIOTTA M., PARERA C. (2004): *Effects of irrigation deficit on table grape cv. Superior seedless production*, «Acta Horticulturae», 646: International Symposium on Irrigation and Water Relations in Grapevine and Fruit Trees.
- WAMPLE R. L. (2000): *In "Deficit Irrigation Practices"*, FAO Water Reports n. 22, ISBN 92-5-104768-5.

- WILLIAMS L. E. (2001): *Irrigation of grapevines in California*, «Practical winery and vineyard magazine», Nov-Dec 2001, p. 42.
- WILLIAMS L. E., MATTHEWS M. A. (1990): *Grapevine*, in *Irrigation of Agricultural Crops*, Agronomy Monograph n. 30. ASA-CSSA-SSSA, 677 South Segoe Road, WI 53711, USA.

L'irrigazione in deficit controllato in olivicoltura

I. INTRODUZIONE

L'olivo è la coltura arborea da frutto più resistente alla carenza idrica per cui può sembrare paradossale discutere di irrigazione in olivicoltura. In realtà, non lo è per una serie di motivi. Innanzitutto, negli ultimi venti anni l'irrigazione si è diffusa negli oliveti finalizzati alla produzione da olio, e ciò è avvenuto non soltanto nei nuovi impianti intensivi ma anche in quelli tradizionali precedentemente non irrigati. Gli impianti irrigui sono presenti soprattutto nelle regioni dell'Italia meridionale e insulare ove il lungo periodo di aridità estiva limita notevolmente la produttività dell'oliveto. Stime recenti indicano che il 14,8% delle aziende olivicole del centro-nord e il 39,4% di quelle del sud sono dotate di un sistema di irrigazione. In Puglia, Sicilia e Sardegna la presenza di impianti irrigui è rispettivamente del 63, 43 e 40%, in Toscana del 13% (D'Auria, 2004).

In secondo luogo, data la notevole diffusione dell'irrigazione, è di fondamentale importanza ottimizzare l'uso dell'acqua, risorsa sempre più scarsa e preziosa nelle regioni olivicole italiane. Alla luce delle attuali conoscenze è possibile sviluppare protocolli di gestione irrigua per l'olivicoltura in modo da ottenere la massima efficienza di utilizzazione dell'acqua, cioè minimizzando il consumo di acqua per unità di prodotto.

Il terzo motivo sta nel fatto che l'irrigazione modifica il contenuto di umidità del suolo e lo stato idrico dell'albero che, a loro volta, risentono della varia-

* *Dipartimento di Coltivazione e Difesa delle Specie Legnose "G. Scaramuzzi", Sezione di Coltivazioni Arboree, Università degli Studi di Pisa*

** *Dipartimento di Scienze Economico-estimative e degli Alimenti, Sezione di Tecnologie e Biotecnologie degli Alimenti, Università degli Studi di Perugia*

bilità annuale delle condizioni ambientali. Conoscere le risposte fisiologiche e agronomiche dell'albero all'irrigazione consente di comprendere l'effetto del regime pluviometrico e termico sulle diverse componenti della produttività dell'oliveto e, quindi, di intervenire tempestivamente, con opportune scelte di tecnica colturale, durante il periodo di sviluppo del frutto.

Infine, vi è da tener conto dell'evoluzione del concetto di qualità degli oli vergini di oliva degli ultimi anni, che oggi include aspetti di natura merceologica, nutrizionale e sensoriale. I mutamenti avvenuti nei gusti e nelle aspettative dei consumatori sono stati recepiti dalla legislazione europea con i Regolamenti UE 2568/91 e 1513/01. L'alta concentrazione di acido oleico non è più una caratteristica esclusiva dell'olio vergine di oliva, poiché diverse nuove varietà di girasole e colza hanno una composizione in acidi grassi simile. Ciononostante, l'olio vergine di oliva è da considerarsi tuttora esclusivo per la sua composizione in componenti minori. Queste sostanze, presenti solo per il 2% circa del peso dell'olio, sono oltre 230 e comprendono alcoli alifatici e triterpenici, steroli, idrocarburi, composti volatili e antiossidanti, questi ultimi rappresentati da caroteni, tocoferoli e composti fenolici idrofili.

Nel presente lavoro si esaminano principalmente due aspetti innovativi dell'irrigazione in olivicoltura, quali le strategie di irrigazione in deficit controllato e gli effetti sulla qualità dell'olio. Oltre a riportare le attuali conoscenze, si includono dei risultati inediti ottenuti in un biennio di prove condotte in Toscana (tab. 1), da cui emerge in modo evidente il ruolo che lo stato idrico dell'albero ha sulla qualità dell'olio. Sulla base di questi dati è, a nostro avviso, possibile oggi parlare di "irrigazione qualitativa" anche per l'olivo, ovvero dell'utilizzazione dell'acqua per fini prevalenti di miglioramento o diversificazione della qualità dell'olio, concetto peraltro già affermato in altre filiere produttive.

2. IRRIGAZIONE IN DEFICIT CONTROLLATO

Per irrigazione in deficit controllato si intende la gestione dell'irrigazione mediante la somministrazione di volumi di acqua inferiori al fabbisogno evapotraspirativo giornaliero della pianta, in modo da indurre condizioni transitorie di deficit idrico e ottenere dei benefici economici. Le strategie di irrigazione in deficit controllato furono messe a punto principalmente per il controllo dello sviluppo vegetativo in alberi da frutto alla fine degli anni 1970 (Chalmers et al., 1981), e successivamente affinate per migliorare la qualità del frutto e ridurre il consumo di acqua (Behboudian e Mills, 1997; Mitchell et al., 1986).

ANNO	IRRIGAZIONE	ALBERI (N)	PIWP CUMULATO (- Mpa d)	PRODUZIONE DI OLIVE (kg/albero)	PRODUZIONE DI OLIO (kg/albero)	PESO FRESCO DEL FRUTTO (g)
2003	FI	18	97	23,357	3,184	2,30
	DI	18	180	17,843	3,219	1,72
	SI	18	269	9,003	1,943	1,29
	LSD (0,05)			2,300	0,556	0,25
2004	FI	14	112	34,212	4,320	1,99
	DI	14	189	28,190	2,877	1,52
	SI	14	291	18,556	2,000	1,38
	LSD (0,05)			5,360	1,189	0,18

Tab. 1. *Principali condizioni sperimentali, produzione e peso medio del frutto nell'oliveto (cv. Leccino) impiantato a un sesto di 6 x 3,8 m nel 1998 in un terreno sabbioso-argilloso a Bibbona (LI) nel biennio 2003-04. Il periodo irriguo durò dal 30 giugno al 10 settembre 2003 e dal 1 luglio al 14 ottobre 2004. Il potenziale idrico fogliare cumulato, misurato al termine del periodo notturno, (PIWP) fu calcolato nel periodo 7-20 settimane dopo la piena fioritura (DPF) nel 2003 e 3-20 settimane DPF nel 2004. Il peso medio fu determinato alla raccolta, avvenuta 21 e 20 settimane DPF rispettivamente nel 2003 e 2004, su 100 drupe campionate casualmente nei diversi settori della chioma di ciascun albero a circa 1,5 m dal suolo. I dati di produzione e peso del frutto sono medie di 6 e 8 alberi rispettivamente nel 2003 e 2004. Le differenze minime significative (LSD) tra le medie sono state calcolate, ove possibile, dopo l'analisi della varianza per un disegno sperimentale split-plot. Legenda: FI, alberi irrigati reintegrando l'evapotraspirato giornaliero; DI, alberi irrigati in deficit controllato; SI, alberi irrigati solo con interventi di soccorso.*

L'applicazione di strategie irrigue in deficit controllato in olivicoltura è recente e risale agli anni 1990 (Alegre, 2001; Alegre et al., 2002; Goldhamer, 1999; Goldhamer et al., 1994). La scarsità delle risorse idriche negli ambienti di coltivazione dell'olivo spesso impedisce di soddisfare per intero la domanda evapotraspirativa dell'oliveto irriguo durante la stagione di crescita. Il problema sta nel regolare correttamente l'intensità e la durata del deficit in base allo stadio fenologico e all'andamento climatico stagionale, per evitare significative perdite di produzione e scadimenti qualitativi.

Le diverse strategie di irrigazione in deficit controllato dell'oliveto sono riconducibili ai seguenti modelli:

1. irrigazione in deficit regolato (RDI). Il deficit viene indotto in determinati stadi fenologici, raggiungendo punte massime durante il periodo di elevata domanda evapotraspirativa. Nella stagione autunno-invernale le piogge reintegrano le riserve idriche del suolo portando il potenziale idrico dell'albero a valori pressoché ottimali;
2. il deficit idrico viene mantenuto a livelli costanti durante tutta la stagione di crescita mediante il dosaggio controllato dei volumi irrigui e il monitoraggio dello stato idrico dell'albero o dell'umidità del suolo;
3. irrigazione in deficit sostenuto (SDI). La quantità di acqua erogata con l'irrigazione è inferiore all'evapotraspirazione, ma a un livello predeterminato in modo da ottenere un aumento progressivo del deficit durante la stagione di crescita e costringere l'albero a utilizzare la riserva di acqua disponibile del suolo.

