

Nuove tecnologie per l'ammodernamento e la gestione degli impianti irrigui

Alessandro Santini*

*Dipartimento di Ingegneria Agraria e Agronomia del Territorio, Università di Napoli Federico II
Via Università 100, 80055 Portici (Na)*

Associazione Italiana di Ingegneria Agraria

Riassunto

Il miglioramento dell'efficienza dei sistemi irrigui rappresenta una premessa indispensabile per ottenere un'irrigazione sostenibile in termini ambientali ed economici, non soltanto nelle aree con risorse idriche limitate, ma anche in quelle ove la progressiva riduzione della disponibilità idrica è una preoccupante prospettiva. L'evoluzione nella disponibilità di acqua ed i maggiori costi d'impianto hanno fortemente ridotto, nel corso degli ultimi venti anni, l'incremento delle aree coltivate servite da reti di distribuzione irrigua. In Italia, la maggior parte degli investimenti nel settore irriguo negli ultimi anni sono stati quindi destinati all'ammodernamento delle reti di distribuzione a superficie libera costruite a partire dagli anni '50 in poi, mediante la loro progressiva sostituzione con reti di condotte in pressione. L'ammodernamento degli impianti in pressione ha visto lo sviluppo di soluzioni progettuali innovative, con l'introduzione di elementi costruttivi in grado di migliorare la flessibilità di gestione delle reti, come ad esempio i sistemi di vasche di compenso e di carico, o, nel caso di reti particolarmente complesse, di garantire un perfetto funzionamento attraverso torrioni di sconnessione idraulica. Accanto allo sviluppo di queste tecnologie, è possibile oggi avvalersi di un bagaglio di conoscenze molto ampio sui processi fisici che intervengono nella gestione di un sistema irriguo, a partire dagli scambi di massa e di energia nel continuum suolo-pianta-atmosfera, fino a giungere alla descrizione dettagliata del funzionamento idraulico di una rete di distribuzione in diversi regimi di moto. Queste conoscenze possono essere utilizzate per lo sviluppo e la messa a punto di modelli matematici per il supporto alle decisioni nella gestione operativa di un sistema irriguo complesso. La raccolta delle informazioni necessarie per l'implementazione di questi modelli è notevolmente migliorata grazie ai Sistemi Informativi Geografici (GIS) ed alle tecniche di analisi dei dati rilevati da satelliti per l'Osservazione della Terra, dotati oggi di risoluzioni spaziali, spettrali e radiometriche di grande efficacia, che consentono la caratterizzazione ed il monitoraggio delle coperture vegetali.

Parole chiave: irrigazione, sistemi informativi geografici, osservazione della terra, satelliti, modelli idrologici.

Summary

NEW TECHNOLOGIES FOR MODERNIZATION AND MANAGEMENT OF IRRIGATION PIPING

Improving the efficiency of irrigation piping-systems represents a fundamental prerequisite to achieve a sustainable irrigation under both the environmental the economic point of view. Such an issue is important not only in areas with limited water-budget, but even in those areas where the increasing reduction of the water availability has become a worrying perspective. In the last twenty years, the reduction in water-availability and the increasing costs of system-management have highly limited the cultivated areas which are irrigated by means of water-distribution nets. In the recent years, most of the Italian investments in the irrigation-field have been oriented toward upgrading the open-channels irrigation nets, which were built starting from 50', by substituting these latter with pipes. The modernization of the piping-systems has been achieved via innovative design solutions, such as back and loading water tanks or towers, which have lead to an improvement into the flexibility of the net management. Nearby the employment of such technologies, nowadays it is also possible to use the knowledge of the physical processes involved in the management of an irrigation system, starting from energy as well as mass exchange in the continuum soil-plant-atmosphere till to a detailed hydraulic description of a water distribution net under different flow regimes. Such a type of knowledge may be used to improve as well as build-up mathematical models for a decisions-support toward the management of complex irrigation districts. The acquirement of the data needed to implement such models has been deeply improved thanks to Geographical Information Systems (GIS), and techniques to analyze satellite-data coming from the Earth observation, which enable to characterize and monitor vegetation at different spatial, spectral and radiometric resolutions.

Key-words: Irrigation, Geographical Information Systems, earth observation, satellites, hydrological models.

* Autore corrispondente: tel.: +39 081 2539018; fax: +39 081 2539412. Indirizzo e-mail: santini@unina.it.

1. Introduzione

Nel corso degli ultimi cinquant'anni l'espansione dell'irrigazione ha determinato un incremento notevole della produzione agraria, consentendo di soddisfare il maggiore fabbisogno alimentare derivante dall'esplosione demografica a scala mondiale. Nel 1950, la superficie irrigata nel mondo era circa 94 milioni di ettari; attualmente essa è stimata in oltre 240 milioni di ettari, corrispondente al 16% della superficie coltivata, ma da cui proviene oltre un terzo della produzione agraria mondiale (Postel, 1993). L'incremento delle aree coltivate servite da reti di distribuzione irrigua è cresciuta al ritmo dell'1% annuo durante i primi anni '60, per giungere ad un'espansione annua del 3-4% nella metà degli anni '70. Negli ultimi venti anni, questa tendenza è andata via via attenuandosi, specialmente nelle zone aride e semi-aride, a causa dei crescenti costi d'impianto e della ridotta disponibilità della risorsa idrica. Inoltre, bisogna considerare che gran parte delle aree coltivate sono particolarmente vulnerabili non solo alla siccità ed all'erosione ma anche agli squilibri nella gestione delle risorse idriche. Si tratta spesso di agrosistemi fragili da un punto di vista ecologico che necessitano di interventi di conservazione dei suoli e che risentono in modo sensibile delle conseguenze di cattive gestioni dell'acqua, la cui efficienza è attualmente valutata in media pari al 45%. Pertanto, gli investimenti nel campo dell'irrigazione sono stati sempre più mirati verso la modernizzazione degli impianti che li ha resi sempre più efficienti e controllati.

2. Evoluzione e ammodernamento degli impianti collettivi

Dopo l'ultima guerra mondiale in Italia i comprensori irrigui erano localizzati prevalentemente nelle regioni settentrionali (in ragione dell'85% circa della superficie agricola), ma a partire dagli anni '50 nel Mezzogiorno si è dato inizio alla realizzazione di impianti irrigui collettivi a servizio anche di aree di notevole estensione. I primi impianti furono realizzati con reti di distribuzione a pelo libero costituiti da canalette prefabbricate (figura 1) e furono messe a punto apposite apparecchiature di misura e di regolazione della rete.



