

## Aspetti fisici ed ecofisiologici nella previsione e difesa delle piante da frutto dalle gelate tardive

Franco Zinoni<sup>1</sup>, Gabriele Antolini<sup>2</sup>, Ugo Palara<sup>3\*</sup>, Federica Rossi<sup>4</sup> e Giampiero Reggidori<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente, Direzione Tecnica, Area di Monitoraggio Ambientale, Via Po 5, 40139 Bologna

<sup>2</sup> Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente, Servizio Idrometeorologico, Area Agrometeorologia e Territorio, Viale Silvani 6, 40122 Bologna

<sup>3</sup> Centro Interprovinciale di Sperimentazione Agroambientale Mario Neri, Via Emilia Levante 18, 40026 Imola (BO)

<sup>4</sup> Istituto di Biometeorologia del CNR, Via Gobetti 101, 40129 Bologna

<sup>5</sup> ApoConerpo, Via Tosarelli 155, 40050 Villanova di Castenaso (BO)

Ricevuto: 22 giugno 2005; accettato: 11 agosto 2005

Physical and eco-physiological aspects in forecasting and crop protection of fruit trees from late frost

**Abstract.** Late frosts represent for fruit production one of the most relevant natural hazard worldwide, considering severity and extent of damage, whose occurrence is constantly increasing, concomitantly to the increase of climate variability. Therefore, impacts on affected farms and local economy are often devastating, but information about how to protect plants from freezing is relatively limited. The research in the field of forecast, risk hazard assessment and protection is directly towards the reduction of the risk level, acting together new orientations in the selection of resistant cvs. Crop vulnerability is jointly determined by genetic peculiarities of the various species and cvs, but a determinant role is played by phenology and agronomic practices. The orchard structural features, tree canopy characteristics and tree arrangement in rows are determinant in conditioning energy and radiation exchanges between soil and the surrounding atmosphere, thus on the exchange processes that are responsible of radiation frosts, mainly occurring in the spring, when plant sensibility is at its maximum. The knowledges of local meteorology, together with the weather reports, which can forecast risk situations, should support the acquisition of passive protection systems and to improve the active ones. The correct evaluation of frost risk holds a great importance in fruit orchard programming and in the choice of protection systems and, therefore, the drawing up of risk maps which correlate the topographical characteristics of soil with the tolerance level of the different fruit tree species.

**Key-words:** climatic risk, frost protection, frost forecasting, orchard ecophysiology.

### Introduzione

Il concetto di vocazionalità in frutticoltura è strettamente legato all'interazione tra caratteristiche genetiche e fisiologiche delle diverse specie e le peculiarità climatiche della zona di coltivazione, che interagiscono nell'estrinsecazione dei meccanismi di resa produttiva in termini sia qualitativi che quantitativi. L'applicazione delle conoscenze delle interazioni tra pianta, suolo, clima e tempo atmosferico, dalla scala aziendale fino a scale regionali, può permettere lo sviluppo di strategie di gestione che favoriscano una riduzione dell'uso di risorse non rinnovabili e una conseguente migliore sostenibilità socio-economica della frutticoltura.

Tra i fattori climatici prioritari nel determinare il successo di una specifica coltura in un determinato territorio vi è la frequenza di eventi estremi, in grado di compromettere drasticamente la produzione, e la tipologia di questi eventi. Tra essi, notevole importanza hanno le gelate tardive, quei fenomeni, cioè, di abbassamento termico con temperature inferiori a zero °C che possono verificarsi dopo la ripresa vegetativa, momento in cui le specie arboree da frutto sono particolarmente vulnerabili. Gli eventi di gelata interessano le zone temperate, ma anche quelle tropicali e sono comuni a molti Paesi nel Mondo: negli Stati Uniti i danni economici provocati dalle gelate tardive sono superiori a quelli causati da qualsiasi altro fenomeno meteorologico avverso e negli ultimi decenni molte aree tra le più produttive sono state severamente colpite da questa calamità (Snyder *et al.*, 2005).

Le gelate tardive che interessano le più importanti aree frutticole italiane sono prevalentemente di tipo radiativo, che provocano perdite di calore per irrag-

---

\*palara@crpv.it

giamento, ma talvolta a tali situazioni si può associare un trasporto di area fredda per avvezione tramite brezza in presenza di eventi meteorologici che precedono la gelata (precipitazioni, presenza di neve nelle zone collinari e montane, ecc.) (Osaer e Vaysse, 1998; Zinoni *et al.*, 2000). Le gelate per irraggiamento presentano un'elevata variabilità sul territorio, ma la loro struttura appare relativamente costante nel tempo; è quindi possibile definire, attraverso opportune tecniche di elaborazione dei dati, le aree più sensibili a questo fenomeno con risoluzioni superiori a quelle che descrivono qualsiasi altro fenomeno meteorologico (Laughlin e Kalma, 1990; Georgiadis *et al.*, 1996; Rossi *et al.*, 1996; Zinoni *et al.*, 2002). Questo aspetto è molto importante non solo per descrivere il rischio climatico di una determinata zona, ma anche per prevedere l'evento gelata in una scala di dettaglio territoriale la più precisa possibile (Antolini *et al.*, 2004).