Senza entrare nel merito degli aspetti strettamente fisiologici, dal punto di vista produttivo le fasi in cui porre maggiore attenzione per evitare condizioni di carenza idrica sono la fioritura, l'allegagione, la fase iniziale di rapida crescita del frutto e il periodo di accumulo di olio nella drupa.

Nei climi dell'Italia centrale è raro che si verifichino condizioni di deficit idrico severo durante la fioritura e l'allegagione, mentre ciò avviene nelle regioni meridionali e insulari per cui è opportuno prevedere interventi irrigui prima e durante tali stadi fenologici. Spesso è necessario iniziare la stagione irrigua poco dopo il germogliamento per evitare che la riserva idrica nel suolo si riduca considerevolmente o si esaurisca.

Durante la fase iniziale di sviluppo del frutto (prime 6 settimane dopo la piena fioritura) un'adeguata disponibilità idrica serve a non inibire i processi di divisione, distensione e differenziazione cellulare nel mesocarpo. In tale periodo è necessario irrigare anche per attenuare gli effetti delle elevate temperature e dell'assenza di precipitazioni. Durante la fase di rapido accumulo di

olio nella polpa, che di solito inizia a metà agosto e si protrae fino alla fine di ottobre, la disponibilità di acqua serve per assicurare che la crescita dell'oliva e l'inoliazione avvengano in maniera ottimale.

Il maggior numero di prove sperimentali sull'irrigazione in deficit controllato in pieno campo è stato effettuato in Spagna. In Catalogna sono stati condotti sia esperimenti di SDI, in cui venivano erogati volumi idrici pre-determinati in base a coefficienti colturali mantenuti costanti durante la stagione irrigua (Girona et al., 2002), che di RDI (Alegre, 2001; Alegre et al., 2002) Girona et al. (2002), in un triennio di prove in un giovane oliveto, ottennero la massima produzione di olive e di olio con valori del coefficiente colturale rispettivamente di 0,71 e 0,64. Le prove di RDI confrontarono, invece, tesi in cui olivi secolari, disposti a un sesto di 9,7 x 9,7 m, ricevevano il 25, 50 o 75% dell'evapotraspirato giornaliero nel periodo tra il completamento della sclerificazione del nocciolo e fine settembre, con alberi a cui veniva restituito tutto l'evapotraspirato giornaliero (Alegre et al., 2002). In Andalusia (Moriana et al., 2003) misero a confronto diverse strategie di irrigazione in deficit (RDI, SDI, o irrigazione solo nell'anno di carica) sulla cv. Picual per un triennio e determinarono la risposta produttiva su un ampio arco di consumi idrici in modo da definire i volumi ottimali in funzione del prezzo dell'olio e del costo dell'irrigazione. In Aragona furono valutati sia gli effetti produttivi che sulla qualità dell'olio di regimi SDI (0, 33, 66 e 100% dell'evapotraspirato giornaliero) in un oliveto adulto impiantato a un sesto di 6,5 x 6,5 m (Faci et al., 2002a).

In California sono state svolte sia delle prove di RDI (irrigato con quantitativi pari al 16, 25 o il 44% del controllo in giugno e luglio, identificati come mesi di massima resistenza al deficit per l'olivo) che di SDI (Berenguer et al., 2004; Goldhamer, 1999; Goldhamer et al., 1994) in oliveti delle cv. Manzanillo e Arbequina.

In Italia esperimenti di SDI (0, 33, 66, 100% dell'evapotraspirato giornaliero) sono stati effettuati in un giovane oliveto con tre diverse cultivar da mensa in Campania (Patumi et al., 1999). Più recentemente prove di irrigazione in deficit controllato, in cui il deficit era regolato sia in base all'evapotraspirazione che al potenziale idrico fogliare misurato prima dell'alba, sono state effettuate per due anni in un giovane oliveto intensivo della cv. Leccino in provincia di Livorno con l'obiettivo di sviluppare protocolli di gestione dell'irrigazione a fini prevalenti di ottimizzazione della qualità dell'olio e di efficienza di utilizzazione dell'acqua (tab. 1). Le tesi a confronto erano tre: una irrigata in modo da soddisfare per intero il fabbisogno idrico degli alberi, la seconda irrigata in modo da mantenere un deficit idrico controllato all'in-

terno di una banda di oscillazione predeterminata del potenziale idrico fogliare notturno e la terza irrigata solo con interventi di soccorso (Gucci, 2004).

3. DEFICIT IDRICO E FIORITURA

Il deficit idrico influisce sia sul numero che sulla qualità dei fiori. Dal punto di vista quantitativo la scarsa disponibilità idrica nel suolo riduce il numero di infiorescenze e la percentuale di allegagione (Beede e Goldhamer, 1994). Entrambi questi fattori, insieme a eventuali fenomeni di cascola durante lo sviluppo del frutto, determinano il numero di drupe presenti sull'albero alla raccolta, una delle principali componenti della produttività dell'olivo.

Per quanto riguarda la qualità dei fiori, il deficit idrico aumenta il numero di fiori imperfetti (Goldhamer e Beede, 2005) e l'incidenza dell'aborto dell'ovario, mentre poco si conosce sulla crescita dell'ovario o sullo sviluppo e longevità dell'ovulo. Tuttavia, in prove di SDI sulla cv. Manzanillo non sono state riscontrate differenze nella percentuale di fiori perfetti (cioè dotati stami e pistilli ben conformati e sviluppati), densità delle infiorescenze e percentuale di allegagione tra otto tesi irrigate con quantitativi di acqua compresi tra 0,25 e 1,3 del controllo (Metheney et al., 1994). Da prove condotte in un oliveto intensivo in provincia di Livorno non sono emerse differenze nella percentuale di fiori perfetti, sulla percentuale di rami fertili (cioè con almeno un'infiorescenza) e nel numero di infiorescenze per branchetta nella primavera successiva a quella in cui erano stati imposti tre diversi regimi irrigui (tabb. 1 e 2). È interessante notare che il numero di infiorescenze per ramo fertile è aumentato significativamente nella tesi che ha ricevuto nel 2003 soltanto alcuni interventi di soccorso (tab. 2), probabilmente per via di una ridotta emissione di nuovi germogli causata dalla carenza idrica. La data di ritorno in piena fioritura risultò anticipata di due giorni nel 2004 per la tesi con interventi di soccorso rispetto alle due irrigate, confermando il leggero ritardo indotto da regimi irrigui elevati riportato da Metheney et al. (1994). È probabile, quindi, che il numero e la qualità dei fiori subiscano una diminuzione solo quando il deficit idrico diventa così severo, per intensità e durata, da superare dei valori soglia ancora ignoti.

4. IRRIGAZIONE, QUALITÀ DEL FRUTTO E PRODUTTIVITÀ DELL'OLIVETO

La disponibilità idrica nel suolo nel corso della stagione di crescita altera lo sviluppo del frutto. È comunemente accettato che l'oliva cresce secondo una

TESI IRRIGUA	TOTALE RAMI PER BRANCHETTA	RAMI CON INFIORESCENZE	RAMI FERTILI (%)	INFIORESCENZE PER BRANCHETTA	INFIORESCENZE PER RAMO FERTILE	INDICE DI MATURAZIONE
FI	33,6	31,7	94,5	338	11,4	3,5
DI	25,6	25,2	98,7	345	14,1	3,1
SI	24,2	23,4	97,2	364	16,6	3,9
LSD (0,05)	7,56	7,26	4,60	92,4	3,50	0,22
LSD (0,01)	10,91	10,45	6,61	132,7	5,03	0,30

Tab. 2. Effetto del regime irriguo nel 2003 sui parametri di fioritura e sulla maturazione delle drupe di olivi (cv. Leccino) nel 2004. I dati sono stati rilevati su quattro branchette per albero, orientate secondo i punti cardinali, il 31 maggio 2004. L'indice di maturazione è stato calcolato alla raccolta in base al colore dei tessuti di 100 drupe (Hermoso et al., 1998). Le differenze minime significative (LSD) tra le medie ($n = 8$) sono state calcolate dopo l'analisi della varianza per un disegno sperimentale split-plot. Legenda: FI, tesi irrigata reintegrando l'evapotraspirato giornaliero; DI, irrigata in deficit idrico controllato; SI, irrigata solo con interventi di soccorso.

