

Agrometeorologia ed esigenze idriche delle colture

Luigi Mariani*, Gabriele Cola

*Dipartimento di Produzione Vegetale, Università di Milano
Via Celoria 2, 20100 Milano*

Associazione Italiana di Agrometeorologia

Riassunto

Scopo del lavoro è quello di descrivere il ruolo delle tecniche agrometeorologiche per la gestione idrica delle colture fornendo anche alcuni significativi esempi di attività di ricerca e sviluppo in corso in tale settore. Dopo una discussione generale in merito all'importanza dell'acqua per le piante e l'ecosistema si passa a discutere gli aspetti legati al bilancio idrico delle colture. Vengono altresì presentate alcune considerazioni in merito agli effetti del cambiamento climatico sul rifornimento idrico delle colture.

Parole chiave: agrometeorologia, bilancio idrico, cambiamento climatico, previsioni meteorologiche.

Summary

AGROMETEOROLOGY AND WATER NEEDS OF CROPS

This paper aims to present some agrometeorological methods useful for water management in agriculture discussing the existing technology and giving some insights about research and development activities in this field. After a general discussion about the importance of water for plants and more generally for the ecosystem the agrometeorological aspects of water balance are discussed and opportunities of use of forecasts are also presented. Some effects of climatic change on water needs of crops are also discussed.

Key-words: agrometeorology, climatic change, water balance, weather forecast.

1. Introduzione

L'agrometeorologia è una disciplina applicata che si occupa di ecosistemi agricoli e forestali analizzando in particolare i legami causali fra variabili guida atmosferiche (radiazione, temperatura, umidità, vento, precipitazione, ecc.) e sistemi biologici (colture e specie forestali in primis) (Mariani, 2002).

Nella nostra materia esistono stretti legami fra attività operative di servizio, attività di ricerca e sviluppo, attività di insegnamento, formazione ed aggiornamento, attività industriali e utenza agricola. In particolare le attività operative di servizio vedono una struttura nazionale di riferimento (l'Ufficio Centrale di Ecologia Agraria del CRA) ed una serie di servizi ope-

rativi in ambito regionale e locale; le attività di ricerca e sviluppo coinvolgono varie strutture fra cui Università e Consiglio Nazionale delle Ricerche, le attività di insegnamento, formazione ed aggiornamento si svolgono in prevalenza in ambito universitario; inoltre alcune attività relative ad ambiti specifici sono condotte dall'Aiam; infine le attività industriali vedono attive le industrie produttrici di sistemi e di strumenti di misura. L'utenza agricola è un bacino assai vasto e diversificato che utilizza prodotti agrometeorologici, dai dati alle previsioni ai bollettini informativi.

Le norme tecnico-operative che regolano le attività agrometeorologiche a livello di servizio sono fissate dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (World Meteorological Organisation –

* Autore corrispondente: tel.: +39 02 50316587; fax: +39 02 50316575. Indirizzo e-mail: luigi.mariani@unimi.it

WMO) e dalla FAO. In particolare le normative WMO sono raccolte nella guida n. 134 (WMO, 1981), la quale è attualmente in fase di revisione da parte di un gruppo di lavoro internazionale. Maggiori notizie su tale attività sono disponibili al sito dell'International Society of Agricultural Meteorology – INSAM (<http://www.agrometeorology.org/>). Fondamentale per quanto attiene alle normative di settore è anche la guida alla strumentazione meteorologica ed ai metodi di osservazione (WMO, 1996).

2. Agrometeorologia e ciclo dell'acqua

Fra gli scopi principali dell'agrometeorologia vi è lo studio del ciclo dell'acqua nella sua frazione atmosferica e terrestre. La colonizzazione delle terre emerse da parte delle piante avvenne molti milioni di anni fa (le prime piante vascolari sono del tardo siluriano – circa 420 milioni di anni fa – mentre nel Devoniano comparvero alcuni caratteri moderni quali gli stomi con celle di guardia), attivando quello che può essere a giusta ragione considerato come il “segmento mancante” del ciclo dell'acqua e cioè il trasferimento dal suolo all'atmosfera (Boyce et al., 2003; Kar, 2003).

Le piante, assorbendo acqua dal terreno e cedendola all'atmosfera, ottengono grandi vantaggi in termini di omeostasi (stabilità del contenuto idrico dei diversi organi), di termoregolazione, di assorbimento di sostanze nutritive dal terreno e di possibilità di svolgere fotosintesi. Inoltre con la loro attività arricchiscono di vapore acqueo l'atmosfera, ove tale gas svolge due ruoli chiave a livello climatico globale:

- quello di vettore energetico, in grado di assorbire energia da grandi superfici tramite i cambiamenti di stato e di liberare poi l'energia stessa in modo concentrato nelle aree interessate da precipitazioni;
- quello di principale gas serra, responsabile in larga misura di quel meraviglioso fenomeno in virtù del quale la temperatura media di superficie della terra risulta di 13 °C anziché di -17 °C, rendendo il pianeta abitabile dagli esseri viventi. Per una stima basata del peso del vapore acqueo come gas serra occorre premettere che ogni stima sull'importanza relativa dei diversi gas in termini di effetto serra è inficiata dal fatto che i diversi gas as-

sorbono radiazione a onda lunga secondo peculiari bande che risultano in parte sovrapposte. Un modo ragionevole per affrontare il problema può essere dunque quello proposto da Ramanathan e Coakley (1978) e che si basa sull'utilizzo di un modello matematico per evidenziare cosa accadrebbe sottraendo all'atmosfera un gas alla volta. In tal modo si può dedurre che il 64% della radiazione a onda lunga emessa dalla Terra viene intrappolata dal vapore acqueo, il 14% dalle nubi (anch'esse in larghissima misura composte d'acqua), il 12% da CO₂ ed il 3% da O₃.

3. Esigenze idriche delle colture e prospettive globali dell'agricoltura

Una chiave di lettura forte del concetto di “gestione idrica delle colture agrarie” ci viene da una visione del contesto globale in cui oggi si svolge l'attività agricola. Negli ultimi cinquant'anni la popolazione mondiale è triplicata passando da 2,5 miliardi del 1950 a 6,7 miliardi di esseri umani odierni. Fatto ovvio, ma non a tutti evidente, è che l'agricoltura, per reggere il passo della crescita della popolazione, ha dovuto anch'essa triplicare le rese (ad esempio la produzione italiana di frumento è passata dai 17 q per ettaro dei primi anni Cinquanta ai 50 q degli anni intorno al 2000). Tale massiccio incremento quantitativo, noto come rivoluzione verde, è stato in genere accompagnato da un miglioramento qualitativo delle produzioni; ad esempio la qualità dei frumenti per la panificazione o per la pasta è oggi assai più stabile ed elevata di quanto non fosse cinquant'anni orsono (Dexter e Marchylo, 2002).

La rivoluzione verde ha costretto il settore agricolo a pagare gravi prezzi in termini di degradazione del suolo, di desertificazione, di erosione genetica e perfino di perdita d'identità culturale. Per di più i cambiamenti non sono da ritenere conclusi, in quanto per il 2050 è attesa una popolazione di 9 miliardi di esseri umani, peraltro soggetti ad un sempre più massiccio inurbamento, il che richiederà un'ulteriore, sensibile evoluzione nel modo di fare agricoltura. In particolare si imporranno ancora di più le istanze di globalizzazione, con la necessità di ga-

rantire grandi masse di produzione cui saranno soprattutto chiamati i paesi detentori di terre di buona qualità (Europa, Asia e Nord America in primis).

In tale quadro è cruciale la disponibilità di informazioni in grado di orientare verso un uso razionale dell'acqua (Cavazza, 2003). Ciò può essere ottenuto mettendo a disposizione dati meteorologici pregressi, attuali e previsti di buona qualità e prodotti con continuità. Tali dati sono importanti di per sé per orientare le decisioni strategiche (quelle che impegnano l'azienda per uno o più anni, come ad esempio la progettazione delle reti irrigue) e tattiche (quelle del giorno per giorno, come ad esempio la decisione su quando irrigare e quant'acqua distribuire).

Un primo dato importante per orientare le decisioni strategiche in ambito irriguo è costituito dalla produttività dell'acqua per le colture irrigue, che costituisce un'interessante indicatore per stime sintetiche di produzione. Senza trascurare il classico lavoro di Manzoni e Puppo (1943) è oggi opportuno considerare i dati assai più recenti riportati da Doorenbos e Kassam (1979) e nella review di Zwart e Bastiaanssen (2004).

Al tema dell'efficienza irrigua afferiscono sia lavori di analisi in aree agricole di grande rilevanza globale (Xi-Ping Deng, 2006; Ravelli e Rota, 1999) sia lavori che mirano a valutare le opportunità di crescita della produzione tramite azioni specifiche sulla fisiologia e sulle agrotecniche (Singlers et al., 2005).