Il tipo di gelata determina la quantità di calore perso nell'unità di tempo dall'ecosistema e, quindi, la quantità di calore che, per mettere in atto una difesa appropriata, va recuperata dall'ambiente o rilasciata tramite interventi esterni per contrastare l'abbassamento termico che si verifica a livello della vegetazione (Snyder *et al.*, 2005). La difesa passiva, o preventiva, costituisce la strategia di base per limitare i danni; essa si basa sull'adozione di una corretta tecnica agronomica, a cui si associano alcuni accorgimenti volti a limitare l'abbassamento termico e il suo effetto sulla vegetazione. La difesa attiva rappresenta, invece, il metodo più idoneo a contrastare un evento meteorologico avverso che sopravviene in una fase fenologica di elevata vulnerabilità. Le diverse tecniche di difesa attiva sono valutabili come alternative più o meno efficaci ed efficienti in relazione al contesto agronomico e ambientale in cui si opera. I diversi metodi di seguito descritti si sono rivelati idonei, anche se con diverso livello di efficacia, nel contrastare le gelate per irraggiamento (che rappresentano la causa principale degli abbassamenti termici primaverili come avvenuto, per esempio, nella Pianura Padana negli anni 1997, 1998, 2003, ecc.), mentre più incerto appare l'esito della difesa attiva quando le gelate sono miste (irraggiamento più brezza) o, addirittura, negativo se la gelata è originata esclusivamente da fenomeni di avvezione.

### **Caratteristiche e tipologia delle gelate tardive**

L'integrazione delle conoscenze sulle interazioni tra piante, clima e tempo atmosferico nelle pratiche agronomiche è relativamente recente, in relazione allo sviluppo di modelli di simulazione e predizione e alla

mappatura agro-climatica per l'ottimizzazione dell'uso del suolo (Holden e Brereton, 2004). La conoscenza dei meccanismi atmosferici è quindi alla base di una corretta interpretazione dei diversi fenomeni che avvengono al suolo e di come e quanto questi condizionino i diversi aspetti della crescita, dello sviluppo e della produttività dei sistemi vegetali. Se la meteorologia, con gli studi e le interpretazioni su larga scala, fornisce gli strumenti descrittivi e previsionali di una gelata e per la messa a punto di mappe territoriali di rischio (Zinoni *et al.*, 2002), la stessa è meno utile nella comprensione di quei fenomeni che, come le gelate, interessano gli strati dell'atmosfera più prossimi alla superficie terrestre; in suo aiuto viene la micro-meteorologia, delegata allo studio degli scambi di energia, massa e quantità di moto nell'interfaccia pianta-suolo-atmosfera (Sozzi *et al.*, 2002).

In termini fisici, si definisce "gelata" un evento in cui un abbassamento della temperatura provoca il passaggio delle molecole d'acqua allo stato solido e, quindi, il risultato della deposizione di vapore acqueo in aria satura. In termini agrometeorologici, questa definizione è meno rigorosa, poiché ciò che danneggia le piante non è la formazione del ghiaccio di per sé sul terreno o sui propri organi, bensì il raffreddamento dell'aria; il manifestarsi del ghiaccio indica semplicemente che la temperatura è certamente scesa sotto il punto di congelamento. Se questo raffreddamento si verifica alla fine del periodo di riposo vegetativo delle piante arboree da frutto, quando le gemme sono idratate o sono presenti primordi fogliari, fiori o frutticini, esso diviene potenzialmente molto pericoloso perché è massima la vulnerabilità di tali organi (Rossi, 2000; Palara e Rossi, 2004); estremamente probabile diviene, infatti, il congelamento dell'acqua all'interno delle cellule o negli spazi intracellulari, con conseguenti rotture delle membrane e degenerazione dei tessuti.

Le modalità di trasferimento del calore sono essenzialmente di tre tipi, *conduzione*, *convezione* e *irraggiamento*, e nel caso di processi di scambio di calore tra suolo e atmosfera vengono tutte chiamate in causa (Campbell e Norman, 1998; Rossi *et al.*, 2004). La *conduzione* avviene unicamente quando c'è una differenza di temperatura tra due parti del mezzo conduttore; essendo l'aria un cattivo conduttore di calore, il riscaldamento dell'atmosfera per conduzione si arresta ai primi strati, a contatto immediato col suolo. La *convezione* è legata al fatto che l'aria calda, meno densa, tende a spostarsi verso l'alto, mentre quella fredda si sposta verso il basso. Di giorno il processo di convezione domina il riscaldamento dell'atmosfera,

mentre di notte la convezione è responsabile di correnti che si formano, in prossimità del suolo, a causa della diversa temperatura tra aria e terreno. L'irraggiamento è invece un trasferimento di energia tramite radiazione elettromagnetica che non richiede un mezzo di collegamento tra due corpi che si scambiano calore, tanto che si verifica anche nel vuoto, nella zona tra la terra e il sole. L'irraggiamento è il modo con cui la terra riceve energia dal sole ed è anche il modo in cui la terra perde calore di notte per emissione in onda lunga.

Dal punto di vista meteorologico, le gelate sono distinte secondo il meccanismo fisico di trasferimento del calore; esse, infatti, possono essere di tipo *avvettivo* e di tipo *radiativo*. Le gelate da avvezione sono provocate da incursioni di masse di aria fredda quando l'atmosfera è ventosa e ben rimescolata e le temperature sono sotto lo zero anche durante il giorno. Spesso precedute da fronti freddi, queste gelate sono abbastanza comuni in Pianura Padana durante l'inverno, quando però le piante, in riposo vegetativo, sono acclimatate e quindi molto resistenti. Soltanto in alcuni sporadici casi (le gelate memorabili del 1929 e del 1956 e quella più recente del 1985, quando nei giorni 10-11-12 gennaio si sono verificate minime termiche inferiori a  $-20^{\circ}\text{C}$  in diverse località dell'Emilia-Romagna) esse sono associate a danni alle piante coltivate, salvo i casi di specie più sensibili e/o native di aree temperate come l'olivo o l'actinidia. La possibilità di protezione attiva delle colture da queste gelate è estremamente improbabile, date le caratteristiche fisiche che si creano in atmosfera e che sono difficilmente contrastabili con l'adozione di pratiche di protezione *ad hoc* (Zinoni e Antolini, 2004).