Figura 1. Rete di distribuzione irrigua a superficie libera, Piana del Sele, 1952.

Figure 1. Irrigation open channel net, Piana del Sele, 1952.

La gestione di questi impianti comporta perdite d'acqua notevoli, specie se la rete di canali ha notevole estensione, anche se le apparecchiature e le strumentazioni di controllo oggi disponibili hanno raggiunto un notevole grado di sofisticazione. Apparecchiature automatiche che comandano organi mobili possono essere impiegate con successo per la regolazione di grossi canali adduttori, ma un controllo dinamico centralizzato pone ancora problemi legati alla lentezza con cui risponde il sistema idraulico ed alla mancanza di procedure soddisfacenti e sufficientemente consolidate per l'analisi e la progettazione dei sistemi automatici. Pertanto, la maggior parte delle reti a pelo libero è regolata manualmente ed esistono nel mondo solo alcuni esempi di canali adduttori, a servizio di numerose utenze, controllate dinamicamente (Lefebvre, 1977; Yeh et al., 1980) che utilizzano centrali operative collegate via radio o via cavo con misuratori di livello e di portata e con attuatori per la manovra delle apparecchiature di regolazione.

In presenza di risorse idriche limitate e per consentire un esercizio irriguo cui sia data ampia libertà agli agricoltori, specialmente per quanto riguarda la scelta dei tempi degli adacquamenti e per la distribuzione dell'acqua nelle aziende, sono state realizzate reti in pressione che presentano minori problemi di gestione e che, per la loro caratteristica di essere agevolmente regolate "da valle", si adattano bene ad un esercizio "alla domanda". In questo caso, oltre ad i vantaggi derivanti da un esercizio ir-

riquo con minori vincoli per gli agricoltori, è possibile ottenere una notevole riduzione delle perdite d'acqua, con conseguente incremento dell'efficienza globale del sistema irriguo. Per questo motivo, uno dei principali interventi di "riabilitazione" dei sistemi di distribuzione consiste nel sostituire le reti di canalizzazioni a superficie libera con condotte in pressione.

In particolare, per le reti irrigue in pressione, le variazioni giornaliere delle erogazioni possono essere soddisfatte prevedendo in sede di progetto capacità di compenso opportunamente localizzate. Nel caso poi di comprensori che si sviluppano su forti dislivelli topografici, opportuni manufatti di disconnessione a pelo libero consentono di contenere entro prefissati limiti le pressioni nella rete in condizioni di regime. Pertanto è quasi sempre possibile, con l'impiego di un numero limitato di apparecchiature asservite ai livelli d'acqua nei manufatti, realizzare una soddisfacente regolazione senza ricorrere ad una centralizzazione dei comandi.

L'esercizio di queste reti richiede principalmente un controllo dei volumi e delle portate prelevati dalle utenze. Nei casi in cui la risorsa idrica sia insufficiente, questo controllo è particolarmente importante se si vuole evitare una ripartizione dell'acqua non programmata ed il rischio di un troppo rapido esaurimento della risorsa con conseguenti gravi danni per la produzione. Pertanto, in un contesto di crescente conflittualità nell'uso delle risorse idriche ed ambientali, il passo successivo verso una più efficiente irrigazione porterà allo sviluppo di tecniche di controllo e di gestione degli impianti sempre più efficaci.

3. Dispositivi per il controllo delle reti

Con l'entrata in esercizio dei primi impianti di irrigazione in pressione, spesso caratterizzati da notevole estensione, si è subito individuata l'esigenza di installare opportune apparecchiature idrauliche di intercettazione, regolazione e controllo, necessarie per dare attuazione alle diverse indicazioni progettuali. Sulla scia di questa esigenza, sono state via via sviluppate apparecchiature idrauliche adatte al gravoso esercizio richiesto negli impianti irrigui, anche in assenza di una continua manutenzione. Particolare at-

tenzione è stata posta ai dispositivi atti ad evitare che alcuni utenti prelevino in modo indiscriminato l'acqua, determinando disfunzioni nella rete collettiva ed inducendo, in alcuni tratti, valori delle pressioni inferiori ai limiti minimi previsti, con conseguenti funzionamenti anomali delle reti aziendali.

I tradizionali limitatori di portate muniti di molle ed organi meccanici in movimento sono stati via via sostituiti da dispositivi ad anello elastico, importati agli inizi degli anni '60 dalla Francia, ma che hanno subito in Italia modifiche e migliorie oggetto di brevetti. Queste apparecchiature sono ormai ampiamente utilizzate per la loro estrema semplicità ed affidabilità, anche in presenza di acque che trasportino materiali sabbiosi o filiformi.

Di particolare rilievo appare, negli ultimi anni, l'introduzione dell'elettronica nei dispositivi impiegati per l'erogazione dell'acqua sia ai diversi reparti in cui è suddiviso un comprensorio sia alle singole aziende, comunemente denominati "gruppi di consegna". Queste apparecchiature, in genere composte da un limitatore di portata, da un contatore volumetrico e da un'idrovalvola, consentono in genere l'individuazione di sprechi e di prelievi anomali. Dopo alcune esperienze, peraltro limitate, di controllo e raccolta dei dati presso stazioni centralizzate, grande diffusione ha avuto l'adozione di dispositivi elettronici da collegare al gruppo di consegna attraverso un'ideale interfaccia per la lettura dei dati. Questi dispositivi possono essere utilizzati anche in zone ove la proprietà è molto frazionata e consentono il monitoraggio dei consumi ed il loro controllo e contabilizzazione, purchè da parte degli Enti gestori vengano messi in atto gli opportuni adeguamenti organizzativi, nonché la qualificazione del personale necessario per la gestione e la manutenzione delle reti e delle apparecchiature.