È naturale attendersi che le condizioni economico-produttive dei prossimi anni portino a ripensare in modo complessivo la struttura e la dimensione delle aziende agrarie; tale revisione dovrà necessariamente essere condotta anche alla luce delle caratteristiche del clima, in virtù ad esempio dell'inscindibile rapporto fra clima e sistemazioni idraulico-agrarie (Bonciarelli, 1978).

Altri problemi che si stanno facendo sempre più urgenti, in particolare nelle regioni sviluppate, sono da un lato la gestione della risorsa idrica in agricoltura a fronte di usi concorrenti della stessa da parte dei settori extra-agricoli e dall'altro la gestione dei problemi di degrado ambientale che possono derivare dall'uso irrazionale di tale risorsa. Un esempio di analisi relativo agli Stati Uniti d'America è riportato da Hauer e Lorang (2004).

Da rilevare infine che in un contesto agricolo che mira a produzioni sempre più elevate resterà ovviamente spazio per i prodotti d'élite, alle cui esigenze di sempre maggiore qualificazione vengono incontro le tecniche agrometeorologiche che permettono di valutare da un lato le peculiarità dei diversi areali produttivi in termini di vocazionalità e dall'altro l'influenza dell'andamento di un'annata agraria su quantità e qualità delle produzioni (WMO, 2005). Anche in questo caso la gestione dell'acqua assume un ruolo cruciale come determinante della qualità dei prodotti.

4. Il bilancio idrico e le sue variabili guida meteorologiche

Il bilancio idrico è un bilancio di massa fra apporti (precipitazione, irrigazione e risalita di falda) e perdite (evapotraspirazione, ruscellamento, infiltrazione) riferito al serbatoio terreno (Cavazza e Patruno, 2005). A seconda della scala di applicazione potremo avere bilanci di campo (microscala in termini meteorologici) ovvero bilanci territoriali (meso e macrocala). Esempi applicativi di bilanci idrici territoriali sono ad esempio proposti da Ravelli e Rota (1999).

In questa sede trascureremo gli aspetti di fisica del terreno per dedicarci alle sole variabili guida meteorologiche ed in particolare alle precipitazioni ed alle variabili da cui dipende l'evapotraspirazione delle colture (radiazione, temperatura, umidità relativa e vento).

Da rilevare per scopi di bilancio idrico aziendale alcune misure meteorologiche dovrebbero essere condotte a livello aziendale, pena una sensibile perdita di accuratezza. In particolare ci riferiamo alle misure di precipitazione, grandezza affetta da considerevole variabilità a livello di microscala. Ciò non sminuisce affatto il ruolo dei servizi agrometeorologici, impegnati a mantenere attive reti di misura che consentano di disporre di dati di buona qualità e con valenza generale, utilizzabili ad esempio per bilanci idrici a livello territoriale. Per quest'ultimo scopo si rivelano utili non solo le reti di stazioni meteorologiche meccaniche o automatiche ma anche strumenti più sofisticati come i radar meteorologici. Utili si rivelano pure le strategie di controllo di qualità dei dati meteorologici (Rana et al., 2004) e quelle volte ad utilizzare

strati informativi prodotti con strumenti diversi (radar, satelliti, reti di stazioni, sistemi di monitoraggio dei fulmini, ecc.) utilizzati in modo complementare.

Da segnalare anche i progressi nella messa a punto di modelli per la ricostruzione di dati meteorologici mancanti, modelli che sono ovviamente utilizzabili anche in sede di controllo di qualità dei dati misurati. Ad esempio si segnalano le seguenti tipologie di modelli:

- modelli per la ricostruzione di variabili meteorologiche a partire da altre variabili meteorologiche ad esse correlate. Fra tale metodi si segnalano ad esempio quelli che a partire dai dati giornalieri di temperatura minima e massima generano dati giornalieri di umidità relativa minima e massima (Benincasa et al., 1991; Mc Vicar e Jupp, 1999) o di radiazione solare globale (Bechini et al., 2000; Donatelli et al., 2003; Pammoli e Marletto, 2005);
- modelli di disaggregazione per la ricostruzione di dati giornalieri a partire da dati mensili e di dati orari o suborari di precipitazione a partire da dati giornalieri (Conolly et al., 1998; Dunn, 2004);
- modelli geostatistici per la spazializzazione di dati di interesse agrometeorologico (Bolstacq et al., 1998; WMO, 2005);
- modelli micrometeorologici per la ricostruzione degli andamenti delle diverse variabili all'interno del boundary layer e della canopy (Rana e Cellier, 1994; Lhommea e Guilioni, 2004; Acutis et al., 2005; Confalonieri et al., 2005; Mariani et al., in corso di stampa).

Una variabile chiave per il bilancio idrico è costituita dall'evapotraspirazione. Per le attività operative di stima di tale grandezza un punto fisso è oggi costituito dal quaderno FAO n. 56 (Allen et al., 1998) che indica, documentandoli in modo assai ben dettagliato, alcuni metodi standard per la stima ed in particolare l'equazione di Penman Monteith, l'equazione di Hargreaves e Samani e l'evaporimetro di classe A.

In tale settore è inoltre da segnalare una vivace attività di ricerca riferita al metodo di Penman Monteith (Allen et al., 2006), all'impiego di metodi micrometeorologici (Rana et al., 1990; Benincasa e Rana, 1992) ed all'impiego di atometri (Magliulo et al., 2003).

Il confronto fra i risultati ottenuti con i diversi metodi di stima è tuttora oggetto di sva-

riate attività di ricerca così come sono oggetto di studio i consumi idrici di singole colture erbacee (Rana et al., 2001; Rinaldi e Rana, 2004) e arboree (Rana et al., 2005). L'efficacia dei metodi di stima viene in genere verificata tramite misure ponderali, con lisimetri a pesata ovvero con TDR (Mastrorilli et al., 1998).

La determinazione del consumo idrico in colture soggette a stress è un altro settore in cui sono in atto svariate attività di ricerca (Rana et al., 1997; Steduto et al., 1997; Rana et al., 2004).

Da registrare infine il sempre più frequente ricorso al remote sensing per la stima dell'evapotraspirazione (Courault et al., 2005). In tale ambito gli approcci empirici, basati su dati da aereo o dati NOAA, considerano come input i dati di LAI oppure le caratteristiche di albedo ed emissività delle superfici mentre gli approcci meccanicistici si basano in genere sulla soluzione dell'equazione del bilancio energetico di superficie considerando come variabile indipendente l'evapotraspirazione della coltura.

Da segnalare anche il crescente uso di tecniche di remote sensing per il calcolo dei coefficienti colturali necessari per la stima dell'evapotraspirazione massima a partire dai valori di evapotraspirazione da coltura di riferimento (Allen et al., 2005; Garatuza e Watt, 2005; Neale et al., 2005).

5. I modelli operativi di bilancio idrico e il loro possibile uso in sede previsionale

Gli ultimi anni hanno visto da parte di diversi servizi agrometeorologici italiani l'attivazione di modelli di bilancio idrico in grado di fornire agli utenti indicazioni circa le necessità irrigue delle loro colture.

In tabella 1 sono elencati alcuni dei modelli operativi oggi disponibili insieme alle modalità di accesso da parte degli utenti. Fra le iniziative in fase sperimentale citiamo inoltre quella lanciata dai colleghi Giambattista Toller ed Andrea Cicogna e che propone un formato standard per la messa a disposizione dei gestori di impianti di irrigazione automatici dei dati agrometeorologici generati da reti regionali o locali (Toller e Corradini, 2006). Tale iniziativa sfrutta le potenzialità della telematica per realizzare un servizio con ricadute potenziali notevolissime e coinvolge attualmente i servizi agro-

Tabella 1. Esempi di modelli di bilancio idrico operativi presso i servizi agrometeorologici in Italia.

Table 1. Examples of water balance models operated by agrometeorological services in Italy.

Modello	Regione e Servizio che lo gestisce	Anno di attivazione	Modalità di accesso da parte degli utenti	Riferimento bibliografico
Criteria	Emilia Romagna ARPA – SIM	-	Output del modello diffusi dal sito del servizio	Marletto et al., 2005
Irriguida	Abruzzo – ARSSA Servizio Agrometeorologico	2002	Programma installabile su personal computer	Acutis et al., 2001; Quaglietta Chiarandà et al., 2001
Irriweb Basilicata	Basilicata – ALSIA (Agenzia Lucana Sviluppo e Innovazione in Agricoltura)	2002	Internet e sms	Scalcione et al., 2006; Giannerini, 1993 e 2004
Irrinet Sardegna	Consorzio SAR (Servizio Agrometeorologico per la Sardegna)	1998	Internet	Fiori et al., 1998; Fiori, 2005
Servizio Irriguo Guidato alle Aziende	ARPA – Friuli Venezia Giulia	1994	E-mail	Cicogna et al., 1994; Danuso et al., 1994
Servizio Irriguo Guidato Territoriale	ARPA – Friuli Venezia Giulia	1997		Gani et al., 2000
Irriweb Veneto	ARPAV, Centro Meteo di Teolo, Unità Operativa di Agro-Biometeorologia	2005	Internet, sms	Giannerini, 1993 e 2004
Prodotti per l'assistenza all'irrigazione	ARSSA Calabria	2006	Internet	Caterisano, comunicazione personale
Irrisias	Regione Siciliana – SIAS	2004	Internet	Drago et al., 2003
Irrinet	Regione Emilia-Romagna – Consorzio di Bonifica di secondo grado per il Canale Emiliano-Romagnolo	1999	Internet, sms, chiamata esterna ad url predefinita	

meteorologici di Trentino, Friuli Venezia Giulia ed Emilia Romana.