Le gelate tardive, come anche alcune gelate invernali, avvengono tipicamente per irraggiamento (Bouchet, 1965). Durante le notti di cielo sereno il calore ricevuto di giorno viene rapidamente trasferito dalla superficie terrestre verso l'atmosfera: la temperatura si abbassa quindi molto rapidamente vicino al terreno causando la formazione di uno strato di inversione termica. Anziché calare come normalmente avviene, la temperatura aumenta quanto più ci si allontana dalla superficie del suolo; l'altezza dello strato di inversione varia a seconda della topografia locale e delle condizioni atmosferiche, ma generalmente ha una ampiezza variabile tra dieci e alcune centinaia di metri (Perez-Garcia, 2004).

### Aspetti meteorologici e fisici delle gelate

La corretta caratterizzazione di una gelata prevede lo studio dei processi fisici coinvolti su diversa

scala. La micro-meteorologia, che studia gli eventi che avvengono nello strato atmosferico più prossimo al suolo definendo i meccanismi di scambio di calore, vapore ed energia da e verso la superficie, ha un ruolo primario nel comprendere i processi di formazione di una gelata ed eventualmente nella predisposizione di modelli per la previsione o la diagnostica (Sozzi *et al.*, 2002). Nondimeno, la descrizione dei campi meteorologici su scala più ampia è utile per conoscere le situazioni sinottiche tipiche degli eventi di gelata.

Gli abbassamenti termici che stanno alla base delle gelate che interessano l'agricoltura sono principalmente causati dall'incursione d'aria fredda, solitamente di origine artica, su aree ad uso produttivo. Le tipiche situazioni di incursione d'aria fredda sul Nord Italia sono associate solitamente alla presenza di un esteso campo anticiclonico sull'Europa centro-settentrionale e ad una depressione sull'Europa orientale che si estende sovente fino ai Balcani (fig. 1). L'incursione d'aria fredda è alla base non soltanto delle gelate avvettive invernali, ma rappresenta anche la condizione iniziale a partire dalla quale spesso si verificano le ben più pericolose gelate tardive di tipo radiativo. Infatti, se nei giorni successivi al raffreddamento dell'aria, dovuto all'incursione di correnti fredde e asciutte, si verifica l'avanzamento di un campo di alta pressione superficiale che determina bel tempo, possono instaurarsi le condizioni atmosferiche ideali per la perdita di energia radiativa durante la notte: bassa umidità, scarsa ventosità e assenza di nubi.

Copertura nuvolosa, velocità e direzione del vento, umidità atmosferica, turbolenza sono tutti fattori fon-

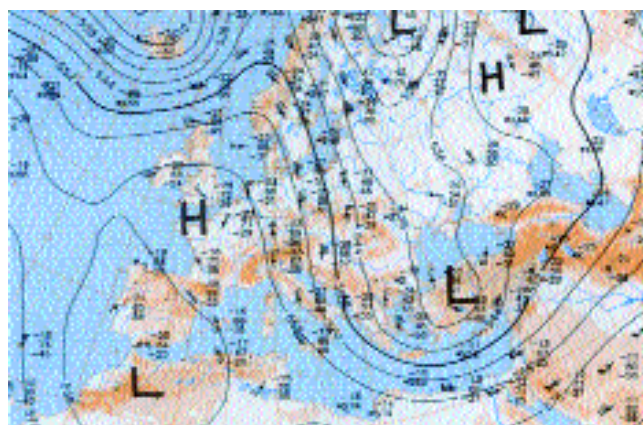


Fig. 1 - Mappa dell'altezza geopotenziale della superficie 500 hPa (8 aprile 1997 - 12:00 UTC); l'immagine, tratta da Europäischer Wetterbericht, illustra la situazione dei campi di pressione in quota alla vigilia di una forte gelata primaverile.

Fig. 1 - Map of the geopotential height of 500 hPa surface that shows the situation in the day before an heavy late frost (April 8<sup>th</sup> 1997 - 12:00 UTC). Taken from Europäischer Wetterbericht.

damentali per la regolazione della formazione dello strato di inversione termica al suolo. Le indicazioni meteorologiche devono quindi essere abbinate ad osservazioni micro-meteorologiche, dato che soltanto la conoscenza combinata dei parametri atmosferici e della tipologia della vegetazione permette di definire dal punto di vista fisico la formazione delle gelate, consentendo la messa in opera di adeguate misure di avvertimento per la difesa alle colture in atto e la redazione di mappe di rischio climatico legate al territorio e alla tipologia dei frutteti.

La variabile strutturazione del frutteto e la disposizione delle piante in filari rendono infatti di per sé molto diversi e complessi i bilanci e gli scambi energetici e radiativi, oltre che l'analisi micro-meteorologica della turbolenza. Dai dati rilevati in numerose osservazioni sperimentali (Rossi *et al.*, 2002), è apparsa evidente la complessità di tali eventi micro-meteorologici su superfici arboree, le cui peculiarità strutturali offrono, per fare un esempio, un elevato attrito nei confronti delle masse d'aria in movimento, interagendo con il profilo del vento e con la turbolenza e, quindi, con il rimescolamento dell'aria. I processi di scambio energetico con l'atmosfera appaiono pertanto più complessi di quelli che avvengono su superfici erbacee, così come lo sono quelli di scambio radiativo, dipendenti da un albedo superficiale variabile con la forma di allevamento e con la progressiva crescita della biomassa fogliare (Georgiadis *et al.*, 1996; Rossi *et al.*, 1996).