4. Conoscenze e strumenti per una gestione integrata dei sistemi irrigui

Accanto agli interventi di tipo strutturale, oggi peraltro in via di completamento in molti comprensori dell'Italia meridionale, la gestione irrigua può avvalersi del contributo di conoscenze più approfondite sui processi fisici che intervengono nel funzionamento di un sistema irri-

guo nel suo complesso, oltre che di tecnologie innovative che possono migliorare notevolmente l'esercizio degli impianti e la loro efficienza. In particolare, la crescente disponibilità di avanzati *modelli di calcolo* consente di eseguire la verifica idraulica delle reti di distribuzione in diverse condizioni di funzionamento, oppure di valutare in dettaglio i processi di trasporto dell'acqua e dei soluti nel sistema suolo-pianta-atmosfera; quest'ultima tipologia di modelli consente di ottimizzare le strategie d'intervento ed i volumi da applicare in funzione delle diverse colture e delle condizioni pedo-climatiche. Inoltre, con l'impiego dei GIS, sempre più facilmente disponibili anche su elaboratori di capacità standard, è possibile gestire agevolmente sia dati in formato vettoriale, relativi alla geometria delle reti di distribuzione ed ai limiti delle parcelle irrigue, sia dati in formato raster, quali mappe, aerofoto o immagini ottenute con il telerilevamento da satellite (Osservazione della Terra).

Con il progredire delle conoscenze sui processi di scambio di massa e di energia che intervengono nel sistema suolo-pianta-atmosfera, è possibile analizzare, tramite modelli numerici di simulazione, i diversi termini del bilancio idrologico con accuratezza sufficiente per gli scopi pratici. In alcuni casi, è possibile ricorrere a modelli in grado di fornire una dettagliata descrizione dei processi di trasporto idrico nel sistema suolo-pianta-atmosfera in presenza di fenomeni di stress idrico (Santini, 1982; 1992). Questi modelli offrono la possibilità di valutare l'evolvere nel tempo dei potenziali e dei contenuti idrici nel suolo nella zona interessata dall'apparato radicale, nonché degli attingimenti radicali. Si possono così stimare i consumi d'acqua delle colture in funzione del livello freatico, della scelta di un calendario delle somministrazioni irrigue, oppure valutare la riduzione di produttività delle colture per ridotti volumi d'irrigazione (Bastiaanssen et al., 2004).

Esistono in letteratura numerosi modelli di simulazione idrologica che possono essere impiegati per pilotare la gestione dell'irrigazione (FAO, 1994). L'evoluzione dello stato idrico del suolo può essere descritta ricorrendo a schematizzazioni semplificate di tipo statico (Smith, 1992; Teixeira et al., 1993) od attraverso la soluzione numerica dell'equazione del moto dell'acqua nel sistema suolo-pianta-atmosfera, in

cui il processo di moto (lungo l'ascissa verticale z) viene legato alla variazione di contenuto d'acqua θ nel tempo t attraverso l'equazione differenziale (Belmans et al., 1983; Santini, 1992):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(h) \quad (1)$$

dove h indica il potenziale dell'acqua nel suolo e $K(h)$ la funzione di conducibilità idraulica, mentre $S(h)$ descrive l'attingimento radicale delle colture. Quest'ultimo termine viene in genere espresso ricorrendo a relazioni semi-empiriche, caratteristiche di ciascun tipo di coltura, od a modelli che descrivono in dettaglio i processi di trasporto dell'acqua nelle piante (Santini et al., 1991). In ogni caso, S è da considerarsi funzione del potenziale dell'acqua nel suolo e di quello in corrispondenza dell'apparato fogliare delle piante, delle condizioni atmosferiche che impongono i flussi di traspirazione, nonché delle diverse colture e del loro sviluppo vegetativo. Questa tipologia di modello è stata ampiamente validata in condizioni colturali e pedo-climatiche molto diverse, nel corso di campagne sperimentali condotte con l'ausilio di tecniche micro-meteorologiche (figura 2).

L'impiego di modelli basati sull'Eq. 1 richiede, però, la conoscenza delle caratteristiche idrauliche dei suoli, nonché la definizione delle condizioni al contorno del dominio interessato, dati il cui reperimento risulta particolarmente oneroso quando si opera su vaste aree. Infatti, per l'impiego di questi modelli alla scala di comprensorio, occorre definire:

- a) l'interazione con la circolazione idrica sotterranea, necessaria per definire la condizione al contorno inferiore;
- b) la variabilità spaziale delle proprietà idrauliche dei suoli presenti nell'area di studio;
- c) la variabilità spaziale e temporale dello sviluppo e dello stato delle colture presenti, al fine di descrivere la condizione al contorno superiore attraverso i flussi massimi di evaporazione dal suolo e di traspirazione dalle piante.

Il contorno inferiore rappresenta il punto di collegamento fra i processi idrologici che avvengono nella zona satura (falda) e nel suolo non saturo. Per semplicità, in genere può risultare vantaggioso scomporre la simulazione del

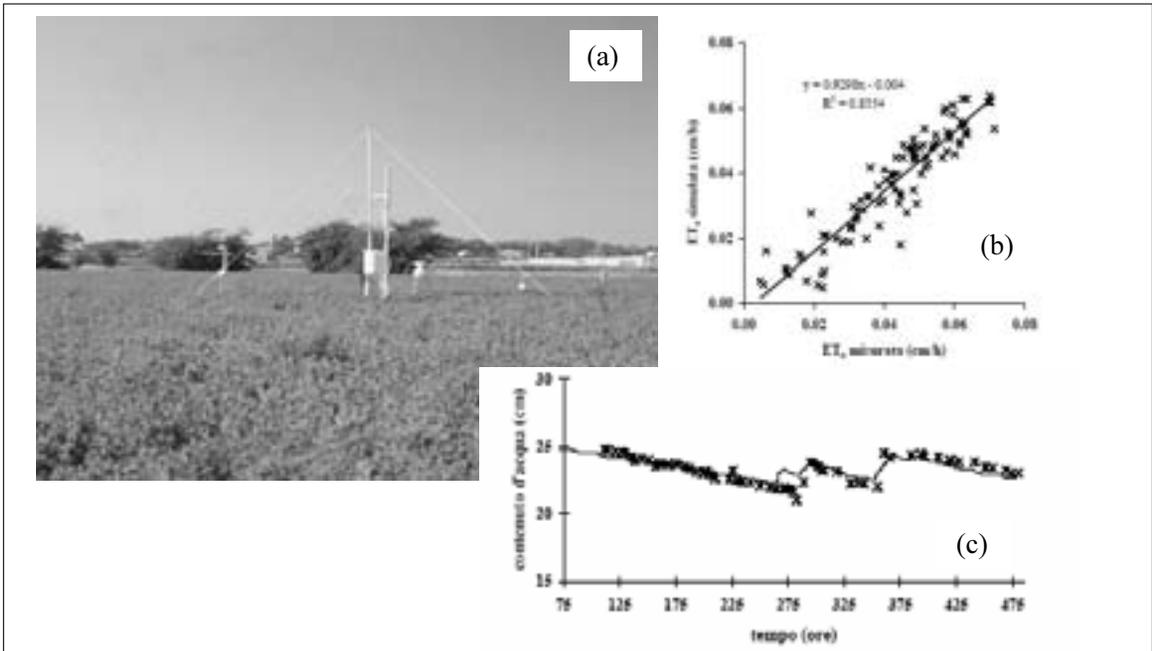


Figura 2. a) Installazione sperimentale su un campo di medica; b) confronto fra misure e risultati delle simulazioni riguardanti ET effettiva (b) e contenuto idrico nell'apparato radicale (c).