Abbiamo visto che le principali variabili guida dei modelli di bilancio idrico sono variabili meteorologiche. Tali variabili sono oggetto di diverse tipologie di previsioni (WMO, 2001; Coiffier, 2004; Deutscher Wetterdienst, 2004): now-casting, a breve termine, a medio termine e a lungo termine. Per la definizione di tali tipologie e per le relative caratteristiche in termini di accuratezza e utilità si rinvia alle tabelle 2 e 3.

Mentre le previsioni a lungo termine, salvo casi particolari che non riguardano la nostra area (Adams, 2003; ECMWF, 2005), sono oggi da considerare come sperimentali e non ancora passibili di impiego operativo, possiamo invece affermare che nel breve e nel medio termine, fino a 5-7 giorni in avanti rispetto alla previsio-

ne, i dati previsti di temperatura, precipitazione, vento e radiazione presentano un'accuratezza tale da poter essere utilizzati come input per modelli di bilancio idrico, il che offre oggi la possibilità dell'uso di tali modelli in sede previsionale (Friesland et al., 1998).

In tali operazioni esiste un problema di gap di scale (le piante agiscono alla microscala, mentre i modelli forniscono prodotti utili alla mesoscala, e cioè con pixel dell'ordine dei 5-40 km). Il gap esistente fra meso e microscala viene oggi superato sia utilizzando modelli previsionali ad area limitata (LAM) sia impiegando modelli statistici di tipo MOS (Model Output Statistics) in grado di adattare allo strato limite rurale gli output dei modelli previsionali numerici (Dobesch et al., 1993).

Un altro problema che si osserva in relazione ai prodotti previsionali è la necessità di disporre

Tabella 2. Tipi di previsioni meteorologiche.
Table 2. Types of weather forecast.

Tipo di previsione	Acronimo	Definizione	Caratteri dell'output	Tecnologia predominante	Altri aspetti	Risoluzione spazio-temporale dei prodotti più caratteristici
<i>Nowcasting</i>	NC	Descrizione del tempo presente e previsione fino a 2 ore dall'emissione	Un set di variabili relativamente completo (temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità e direzione del vento, radiazione solare, precipitazione (quantità e tipo), nuvolosità (livello di copertura e tipo di nubi, ecc.) Tecniche di analisi, estrapolazione di traiettorie, modelli empirici, metodi empirici frutto dell'esperienza dei fulmini, da osservazioni locali, ecc.)	Tecniche di analisi, estrapolazione di traiettorie, modelli empirici, metodi empirici frutto dell'esperienza del previsore. L'informazione di base è costituita dai dati prodotti da reti di stazioni automatiche, da mappe radar, da immagini da satelliti meteorologici, da sistemi di monitoraggio dei fulmini, da osservazioni locali, ecc.)	Un fondamentale pre-requisito per NC è la continuità operativa e la disponibilità di un sistema efficiente di diffusione dell'informazione (esempio: l'individuazione di temporali molto intensi con grandine che interessano una data area deve essere seguita da un'informazione continua per gli utenti finali)	Risoluzione temporale tipica: un'ora; Risoluzione spaziale tipica è la mesoscala gamma (20-2 km)
Previsione a brevissimo termine	VSRF (Very Short Range Forecast)	Previsione fino a 12 ore dall'emissione	Un set di variabili relativamente completo (vedere nowcasting)	Tecniche di analisi, estrapolazione di dati e mappe previste da modelli NWP (LAM o GM), metodi empirici frutto dell'esperienza del previsore. L'informazione di base è costituita dai dati prodotti da reti di stazioni automatiche, da mappe radar, da immagini da satelliti meteorologici, da modelli NWP, da osservazioni regionali e locali, ecc.)	Un fondamentale pre-requisito per VSRF è la disponibilità di un sistema efficiente di diffusione dell'informazione (esempio: la previsione di gelate dev'essere diramata ai produttori in modo tempestivo per permettere l'attivazione dell'irrigazione climatizzante)	Risoluzione temporale tipica: 1-3 ore; Risoluzione spaziale tipica è la mesoscala beta (200-20 km)
Previsione a breve termine (*)	SRF (Short Range Forecast)	Descrizione delle variabili meteorologiche da 12 a 72 ore	Un set di variabili relativamente completo (vedere nowcasting)	Interpretazione di dati previsti e mappe da NWP (LAM e GM), modelli empirici, metodi empirici frutto dell'esperienza del previsore. L'informazione di base è costituita dai dati prodotti da reti di stazioni automatiche, da mappe radar, da immagini da satelliti meteorologici, da modelli NWP, da osservazioni regionali e locali, ecc.)	Nel SRF l'attenzione si concentra sulle caratteristiche a mesoscala dei differenti campi meteorologici. Le SRF possono essere diffuse attraverso una vasta gamma di media (quotidiani, radio, Tv, web, etc.) e deve rappresentare un'informazione fondamentale per gli agricoltori	Risoluzione temporale tipica: 6 ore; Risoluzione spaziale tipica è la mesoscala alfa o beta (2000-20 km)

Tipo di previsione	Acronimo	Definizione	Caratteri dell'output	Tecnologia predominante	Altri aspetti	Risoluzione spaziotemporale dei prodotti più caratteristici
Previsione a medio termine (*)	MRF (Medium Range Forecast)	Descrizione delle variabili meteorologiche da 72 a 240 ore	Un set di variabili relativamente completo (vedere nowcasting)	mappe da NWP (GM), metodi empirici frutto dell'esperienza del previsore. L'informazione di base è costituita dai dati dei modelli NWP. Tecniche di "ensemble forecasting" sono adottabili con lo scopo di superare il problema dell'abbassamento con il tempo del potere previsionale dei modelli NWP. Anziché utilizzare un solo output del modello si eseguono molte run con condizioni iniziali leggermente differenti. Si crea così la media e la deviazione standard delle varie previsioni ottenute. Tali prodotti forniscono un'idea più realistica dei livelli di incertezza che si celano nelle uscite dei modelli numerici	Nelle MRF l'attenzione è centrata sui caratteri sinottici delle differenti variabili strutture meteorologiche. Le MRF possono essere diffuse attraverso una vasta gamma di media (quotidiani, radio, Tv, web, etc.) e deve rappresentare un'informazione fondamentale per gli agricoltori	Risoluzione temporale tipica: 12-24 ore; Risoluzione spaziale tipica è la mesoscala alfa (2000-2000 km)
Previsione a lungo termine	LRF (Long Range Forecast)	Da 12-30 giorni a 2 anni	Previsione di norma ristretta ad alcune variabili fondamentali (temperatura e precipitazione). Altre variabili come vento, umidità relativa e contenuto idrico del suolo sono a volte diffuse. L'informazione può essere espressa come valori assoluti ovvero in termini di anomalie.	Metodi statistici (es: teleconnessioni) e NWP. L'accoppiamento dei modelli atmosferici con modelli circolatori oceanici è in vari casi adottato per migliorare la qualità dei prodotti a lunga scadenza	A volte si considera una previsione a scadenza estesa (ERF), che va da 10 a 30 giorni	Tipica risoluzione temporale di 1 settimana / 1 mese; tipica risoluzione spaziale dell'ordine della macroscala beta (10.000-2.000 km)

(*) Di recente si osserva il convergere tra SRF MRF verso un solo tipo di previsione, in virtù del fatto che il modelli di previsionali numerici (Numerical Weather Prediction models - NWP) sono alla base tanto delle SRF che delle MRF. Sarebbe forse più corretto distinguere fra previsioni basate tanto su modelli globali (GM) che su modelli a area limitata (LAM) e previsioni basate sui soli modelli globali (GM), tenendo in considerazione il fatto che i GM forniscono previsioni fino a 7-15 giorni dall'emissione e con pixel dell'ordine del mezzo grado di latitudine/longitudine mentre i LAM forniscono previsioni fino a 72 ore dall'emissione e con pixel dell'ordine dei 10 x 10 km o meno.

Tabella 3. Accuratezza, utilità per gli agricoltori e principali limitazioni dei diversi tipi di previsioni meteorologiche.

Table 3. Accuracy, usefulness for farmers and main limitations for different types of weather forecasts.