Per prevedere i profili di temperatura a livello della chioma è necessario tenere in conto innanzitutto degli scambi verticali di calore in atmosfera. A questo fine, per comprendere il potenziale grado di pericolosità di una gelata in divenire è utile verificare non solo il dato di temperatura, ma anche l'umidità dell'aria e, soprattutto, la presenza di vento e lo stato di copertura del cielo. Se si prevede una difesa attiva, poi, la conoscenza di queste variabili è di primaria importanza per scegliere i momenti di avvio della difesa, ottimizzando le prestazioni e l'efficacia. La caratterizzazione meteorologica del territorio e la caratterizzazione micro-meteorologica locale delle condizioni di gelata possono quindi, insieme, costituire uno strumento molto efficace per la conoscenza dell'evento stesso, la predicibilità dei potenziali danni e la messa a punto di adeguati sistemi di difesa.

### **Valutazione del rischio e sensibilità delle piante da frutto**

Diverse sono le componenti che concorrono a determinare la sensibilità di una coltura alle gelate tar-

dive: le caratteristiche fisico-climatologiche della zona, lo stato fisiologico e fenologico delle piante, le specie e cultivar, la gestione agronomica del frutteto, la localizzazione ed esposizione dello stesso a parità di latitudine (Li *et al.*, 1999, 2004). Non è quindi facile determinare a priori il livello di rischio di una coltura, né predisporre con assoluta certezza i sistemi agronomici, tecnologici e fisico-meccanici di prevenzione e riduzione di tale rischio, non fosse altro per l'assoluta indeterminabilità del momento esatto in cui si verificano i ritorni di freddo, al di là dei sempre più precisi sistemi previsionali.

In generale, è possibile affermare che la combinazione località-specie (cultivar) costituisce l'elemento di base nella definizione del rischio, mentre tutti gli altri elementi del sistema intervengono successivamente a limitare o accentuare la soglia di rischio iniziale. Anche la combinazione cv/portinnesto dovrebbe essere tenuta in attenta considerazione e adeguata, tra l'altro, alle particolari caratteristiche climatiche di ogni area di coltivazione. Ci sono differenze notevoli in sensibilità ai danni da freddo tra le diverse specie e varietà (tab. 1); la costituzione genetica di una pianta è, infatti, il primo fattore in grado di determinarne la resistenza al freddo; i programmi di miglioramento genetico, oltre ad essere finalizzati all'incremento della produttività e della qualità del prodotto, sempre più spesso considerano fra i caratteri importanti la durata del riposo invernale, l'epoca di fioritura e il grado di resistenza al gelo delle gemme (Hughes e Dunn, 1996; Thomashow, 1999).

La durata del periodo di stasi invernale è molto importante: se il fabbisogno in freddo è limitato, un periodo caldo durante l'inverno può stimolare e anticipare la fioritura, rendendo la pianta molto più vulnerabile alle eventuali gelate tardive (Beckman, 2004). Lo stadio fenologico è, infatti, il fattore che realmente può essere determinante per una maggiore o minore vulnerabilità alle gelate. Appena la pianta esce dal riposo invernale, l'idratazione dei tessuti collegata al risveglio vegetativo fa sì che la sua sensibilità alle basse temperature divenga enormemente più elevata. In particolare, su albicocco, susino, pesco, ciliegio i danni maggiori si rilevano sui fiori (le cui parti più sensibili sono rappresentate dagli organi sessuali, costituiti da tessuti molto giovani, rigonfi di acqua, con cellule dalle pareti poco ispessite), mentre su actinidia e vite, a fioritura più tardiva, vengono colpiti prevalentemente i nuovi germogli, compromettendo la fioritura e la fruttificazione successive (tab. 1). Elevata vulnerabilità, talora maggiore rispetto al fiore, presentano anche i frutticini subito dopo l'allegagione; quando gli abbassamenti termici si verificano

Tab 1- Valori di temperature critiche per le principali specie da frutto. La definizione del 10 e 90% di danno implica che trenta minuti trascorsi alla temperatura indicata causino la morte rispettivamente del 10 e del 90% delle parti di pianta colpite durante lo stadio fenologico indicato (rielaborazione da Proebsting e Mills, 1978; Rossi, 2000; Snyder *et al.*, 2005).

Tab. 1 - Critical temperature values for fruit tree species. 10% and 90% damage mean that half and hour at the indicated temperatures is expected to induce respectively kill of the plant part affected during that particular phenological stage (from Proebsting e Mills, 1978; Rossi, 2000; Snyder *et al.*, 2005).