Figure 2. a) Experimental equipment in a lucerne-field; b) comparison between experimental data and simulation-results concerning the effective ET (b), and water content in plant-roots (c).

moto dell'acqua in due sistemi separati: il primo, unidimensionale, per la zona che si presenta prevalentemente in condizioni di non-saturazione ed un secondo, per la zona satura, costituito da un reticolo bi- o tri-dimensionale. In molti casi, è possibile individuare una relazione analitica che stima il flusso di scambio idrico fra suolo e falda in funzione dell'altezza freatica, sia ricorrendo ad osservazioni sperimentali o, in alternativa, analizzando in maniera opportuna i risultati dei modelli bidimensionali di moto dell'acqua nel saturo (van Bakel, 1986).

Per quanto riguarda il punto (b), è stato verificato in diversi studi (v. Genuchten et al., 1992; Romano e Santini, 1997; Palladino et al., 2005) che l'impiego delle cosiddette *pedo-transfer functions* (PTFs), può consentire la stima delle proprietà idrauliche dei suoli dalla sola conoscenza di quelle fisico-chimiche e risultare particolarmente efficiente ed affidabile anche nelle applicazioni di modelli a scale relativamente grandi (figura 3).

La condizione al contorno superiore del sistema è dettata soprattutto dallo stato di crescita del manto vegetale e dalle caratteristiche climatiche che determinano i flussi di scambio

di massa e di energia fra il suolo e l'ambiente circostante. Diversi studi hanno evidenziato come le tecniche di telerilevamento in differenti regioni dello spettro elettromagnetico permettano la stima di alcune caratteristiche del manto vegetale, come ad esempio il grado di copertura del suolo e l'indice di area fogliare (Moran et al., 1991).

5. Telerilevamento da satellite per la valutazione dei fabbisogni irrigui

L'osservazione ciclica della superficie terrestre mediante sensori multispettrali trasportati a bordo di piattaforme orbitanti è di uso corrente da oltre un decennio in un vasto campo di applicazioni e di studi del territorio. In campo irriguo, i metodi più comuni che utilizzano il telerilevamento possono essere suddivisi in due gruppi:

- 1) metodi per la stima di alcuni termini del bilancio idrologico, come, ad esempio, l'evapotraspirazione e lo stato idrico del suolo;
- 2) metodi mirati all'individuazione di parametri descrittivi del manto vegetale interessante la superficie osservata.

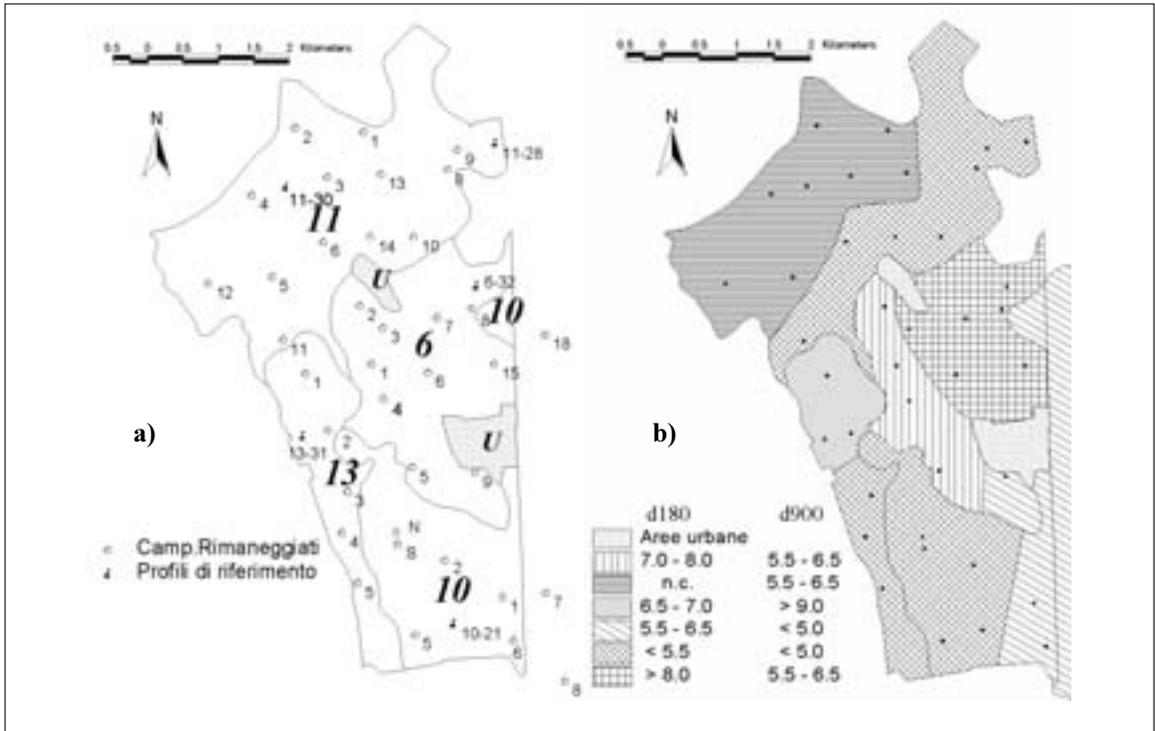


Figura 3. a) Carta dei suoli di un'area del comprensorio irriguo nella Piana del Sele con ubicazione dei siti di campionamento; b) Classificazione in base al comportamento idrologico con l'ausilio di PTF (D'Urso et al., 1997).

Figure 3. a) Soil map of an area belonging to the irrigation district of Piana del Sele with location of sampling sites; b) Hydrological classification by means of PTF (D'Urso et al., 1997).