Tipo di previsione		Accuratezza (*) reale	Utilità potenziale	Principali limitazioni
Nowcasting	Molto alta	Molto bassa	Moderata	Il sistema di diffusione è inadatto; la flessibilità delle tecnologie agricole è insufficiente
Previsione a brevissimo termine	Molto alta	Bassa	Alta	Il sistema di diffusione è inadatto; la flessibilità delle tecnologie agricole è insufficiente; l'agricoltore non conosce come fare un uso efficace di tali prodotti
Previsione a breve termine	Alta	Alta	Molto alta	È auspicabile un ulteriore adattamento delle previsioni alle esigenze degli agricoltori; l'agricoltore non conosce come fare un uso efficace di tali prodotti
Previsione a medio termine	Alta o moderata fino a 5 giorni; più bassa in seguito	Moderata	Molto alta	È auspicabile un ulteriore adattamento delle previsioni alle esigenze degli agricoltori; l'agricoltore non conosce come fare un uso efficace di tali prodotti
Previsione a lungo termine	Molto bassa	Molto bassa	Alta	L'efficacia delle LRF è più alta ai tropici che alle medie latitudini. Ciò perché le aree tropicali hanno una discreta quantità di segnale prevedibile mentre alle medie latitudini le fluttuazioni casuali del tempo sono di norma più ampie della componente prevedibile

(*) Giudizio soggettivo di un previsore che opera alle medie latitudini. La valutazione è riferita alla copertura nuvolosa, alla temperatura dell'aria ed al verificarsi di precipitazione.

di dati in merito alla qualità dei prodotti stessi, in modo tale da utilizzare solo prodotti di qualità sufficiente. Da questo punto di vista occorre segnalare che mentre le tecniche di controllo di qualità dei dati sono in progressivo miglioramento (Thornes e Stephenson, 2001) sarebbe quantomai auspicabile poter disporre di statistiche di qualità per i prodotti operativi emessi dai servizi meteorologici nazionali e locali. Su quest'ultimo aspetto occorre da un lato sensibilizzare gli utenti, i quali dovrebbero assumere un atteggiamento più cauto nei confronti della qualità dei prodotti previsionali utilizzati, e dall'altro i produttori di informazione. A titolo di esempio si segnala che il Servizio Meteorologico dell'Emilia Romagna pubblica da qualche tempo su web le verifiche di qualità delle previsioni di temperatura e precipitazione (<http://www.arpa.emr.it/smr/pagine/sapernedipiu/verifica/#precipitazioni>).

6. Cambiamento climatico ed effetti sul rifornimento idrico delle colture

Lo studio dell'andamento del clima nell'area euro-mediterranea dalla fine dell'ultima era gla-

ciale, condotto per lo più tramite l'analisi di proxy data, mostra che il cambiamento è una delle caratteristiche chiave del nostro clima, tanto che a livello storico il cambiamento può essere considerato sostanzialmente la norma e la storia della civiltà umana potrebbe essere letta come storia dei tentativi dell'uomo di affrancarsi dalla "dittatura del clima" (Mariani, in corso di stampa). Verso un tale obiettivo la civiltà umana ha compiuto passi notevoli, specialmente nei Paesi sviluppati, tant'è vero che ad esempio in Europa le ultimi morti in massa per fame dovute a cause climatiche risalgono al 1740 (Leroy Ladurie, 2004).

Nonostante tutti gli sforzi compiuti le condizioni socio-economiche sono tuttavia tali da indurre ancor oggi un'elevata sensibilità dei nostri sistemi agricoli alle avversità climatiche, siccità in primis. Da ciò deriva l'utilità delle iniziative di analisi, monitoraggio e previsione delle condizioni di siccità e del rischio di desertificazione che a tali condizioni risulta almeno in parte connesso (Puigdefabregas, Mendizabal, 1997; Mariani, 2002). Tali iniziative sono coordinate dalle Nazioni Unite attraverso l'U.N. Convention to Combat Desertification (UNCCD), e mirano a

stimolare attività più specifiche a livello di singole nazioni.

Una review circa i trend storici delle variabili di interesse idrogeologico (precipitazione, ruscellamento, vapore acqueo troposferico, umidità del suolo, bilancio di massa dei ghiacciai, evaporazione, evapotraspirazione e lunghezza della stagione di crescita) è stata di recente presentata da Huntington (2005). Pur nell'incompletezza in termini spaziali e temporali dei dati disponibili posta in evidenza dallo stesso autore, le informazioni raccolte lo spingono a propendere per l'intensificazione del ciclo dell'acqua e ad evidenziare altresì l'assenza di trend particolari per quanto concerne le tempeste tropicali e le alluvioni.

A livello globale è da tempo evidente lo strettissimo legame esistente fra il clima e la circolazione, che ha le sue radici nel fatto che la circolazione è lo strumento attraverso il quale

il sistema climatico riequilibra gli scompensi energetici a tutte le scale. In particolare la circolazione atmosferica a macroscale è responsabile dell'80% dello scambio energetico fra basse e alte latitudini e quella oceanica del restante 20%, il che porta ad affermare che parlare di clima e cambiamento climatico senza considerare la circolazione atmosferica è come per un medico parlare di fisiologia umana senza considerare la circolazione sanguigna. Ciò giustifica l'interesse per gli studi legati al rapporto fra circolazione e variabili meteorologiche al suolo (tabella 4).

Da tali studi emerge che l'area europea è stata interessata sul finire degli anni Ottanta del XX secolo da un cambiamento climatico che si è tradotto in un aumento delle temperature e dell'evapotraspirazione accompagnata, per l'area italiana, dal calo delle precipitazioni in particolare nei mesi invernali, primaverili ed estivi. Con riferimento a molte variabili di interesse

Tabella 4. Alcuni indici circolatori e relativi effetti sulle condizioni meteorologiche al suolo.

Table 4. Some circulation indexes and their effects on surface meteorological conditions.

Indice	Significato	Effetti a livello euro-mediterraneo
NAO (North Atlantic Oscillation)	Indice che esprime l'intensità delle Grandi Correnti Occidentali (a NAO invernale molto positivo corrisponde una circolazione da ovest molto accentuata)	L'anomalia positiva del NAO invernale (situazione in atto dal 1989) provoca <i>per l'area Mediterranea</i> un'anomalia termica positiva e una anomalia precipitativa negativa, <i>per il Nord Europa</i> un'anomalia termica e precipitativa positiva.
AO (Artic Oscillation)	Esprime la robustezza del vortice circumpolare che si traduce nella robustezza delle Grandi Correnti Occidentali.	L'anomalia positiva di tale indice corrisponde all'anomalia positiva del NAO, pertanto i due indici (NAO e AO) sono utilizzabili in modo relativamente intercambiabile. In altri termini (Wallace, 2000) NAO e AO rappresentano lo stesso fenomeno visto da due punti di vista diversi.
ENSO (El Nino Southern Oscillation)	Indice che esprime l'anomalia ciclica della temperatura del Pacifico che ha pesanti ripercussioni sulla circolazione globale	Gli effetti più eclatanti riguardano la fascia intertropicale anche se influenze discernibili si hanno anche sul clima delle medie altitudini
Tipi di tempo al suolo o in quota	Individuazione dei tipi di circolazione che agiscono su aree più o meno ampie	Esempi di questi tipi di analisi sono i tipi circolatori di Lamb per l'area britannica o i tipi circolatori a 850 hPa per l'area italiana. Si pensi ad esempio all'importanza per il Nord Italia legata alla conoscenza di frequenza, persistenza e variabilità interannuale dei giorni con Foehn o con ciclone di Genova o con anticiclone africano
Climatologia delle masse d'aria	Riconoscimento dei diversi tipi di masse d'aria che insistono su un certo territorio ed elaborazione di statistiche specifiche	Per le medie latitudini questi studi sono interessanti in virtù delle peculiarità delle diverse masse d'aria (artiche, polari, subtropicali)
Studio di traiettorie delle strutture meteorologiche	Studio dei tracciati di strutture meteorologiche quali depressioni chiuse, saccature, anticloni	Questi studi sono interessanti in quanto consentono di cogliere la variabilità spazio-temporale di tali traiettorie cogliendo i possibili effetti sulle aree interessate

agrometeorologico (temperatura, precipitazione, vento, evapotraspirazione) il cambiamento ha assunto la forma di discontinuità climatica (shift). La causa di questa discontinuità è da ricercarsi nel brusco ed inatteso cambiamento di regime delle grandi correnti occidentali (Westerlies) che spingono l'aria atlantica verso la massa continentale eurasiatica (Werner et al., 2000). Tale cambiamento di regime è segnalato ad esempio dall'andamento invernale dell'indice NAO – North Atlantic Oscillation (Marshall et al., 2001), che proprio dal 1989 ha inaugurato una fase di spiccata anomalia positiva che si protrae tuttora. In sostanza dal finire degli anni Ottanta la circolazione si è occidentalizzata con una sequenza di inverni miti; in contemporanea l'irrobustirsi dell'anticiclone atlantico ha ridotto l'accesso delle perturbazioni atlantiche all'area mediterranea, il che spiega la diminuzione delle precipitazioni osservata in Italia. Un esempio illustrativo degli effetti di tale fenomeno a livello di bilancio idrico emerge da un'analisi speditiva condotta sulle serie storiche mensili di Milano Linate con lo scopo di evidenziare le eventuali tendenze nel deficit idrico dei vegetali, indagine che è stata intrapresa in relazione alla recrudescenza di fitopatie osservata di recente su piante ornamentali di parchi pubblici milanesi e che secondo un'ipotesi sarebbe da ricondurre a situazioni di stress indotte da carenza idrica. I valori di riferimento sono costituiti dai valori mensili di temperatura media delle minime e delle massime e di precipitazione di Milano Linate per il periodo 1951-2005. Dai dati di temperatura è stata ricavata l'evapotraspirazione da coltura di riferimento mensile (ET0) tramite l'equazione di Hargreaves e Samani (Allen et al., 1998). La conversione da ET0 ad evapotraspirazione massima (ETM) è stata ottenuta applicando i coefficienti culturali mensili riportati in tabella 5.