Specie	Stadio fenologico	10% danno	90% danno
Albicocco	Gemma rigonfia	- 4,3°C	- 14,4°C
	Calice visibile	- 6,2°C	- 13,8°C
	Inizio fioritura	- 4,9°C	- 10,3°C
	Piena fioritura	- 4,3°C	- 6,4°C
	Scamicciatura	- 2,6°C	- 4,7°C
	Ingrossamento frutto	- 2,3°C	- 3,3°C
Ciliegio	Gemma rigonfia	- 11,1°C	- 17,9°C
	Bottoni visibili	- 2,7°C	- 6,2°C
	Separazione dei bottoni	- 2,7°C	- 4,9°C
	Inizio fioritura	- 2,8°C	- 4,1°C
	Piena fioritura	- 2,4°C	- 3,9°C
	Allegazione	- 2,2°C	- 3,6°C
Pesco	Gemma rigonfia	- 7,4°C	- 17,9°C
	Calice visibile	- 6,1°C	- 15,7°C
	Corolla visibile	- 4,1°C	- 9,2°C
	Inizio fioritura	- 3,3°C	- 5,9°C
	Piena fioritura	- 2,7°C	- 4,4°C
	Caduta petali	- 2,7°C	- 4,9°C
	Scamicciatura	- 2,5°C	- 3,9°C
Susino	Gemma rigonfia	- 11,1°C	- 17,2°C
	Bottoni visibili	- 8,1°C	- 14,8°C
	Bottoni bianchi	- 4,0°C	- 7,9°C
	Inizio fioritura	- 4,3°C	- 8,2°C
	Piena fioritura	- 3,1°C	- 6,0°C
	Caduta petali	- 2,6°C	- 4,3°C
Pero	Apertura gemme	- 8,6°C	- 17,7°C
	Mazzetti fiorali	- 4,3°C	- 9,6°C
	Mazzetti divaricati	- 3,1°C	- 6,4°C
	Inizio fioritura	- 3,2°C	- 6,9°C
	Piena fioritura	- 2,7°C	- 4,9°C
	Caduta petali	- 2,7°C	- 4,0°C
Melo	Gemma d'inverno	- 11,9°C	- 17,6°C
	Rottura gemma	- 7,5°C	- 15,7°C
	Punte verdi	- 5,6°C	- 11,7°C
	Orecchiette di topo	- 3,9°C	- 7,9°C
	Mazzetti affioranti	- 2,8°C	- 5,9°C
	Bottoni rosa	- 2,7°C	- 4,6°C
	Apertura fiore centrale	- 2,3°C	- 3,9°C
	Piena fioritura	- 2,9°C	- 4,7°C
Allegazione	- 1,9°C	- 3,0°C	
Vite	Gemma cotonosa	- 10,6°C	- 19,4°C
	Punta verde	- 6,1°C	- 12,2°C
	Apertura gemme	- 3,9°C	- 8,9°C
	Prima foglia	- 2,8°C	- 6,1°C
	Seconda foglia	- 2,2°C	- 5,6°C
	Terza foglia	- 2,2°C	- 3,3°C
	Quarta foglia	- 2,2°C	- 2,8°C
Actinidia	Gemma dormiente		- 18,0°C
	Germogliamento		- 3,0°C
	Inizio accrescimento germogli		- 2,0°C
	Foglie espanse		- 1,5°C
	Bottoni fiorali distinguibili		- 1,0°C

dopo la fioritura, specialmente su albicocchi e nettarine, non è raro rilevare ingenti perdite di prodotto a causa della completa degenerazione dei tessuti del frutto, che in breve annerisce e cade (Palara, 2004).

Numerosi altri fattori ambientali e agronomici agiscono, spesso congiuntamente, nel determinare una maggiore o minore predisposizione delle piante a subire danni da gelate primaverili (Alden e Hermann, 1971). La forma di allevamento può essere molto importante nel limitare i danni delle gelate per irraggiamento, allorché le temperature sono più basse in prossimità del suolo e tendono a crescere con l'altezza (Yamada e Takahashi, 2004). Piante nanizzate o comunque basse possono essere più vulnerabili (sono normali perdite di fiori e frutti pressoché totali nelle parti più basse della chioma, quando invece le parti alte mantengono quasi inalterato il proprio potenziale produttivo), mentre forme di allevamento che favoriscono la concentrazione della produzione nelle parti più alte diminuiscono il rischio di danneggiamenti estesi. Per esempio, manifestano in genere maggiori percentuali di danno albicocchi e peschi allevati a vasetto ritardato, gli impianti di melo e pero innestati su portinnesti deboli e, in genere, tutte le forme che concentrano nei primi due metri da terra la maggior parte degli organi riproduttivi. Impianti ad elevato sviluppo verticale (es. palmette, fusetti alti) possono mostrare una netta linea di demarcazione lungo il profilo della chioma fra la zona colpita in basso e quella più alta che continua a vegetare e produrre normalmente (Palara, 2004).

La diversa sensibilità alle gelate delle chiome degli alberi in diverse situazioni colturali dipende anche dalla presenza di batteri criogeni INA (*ice-nucleating agents*), in grado di consentire il congelamento dell'acqua a temperature più elevate (Lindow, 1983); la diminuzione del potenziale di questi batteri ubiquitari, che si trovano sia sulla vegetazione spontanea che sulle piante coltivate, può essere conseguita attraverso il controllo totale o parziale (diserbo o sfalcio) delle infestanti oppure con trattamenti chimici.

Chiome molto chiuse e elevate densità di impianto possono ridurre la quantità di luce intercettata in estate dalle diverse parti della pianta, riducendone la capacità fotosintetica: in questo caso le piante elaborano meno zuccheri e la loro resistenza alle gelate può venire indirettamente limitata (Gray *et al.*, 1997); al contrario, piante in buono stato di salute e correttamente fertilizzate sono meno vulnerabili in caso di gelate: le carenze nutrizionali causano, infatti, precoce perdita delle foglie in inverno e fioritura anticipata in primavera. Ancora, l'eccessiva disponibilità di azoto

accresce la sensibilità alle basse temperature; è infatti consigliabile ridurre la fertilizzazione azotata in tarda estate in quanto i germogli in attiva crescita, contenendo pochi soluti rispetto all'acqua di cui sono dotati, presentano un punto di raffreddamento pericoloso già a temperature prossime allo zero. Anche elevati apporti di fosforo, che favoriscono la crescita della pianta, tendono a ridurre la resistenza al freddo, mentre applicazioni di microelementi (Cu, B, Mg, Zn, ecc.) appaiono idonee ad aumentarne la tolleranza.