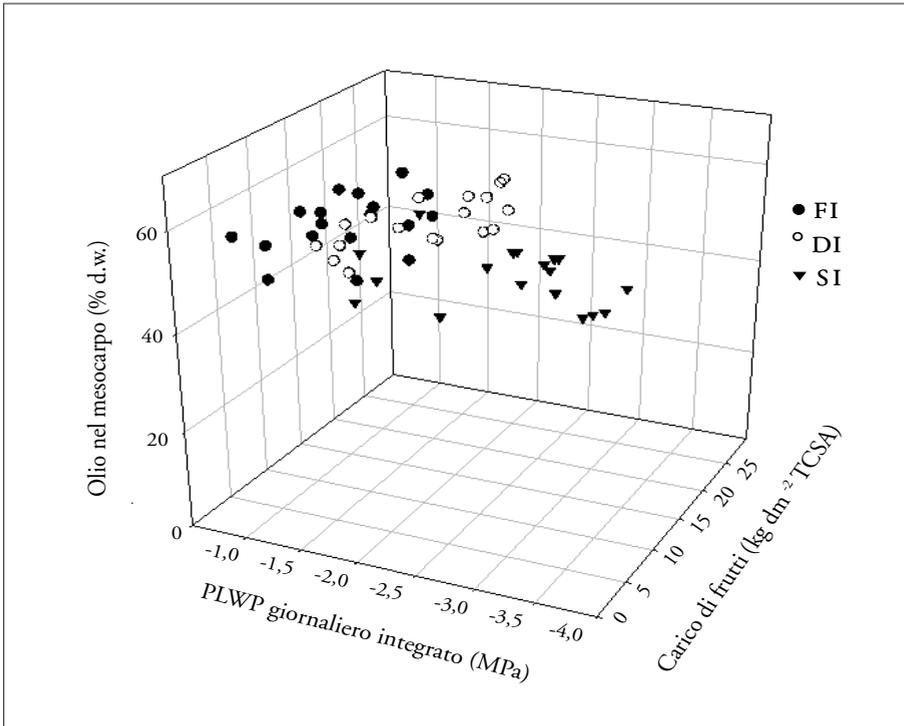


Fig. 1. L'effetto congiunto dello stato idrico dell'albero, espresso come potenziale idrico fogliare misurato al termine del periodo notturno (PLWP) integrato, e del carico di frutti (in peso fresco per dm^2 di area della sezione trasversale del tronco), sul contenuto in olio nel mesocarpo su base di peso secco nel 2003. La raccolta fu effettuata 21 settimane dopo la piena fioritura. Ciascun dato indica un albero. Legenda: FI, alberi irrigati reintegrando l'evapotraspirato giornaliero; DI, alberi irrigati in deficit controllato; SI, alberi irrigati solo con interventi di soccorso

curva a doppia sigmoide, con due periodi distinti di crescita elevata separati da una fase di crescita meno intensa, ma in realtà fattori climatici o di tecnica colturale possono modificare l'andamento. Ad esempio, in condizioni non limitanti di acqua nel suolo, la curva di crescita presenta un andamento quasi lineare, con solo una modesta flessione nella fase centrale. Tuttavia, le condizioni prevalenti di scarsa disponibilità idrica nel periodo estivo determinano una curva a doppia sigmoide, tanto più evidente quanto più severo il deficit idrico e prolungato il periodo di aridità.

L'irrigazione migliora i parametri di qualità del frutto, quali la pezzatura e il rapporto polpa-nocciolo. Il peso fresco di olive di alberi irrigati è maggiore rispetto a quello di olivi non irrigati, mentre il peso secco non necessariamente aumenta (Alegre et al., 2002; Costagli et al., 2003). In prove di RDI sulla

CULTIVAR	EFFETTO SUL RAPPORTO POLPA-NOCCIOLA	IRRIGAZIONE	AUTORE
Ascolana Tenera Kalamata Nocellara del Belice	= = =	SDI (0, 33, 66, 100% dell'Et _e) 80 mm acqua in 4 volte da 60 d DPF	Patumi et al., 1999
Carolea	+	Da 1 a 3 interventi di soccorso	Inglese et al., 1996
Souri	=	Da 1 a 3 interventi di soccorso	Lavee et al. 1990
Nocellara del Belice	+ nel 1980 = nel 1981	Da 1 a 3 interventi di soccorso	Baratta et al., 1986
Olia Manna	+	SDI (33, 66, 100% dell'Et _e)	Milella e Dettori, 1986
Arbequina	= nel 1996/97 + nel 1998	RDI (50, 25% vs. 100, 75%)	Alegre et al., 2002
Leccino Frantoio	+ =	Irrigato vs. non irrigato	Gucci et al., 2004a
Leccino	+	100 vs. RDI 50% dell'Et _e da 4 a 9 settimane DPF	Rapoport et al., 2004
Frantoio	=	Irrigato vs. non irrigato	Costagli et al., 2003

Tab. 3. *Effetto dell'irrigazione sul rapporto polpa-nocciolo in diverse varietà di olivo da vari autori. Legenda: RDI, irrigazione in deficit controllato, SDI, irrigazione in deficit sostenuto; DPF, dopo la piena fioritura; Et_e, evapotraspirato effettivo.*

cv. Arbequina il peso fresco del frutto diminuì significativamente solo al livello irriguo del 25%, mentre rimase invariato rispetto agli alberi pienamente irrigati per le tesi 50 e 75% (Alegre et al., 2002). Moriana et al. (2003) non trovarono sostanziali variazioni nel peso fresco del frutto confrontando alberi (cv. Picual) irrigati con diverse strategie in deficit con altri irrigati reintegrando il fabbisogno evapotraspirativo giornaliero. Negli esperimenti da noi effettuati di irrigazione in deficit controllato sulla cv. Leccino in Toscana il peso fresco del frutto diminuì al diminuire del regime irriguo in entrambi gli anni (tab. 1). Differenze significative nel peso fresco di tre cultivar da mensa furono anche riportate da Patumi et al. (1999). Analizzando l'effetto dello stato idrico sullo sviluppo dei tessuti del frutto risulta che l'endocarpo è meno sensibile, sia in termini di peso fresco che di secco, del mesocarpo. Ne risulta che l'irrigazione consente di produrre frutti con un elevato rapporto mesocarpo-endocarpo (polpa-nocciolo), un importante fattore di qualità non solo per le varietà da mensa ma anche per quelle da olio dato che l'olio si accumula nel mesocarpo. Tuttavia, a secondo della strategia irrigua e dei volumi

idrici erogati il rapporto polpa-nocciolo può aumentare o rimanere invariato, come evidente dalla tabella 3 in cui sono sintetizzati i risultati di diversi lavori sperimentali.

L'accumulo di olio nel mesocarpo avviene in maniera sensibile a partire dal completamento dell'indurimento dell'endocarpo. In generale, un'elevata disponibilità idrica determina un contenuto di olio nella drupa almeno pari a quello di alberi che hanno sofferto di carenza idrica (fig. 1; Alegre, 2001; Alegre et al., 2002; Costagli et al., 2003; Patumi et al., 1999). Lo stadio fenologico in cui si verificano condizioni di stress idrico per l'albero è cruciale per il processo di inoliazione nella drupa. La diminuzione della resa in olio ottenuta ad alti regimi irrigui è spesso dovuta alla minore estraibilità dell'olio dalla drupa in fase di trasformazione e al fatto di esprimere il contenuto in olio su base di peso fresco invece che di peso secco (Alegre et al., 2002; Berenguer et al., 2004). Nei due anni di prova sulla cv. Leccino abbiamo riscontrato che il contenuto in olio su base di peso secco del mesocarpo aumentò al diminuire del grado di deficit idrico sopportato durante il periodo di sviluppo del frutto.

La curva di risposta della produzione di olive o di olio all'evapotraspirato di un oliveto adulto presenta un andamento quasi lineare a bassi livelli di consumo idrico e poi si appiattisce descrivendo un ramo di parabola con la concavità verso il basso (Moriana et al., 2003). La produttività dell'acqua fu stimata pari a 22 kg di frutti ha⁻¹ mm⁻¹ a bassi valori di evapotraspirazione (450-550 mm) e a circa 9 kg ha⁻¹ mm⁻¹ a elevati valori (750-850 mm) nelle condizioni climatiche dell'Andalusia (Moriana et al., 2003). Ciò significa che i maggiori benefici produttivi si hanno per piccoli apporti idrici soprattutto nelle zone olivicole aride e spiega i notevoli risultati ottenuti con l'irrigazione di soccorso (Lavee et al., 1990).

In generale, il risparmio idrico conseguito con la gestione dell'irrigazione in deficit controllato si traduce in diminuzioni più contenute nella produzione di olio (0-25%) che in quella di olive (tab.1; Alegre et al., 2002; Berenguer et al., 2004; Motilva et al., 2002; Moriana et al., 2003). Girona et al. (2002) stimarono il coefficiente colturale ottimale per la produzione di olio pari a circa 0,6, inferiore a quello determinato per la produzione di olive. Analogamente, Berenguer et al. (2004) in prove di SDI sulla cv. Arbequina ottennero la massima produzione di olio per albero a livelli irrigui compresi tra il 40 e il 71% dell'evapotraspirato.