Ai dati sopra elencati è stato applicato un semplice modello di bilancio idrico a passo mensile fondato sul bilancio di massa riferito ad un terreno con riserva utile massima complessiva (AWC) per lo strato esplorato dalle radici pari

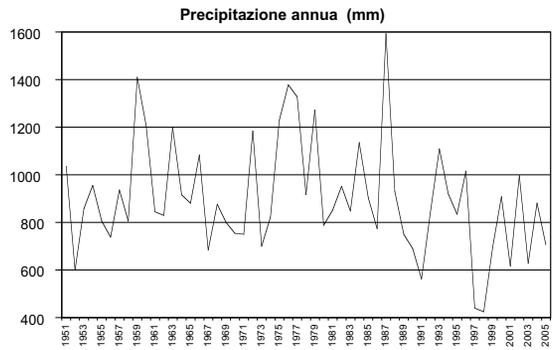


Figura 1. Precipitazioni totali annue – Milano Linate, 1951-2005.

Figure 1. Yearly precipitation – Milano Linate, 1951-2005.

a 150 mm. Per ragioni di semplicità si è considerato nullo il ruscellamento mentre l'eccesso idrico rispetto all'AWC è stato considerato perso per infiltrazione.

In complesso l'equazione di bilancio utilizzata è stata:

$$CI_{m+1} = CI_m + RR - ETM$$

la quale afferma che il contenuto idrico al mese m+1 (CI_{m+1}) è pari al contenuto idrico al mese m più la precipitazione RR meno l'evapotraspirazione massima ETM. Il deficit pluviometrico annuo è stato quindi ottenuto cumu-

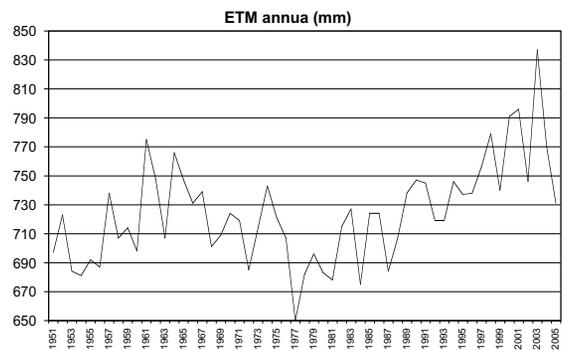


Figura 2. Evapotraspirazione massima annua – Milano Linate, 1951-2005.

Figure 2. Yearly values of Maximum Evapotranspiration – Milano Linate, 1951-2005.

Tabella 5. Coefficienti colturali mensili adottati per il bilancio idrico.

Table 5. Monthly crop coefficients adopted for the water balance.

	gen	feb	mar	apr	ma	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Kc	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.1	1.1	0.8	0.5	0.3	0.1

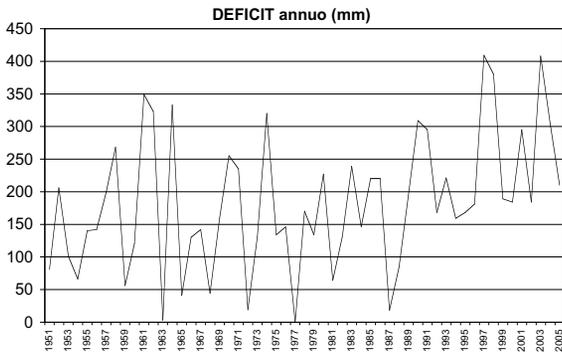


Figura 3. Deficit idrico totale annuo – Milano Linate, 1951-2005.

Figure 3. Yearly values of water deficit – Milano Linate, 1951-2005.

lando tutti i valori mensili di CI minori di 0. In figura 1 e 2 si riportano i valori di precipitazione annua ed evapotraspirazione massima mentre i deficit cumulati nei diversi anni sono riportati nel grafico in figura 3.

Ai dati annuali di deficit idrico è stata quindi applicata l'analisi di change point della libreria *strucchange* del software statistico R. In tal modo si è evidenziato che nella serie è presente una discontinuità che con un livello di confidenza del 90% ricade fra il 1983 ed il 1996; anno più probabile della discontinuità è il 1989, proprio l'anno del cambiamento di fase nella circolazione atlantica. In figura 4 si riportano graficamente i risultati dell'analisi statistica. Si osservi che il deficit medio del periodo a monte del change point è di 152 mm mentre quello a valle (dal 1989 ad oggi) è di 250 mm. In pratica quello che si osserva per la stazione in esame è un aumento dell'aridità estiva con maggiore stress per la vegetazione, di cui occorre tener conto in sede di valutazione della recrudescenza di varie fitopatie di origine biotica e abiotica osservata nei vegetali delle aree a parco dell'area di Milano.

I dati in esame mostrano che il deficit idrico per la stazione di Milano risente in modo sensibile del sopra discusso cambiamento climatico verificatosi alla fine degli anni Ottanta nell'area europea. Tale cambiamento climatico ci ha condotto alla nuova fase climatica che ci interessa tuttora, e che, come dianzi accennato, ha come maggiori effetti l'aumento delle temperature e dell'evapotraspirazione sull'intera area euro-mediterranea, cui si accompagna un calo delle precipitazioni per gli areali a clima

mediterraneo e di transizione (mesoclima padano).

Per l'area subalpina, di transizione fra aree a clima mediterraneo (Csa secondo Koeppen) e areale a clima europeo (Cfb secondo Koeppen), i sintomi evidenziati in modo netto per le aree Cfb e Csa appaiono più sfumati e spesso non leggibili con chiarezza. Anche per questo il segnale di shift climatico evidenziato per Milano appare interessante e meritevole di attenzione. Si deve infine segnalare che dalla presenza di un tale shift discendono svariate conseguenze pratiche fra cui ad esempio:

- la necessità di valutare l'anomalia dei diversi dati meteorologici (temperature, precipitazioni, vento, ecc.) con riferimento a serie storiche (normali climatiche) relative al periodo successivo al 1989, in modo tale da ancorare la valutazione del livello di anomalia e non ad un clima del passato;

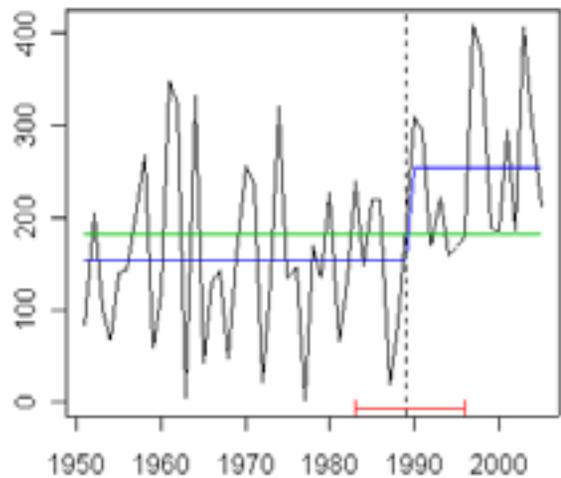


Figura 4. Analisi di change point che evidenzia il cambiamento climatico avvenuto nel 1989, che si è tradotto in un sensibile aumento del deficit idrico a Milano. La linea tratteggiata mostra il change point stimato. La linea orizzontale più in basso, i cui limiti sono il 1983 ed il 1997, indica l'intervallo di confidenza al 90% della ripartizione della serie in due segmenti. Le tre linee orizzontali sovrapposte alla spezzata che collega i valori rappresentano rispettivamente la media dell'intero periodo e le medie del periodo che precede e che segue il change point.

Figure 4. Change point analysis showing the climatic change of 1989 which produced a sensitive increase of water deficit for Milano. Dotted line shows the estimated change point. The lowest horizontal line, with limits are 1983 and 1997, shows the confidence range of 90% for the change point. The other 3 horizontal lines superimposed to the diagram represent respectively the mean of the whole period and the means for the period before and after the change point.