Numerose ricerche hanno mostrato, infatti, la possibilità di stimare il valore istantaneo dell'evapotraspirazione e di individuare l'insorgenza di stress idrici mediante rilievi radiometrici nella regione dell'infrarosso (Seguin et al., 1983; Moran et al., 1991). Nella regione delle microonde, le potenzialità dei sensori radar oggi disponibili per la stima del contenuto idrico dei suoli sono state definite in diversi studi recenti (Engman et al., 1995; D'Urso et al., 2006).

I metodi rientranti nel secondo gruppo sono stati diffusamente impiegati, per la mappatura delle colture e per l'individuazione delle aree irrigate (FAO, 1995; Li Jiren et al., 1997), nonché per la stima di alcune caratteristiche del manto vegetale, come ad esempio il grado di copertura del suolo e l'indice di area fogliare (Clevers et al., 1983). Combinando queste informazioni con dati agrometeorologici acquisiti presso stazioni localizzate all'interno dei comprensori irrigui, possono essere ricavate le mappe dell'evapotraspirazione potenziale ET_p o del coefficiente colturale K_c , rapporto fra ET_p e valore

di riferimento ET_0 (D'Urso et al., 1995). qualora si adotti la schematizzazione proposta da Monteith (1990) (Jensen et al., 1990), il calcolo dell' ET_p , e quindi del coefficiente K_c in assegnate condizioni agrometeorologiche, è legato ad alcuni parametri caratteristici del manto vegetale, quali l'albedo r , l'indice di area fogliare LAI ed l'altezza del manto vegetale, h_c :

$$K_c = \frac{ET_p}{ET_0} = f(r, LAI, h_c)$$

Poiché i citati parametri influenzano in maniera diretta la risposta spettrale delle superfici vegetate, è possibile stabilire una corrispondenza fra la riflettanza superficiale, osservata da satellite, ed il corrispondente valore del coefficiente colturale K_c (Choudhury et al., 1994; Bausch, 1995; D'Urso et al., 1995).

Le mappe di K_c e di ET_p così ottenute possono essere utilizzate per l'applicazione di modelli di simulazione, al fine di stimare i diversi termini del bilancio idrologico nel sistema suolo-pianta, tenendo conto in maniera precisa del-

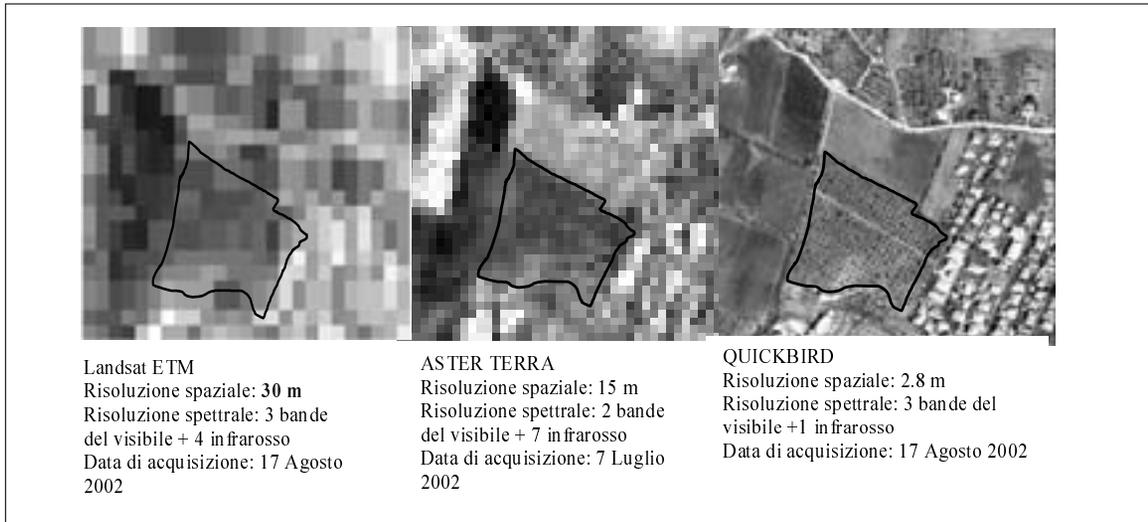


Figura 4. Acquisizioni con sensori satellitari di diversa risoluzione in colture di agrumi, Piana di Catania (Barbagallo et al., 2003).

Figure 4. Citrus orchards monitoring via satellite devices working at different resolution, Piana di Catania (Barbagallo et al., 2003).

la variabilità dei fabbisogni irrigui in relazione all'effettivo sviluppo del manto vegetale (D'Urso et al., 1999). In base ai risultati del bilancio idrologico, vengono individuate le zone ove si verificano condizioni di stress idrico delle colture ed i corrispondenti deficit d'acqua nel suolo e si può determinare la distribuzione spaziale dei fabbisogni irrigui e dei conseguenti probabili prelievi d'acqua nei nodi della rete di distribuzione irrigua.

Queste procedure sono state applicate a numerosi casi di studio in Italia e all'estero, sia su colture erbacee che arboree. Ad esempio, in figura 4, viene illustrata un'applicazione a coltivazioni di agrumi nella piana di Catania; in questo caso, la risoluzione spaziale del sensore è di fondamentale importanza per l'individuazione dei parametri geometrici degli agrumeti.

L'utilizzo di dati satellitari ad altissima risoluzione (1-2 m), sempre più agevolmente reperibili, è giunto ad un grado di maturazione ed affidabilità tale da poter costituire la base per applicazioni operative direttamente rivolte agli utenti finali, fra cui i gestori delle risorse territoriali nel comparto agricolo ed i soggetti coinvolti nella pianificazione e distribuzione delle risorse idriche.