Tra i fattori in grado di influenzare l'incidenza delle gelate vi è anche il contenuto idrico del suolo. Generalmente suoli con elevata conducibilità e capacità termica hanno un campo di variabilità della temperatura modesto e questo determina temperature notturne più alte sia in superficie che nell'aria. Le condizioni di massima conducibilità e diffusività del calore non si ottengono però con suoli saturi, bensì con suoli umidi, ma drenati, e lo strato umido deve interessare almeno i primi 30 cm (Monteith e Unsworth, 1990). Se il terreno è secco, la maggior quantità di spazi riempiti dall'aria rende più difficile il trasferimento e l'immagazzinamento del calore; è quindi buona norma, in previsione di una gelata per irraggiamento, bagnare il terreno il più presto possibile in modo che il sole possa riscaldarlo (Snyder *et al.*, 1987).

Se il frutteto è inerbito, durante il giorno il terreno immagazzina una minor quantità di energia, disponendo quindi di una minore quota di calore da restituire di notte all'atmosfera; le lavorazioni del terreno, pertanto, diminuiscono il rischio di danni da freddo.

### **Le basse temperature e le piante**

Elevate temperature nel periodo invernale possono facilitare un soddisfacimento anticipato del fabbisogno in freddo delle gemme, inducendo un precoce risveglio vegetativo, e rendere le piante molto più indifese nei confronti dei ritorni di freddo primaverili.

Il danno da gelo consiste nella formazione di ghiaccio nelle cellule e negli spazi intercellulari; il verificarsi di questo evento è in relazione alle temperature esterne e al grado di vulnerabilità (livello di idratazione) dei tessuti in cui il ghiaccio si forma (Kang *et al.*, 1998). Piante "indurite" e in fase di riposo sono meno idratate, e quindi più resistenti, ma l'indurimento è uno stato fisiologico che, in presenza di fluttuazioni termiche, si modifica rapidamente (Rodrigo, 2000) per l'alternarsi di temperature miti e rigide. Dopo una gelata, la velocità con la quale gli organi riacquistano calore è importante nel determinare il danno finale (più brusco è il riscaldamento, mag-

giori sono i danni), così come forti rischi derivano dal verificarsi, a distanza di giorni, di eventi consecutivi in cui la temperatura scende sotto lo zero. L'effetto additivo, o sinergico, del susseguirsi in tempi brevi di abbassamenti termici è difficilmente prevedibile poiché dipende dallo stadio fenologico, dall'entità del danno precedente e dalle temperature che caratterizzano i successivi fenomeni (Knollkoff *et al.*, 2003). Anche la durata dell'evento influenza l'entità del danno: minime termiche anche rilevanti, ma di breve durata (per es. poche ore all'alba) hanno effetti solitamente minori rispetto ad abbassamenti termici di pochi gradi sotto zero che però iniziano già nelle prime ore notturne e proseguono fino all'alba. In tal caso, i danni rilevabili sembrano frutto di un effetto negativo sinergico fra le minime termiche assolute e il numero di ore con temperatura inferiore a 0°C.

Anche se appare assai difficile prevedere e prevenire con certezza i danni da ritorni di freddo primaverili, è possibile sintetizzare alcuni accorgimenti utili alla riduzione degli stessi: scelta di specie e varietà meno sensibili alle brinate per propria rusticità genetica o per la fioritura tardiva; utilizzo di tecniche agronomiche che contribuiscano ad una prolungata fase di "indurimento" delle piante nel periodo autunno-invernale (in particolare limitati apporti idrici e oculati interventi nutrizionali); adozione di sistemi di impianto e gestione che, a parità di specie e cv, negli ambienti più esposti al rischio consentano di salvaguardare la maggior parte della chioma (forme di allevamento alte, potatura ricca e ritardata); predisposizione di sistemi fisico-meccanici di difesa attiva (irrigazione sopra- e sotto-chioma, ventilatori, impianti di riscaldamento e condizionamento dell'atmosfera) che, compatibilmente con i costi di installazione e gestione, e in funzione delle caratteristiche fisiche d'origine dell'evento climatico, contribuiscano ad innalzare la temperatura dell'aria nel frutteto.

## Previsione delle gelate

### *Mappe di rischio climatico*

Per un'adeguata opera di allerta agli agricoltori è necessario conoscere quando può verificarsi una gelata, ma, più in generale, ai fini di una corretta pianificazione della produzione e dell'uso del suolo occorre sapere dove è più probabile che essa si manifesti in maniera critica per le colture. Le mappe di rischio climatico costituiscono uno strumento indispensabile per la pianificazione di nuovi frutteti, soprattutto delle specie più sensibili, e per una corretta programmazione dei sistemi di difesa. Informazioni sulla variabilità

spaziale della temperatura sono altresì utili per estendere le previsioni su tutto il territorio alla scala di dettaglio (Antolini *et al.*, 2004).