Rimane ancora incerto quale sia la migliore strategia irrigua in deficit per l'oliveto per conseguire la massima efficienza produttiva dell'albero, anche perché pochi studi si sono cimentati in tale ambito. Ad esempio, non sono

TESI IRRIGUA	ACIDITÀ (% ACIDO OLEICO)	NUMERO DI PEROSSIDI (meq O, kg ⁻¹)	COMPOSTI FENOLICI (mg kg ⁻¹)	ORTODIFENOLI (mg kg ⁻¹)
FI	0,20	4,7	306	150
DI	0,22	3,5	449	217
SI	0,27	5,5	513	252
LSD (0,05)	0,078	0,94	120	61
LSD (0,01)	0,109	1,30	166	84

Tab. 4. *Acidità libera, numero di perossidi, contenuto in composti fenolici e in ortodifenoli dell'olio ottenuto da olivi (cv. Leccino) soggetti ai seguenti regimi irrigui nel 2004: a) irrigazione pari all'evapotraspirato giornaliero (FI); b) irrigazione in deficit controllato (DI); c) irrigata solo con interventi di soccorso (SI). L'olio è stato prodotto da un campione di 5 kg di olive a stadio di maturazione 4, determinato in base alla colorazione delle drupe (Hermoso et al., 1998), utilizzando un frantoio sperimentale (Gucci et al., 2004b). I dati sono medie di sei repliche. Le differenze minime significative (LSD) tra le medie (n = 6) sono state calcolate dopo analisi della varianza per un disegno sperimentale split-plot.*

state riportate differenze significative nella produzione di olio in oliveti irrigati in deficit regolato o in deficit sostenuto nell'arco di un triennio (Moriani et al., 2003). Gli stessi autori, però, conclusero che il metodo molto diffuso di irrigare gli oliveti adulti con alti volumi (pari a circa l'evapotraspirato giornaliero) nell'anno di carica e di non irrigare nell'anno di scarica era irrazionale perché i risultati produttivi di un biennio furono inferiori a quelli di oliveti irrigati con strategie RDI o SDI.

5. IRRIGAZIONE E QUALITÀ DELL'OLIO: PARAMETRI ANALITICI

I diversi aspetti della qualità sono riconducibili alla peculiare composizione chimica degli oli vergini di oliva che è caratterizzata da una frazione saponificabile e dai composti minori. La frazione saponificabile comprende i trigliceridi che costituiscono più del 98% dell'olio. Gli acidi grassi, che costituiscono i composti più importanti di questa frazione, sono alla base del valore nutrizionale "storico" dell'olio extra-vergine di oliva. In passato, infatti, la qualità salutistica di questo alimento era attribuita all'alto livello di acido oleico, riconosciuto da diversi studi epidemiologici come elemento importante per la prevenzione delle malattie cardiovascolari.

Gli antiossidanti naturali dell'olio vergine di oliva sono i composti che, da un punto di vista nutrizionale, possono essere maggiormente correlati alla qualità dell'olio. Tra questi, i composti fenolici idrofili sono presenti esclusivamente nell'olio vergine di oliva che contiene, infatti, oltre a fenil-

ACIDI GRASSI (%)	IM = 3,6		IM = 2,0	
	Irriguo	Asciutto	Irriguo	Asciutto
Palmitico	13,2	13,3	13,2	13,6
Eptadecanoico	0	0,1	0	0
Stearico	2,0	2,1	1,8	2,0
Palmitoleico	1,3	1,3	1,1	1,4
Eptadecenoico	0,1	0,1	0,1	0,1
Oleico	74,9	74,3	77,5	74,4
Linoleico	7,0	7,3	5,0	6,9
Linolenico	0,8	0,8	0,7	0,8
Eicosenoico	0,3	0,3	0,3	0,4
Arachico	0,3	0,3	0,3	0,3

Tab. 5. *Composizione percentuale in acidi grassi di olio ottenuto da olivi (cv. Leccino) di 15 anni (sesto di impianto 4,5 x 2,8 m) irrigati o non irrigati in un terreno sabbioso argilloso a Bibbona (LI) nel 2001. I frutti furono raccolti a un indice di maturazione (IM) di 3,6 (buccia nera) o 2 (buccia verde) determinato secondo il metodo di Hermoso et al. (1998). Gli acidi grassi furono determinati su campione triplo secondo i metodi ufficiali di analisi (European Economic Community, 1991). Modificato da Gucci et al. (2004b).*

acidi e fenil-alcoli, come il 3,4-(diidrossifenil)etanolo (3,4-DHPEA) e il *p*-(idrossifenil)etanolo (*p*-HPEA), diversi derivati dei secoiridoidi glucosidi presenti nella drupa dell'oliva, come la forma dialdeidica dell'acido elenoico legata al 3,4-DHPEA o *p*-HPEA (3,4-DHPEA-EDA o *p*-HPEA-EDA), un isomero dell'oleuropeina aglicone (3,4-DHPEA-EA) e i lignani pinoresinolo e acetossi-pinoresinolo (Servili et al., 2004). I secoiridoidi sembrano svolgere un'azione protettiva nel rischio di trombosi, nel ritardo della comparsa dei danni da aterosclerosi e nella prevenzione di alcune forme tumorali (Servili et al., 2004). In particolare, sono state evidenziate l'inibizione dell'aggregazione delle piastrine del sangue, l'implicazione nella sintesi del tromboxano nelle cellule umane, l'inibizione dell'ossidazione dei fosfolipidi e LDL, l'induzione dell'apoptosi in cellule tumorali.

La quasi totalità dei dati disponibili in letteratura indica che diversi regimi irrigui non influiscono sull'acidità libera, sul numero di perossidi e sugli indici spettrofotometrici dell'olio (Dettori e Russo, 1993; Faci et al., 2002b; Gucci et al., 2004b; Motilva et al., 2000; Patumi et al., 1999; Tovar et al. 2002b). Occasionalmente è stato misurato un più alto numero di perossidi per la tesi pienamente irrigata rispetto alle tesi irrigate in deficit controllato (Tovar et al., 2002b in un anno su tre di sperimentazione; tab. 4 nel 2004, ma non nel 2003), ma vanno considerate eccezioni. Al momento si può concludere che è possibile produrre oli entro i limiti di legge di questi parametri per la cate-

goria degli extra-vergini di oliva indipendentemente dalla condizione idrica dell'albero. Il numero di cultivar provate è abbastanza ampio per considerare questi risultati generalizzabili.

La composizione in acidi grassi dell'olio non sembra risentire molto del regime idrico. Le prove da noi condotte nel biennio 2003-04 e precedenti studi mostrarono che la composizione acidica dell'olio non era influenzata dall'irrigazione (tab. 5 per indice di maturazione = 3,6), confermando risultati ottenuti su altre cultivar in Italia e Spagna (Inglese et al., 1986; Motilva et al., 2000; Patumi et al., 1999; Tovar et al., 2002b). Tuttavia, alcune differenze, piccole ma significative, nella percentuale di acido stearico, acido oleico e acido linoleico furono trovate sulla cv. Arbequina, anche se l'effetto dell'andamento climatico annuale sulla composizione in acidi grassi fu prevalente rispetto a quello del regime idrico (Tovar et al., 2002b). Inoltre, una diminuzione dell'acido oleico fu osservata in olio ottenuto da olive raccolte a un indice di maturazione uguale a due in alberi non irrigati (tab. 5) o in prove di SDI (Faci et al., 2002b).

Allo stato attuale vi è ampia evidenza sperimentale che condizioni di scarsa umidità nel suolo determinano un aumento della concentrazione di composti fenolici idrofili (ed orto-difenolici in particolare), e della stabilità dell'olio rispetto all'ossidazione (Berenguer et al., 2004; Faci et al., 2002b; Motilva et al., 2000; Motilva et al., 2002; Patumi et al., 1999; Tovar et al., 2002b). La minore concentrazione di composti fenolici nell'olio indotta dall'irrigazione è ascrivibile alla loro diminuzione all'interno del mesocarpo dovuta a una minore attività enzimatica della L-fenilalanina amminio-liasi (Patumi et al., 1999; Tovar et al., 2002a). L'aumento della concentrazione di composti fenolici a bassi livelli di irrigazione si verifica indipendentemente dalla strategia di irrigazione in deficit (RDI o SDI).

Nel biennio di sperimentazione svolto in Toscana sulla cv. Leccino si è osservato che la maggiore disponibilità idrica determinava una diminuzione della concentrazione di composti fenolici idrofili e di ortodifenoli nell'olio, mentre la differenza tra le tesi irrigata in deficit (DI) o di soccorso (SI) non era significativa (tabb. 1 e 4). Nel 2003 la concentrazione in composti fenolici dell'olio della tesi pienamente irrigata (FI) era circa la metà di quello delle tesi DI o SI, a parità di indice di maturazione delle olive (Gucci, 2004).

La relazione tra concentrazione in composti fenolici nell'olio e stato idrico dell'albero, espresso come potenziale idrico notturno integrato su tutto il periodo irriguo, nei due anni di sperimentazione è riportata in figura 2. Da questi dati emerge chiaramente che, a parità di altre condizioni, è possibile "dosare" la concentrazione di composti fenolici e di ortodifenoli attraverso la

somministrazione controllata dell'acqua. La concentrazione in composti fenolici nell'olio è inversamente proporzionale allo stato idrico dell'albero, cioè aumenta all'aumentare del grado di carenza idrica, secondo un andamento lineare (fig. 2). Bisogna sottolineare che questi risultati sono stati ottenuti analizzando oli estratti da olive allo stesso grado di colorazione (indice di maturazione uguale a 4), quindi non influenzati dall'effetto che la disponibilità idrica ha sull'andamento della maturazione (vedi anche paragrafo 7). Naturalmente, l'andamento climatico durante la stagione di crescita influisce sulla risposta sia in termini di valori assoluti di concentrazione che di pendenza delle rette di regressione (fig. 2).