Un esempio notevole di trasferimento tecnologico del telerilevamento da satellite ad applicazioni operative è rappresentato dal progetto

DEMETER (<http://www.demeter-ec.net>), finanziato nell'ambito del "V Programma Quadro" per la Ricerca dalla Commissione Europea. Questo progetto, a cui hanno partecipato 12 istituzioni europee, fra cui il Dipartimento di Ingegneria Agraria ed Agronomia del Territorio dell'Università di Napoli "Federico II", è stato interamente dedicato allo sviluppo di tecniche per l'impiego di informazioni ottenute da telerilevamento satellitare nei programmi di assistenza all'agricoltura irrigua. Il progetto DEMETER è stato sviluppato e testato nel 2004-2005 nel Consorzio di Bonifica in destra del fiume Sele (Salerno) ed ha messo a punto, come risultato finale, uno strumento di *Information Technology* basato sull'integrazione fra dati satellitari e mezzi di comunicazione, rivolto principalmente ai Consorzi e le aziende agricole per la gestione dell'irrigazione. Il prototipo sviluppato nell'ambito di DEMETER viene concepito come un sistema integrato di monitoraggio, in cui dati di Osservazione della Terra, informazioni agro-meteorologiche e colturali e modelli di bilancio idrologico convergono in un GIS, arricchito da innovativi mezzi di *Information Technology* per il trasferimento dei dati all'utenza.

Il calcolo dei fabbisogni irrigui si basa sulla metodologia FAO (1998), ove però i valori dei coefficienti colturali vengono ottenuti mediante l'algoritmo rappresentato dall'Eq. 1. Dalle map-

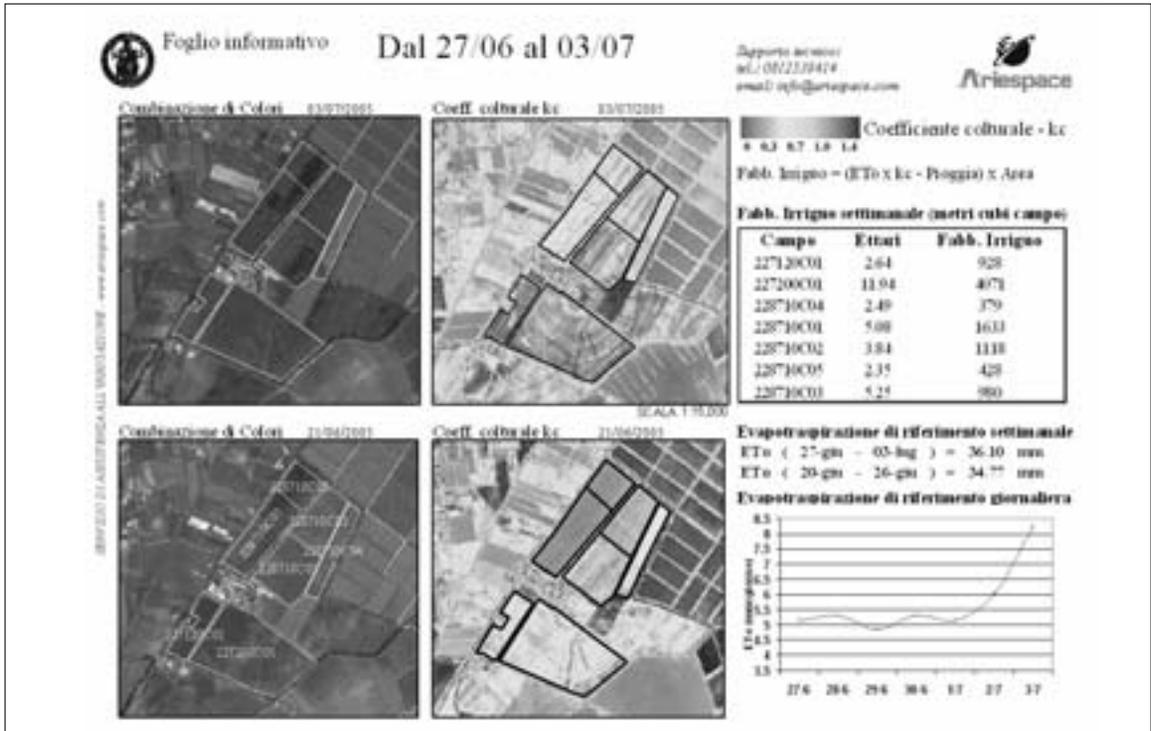


Figura 5. Esempio di foglio informativo distribuito settimanalmente ed in tempo reale alle aziende pilota nel corso della stagione irrigua 2005 in agro di Eboli (SA).

Figure 5. An example of informative sheet distributed in real time and weekly to pilot-farms during the 2005 irrigation season in agro di Eboli (SA).

pe spaziali dei fabbisogni irrigui si possono poi estrarre dati ed informazioni personalizzate da trasferire alle aziende agricole tramite telefonia cellulare ed e-mail. Il GIS, in cui convergono immagini satellitari ad alta risoluzione opportunamente interpretate e dati meteorologici raccolti a terra, provvede a calcolare i fabbisogni irrigui settimanali ed a generare quest'informazione in due formati: uno grafico, sotto forma di mappe, ed uno alfanumerico, consistente nella quantità d'acqua da somministrare e nella durata dell'intervento in ciascuna parcella. Il primo tipo di dato, insieme all'immagine satellitare, viene reso disponibile su Internet, il secondo invece viene inviato tramite SMS ed MMS direttamente al conduttore dell'azienda, che riceve così un "consiglio irriguo" personalizzato in tempo reale. Un esempio dell'informazione distribuita agli agricoltori è illustrata in figura 5. In qualsiasi istante, ciascuno di essi potrà poi "osservare" la propria azienda sull'immagine satellitare disponendo di un personal computer o di un telefono cellulare di nuova generazione.

Questo tipo di informazione, personalizzata per ogni agricoltore, è di particolare utilità specialmente nei distretti ove i prelievi irrigui vengono controllati mediante schede elettroniche dove programmare i prelievi d'acqua.

6. Sviluppo di Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS) in campo irriguo

Integrando fra loro strumenti quali dispositivi di controllo e di telerilevamento, nonché software di simulazione e di gestione di grandi archivi di dati, è oggi pensabile lo sviluppo di "sistemi di supporto alle decisioni (DSS)" di notevole efficacia nella gestione degli impianti irrigui collettivi (Rey et al., 1994). Questi strumenti consentono di simulare diversi "scenari" e di identificare per ciascuno di essi le possibili situazioni di crisi del sistema, dovute, ad esempio, a carenze di tipo strutturale nella rete di distribuzione od a causa di limitazioni nella disponibilità della risorsa. L'utilizzazione di software in grado di gestire dati georeferenziati consente

inoltre di rappresentare in forma cartografica i risultati delle simulazioni, per una loro più agevole lettura ed interpretazione.