In generale, la variazione spaziale della temperatura dell'aria durante una notte di gelo dipende dalle condizioni meteorologiche e da fattori locali dato che, come già evidenziato, le perdite radiative dal suolo e dai bassi strati dell'atmosfera e i flussi turbolenti differiscono dal punto di vista spaziale. Durante le gelate avvelte, la perdita radiativa locale è trascurabile rispetto al processo di raffreddamento generalizzato causato dall'irruzione di aria fredda e quindi, solitamente, la variabilità spaziale è relativamente scarsa. In questi casi non si crea uno strato d'inversione termica e le zone più a rischio sono quelle ben esposte al vento, a quota elevata e sui crinali. Nelle gelate di tipo radiativo, quando il raffreddamento è causato da un irraggiamento notturno dal suolo verso l'atmosfera, la variabilità spaziale è, al contrario, molto elevata. Le caratteristiche radiative locali e i fattori che indirettamente influenzano il trasferimento radiativo sono infatti peculiari nel definire i pattern spaziali del campo termico: colore del terreno, rugosità della superficie, umidità e nuvolosità.

Una buona cartografia dell'uso del suolo è fondamentale per stimare la variabilità; è noto che in vicinanza di agglomerati urbani e di corpi idrici la temperatura minima notturna è sempre superiore rispetto alle aree limitrofe: i primi condizionano i flussi di calore e determinano l'effetto "isola di calore", i secondi influenzano l'umidità atmosferica. In zone ad orografia complessa la situazione è ulteriormente complicata dalla presenza di valli, versanti e crinali che modificano sensibilmente il movimento dell'aria e alterano la stabilità dello strato atmosferico limite. Il movimento dell'aria ne determina un drenaggio verso le aree collocate a quote minori, fino a creare veri e propri laghi di aria fredda qualora la valle sia particolarmente stretta e profonda. Il fenomeno è particolarmente evidente in collina o in montagna, dove si osservano venti catabatici dovuti allo scivolamento di masse d'aria fredda verso i fondovalle. Anche in pianura le aree collocate anche pochi metri più in basso rispetto alle zone circostanti sono più a rischio e vi si osservano differenze di temperature anche di diversi gradi centigradi a distanze di poche centinaia di metri (Zinoni *et al.*, 2000; 2002). Solitamente, in orografia piana, laddove siano assenti fenomeni di rimescolamento, l'aria più fredda tende a stratificarsi verso la superficie e si osserva una spiccata inversione termica lungo il profilo verticale dell'atmosfera (che raggiunge qualche centinaio di metri) durante una tipica gela-

ta radiativa. Il gradiente termico che esprime la variazione di temperatura misurata ad altezza standard (2 metri) rispetto alla quota della stazione sembra seguire andamenti simili, come riportato da Antolini *et al.* (2004).

Per produrre mappe di rischio è necessario quantificare la variabilità spaziale della temperatura attraverso strumenti sufficientemente precisi e oggettivi. A tal fine occorre avere a disposizione una rete di stazioni meteorologiche di controllo della temperatura oppure misurare questo parametro in maniera remota tramite sensori all'infrarosso su aerei o piattaforme satellitari. I dati raccolti dalle stazioni a terra costituiscono valori puntuali irregolarmente sparsi sul territorio che, previa elaborazione in base a procedure geostatistiche e modelli spaziali, vengono usati per ricavare mappe territoriali di temperatura minima (fig. 2). E' possibile utilizzare una rete esistente di stazioni, per la quale sono disponibili serie storiche decennali di misurazione della temperatura di territori relativamente vasti (Tabony, 1985; Zinoni *et al.*, 2002) oppure ricavare i dati da campagne di misura appositamente predisposte, della durata di pochi anni e concentrate su aree ristrette, con reti costituite da sensori di temperatura portatili per discriminare al meglio le differenze spaziali (Laughlin e Kalma, 1990; Blennow e Persson, 1998; Lindkvist e Chen, 1999; Lindkvist *et al.*, 2000). Spesso i due metodi vengono integrati per costruire modelli statistici e procedere alla loro validazione (Zinoni *et al.*, 2004).

Qualunque sia la tipologia dei dati di temperatura, occorre impiegare tecniche di interpolazione spaziale per stimare il campo termico anche nelle aree non

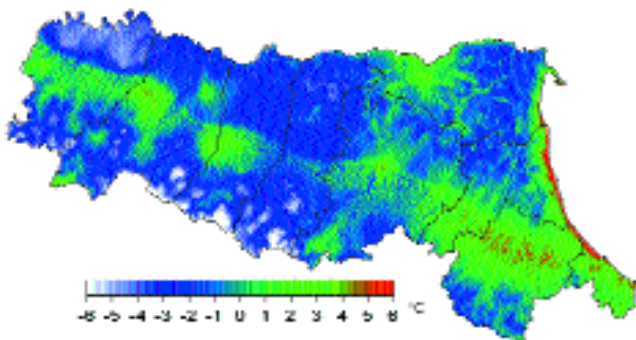


Fig. 2 - Esempio applicativo di stima delle temperature minime attraverso la mappa di singoli eventi significativi manifestatisi il 17 marzo 2003 in Emilia-Romagna. I valori sono ricavati a partire dai dati rilevati dalla rete meteorologica regionale e integrati con il modello topoclimatico sviluppato da Zinoni *et al.* (2004).