Nel 2003 la quantità e composizione delle sostanze volatili con impatto sensoriale risultò simile per le tesi FI e DI, ed entrambe superiori ai valori riscontrati nella tesi SI. A tale proposito bisogna osservare che la disponibilità idrica influisce sui componenti volatili derivati dalla via delle lipossigenasi ed, in particolare, modifica la concentrazione di componenti responsabili della nota di "erbaceo" quali la trans-2-esenale, il trans-2-esen-1-olo e l'1-penten-3-olo. Questo aspetto potrebbe essere legato all'effetto dell'irrigazione sull'espressione dei geni che regolano l'attività degli enzimi responsabili della via delle lipossigenasi.

6. IRRIGAZIONE E QUALITÀ SENSORIALE DELL'OLIO

Le caratteristiche sensoriali sono da ricondurre a tutti quegli aspetti che sono soggetti all'interpretazione dei sensi umani e che rendono l'olio apprezzabile al consumatore. La qualità sensoriale dell'olio vergine di oliva è strettamente correlata sia a composti fenolici, in quanto sostanze d'impatto per il gusto amaro e per il pungente (Servili et al., 2004), sia a composti volatili che ne definiscono l'aroma (Angerosa et al., 2004). Nello spazio di testa di questo alimento, sono stati identificati più di 180 composti volatili ma la loro correlazione con il flavour del prodotto non è ancora completamente conosciuta (Angerosa et al., 2004). Gli studi finora condotti permettono di affermare che l'aroma dell'olio vergine evidenzia note aromatiche molto diverse tra loro, come "fruttato erbaceo", "floreale", "mela verde", "pomodoro", "carciofo", "fieno" e "mandorla" principalmente. Allo stato attuale delle conoscenze è stata documentata solo la relazione tra l'aroma di "fruttato erbaceo" e le aldeidi e gli alcoli saturi e insaturi a C₅ e C₆, che si originano dall'attività della lipossigenasi durante l'estrazione meccanica dell'olio. Dal punto di vista gustativo è stata studiata sia la nota di amaro che di pungente. In questo con-

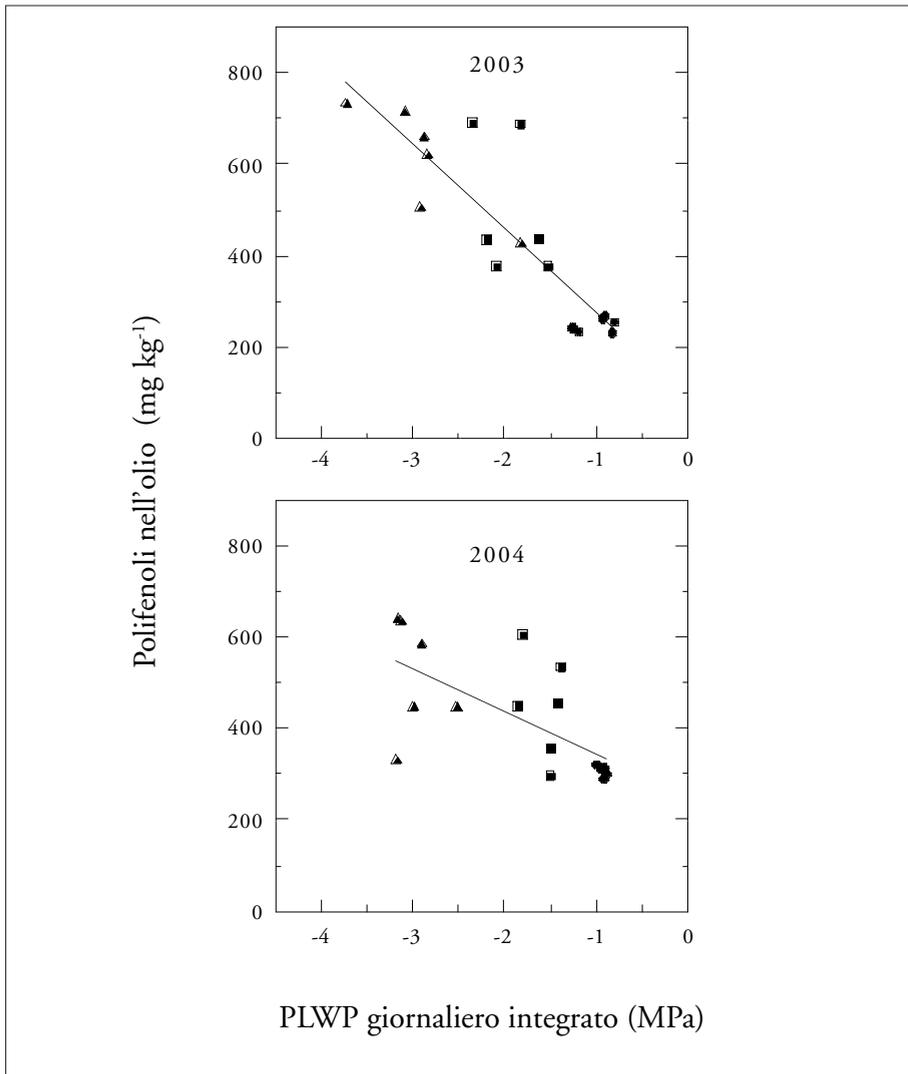


Fig. 2. Variazioni del contenuto in composti fenolici dell'olio in risposta al potenziale idrico giornaliero misurato al termine del periodo notturno (PLWP) con camera a pressione (Costagli et al., 2003) di olivi della cv. Leccino negli anni 2003 e 2004. I dati di potenziale sono stati integrati su tutto il ciclo di sviluppo dei frutti e il valore giornaliero calcolato alla raccolta, avvenuta 21 settimane dopo la piena fioritura. Ciascun dato indica un albero. L'olio è stato ottenuto da un campione di 5 kg di olive a stadio di maturazione 4, determinato in base alla colorazione delle drupe (Hermoso et al., 1998), utilizzando un frantoio sperimentale (Gucci et al., 2004b). I composti fenolici sono stati determinati per via colorimetrica secondo il metodo riportato in Montedoro et al. (1992). Le rette di regressione sono: (2003) $y = 95 - 184,7x$ $R^2 = 0,758$; (2004) $y = 252 - 93,2x$ $R^2 = 0,431$.

testo è stata evidenziata una relazione tra i derivati agliconici del ligustroside quali il p-HPEA-EDA (oleocantale) e la nota di piccante, mentre i derivari dell'oleuropeina quali il 3,4-DHPEA-EDA e il 3,4-DHPEA-EA sono stati messi più strettamente in relazione alla note di amaro (Angerosa et al., 2004; Servili et al., 2004).

Vi è unanimità di risultati sul fatto che l'irrigazione diminuisce il gusto amaro dell'olio. La sensazione di amaro è correlata negativamente con i volumi idrici somministrati, per cui l'amaro è fortemente attenuato in oli ottenuti da tesi irrigate abbondantemente (Berenguer et al., 2004; Patumi et al., 1999; Tovar et al., 2002b). Anche la nota di piccante (Patumi et al., 1999), e in minor misura di fruttato, sembrano inversamente correlate alla quantità di acqua somministrata, almeno entro certi intervalli di volumi idrici erogati (Berenguer et al., 2004). Tovar et al. (2002b) riportano che l'irrigazione produsse oli della cultivar Arbequina meno amari, meno astringenti e meno serbevoli.

Il regime irriguo influisce in modo complesso sul profilo sensoriale completo. Tovar et al. (2002b) assegnarono il maggior punteggio per l'analisi sensoriale a oli monovarietali della cv. Arbequina ottenuti dalla tesi RDI-50% (deficit durante il periodo dall'indurimento del nocciolo alla fine di settembre) e vi riscontrarono caratteristiche note dolci, leggermente piccanti e verdi. Gli oli prodotti dalle tesi RDI-25% e -50% ebbero il maggior punteggio per le sensazioni di verde erbaceo, banana fresca, mela e carciofo. Gli oli ottenuti dalla tesi irrigata al 100% erano meno amari e fruttati di quelli delle tesi RDI. Patumi et al. (1999) non trovarono differenze di fruttato dovute al regime irriguo.

Dalle prove da noi effettuate nel 2003-04 risulta evidente l'attenuazione dell'amaro e del piccante nella tesi pienamente irrigata (FI). Tali oli presentarono un profilo "addolcito" con note evidenti di erbaceo, fruttato, carciofo, floreale e fieno (fig. 3). Le tesi irrigate in deficit o di soccorso produssero oli più piccanti e amari con note erbacee, di mela, di pomodoro e di fieno. La sensazione di fruttato fu più marcata negli oli prodotti dalle tesi DI e SI di quelli ottenuti da tesi FI nel 2003 (fig. 3), ma nessuna differenza fu riscontrata nel 2004.