- la necessità di tenere conto di tale evidenza in sede di pianificazione (es: sarebbe opportuno tenere conto dei dati più recenti e comunque successivi alla discontinuità del 1989 per attività di programmazione irrigua, di gestione del livello dei laghi, di gestione dei consumi energetici urbani e rurali, ecc.).

Effetti di questo tipo sono evidenti nell'intero bacino del Mediterraneo. Ad esempio la relazione fra indice NAO e precipitazioni è stata indagata da Komuscu per la Turchia (2001).

Se il cambiamento climatico nell'area eurasiatica si manifesta con un aumento delle temperature, gli effetti sull'agricoltura potrebbero rivelarsi addirittura positivi se si fa fronte in modo razionale alle esigenze idriche delle colture. In tal senso si colloca la constatazione che a fronte dell'aumento delle temperature la viticoltura europea sta espandendosi più a sud che a nord, forte della disponibilità di acqua irrigua. Se ciò da un lato ci tranquillizza rispetto ai foschi millenarismi cui i media ci hanno purtroppo sempre più spesso abituati, dall'altro deve impegnarci nella ricerca di soluzioni razionali al problema dell'acqua. Su quest'ultimo punto occorre a nostro avviso evitare la scorciatoie da "maghi della pioggia" (Mariani, 2003), puntando invece in modo deciso su:

- investimenti nella gestione razionale degli invasi, nella razionalizzazione delle reti di distribuzione e nell'efficienza della gestione a livello di campo;
- attuazione di strategie di miglioramento genetico volte al miglioramento dell'efficienza nell'uso dell'acqua e nell'accentuazione dei caratteri di resistenza allo stress idrico (Maggiulo et al., 2003).

Con riferimento a quest'ultimo punto occorre segnalare che da più parti giungono indicazioni secondo cui l'aumento dei livelli di CO₂ si tradurrebbe in una maggior resistenza allo stress idrico (Idso e Kinball, 1992, Wall et al., 2001). La ragione di tale effetto sarebbe da ricercare anzitutto nel fatto che la fotosintesi in presenza di elevati livelli di CO₂ accrescerebbe il pool totale di carboidrati non strutturali (Hendrix et al., 1994; Drake et al., 1997; Estiarte et al., 1999), utilizzabile per sviluppare apparati radicali più robusti (Rogers et al., 1992; Rogers e Runion, 1994; Wechsung et al., 1995, 1999). Ad esempio nel sorgo le radici raggiungono una profondità massima di 1,6-2,0 m (Mayaki et al.,

1976; Kiagama et al., 1977; Chaudhuri et al. 1986a). La presenza di CO₂ elevate causa un incremento della massa radicale verificabile in ogni stadio di crescita per il sorgo ed un anticipato raggiungimento del fondo di un mini-rizotrone da 1,6 m. Inoltre sorgo ed altre specie in presenza di elevata CO₂ manifestano un'accresciuta ramificazione delle radici con aumento del numero di radici fini (Rogers et al., 1992).

Nel caso del riso è stato invece posto in evidenza che elevati livelli di CO₂ aumentano la crescita, la produzione di granella ed il livello di fotosintesi della canopy riducendo altresì l'evapotraspirazione del 10%. Durante cicli di stress idrico inoltre tale minor consumo idrico si traduce nella possibilità di proseguire la fotosintesi per 1-2 giorni rispetto a quanto avviene in colture soggette a CO₂ ambiente. Inoltre gli elevati livelli di CO₂ atmosferica migliorano gli impatti negativi del deficit idrico del suolo e gli stress indotti dalle alte temperature su specifici processi fisiologici (Baker et al., 2003).

Howden et al. (1999) hanno invece posto in evidenza che in ambiente di savana l'accresciuta efficienza nell'uso dell'acqua in presenza di più elevati livelli di CO₂ è in grado di mitigare gli effetti di stress idrico, specialmente in piante C₄, proteggendo gli ecosistemi di savana dall'influenza dell'elevata variabilità pluviometrica e dei periodici stress idrici tipici di tali ecosistemi. Tali fatti sono stati altresì posti in evidenza dal progetto australiano Ozface per l'arricchimento artificiale di CO₂ in ambienti di savana (Stokes et al., 2003).

7. Verso il monitoraggio globale delle anomalie

Le anomalie pluviometriche costituiscono un dato importante nell'ambito del sistema di allerta globale per le situazioni di stress idrico con potenziali ripercussioni sui livelli produttivi. In tale settore gli sforzi compiuti negli anni più recenti grazie alle tecniche di remote sensing sono stati considerevoli.

A tale proposito si segala il prodotto operativo aggiornato giornalmente sul sito http://disc.gsfc.nasa.gov/agriculture/ais_sup/current_conditions.shtml. Su tale sito si riportano le mappe di precipitazione stimata e le anomalie pluviometriche globali per archi di tempo variabili (ultime 3 ore, ultime 24 ore, ultimi 10, 30, 60 e 90

giorni). Il pixel è dell'ordine del grado ed il metodo si fonda sul sensore a microonde TRRM della NASA.

8. Conclusioni

L'analisi sommaria delle tecniche operative e delle attività di ricerca e sviluppo mostra un settore vivace ed in grado di rispondere alle esigenze dei produttori agricoli e degli enti incaricati di programmare e gestire la risorsa acqua. Si deve tuttavia constatare che proprio su quest'ultimo versante nel nostro Paese esistono spazi amplissimi per interventi di razionalizzazione dell'uso di tale risorsa, rispetto ai quali l'agrometeorologia è in grado di fornire informazioni di grande rilevanza applicativa e che devono essere sfruttate appieno.

Bibliografia

Acutis M., Quaglietta Chiarandà F., Fagnano M., Sifola M.I., Fagnano M., Merola G., Zarone A., Conte C., Punzo A., Postiglione L. 2001. Programma semplificato per la gestione dell'irrigazione ("SIMBIL"): Applicazione a colture di mais e tabacco. In: Postiglione L., Santini A., Fagnano M.: Modelli di agricoltura sostenibile per la pianura meridionale: gestione delle risorse idriche nelle piane irrigue, 53-67. Gutemberg, Salerno.

Acutis M., Richter G., Rana G., Laudato M., Trevisiol P., Bechini L., Gentile A. 2005. Simulazione della micrometeorologia e dei sistemi culturali in aree collinari. Rivista Italiana di Agrometeorologia, 8(1):34-35.

Adams R.M., Houston L.L., McCarl B.A., Tiscareno M.L., Matus J.G., Weiher R.F. 2003. The benefits to Mexican agriculture of an El Niño Southern Oscillation (ENSO) early warning system. Agricultural and Forest Meteorology, 115:183-194.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome (<http://www.fao.org/docrep>).

Allen R.G., Tasumi M., Morse A., Trezza R. 2005. A land-sat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. Irrigation and Drainage Systems, 19(3/4):25-268.

Allen R.G., Pruitt W.O., Wright J.L., Howell T.A., Ventura F., Snyder R., Itenfisu D., Steduto P., Berengena J., Yrisarry J.B., Smith M., Pereira L.S., Raes D., Perrier A., Alves I., Walter I., Elliott R. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference eto by Fao56 Penman-Monteith Method. Agricultural Water Management, 81:1-22.

Baker J.T., Allen L.H. Jr., Boothe K.J. 2003. Impacts of drought, high temperature and carbon dioxide on ri-

ce physiological processes [abstract]. Integrated Biological Systems Conference.

Bechini L., Ducco G., Donatelli M., Stein A. 2000. Modelling, interpolation and stochastic simulation of global solar radiation. Agriculture, ecosystems and environment, 81:29-42.

Benincasa F., Rana G. 1992. Confronto tra metodi micrometeorologici e lisimetro in misure di evapotraspirazione reale. Rivista di Agronomia, 26(1):19-24.

Bolstacq P.V., Swift L., Collins F., Regniered J. 1998. Measured and predicted air temperatures at basin to regional scales in the southern Appalachian mountains. Agricultural and Forest Meteorology, 91:161-176.

Bonan G. 2002. Ecological climatology, concepts and applications. Cambridge Univ. Press, 678 p.

Bonciarelli F. 1978. Agronomia generale. Edagricole, Bologna, 292 p.

Boyce C.K., Cody G.D., Fogel M.L., Hazen R.M., Alexander C.M.O.D., Knoll A.H. 2003. Chemical evidence for cell wall lignification and the evolution of tracheids in Early Devonian plants. International Journal of Plant Science, 164:691-702.

Cavazza L. 2003. L'impatto della siccità sull'agricoltura. Dalle migrazioni di popoli al latifondo, attraverso carestie ed aridocoltura. Atti del Convegno "La siccità in Italia", Accademia Nazionale dei Lincei, Giornata mondiale dell'acqua, 21 marzo 2003, Roma, 46 p.