Un esempio di DSS e delle sue componenti principali è descritto in figura 6. Il sistema informativo geografico rappresenta il nodo di scambio dei flussi di informazioni fra gli algoritmi numerici di simulazione del bilancio idrologico del suolo e del trasporto dell'acqua nella rete di distribuzione irrigua, gli strumenti di rilevamento e misura e l'utente finale, rappresentato dal gestore. All'interno della procedura, lo scambio dei dati avviene utilizzando un formato compatibile con i software per l'analisi di dati territoriali e per la rappresentazione cartografica dei risultati delle simulazioni.

Il comprensorio irriguo è visto come un insieme di aree elementari connesse dalla rete di distribuzione. Per la simulazione del bilancio idrologico, in ogni unità elementare i processi di trasporto dell'acqua nel suolo sono descritti secondo una geometria unidimensionale, ricavando alcuni dati attraverso l'analisi di immagini multispettrali telerilevate da satellite. In base ai risultati del bilancio idrologico, vengono individuate le unità ove si verificano condizioni di stress idrico delle colture ed i corrispondenti deficit d'acqua nel suolo. Si può così determinare, con cadenza giornaliera, la distribuzione spaziale dei fabbisogni irrigui e dei conseguenti prelievi d'acqua nei nodi della rete. Successivamente, viene eseguito il confronto fra il volume irriguo richiesto e la disponibilità della risorsa e si passa quindi alla verifica della capacità di trasporto idraulico della rete di distribuzione. È così possibile simulare diversi "scenari" ed iden-

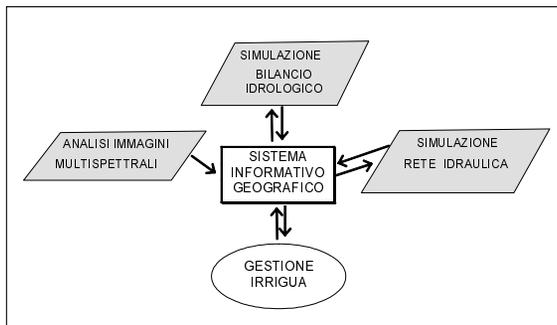


Figura 6. Elementi costitutivi del sistema di supporto alle decisioni.

Figure 6. Constitutive elements of the decisions support-system.

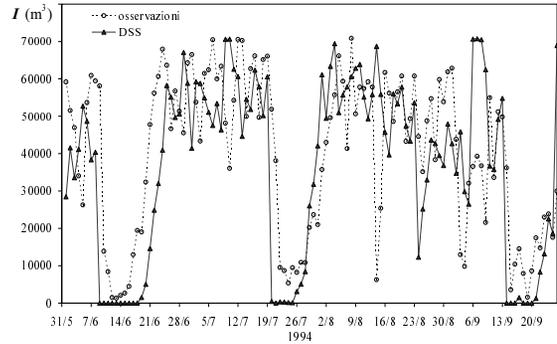


Figura 7. Confronto fra i prelievi giornalieri complessivi simulati con il DSS "SIMODIS" e misurati presso i contatori volumetrici di reparto nel comprensorio "Gromola" di Paestum.

Figure 7. Comparison between DDS "SIMODIS"-simulated and measured total daily water-drawings at the volumetric counters in the irrigation district "Gromola" di Paestum.

tificare per ciascuno di essi le possibili situazioni di crisi.

Presso il Dipartimento di Ingegneria Agraria ed Agronomia del Territorio dell'Università di Napoli "Federico II" è stato messo a punto un DSS denominato "SIMODIS" (Simulation and Management of On-Demand Irrigation Systems, D'Urso, 2001), che è stato messo a punto nel comprensorio irriguo "Gromola", ricadente nell'area d'interesse del Consorzio di Bonifica di Paestum (Salerno). I risultati del DSS sono stati confrontati con i volumi irrigui giornalieri misurati in corrispondenza dei contatori di reparto. Come può evincersi dal grafico in figura 7, l'entità dei prelievi e la loro evoluzione temporale sono risultati molto prossimi alle osservazioni, confermando le ipotesi di funzionamento assunte nelle simulazioni effettuate con il DSS.

Grazie al DSS SIMODIS, è stata effettuata una simulazione di scenari in condizioni di scarsità della risorsa idrica. È stato così possibile valutare il volume minimo di ciascun intervento irriguo, in modo da non compromettere la produzione e conseguire risparmi sul consumo stagionale d'acqua per l'intero comprensorio fino al 25% (D'Urso e Santini, 2002).

7. Conclusioni

Il miglioramento dell'efficienza dei sistemi irrigui è un obiettivo di primaria importanza per l'utilizzazione razionale delle risorse idriche in

agricoltura. Questo obiettivo può essere conseguito attraverso interventi di carattere strutturale, finalizzati al contenimento delle perdite di distribuzione, e mediante una gestione della risorsa basata su un maggior controllo dei consumi e dei criteri di distribuzione. In questo caso, il comprensorio irriguo deve essere considerato come un sistema nella sua notevole complessità, ove la gestione della risorsa idrica è determinata non soltanto dalle condizioni idrologiche e climatiche, ma anche da elementi di natura economica ed ambientale sia a scala aziendale che territoriale. Pertanto, la definizione dei criteri che intervengono nella gestione di un siffatto sistema devono includere, sempre più, l'analisi di diversi livelli d'informazione.

Lo sviluppo di nuove tecnologie, unitamente ad una migliore comprensione dei processi fisici presenti in un sistema irriguo, consente la messa a punto di strumenti per il supporto alle decisioni che i gestori devono assumere. Questi sistemi, che possono essere realizzati, ad esempio, ricorrendo all'uso combinato di modelli di simulazione e di dispositivi di monitoraggio dei prelievi d'acqua, permettono di valutare l'efficienza del sistema irriguo in ogni punto della rete, individuando l'equità di distribuzione ed il corrispondente soddisfacimento dei fabbisogni irrigui. I risultati di queste elaborazioni possono essere impiegati per il calcolo di "indicatori di performance" del sistema irriguo o di parte di esso, anche ricorrendo all'ausilio dei sistemi informativi territoriali. L'analisi della distribuzione spaziale degli indicatori di performance può mettere in evidenza le zone ove la risorsa idrica non è utilizzata in modo ottimale a causa di sprechi o, diversamente, per limitazioni strutturali nella rete di distribuzione.