7. DISPONIBILITÀ IDRICA E MATURAZIONE DELLE OLIVE

La quantità di olio estraibile mostra un andamento diverso in funzione del modello di maturazione dei frutti. Le cultivar a maturazione tardiva, infatti,

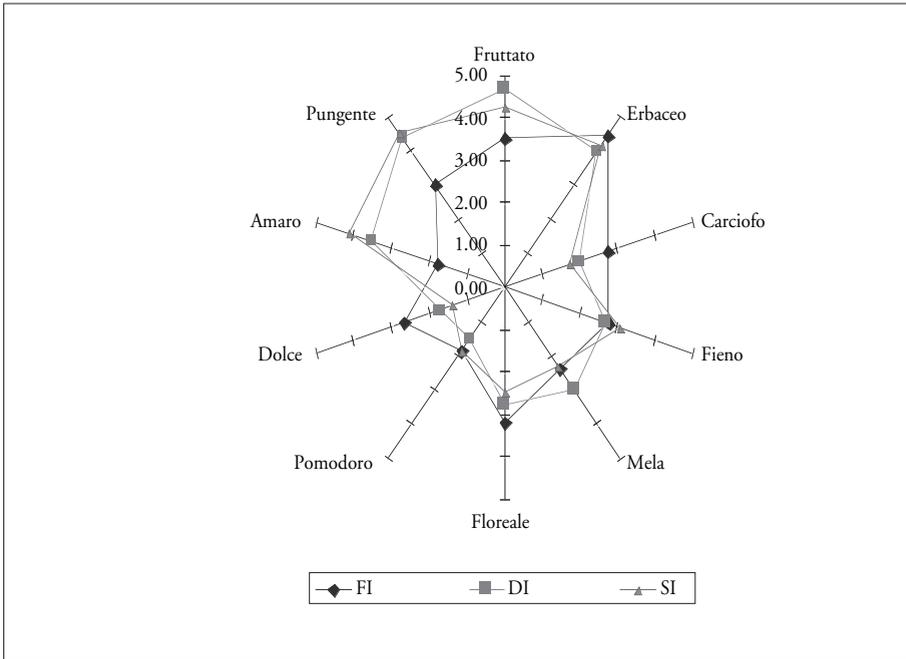


Fig. 3. Profilo delle caratteristiche sensoriali di oli extra-vergini di oliva ottenuti da tre diversi regimi irrigui nel 2003. La valutazione sensoriale degli oli ($n = 6$ per tesi irrigua) è stata effettuata da un gruppo di assaggio composto da otto esperti secondo procedure standard (Servili et al., 1995). Per altre condizioni sperimentali vedi la didascalia della Figura 2. Legenda: FI, alberi irrigati reintegrando l'evapotraspirato giornaliero (irriguo); DI, alberi irrigati in deficit controllato (con deficit); SI, alberi irrigati solo con interventi di soccorso (non irriguo).

raggiungono i massimi livelli in corrispondenza della completa pigmentazione superficiale, diversamente da quelle a maturazione precoce, nelle quali la maggior quantità di olio recuperabile, si ottiene a uno stadio di maturazione più avanzato (Montedoro et al., 2003).

Per quanto riguarda gli aspetti qualitativi va osservato che la composizione acidica varia nel corso della maturazione, con una diminuzione dell'acido palmitico e un aumento dell'acido oleico e dell'acido linoleico per cui il rapporto insaturi/saturi aumenta. Lo stadio di maturazione del frutto influisce anche sulle componenti di interesse sensoriale e salutistico come le sostanze volatili, i composti fenolici e i pigmenti. In particolare si osserva come la maturazione avanzata comporti una riduzione dei composti fenolici del frutto precursori delle sostanze fenoliche dell'olio quali l'oleuropeina glucoside, la demetiloleuropeina e il ligustroside. A tale diminuzione corrisponde un calo del contenuto dei derivati agliconici dei suddetti composti negli oli. Per quel-

lo che riguarda la composizione aromatica, nel corso della maturazione del frutto si assiste a una riduzione delle attività enzimatiche relative alla via della lipossigenasi, il che determina una riduzione delle note di “erbaceo fresco” e di “floreale” negli oli ottenuti da olive molto mature.

L'irrigazione tende a ritardare l'epoca di maturazione dei frutti, come si evince dai più bassi valori dell'indice di maturazione di alberi pienamente irrigati (FI) rispetto a quelli irrigati solo di soccorso (SI) (tab. 2), confermando quanto riportato da Motilva et al. (2000) sulla cv. Arbequina. Berenguer et al. (2004) concludono che l'irrigazione in deficit sostenuto non necessariamente anticipa la colorazione dell'epicarpo, ma sicuramente accelera il processo di pigmentazione una volta iniziato rispetto a piante irrigate abbondantemente. In casi eccezionali di deficit idrico estremo e con produzioni molto elevate rispetto al potenziale fotosintetico e nutrizionale dell'albero si possono verificare ritardi nella maturazione delle drupe in alberi non irrigati a causa dell'inibizione dell'attività fotosintetica e dell'eccessiva competizione per gli assimilati tra i frutti.

In sintesi, la concentrazione di molti costituenti caratterizzanti la qualità organolettica del prodotto aumenta tendenzialmente con l'intensificarsi della pigmentazione fino a raggiungere un livello oltre il quale si rileva un'inversione di tendenza. La fase successiva alla pigmentazione superficiale costituisce un momento di notevole trasformazione fisiologica del frutto, che si traduce in una diminuzione complessiva delle clorofille, dei costituenti volatili e di quelli fenolici e un conseguente appiattimento organolettico del futuro olio. Dato che il regime idrico altera l'andamento della maturazione, è fondamentale che in prove di irrigazione gli oli a confronto siano estratti da olive allo stesso stadio di maturazione, per evitare di attribuire all'irrigazione effetti sulla qualità in realtà causati da differenze di maturazione.

8. INTERAZIONE TRA STATO IDRICO E CARICO DI FRUTTI

Esistono pochi dati sull'effetto congiunto dello stato idrico dell'albero e del carico produttivo sulla qualità dell'olio. La quantità di frutti determina variazioni del volume, del peso fresco, del rapporto polpa-nocciolo e dell'accumulo di olio nella drupa. Meno evidente l'effetto sul peso secco della drupa. Inoltre, produzioni abbondanti producono un minor accumulo di olio nella drupa e ne ritardano la maturazione. In prove condotte sulla cv. Leccino abbiamo determinato che un aumento della produzione da 5 a 25 kg di olive ad albero causava una diminuzione di olio nella drupa alla raccolta (20 settimane DPF) dal 53 al 47% su base di peso secco (fig. 1).

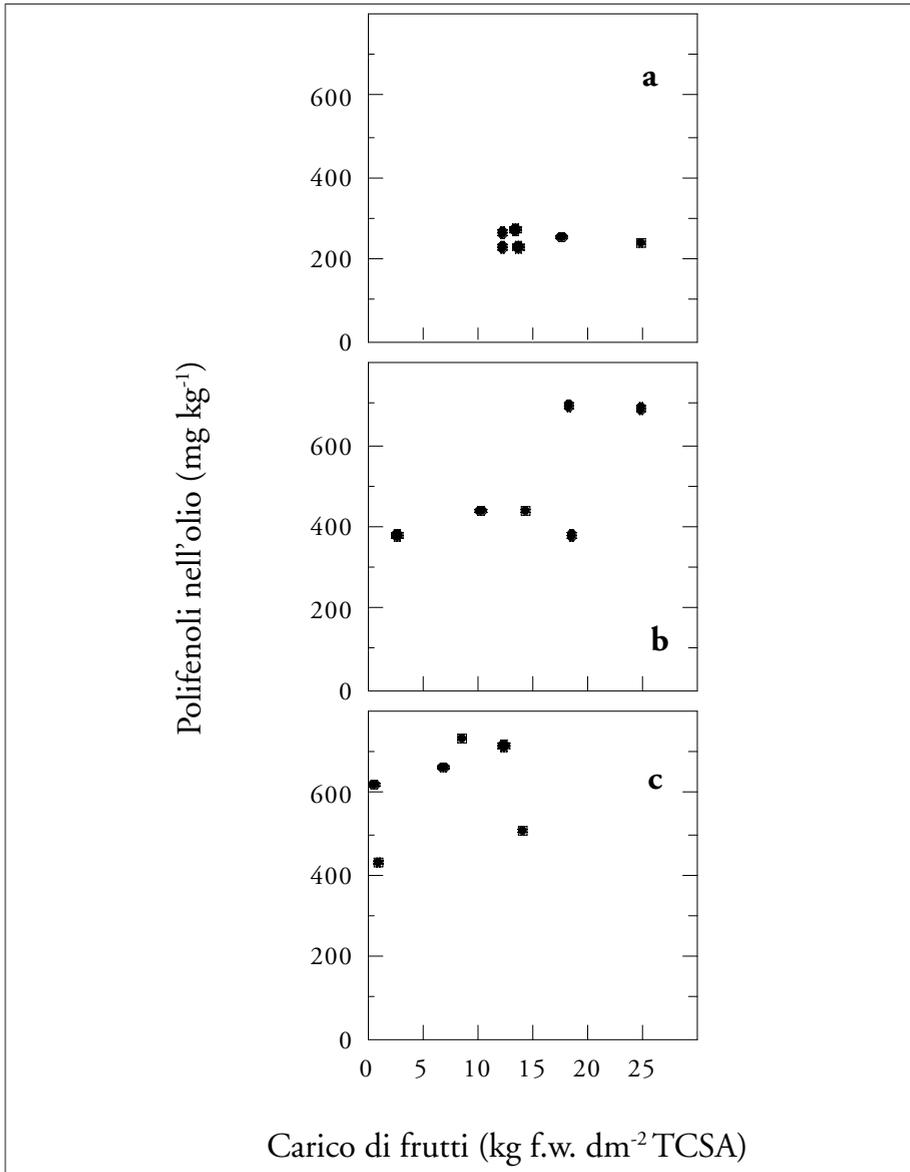


Fig. 4. Effetto del carico di frutti, espresso come peso fresco delle olive (cv. Leccino) per unità di superficie della sezione trasversale del fusto misurata a 0,4 m dal suolo, sul contenuto in composti fenolici dell'olio per tre diversi regimi irrigui nel 2003. Per i metodi di estrazione dell'olio e determinazione dei composti fenolici si veda la didascalia della figura 2. Legenda: a) tesi pienamente irrigata; b) tesi irrigata in deficit controllato; c) tesi con irrigazione di soccorso.