Cavazza L., Patruno A. 2005. Terreno agrario, il comportamento fisico. REDA, 324 p.

Cess R.D., Potter G.L., Blanchet J.P., Boer G.J., Del Genio A.D., Deque M., Dymnikov V., Galin V., Gates W.L., Ghan S.J., Kiehl J.T., Lacis A.A., Le Treut H., Li Z.-X., Liang X.-Z., McAvaney B.J., Meleshko V.P., Mitchell J.F.B., Morcrette J.-J., Randall D.A., Rikus L., Roeckner E., Royer J.F., Schlese U., Sheinin D.A., Slingo A., Sokolov A.P., Taylor K.E., Washington W.M., Wetherald R.T., Yagai I., Zhang M.-H. 1990. Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models. J. Geophys. Res., 95:16601-16615.

Chaudhuri U.N., Burnett R.B., Kirkham M.B., Kanemasu E.T. 1986. Effect of carbon dioxide on sorghum yield, root growth, and water use. Agricultural and Forest Meteorology, 37:109-122.

Cicogna A., Gani M., Danuso F., Giovanardi R. 1994. Servizio irriguo guidato: un anno di sperimentazione. Notiziario ERSA, 5-6:43-47.

Coiffier J. 2004. Weather forecasting technique considered as a sequence of standard processes from the forecaster's point of view. World Meteorological Organization, Workshop on severe and extreme events forecasting, 26-29 October 2004, Toulouse.

Confalonieri R., Mariani L., Bocchi S. 2005. Analysis and modelling of water and near water temperatures in flooded rice (*Oryza sativa* L.). Ecological Modelling, 183:269-280.

Conolly R.D., Schirmer J., Dunn P.K. 1998. A daily rainfall disaggregation model. Agricultural and Forest Meteorology, 92:105-117.

- Courault D., Seguin G., Oliosio A. 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage Systems*, 19:223-249.
- Cubasch U., Meehl G.A., Boer G.J., Stouffer R.J., Dix M., Noda A., Senior C.A., Raper S.C.B., Yap K.S. 2001. Projections of future climate change. In: Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P., Dai X., Maskell K., Johnson C.I. (eds.): *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 525-582.
- Danuso F., Gani M., Giovanardi R. 1995. Field water balance: BIdriCo 2. In: Pereira L.S. et al. (eds.): *Crop-water-simulation models in practice. Selected papers of the 2nd Workshop on Crop-Water-Models, 1993*, Wageningen Press, 49-73.
- Deutscher Wetterdienst 2004. Quarterly Report of the German NWP-System, Part 2: Description of the German NWP System (http://www.dwd.de/en/FundE/Veroeffentlichung/Quarterly_new/QR_part2_mar_2004.pdf)
- Dexter J.E., Marchylo B.A. 2002. Recent trends in durum wheat milling and pasta processing: Impact on durum wheat quality requirements, Canadian Grain Commission, Conference papers.
- Dobermann A. 2003. A critical assessment of the system of rice intensification (SRI), *Agricultural Systems*, 79:261-281.
- Dobesch H., Hermann G., Sabo P. 1993. Local weather forecast in Austria and its application for hydrometeorological modelling by means of model output statistics. Symposium of 1st European Conf. on Application of Meteorology, Sept. 1993, Oxford, 4 pp.
- Donatelli M., Bellocchi G., Fontana F. 2003. RadEst3.00: Software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables. *Eur. J. Agron.*, 18:363-367.
- Doorenbos J., Kassam A.H. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Drago A., Dimino B., Lo Bianco L., Neri L., Pasoti L., Scibetta C., Seminara C. 2003. Un modello di bilancio idrico e di irrigazione per la coltura del pesco in Sicilia, in Atti del IV Convegno sulla peschicoltura meridionale, 11 e 12 settembre 2003, Campobello di Licata e Agrigento (<http://unipa.it/medpeach/atti/>).
- Drake B.G., Gonzalez-Meler M.A., Long S.P. 1997. More efficient plants? A consequence of rising atmospheric CO₂. *Annual Review of Plant Physiological Plant Molecular Biology*, 48:607-637.
- Dunn P.C. 2004. Occurrence and quantity of precipitation can be modelled simultaneously. *Int. J. Climatol.*, 24:1231-1239.
- ECMWF 2005. The basis of Seasonal forecasting (<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/seasonal/>).
- Estiarte M., Penuelas J., Kimball B.A., Hendrix D.L., Pinter P.J. Jr., Wall G.W., LaMorte R.L., Hunsaker D.J. 1999. Free-air CO₂ enrichment of wheat: Leaf flavonoid concentration throughout the growth cycle. *Physiological Plant*, 105:423-433.
- Fiori M., Micale M., Locci L. 1998. Irrinet-Sardegna: un servizio di assistenza all'irrigazione in ambiente internet/intranet. Atti del Convegno "Irrigazione e ricerca: progressi nell'uso della risorsa acqua", 1-2 ottobre 1998, Bari.
- Fiori M. 2005. Le attività del SAR Sardegna nel campo dell'assistenza all'irrigazione. Atti del Seminario nazionale "La razionalizzazione dell'impiego dell'acqua nel settore irriguo, esperienze regionali a confronto per lo sviluppo coordinato di iniziative per il risparmio idrico", febbraio 2005, Arezzo.
- Friesland H., Kersebaum K.C., Löpmeier F.J. (eds.) 1998. Operational use of irrigation models using medium range weather forecast. Report del progetto "COST 711 - Operational applications of meteorology to agriculture, including horticulture".
- Gani M., Cicogna A., Centore M. 2000. Evoluzione e prospettive dell'offerta agro-meteorologica in Friuli-Venezia Giulia: dieci anni di bilanci idrici, *AIAM* 2000, 144 -157.
- Garatuza-Payan J., Watts C.J. 2005. The use of remote sensing for estimating ET of irrigated wheat and cotton in Northwest Mexico. *Irrigation and Drainage Systems*, 19(3/4):301-320.
- Garcia R.L., Pinter P.J. Jr., Kartschall Th. 1995. Biomass and growth rate of a spring wheat root system grown in free-air CO₂ enrichment (FACE) and ample moisture. *Journal of Biogeography*, 22:623-634.
- Giannerini G. 1993. Renana Model: A model for irrigation scheduling employed on a large scale. II Workshop on crop water models, 15 ICID Congress, The Hague.
- Giannerini G. 2004. IT services for water management, the Newaginternational Conference&Exhibition, 19 marzo 2004, Roma.
- Hauer F.R., Lorang M.S. 2004. River regulation, decline of ecological resources, and potential for restoration in a semi-arid lands river in the western USA. *Aquatic Sciences*, 66:388-401.
- Hendrix D.L., Mauney J.R., Kimball B.A., Lewin K., Nagy J., Hendrey G.R. 1994. Influence of elevated CO₂ and mild water stress on nonstructural carbohydrates in field-grown cotton leaves. *Agricultural and Forest Meteorology*, 70:153-162.
- Howden S.M., McKeon G.M., Walker L., Carter J.O., Conroy J.P., Day K.A., Hall W.B., Ash A.J., Ghanoum O. 1999. Global change impacts on native pastures in south-east Queensland, Australia. *Environmental Modelling and Software*, 14:307-316.
- Huntington T.G. 2005. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319:83-95.