Bibliografia

Barbagallo S., Consoli S., D'Urso G., Giorgio Gaggia R.C., Toscano A. 2003. Remote sensing of crop water requirements in orange orchards using high resolution sensor. *Proceed. European Symposium on Satellite Remote Sensing, SPIE, Int. Soc. Optical Engineering*, vol. 5232, 119-127, Barcelona, Spain.

Bastiaanssen W.G.M., Allen R.G., Droogers P., D'Urso G., Steduto P. 2004. Inserting man's irrigation and drainage wisdom into soil water flow models and bringing it back out: How far have we progressed? In: van Dam J.C., de Rooij G.H., Feddes R.A. (eds.): *Unsaturated-zone modeling: progress, challenges and*

applications, cap. 9, 263-299. Kluwer Publish., Dordrecht, The Netherlands.

Bausch W.C. 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manag.*, 27:55-68.

Belmans C., Wesseling J.G., Feddes R.A. 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J. Hydrology*, 63:271-286.

Clevers J.G.P.W., Verhoef W. 1993. LAI estimation by means of the WdVI: a sensitivity analysis with a combined PROSPECT-SAIL model. *Remote Sensing Reviews*, 7:43-64. Harwood Academic Publish., USA.

Choudhury B.J., Ahmed N.U., Idso S.B., Reginato R.J., Daughtry C.S.T. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sens. Environ.*, 50:1-17.

D'Urso G. 2001. Simulation and management of on-demand irrigation systems: a combined agrohydrological and remote sensing approach. Monography, Wageningen University, 174 pp.

D'Urso G., Basile A. 1997. Realizzazione di carte delle proprietà idrauliche dei suoli finalizzate all'applicazione di modelli idrologici a scala regionale. *Atti VI Convegno Naz. Ass. Ingegneria Agraria, Ancona*, 261-272.

D'Urso G., Menenti M. 1995. Mapping crop coefficients in irrigated areas from Landsat TM images. *Proceed. European Symposium on Satellite Remote Sensing II, Europto, Paris, settembre 1995; SPIE, Intern. Soc. Optical Engineering, Bellingham (USA)*, vol. 2585:41-47.

D'Urso G., Menenti M., Santini A. 1999. Regional application of one-dimensional water flow models for irrigation management. *Agricultural Water Management*, 40:291-302.

D'Urso G., Santini A. 1996. A remote sensing and modeling integrated approach for the management of irrigation distribution systems. In: *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Proceed. Am. Soc. Agric. Engin. (ASAE), Intern. Workshop San Antonio, Texas (USA)*, 1996, 435-441.

D'Urso G., Santini A. 2002. Nuove tecnologie per l'uso razionale della risorsa idrica in agricoltura: simulazione e gestione di sistemi irrigui. *Atti del 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza*.

Engman E.T., Chauhan N. 1995. Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, 51:189-198.

F.A.O. 1994. Irrigation water delivery models. *Proceed. FAO. Expert Consultation Rome, October 1993; Food and Agriculture Organism, Water Report n. 2; 312 pp.*

F.A.O. 1995. Use of remote sensing techniques in irrigation and drainage. *Proceed. Expert Consultation FAO-Cemagref, Montpellier, Nov. 1993; Food and Agriculture Organism, Water Report n. 4; 201 pp.*

F.A.O. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and*

- drainage Paper n. 56, Food and Agriculture Organisations, Roma.
- Jensen M.E., Burman R.D., Allen R.G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manual n. 701.
- Lefebvre J. 1977. La regulation dynamique et sa mise en oeuvre au Canal de Provence. *La Houille Blanche*, 32:265-270.
- Li Jiren, Zhedan C., Fuchuan X., Jian L., Wen W., Lei C. 1997. Application of remote sensing and GIS techniques for irrigable land investigations. In: Baumgartner M.F. et al. (eds.): *Remote sensing and Geographic Information Systems for design and operation of water resources systems*, 17-21. IAHS Publ. n. 242, Wallingford, UK.
- Monteith J.L., Unsworth M.H. 1990. *Principles of Environmental Physics*. E. Arnold Ed., London, 290 pp.
- Moran M.S., Jackson R.D. 1991. Assessing the spatial distribution of evapotranspiration using remotely sensed inputs. *J. Environ. Qual.*, 20:725-737.
- Palladino M., Romano N., Santini A. 2005. Integration of pedotransfer functions and topographical data to obtain soil hydraulic properties at catchment scale. In: Nützmann G., Viotti P., Aagaard P. (eds.): *Reactive Transport in Soil and Groundwater: Processes and Models*.
- Rey J., Hemakumara H.M. 1994. Decision support systems (DSS) for water distribution management. Theory and practice. IIMI Working Paper n. 31, 44 pp.
- Romano N., Santini A. 1997. Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. *J. Hydrology*, 202:137-157.
- Santini A. 1982. Dinamica dell'acqua nel terreno. *Atti Convegno Naz. 1ª Sez. Associaz. Ital. di Genio Rurale*, Padova, 21-44.
- Santini A. 1992. Modelling water dynamics in the soil-plant-atmosphere system for irrigation problems. *Excerpta n. 6*, Milano.
- Santini A. 1991. Modellizzazione del trasporto dell'acqua nel sistema suolo-pianta-atmosfera. *Riv. di Agronomia*, 24:273-290.
- Seguin B., Itier B. 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *Int. J. Rem. Sens.*, 4:371-383.
- Smith M. 1992. CROPWAT. A computer program for irrigation planning and management. *FAO-Irrigation and Drainage Paper n. 46*, Rome, 126 pp.
- Texeira J.L., Fernando R.M., Pereira L.S. 1993. RELREG, a model for real time irrigation scheduling. 15th Intern. Congress on Irrigation and Drainage, The Hague, Netherlands; *Transaction of 2nd Workshop on Crop-Water Models*, 15 pp.
- van Bakel P.J.T. 1986. A systematic approach to improve the planning, design and operation of regional surface water management systems: a case study. Report 13, Institute for Land and Water Management Inst. (ICW), Wageningen, The Netherlands, 118 pp.
- van Genuchten M.Th., Leij F.J., Lund L.J. (eds.) 1992. *Proceed. International Workshop on Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils*, U.S. Salinity Lab. and Dept. Soil And Environm. Sci., University of California, Riverside, Ca., October 1989, 718 pp.
- Yeh W., Becker L., Toy D., Graves A.L. 1980. Central Arizona Project: Operation models. *J. Water Res. Planning and Manag.*, ASCE, 106:521-540.