Scarsi sono gli studi che hanno preso in esame eventuali effetti del carico produttivo sulle caratteristiche analitiche e organolettiche degli oli. Nel passato qualche prova è stata fatta confrontando oli prodotti da olivi in annate di carica con altri in annate di scarica, ma i risultati sono attualmente di limitato interesse data l'evoluzione del concetto di qualità dell'olio vergine di oliva negli ultimi anni. Prove effettuate alterando artificialmente il carico di frutti con diradamento manuale 5-6 settimane dopo la piena fioritura non mostrarono effetti significativi del carico di frutti su acidità libera, numero di perossidi, composizione acidica e caratteristiche organolettiche dell'olio. La concentrazione in composti fenolici dell'olio, che è fortemente influenzata dal regime idrico durante il ciclo di sviluppo delle drupe, non risentiva della quantità di olive prodotte per albero (fig. 4). Analoghi risultati sono stati ottenuti esprimendo la concentrazione in composti fenolici e ortodifenoli in funzione della quantità di olio prodotta per albero.

Nonostante questi risultati negativi, data l'importanza del fenomeno dell'alternanza di produzione in olivicoltura, riteniamo che siano necessari ulteriori studi su altre cultivar prima di concludere che i parametri di qualità dell'olio siano del tutto indifferenti a variazioni marcate del carico produttivo.

9. IRRIGAZIONE E CULTIVAR

Il genotipo svolge un ruolo molto importante sulle caratteristiche compositive dell'olio. Le maggiori variazioni sono osservabili per il contenuto in polifenoli, sostanze volatili e steroli (Montedoro et al., 2003). Una particolare influenza è stata rilevata sulla composizione acidica, con sensibili modificazioni del contenuto dei principali acidi grassi e del rapporto insaturi/saturi. Le variazioni più importanti sono dovute al genotipo anche se i fattori ambientali possono agire in modo rilevante su questo parametro analitico.

Dal punto di vista dei composti fenolici, le diversità legate alla cultivar sono di ordine quantitativo (Servili et al., 2004). A parità di stadio di maturazione, infatti, la cultivar Coratina e Moraiolo presentano concentrazioni fenoliche nettamente superiori a quelle di altre varietà di olive come Leccino e Frantoio. Va, inoltre, osservato che le nuove metodologie analitiche di valutazione della frazione fenolica dimostrano l'esistenza di un interessante effetto qualitativo delle cultivar su di essa, elemento questo che potrebbe essere utilizzato nella caratterizzazione degli oli monovarietal.

Per quanto riguarda le sostanze volatili, la via della lipossigenasi rappresenta la principale linea biogenetica di produzione degli aromi negli oli vergini di oliva. Esiste, comunque, una notevole variabilità compositiva relativa alle cultivar legata principalmente alla diversa attività totale dei singoli enzimi facenti parte del suddetto percorso biochimico, quali l'idroperossido-liasi, l'alcol-deidrogenasi e l'alcol-acetil-transferasi. Queste attività si traducono in un altrettanto diverso rapporto di concentrazioni tra aldeidi, alcoli ed esteri con impatto sensoriale, ai quali, cioè, sono legate le note aromatiche degli oli vergini d'oliva (Angerosa et al., 2004).

Per quanto riguarda eventuali differenze varietali nella risposta all'irrigazione, i dati a disposizione sono pochi. Differenze nella risposta stomatica al deficit idrico sono state evidenziate per le cultivar Leccino e Frantoio (Tognetti et al., 2002), ma vi è carenza di confronti varietali sulla resistenza al deficit idrico in condizioni di pieno campo. L'interazione tra cultivar e disponibilità idrica sulla qualità analitica e sensoriale degli oli extra-vergini di oliva può essere molto importante, ma allo stato attuale manca il riscontro scientifico. Alla luce di quanto visto finora si possono già intravedere alcune ricadute pratiche. Ad esempio, è ipotizzabile che mediante l'irrigazione sia possibile ridurre opportunamente la concentrazione di composti fenolici nella drupa e nell'olio della cultivar pugliese Coratina, che si contraddistingue per l'elevato contenuto in composti fenolici idrofili, attenuando così le sensazioni di amaro e piccante che rendono questo olio poco adatto per l'utilizzazione in purezza. Un ulteriore esempio riguarda la cultivar Leccino, che presenta maturazione precoce e rapida nonchè oli con un contenuto in composti fenolici idrofili relativamente basso. Si è visto che l'irrigazione gestita in deficit idrico controllato consente di mantenere il contenuto in composti fenolici dell'olio simile a quello di alberi non irrigati, ma rallentando il processo di maturazione con chiari vantaggi sull'organizzazione della raccolta.

10. CONCLUSIONI

La gestione dell'irrigazione in deficit controllato appare una pratica culturale economica, sostenibile, di basso impatto ambientale e di facile applicazione nelle aziende olivicole già provviste di impianto di irrigazione localizzata. A questi vantaggi si aggiunge la possibilità di migliorare o diversificare il profilo analitico, organolettico e anti-ossidante degli oli extra-vergini di oliva, come evidenziato anche dalle nostre ricerche sulla cv. Leccino, in cui la gestione in deficit controlla-

to dell'acqua ha consentito un risparmio di acqua di oltre il 50% rispetto alla tesi pienamente irrigata con perdite di prodotto di meno del 20%. Inoltre, il regime irriguo è in grado di modificare la concentrazione in alcune molecole volatili a impatto sensoriale o con proprietà antiossidanti degli oli extra-vergini di oliva, per cui oggi ha senso parlare di irrigazione "qualitativa" per l'olivicoltura da olio ed è probabile che tale aspetto acquisterà importanza nel prossimo futuro.

A questo punto si tratta di trasferire le informazioni disponibili in protocolli applicativi di gestione dell'irrigazione per le cultivar già oggetto di sperimentazione. Contemporaneamente appare importante estendere il lavoro di ricerca almeno alle cultivar di maggior diffusione nelle principali aree olivicole italiane. Riteniamo, infatti, che la valorizzazione delle varietà autoctone e del territorio sia una strada obbligata da percorrere per i produttori olivicoli italiani, che sono svantaggiati nei confronti della concorrenza estera per gli alti costi di produzione. La gestione irrigua potrà essere finalizzata alla diversificazione, standardizzazione, correzione o addolcimento dei profili analitici e sensoriali degli oli a seconda della cultivar, dell'andamento climatico o per rispondere alle esigenze di mercato dell'azienda o del territorio.

Spesso viene sottolineata l'importanza di aspetti legati allo stoccaggio, alla trasformazione delle olive, e alla conservazione dell'olio sulla qualità. Allo stato attuale delle conoscenze si può però affermare che, analogamente a quanto avviene per il vino, la qualità dell'olio vergine di oliva si ottiene innanzitutto in campo. Le caratteristiche merceologiche, sensoriali e salutistiche dell'olio sono influenzate dalla disponibilità idrica nel suolo, che va opportunamente gestita al fine di ottenere la massima qualità del prodotto.

RINGRAZIAMENTI

Si desidera ringraziare il Centro Sperimentale per la Ortofrutticoltura per la Maremma Toscana per il sostegno dato alla sperimentazione svolta nel biennio 2003-04 e l'Azienda Agricola Mazzacurati Giuseppe per la disponibilità nell'ospitare le prove. Il presente articolo è dedicato alla memoria del Dr. Balilla Sillari, a un anno dalla sua scomparsa.