- Idso S.B., Kimball B.A. 1992. Seasonal fine-root biomass development of sour orange trees grown in atmospheres of ambient and elevated CO₂ concentration. *Plant Cell. Environ.*, 15:337-41.
- Kar R.K. 2003. Greenhouse effect of the past and plant evolution. *Current Science*, 86:267-269.
- Kiagama B.K., Teare I.D., Stone L.R., Power W.L. 1977. Root and top growth of irrigated and non-irrigated grain sorghum. *Crop Science*, 17:555-559.
- Komuscu A.K. 2001. An analysis of recent drought conditions in Turkey in relation to circulation patterns, drought letter news. A newsletter of the International Drought Information Center and the National Drought Mitigation Center, vol. 13, n. 2-3, 5-6.
- Le Roy Ladurie E. 2004. Histoire humaine et comparée du climat – Canicules et glaciers XIIIème - XVIIIème siècles. Fayard, 740 p.
- Lhommea J.P., Guilioni L. 2004. A simple model for minimum crop temperature forecasting during nocturnal cooling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123:55-68
- Magliulo V., d'Andria R., Rana G. 2003. Use of the modified atmometer to estimate reference evapotranspiration in Mediterranean environments. *Agricultural Water Management*, 63:1-14.
- Magliulo V., Bindi M., Rana G. 2003. Water use of irrigated potato (*Solanum tuberosum* L.) grown under free air carbon dioxide enrichment in Central Italy. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 97(1-3):65-80.
- Manzoni L., Puppo A. 1943. Ricerche sulla traspirazioni e sul consumo idrico delle piante. CNR, Comitato per l'Agricoltura, Anonima Arti Grafiche S.A., Bologna.
- Mariani L. 2002. Dispensa di agrometeorologia. Clesav, Milano, 292 p.
- Mariani L. 2003. Tecniche di stimolazione delle precipitazioni. *Agriculture*, 59:11-12.
- Mariani L., Failla O., Cola G. in corso di stampa. A simulation model for the daily course of grape berry temperature. Atti del Convegno internazionale di viticoltura, International Society of Horticultural Science, settembre 2005, Venosa.
- Mariani L. in corso di stampa. Clima e agricoltura in Europa e nel bacino del Mediterraneo dalla fine dell'ultima glaciazione. *Rivista di Storia dell'Agricoltura*.
- Marletto V., Zinoni F., Botarelli L., Alessandrini C. 2005. Studio dei fenomeni siccitosi in Emilia Romagna con il modello di bilancio idrico CRITERIA (extended abstract). *RIAM* 9: 32-33. Quaderno dei riassunti del Convegno AIAM, 3-5 maggio 2005, Vasto.
- Marshall J., Kushnir Y., Battisti D., Chang P., Czaja A., Dickson R., Hurrell J. McCartney M., Saravanan R., Visbeck M. 2001. North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms. *Int. J. Climatol.*, 21:1863-1898.
- Mastrorilli M., Katerji N., Rana G., Ben Nouna B. 1998. Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 90:81-89.
- Mayaki W.C., Stone L.R., Teare I.D. 1976. Irrigated and non-irrigated soybean, corn and grain sorghum root systems. *Agronomy Journal*, 68:532-534.
- Mc Vicar T., Jupp D.L.B. 1999. Estimating one-time-of-day meteorological data from standard daily data as inputs to thermal remote sensing based energy balance models. *Agricultural and forest meteorology*, 96:219-238.
- Minschwatter K., Dessler A.E. 2004. Water vapour in the tropical atmosphere: model results and observations. *Journal of Climate*, 17:1272-1282.
- Neale C., Jayanthi H., Wright J.L. 2005. Irrigation water management using high resolution airborne remote sensing. *Irrigation and Drainage Systems*, 19(3/4):321-336
- Novak V. 1999. Soil-crack characteristics – estimation methods applied to heavy soils in the NOPEX area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98/99:501-507.
- Pammolli A., Marletto V. 2005. Radiazione solare globale giornaliera: correzione dei dati achiavati e stima dei dati mancanti per la stazione agro-meteorologica di San Pietro Capofiume (Bo). *Riv. Ital. Meteorol.*, 2:45-49.
- Puigdefabregas J., Mendizabal T. 1997. Perspectives on desertification: western Mediterranean. *Journal of Arid Environments*, 39:209-224.
- Quaglietta Chiarandà F., Acutis M., Fagnano M., Meroia G., Zarone A., Conte M., Postiglione L. 2001. Monitoraggio della gestione irrigua aziendale: pomodoro, melone e pesce in Campania. In: Postiglione L., Santini A., Fagnano M. (eds.): Modelli di agricoltura sostenibile per la pianura meridionale: gestione delle risorse idriche nelle pianure irrigue, 76-90. Gutemberg, Salerno.
- Ramanathan V., Coakley J.A. 1978. Climate modeling through radiative-convective models. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 16, 465-489.
- Rana G., Losavio N., Mastrorilli M., Venezian Scarascia M.E. 1990. Crop evapotranspiration measured by two energy balance methods under Mediterranean climate. *Acta Horticulturae*, 278, 517-524.
- Rana, G. Katerji, N., Mastrorilli, M., 1997. Environmental and soil-plant parameters for modelling actual crop evapotranspiration under water stress conditions. *Ecological Modelling*, 101, 363-371.
- Rana G., Katerji N., De Lorenzi F. 2005. Measurement and modelling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128:199-209.
- Rana G., Katerji N., Perniola M. 2001. Evapotranspiration of sweet sorghum: a general model and multilo-cal validity in semi arid environmental conditions. *Water Resources Research*, 37:3237-3246.
- Rana G., Mastrorilli M., Katerji N. 2000. An evapotranspiration model adapted to water stressed crops. *Acta Horticulturae*, 537:95-101.
- Rana G., Rinaldi M., Introna M. 2004. Metodologie e algoritmi per il controllo di qualità di dati orari e gior-

- nalieri acquisiti da una rete agrometeorologica: applicazioni alla rete lucana SAL. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, 1:14-23.
- Ravelli F., Rota P. 1999. Carte frequenziali mensili della evapotraspirazione di riferimento (ET_o) e dei deficit idrici delle colture del Mezzogiorno d'Italia. *Rivista di Irrigazione* (www.francoravelli.it).
- Rinaldi M., Rana G. 2004. I fabbisogni idrici del pomodoro da industria in Capitanata. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, 1:31-35.
- Rogers H.H., Peterson C.M., McGrimmon J.N., Cure J.D. 1992. Response of plant roots to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant, Cell and Environment*, 15:749-752.
- Rogers H.H., Runion G.B. 1994. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. *Environmental Pollution*, 83:155-189.
- Scalcione E., Lanzellotti L., Ziena P., Lacertosa G., Petroza A., Pizza S., Perniola M. 2006. IrriWeb Basilicata, un servizio per ottimizzare la gestione dell'irrigazione delle aziende agricole. *Rivista Italiana di Agrometeorologia* (Italian Journal of Agrometeorology), 1:59-63.
- Singels A., Donaldson R.A., Smit M.A. 2005. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. *Field Crops Research*, 92:291-303.
- Steduto P., Katerji N., Puertos-Molina H., Unlu M., Mastrorilli M., Rana G. 1997. Water use efficiency of sweet sorghum under water stress conditions. Gas-exchange investigations at leaf and canopy scales. *Field Crop Research*, 54:221-234.
- Stokes C., Ash A.J., Holtum J.A.M. 2003. OZface: Australian savannas free air carbon dioxide enrichment facility. In: Allsopp N., Palmer A.R., Milton S.J., Kirkman K.P., Kerley G.I.H., Hurt C.R., Brown C.J. (eds.): *Proceedings of the VIIth International Rangelands Congress*, 26 July - 1 August 2003, Durban, South Africa, 1097-1099.
- Toller G., Corradini S. 2006. ARAQUAE, Rete standard per la fornitura di dati meteo ai controller irrigui: evoluzione ed esempi di software di accesso. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, Atti di Aiam, 65-66.
- Thornes J.E., Stephenson D.B. 2001. How to judge the quality and value of weather forecast products. *Met. Appl.*, 8:307-314.
- Triggs J., Ottman M.J., Leavitt S.W., Matthias A.D., Williams D.G., Webber A.N., 2001. Elevated atmospheric CO₂ improved Sorghum plant water status by ameliorating the adverse effects of drought. *New Phytologist*, 152:231-248.
- W.M.O. 1981. Guide to agricultural meteorological practices (WMO guide n. 134), 2nd edition, loose-leaf; updated by supplements when necessary, Geneva, CH.
- W.M.O. 1983. Guide to climatological practices (WMO guide n. 100), loose-leaf; updated by supplements when necessary, Geneva, CH.
- W.M.O. 1992. Manual on the Global Data-processing System, voll. 1 and 2, (WMO guide n. 485), loose-leaf; updated by supplements when necessary, Geneva, CH (disponibile on line al sito www.wmo.ch <<http://www.wmo.ch>> - ricercare la pagina dedicata al Global Data-processing System).
- W.M.O. 1994. Guide to hydrological practices, (WMO guide n. 168), 5th edition, loose-leaf; updated by supplements when necessary, Geneva, CH, 735 p.
- W.M.O. 1996. Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO guide n. 8), 6th edition, loose-leaf; updated by supplements when necessary, Geneva, CH.
- Wallace J.M. 2000. North Atlantic Oscillation/annular model: two paradigms-one phenomena. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126:791-805.
- Wechsung G., Wechsung F., Wall G.W., Adamsen F.J., Kimball B.A., Pinter P.J. Jr., Kartschall Th., Garcia R.L., La Morte R.L. 1999. The effects of free-air CO₂ enrichment and soil water availability on spacial and seasonal patterns of wheat root growth. *Global Change Biology*, 5:519-529.
- Werner P.C., Gerstengarbe F.W., Fraedrich K., Oesterle K. 2000. Recent climate change in the North Atlantic/European sector. *International Journal of Climatology*, 20:463-471.
- WMO 2001. Scope of public weather services data and products, 2001, WMO/td no. 1054.
- WMO 2005. Workshop on climatic analysis and mapping for agriculture, 14-17 June 2005 Bologna, Italy. Meeting report, September 2005 (www.wmo.ch/web/wcp/agm/Meetings/bologna05/bolognareport.pdf).
- Xi-Ping Deng, Lun Shan, Heping Zhang, Turner N.C. 2006. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. *Agricultural Water Management*, 80:23-40.
- Zwart S.J, Bastiaanssen W.G.N. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 69:115-133.