BIBLIOGRAFIA

- ALEGRE S. (2001): *Efecto de diferentes estrategias de riego deficitario controlado durante la época estival sobre la producción del olivo (Olea europaea L.) cv. Arbequina*, Tesis doctoral, Universitat de Lleida, Lleida, p. 244
- ALEGRE S., MARSAL J., MATA M., ARBONES A., GIRONA J., TOVAR M.J. (2002): *Regulated*

- deficit irrigation in olive trees (Olea europaea L. cv. Arbequina) for oil production*, «Acta Hort.» 586, pp. 259-262.
- ANGEROSA F., SERVILI M., SELVAGGINI R., TATICCHI A., ESPOSTO S., MONTEDORO G.F. (2004): *Volatile compounds of virgin olive oil: occurrence and their relationship with the quality*, «J. Chromatography A.», 1054, pp. 17-31.
- BARATTA B., CARUSO T., DI MARCO L., INGLESE P. (1986): *Effects of irrigation on characteristics of olives in "Nocellara del Belice" variety*. «Olea», 17, pp. 195-198.
- BEEDE R. H., GOLDHAMER D.A. (1994): *Olive irrigation management*, p. 61-68, in *Olive Production Manual* a cura di L. Ferguson, G.S. Sibbett, G.C. Martin, University of California, Division of Agricultural and Natural Resource, Oakland, CA. Publication 3353.
- BEHBOUDIAN M.H., MILLS T.M. (1997): *Deficit irrigation in deciduous orchards*, «Hort. Rev.», 21, pp. 105-131.
- BERENQUER M.J., GRATTAN S.R., CONNELL J.H., POLITO V.S., VOSSEN P.M. (2004): *Irrigation management to optimise olive growth, production and sensorial oil quality*, «Acta Hort.», 664, pp. 79-85.
- CHALMERS D.J., MITCHELL P.D., VAN HECK L. (1981): *Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning*, «J. Am. Soc. Hort. Sci.», 106, pp. 307-312.
- COSTAGLI G., GUCCI R., RAPOPORT H.F. (2003): *Growth and development of fruits of olive 'Frantoio' under irrigated and rainfed conditions*, «J. Hort. Sci. Biotech», 78, pp. 119-124.
- D'AURIA R. (2004): *La nuova campagna olivicola secondo ISMEA*, www.phytomagazine.com 25 (28 gennaio 2004).
- DETTORI S., RUSSO G. (1993): *Influenza della cultivar e del regime irriguo su quantità e qualità dell'olio di oliva*, «Olivae», 49, pp. 36-43.
- EUROPEAN ECONOMIC COMMUNITY, (1991): European Economic Community Legislation no. 2568/91 issued on 11 July 1991.
- FACI J. M., BERENQUER M.J., ESPADA J.L., GRACIA S. (2002a): *Effect of variable water irrigation supply to olive (Olea europaea L.) cv. Arbequina in Aragon (Spain). I Fruit and oil production*, «Acta Hort.», 586, pp. 341-344.
- FACI J. M., BERENQUER M.J., ESPADA J.L., GRACIA S. (2002b): *Effect of variable water irrigation supply to olive (Olea europaea L.) cv. Arbequina in Aragon (Spain). II Extra virgin oil quality parameters*, «Acta Hort.», 586, pp. 649-652.
- GIRONA J., LUNA M., ARBONÉS A., MATA M., RUFAT J., MARSAL J. (2002): *Young olive trees responses (Olea europaea L. cv. Arbequina) to different water supplies. Water function determination*, «Acta Hort.», 586, pp. 277-280.
- GOLDHAMER D.A. (1999): *Regulated deficit irrigation for California canning olives*, «Acta Hort.», 474, pp. 369-372.
- GOLDHAMER D.A., BEEDE, R. H. (2005): *Effects of water stress on olive tree performance*, p. 71-74, in *Olive Production manual. 2nd edition*, a cura di G.S. Sibbett, L. Ferguson, University of California, Division of Agricultural and Natural Resource, Oakland, CA. Publication 3353.
- GOLDHAMER, D.A., DUNAJ J., FERGUSON L.F. (1994): *Irrigation requirements of olive trees and responses to sustained deficit irrigation*, «Acta Hort.», 356, pp. 172-175.
- GUCCI R. (2004): *L'irrigazione dell'olivo*, «L'Informatore Agrario», 60(40), pp. 37-41.
- GUCCI R., GENTILE S., SERRAVALLE M., TOMEI F., RAPOPORT H.F. (2004a): *The effect of irrigation on fruit development of olive cultivars 'Frantoio' e 'Leccino'*, «Acta Hort.», 664, pp. 291-295.

- GUCCI R., SERVILI M., ESPOSTO S., SELVAGGINI R. (2004b): *Oil quality of olive cv. 'Lecino' grown under irrigated or dry-farmed conditions*, «Acta Hort.», 664, pp. 297-302.
- HERMOSO M., UCEDA M., FRIAS L., BELTRAN G. (1998): *Maduración*, p. 147-161, in *El cultivo del olivo*, a cura di D. Barranco, R. Fernández-Escobar, L. Rallo, Mundi-Prensa, Madrid.
- INGLESE P., BARONE E., GULLO G. (1996): *The effect of complementary irrigation on fruit growth, ripening pattern and oil characteristics of olive (Olea europaea) cv. Carolea*, «J. Hort. Sci.», 71, pp. 257-263.
- LAVEE S., NASHEF M., WODNER M., HARSHMESH H. (1990): *The effect of complementary irrigation added to old olive trees (Olea europaea L.) cv 'Souri' on fruit characteristics, yield and oil production*, «Adv. Hort. Sci.», 4, pp. 135-138.
- METHENEY P.D., FERGUSON L.F., GOLDHAMER D., DUNAI J. (1994): *Effects of irrigation on Manzanillo olive flowering and shoot growth*, «Acta Hort.», 356, pp. 168-171
- MILELLA A., DETTORI S. (1986): *Confronto fra tre coefficienti culturali per l'irrigazione dell'olivo da mensa*, «Riv. Ortoflorofruitt. Ital.», 3, pp. 231-240.
- MITCHELL P.D., CHALMERS D.J., JERIE P.H., BURGE G. (1986): *The use of initial withholding of irrigation and tree spacing to enhance the effect of regulated deficit irrigation on pear trees*, «J. Am. Soc. Hort. Sci.», 111(6), pp. 858-861.
- MONTEDORO G.F., SERVILI M., BALDIOLI M., MINIATI E. (1992): *Simple and hydrolyzable compounds in virgin olive oil. 1. Their extraction, separation and quantitative and semiquantitative evaluation by HPLC*, «J. Agric. Food Chem.», 40, pp. 1571-1576.
- MONTEDORO G.F., SERVILI M., PANNELLI G. (2003): *Le caratteristiche del prodotto e le relazioni con le variabili agronomiche*, in *Olea: Trattato di olivicoltura*, a cura di P. Fiorino, Edagricole, Bologna, pp. 263-289.
- MORIANA A., ORGAZ F., PASTOR M., FERERES E. (2003): *Yield responses of a mature olive orchard to water deficits*, «J. Am. Soc. Hort. Sci.», 128, pp. 425-431.
- MOTILVA M.J., TOVAR M. J., ROMERO M. P., ALEGRE S., GIRONA J. (2000): *Influence of regulated deficit irrigation strategies applied to olive trees (Arbequina cultivar) on oil yield and oil composition during the fruit ripening period*, «J. Sci. Food Agric.», 80, pp. 2037-2043.
- MOTILVA M.J., TOVAR M. J., ROMERO M. P., ALEGRE S., GIRONA J. (2002): *Evolution of oil accumulation and polyphenol content in fruits of olive tree (Olea europaea L.) related to different irrigation strategies*, «Acta Hort.», 586, pp. 345-348.
- PATUMI M., D'ANDRIA R., FONTANAZZA G., MORELLI G., GIORIO P., SORRENTINO G. (1999): *Yield and oil quality of intensively trained trees of three cultivars of olive (Olea europaea L.) under different irrigation regimes*, «J. Hort. Sci. Biotech.», 74, pp. 729-737.
- RAPOPORT H.F., COSTAGLI G., GUCCI R. (2004): *The effect of water deficit during early fruit development on olive fruit morphogenesis*, «J. Am. Soc. Hort. Sci.», 129, pp. 121-127.
- SERVILI M., CONNER J.M., PIGGOTT J.R., WITHERS S.J., PATERSON A. (1995): *Sensory characterization of virgin olive oil and relationship with head space composition*, «J. Sci. Food Agric.», 67, pp. 61-70.
- SERVILI M., SELVAGGINI R., ESPOSTO S., TATICCHI A., MONTEDORO G.F., MOROZZI G. (2004): *Health and sensory properties of virgin olive oil hydrophilic phenols: agronomic and technological aspects of production that affect their occurrence in the oil*, «J. Chromatography A», 1054, pp. 113-127.
- TOGNETTI R., COSTAGLI G., MINNOCCI A., GUCCI R. (2002): *Stomatal behaviour and water use efficiency in two cultivars of Olea europaea L.*, «Agricoltura Mediterranea», 132, pp. 90-97.

- TOVAR M. J., ROMERO M. P., GIRONA J., MOTILVA M.J. (2002a): *L-Phenylalanine ammonia-lyase activity and concentration of phenolics in developing olive (Olea europaea L. cv. Arbequina) fruit grown under different irrigation regimes*, «J. Sci. Food Agric.», 82, pp 892-898.
- TOVAR M. J., ROMERO M. P., ALEGRE S., GIRONA J., MOTILVA M.J. (2002b): *Composition and organoleptic characteristics of oil from Arbequina olive (Olea europaea L.) under deficit irrigation*, «J. Sci. Food Agric.», 82, pp. 1755-1763.

Finito di stampare
nel mese di marzo 2006
dalla Tipografia ABC
Sesto Fiorentino - Firenze