Fig. 2 - Map of daily minimum temperature (March 17<sup>th</sup> 2003) for Emilia-Romagna region (Italy), obtained with the topoclimatic model developed by Zinoni *et al.* (2004).

coperte da misure. La geostatistica classica fornisce a questo scopo numerosi algoritmi che, in generale, sono basati su formulazioni matematiche per la stima della temperatura in un generico punto dello spazio cartesiano a partire da un "dataset" di misure. La variabile incognita è esprimibile tramite una funzione a due variabili (le coordinate orizzontali) che dipende dai valori puntuali corrispondenti alle misure. Nei casi più semplici la funzione è una combinazione lineare dei valori noti, ciascuno moltiplicato per un peso che dipende dalla distanza tra il punto di misura e il punto di stima. Per esprimere in maniera realistica la dipendenza della temperatura minima dai fattori locali, si è soliti integrare in tali metodi altre informazioni (covariabili) relative ad altre variabili ambientali. Le covariabili più significative sono espressione della topografia locale del territorio e vengono derivate da un modello digitale del terreno. Si utilizzano frequentemente indici topografici calcolati in base alle differenze di quote tra punti griglia adiacenti, a rappresentare in maniera quantitativa e semplificata il rischio di drenaggio di aria fredda (Laughlin e Kalma, 1990; Zinoni *et al.*, 2002b) oppure, in altri casi, il territorio viene categorizzato secondo la conformazione orografica (Lindkvist e Chen, 1999; Lindkvist *et al.*, 2000).

La temperatura può essere misurata anche tramite radiometri, rilevando quindi la radiazione elettromagnetica emessa dalla una superficie nella lunghezza d'onda dell'infrarosso termico, sia al suolo che da satellite, utilizzando le leggi di trasferimento radiativo per operare opportune correzioni atmosferiche (Sobrino, 2000). Anche immagini AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo di satelliti NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) possono essere usate per realizzare mappe di temperatura di gelata (Sobrino, 2000; Zinoni *et al.*, 2004) (fig. 3).

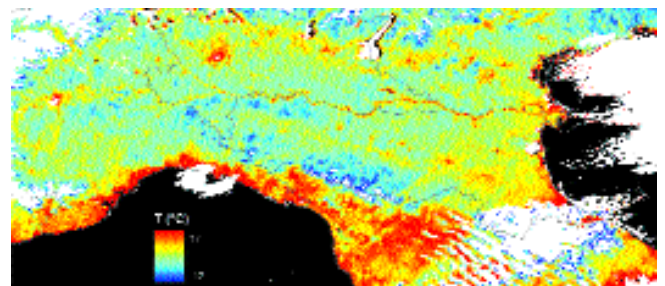


Fig. 3 - Mappa di temperatura superficiale terrestre per il Nord Italia; sono evidenti le "isole di calore" collegate alla presenza di grandi centri abitati (elaborazione da dati NOAA-AVHRR, 17 marzo 2003, 04:25 UTC).

Fig. 3 - Map of land surface temperature for Northern Italy (elaboration from NOAA-AVHRR data, March 17<sup>th</sup> 2003, 04:25 UTC).



### Modelli previsionali

Il rischio climatico è inteso come la probabilità che un evento dannoso possa verificarsi in una determinata area ed in un periodo definito. Per esempio, disponendo di una serie storica di dati termici misurati in stazione meteorologica, è possibile calcolare la probabilità che la temperatura in un determinato periodo dell'anno scenda, in quella zona, sotto una certa soglia. Snyder *et al.* (2005) presentano alcuni software per il calcolo del rischio climatico da gelo; uno di questi, di tipo climatologico, è basato sulla metodologia per distribuzioni statistiche di eventi estremi, perfezionata da Haan (1979), in cui la probabilità annuale che la temperatura minima scenda sotto una determinata soglia è calcolata sulla base di serie storiche di temperatura in un certo periodo dell'autunno e della primavera. Tale grandezza, assieme alla lunghezza del periodo di crescita in assenza di rischio, costituisce un'informazione preziosa per la scelta della data di semina di specie annuali primaverili o la selezione di colture invernali. Dalla probabilità annuale si può derivare facilmente il numero di anni esenti da gelo associati ad un determinato livello di probabilità, elemento importante nell'analisi costi-benefici relativa a nuovi impianti di specie poliennali.

Lo strumento potrebbe diventare di pratico uso non solo per i pianificatori agricoli, ma anche per gli agricoltori che, noto il rischio, possono decidere la convenienza di un investimento su una coltura alternativa o l'installazione di impianti di difesa. In tal senso, infatti, l'agro-climatologia si orienta verso l'utilizzo concreto del dato climatico anche attraverso il dialogo interdisciplinare con l'ecofisiologia, l'agronomia e l'economia. Il rischio, dunque, è espresso come potenziale perdita produttiva in termini agronomici o economici ed è quantificato tramite la riduzione del numero degli organi riproduttivi o la diminuzione della qualità del prodotto oppure con la perdita in termini di prodotto vendibile. Tuttavia, non sono numerosi i tentativi di seguire un approccio integrato di questo tipo, a causa delle difficoltà nel reperire dati storici per la calibrazione e la validazione di modelli e anche per la difficile comprensione di alcuni fenomeni e processi. Gli elementi da considerare nell'analisi del rischio agro-climatico sono infatti molteplici: la gelata come evento meteorologico è caratterizzata dall'intensità della stessa in termini di durata e livello termico e dalla variabilità spaziale del fenomeno, come già ampiamente discusso. Difficile è anche la valutazione oggettiva dell'effetto che la stessa ha sulla coltura, poiché la reazione della pianta dipende, come già descritto, da numerosi fattori endogeni ed esogeni.

Dato che uno dei principali elementi che determina la sensibilità della coltura è il suo stadio di sviluppo, alcune recenti ricerche si sono indirizzate allo studio del rischio in relazione al calendario fenologico

Per esprimere il danno produttivo potenziale procurato da un evento di gelo di una determinata entità, in relazione al calendario fenologico di alcune colture frutticole in Emilia-Romagna, Zinoni *et al.* (2002) utilizzano l'indice di rischio proposto da Lindkvist e Chen (1999), che considera in maniera integrata l'intensità dell'evento e lo sviluppo della coltura. La prima è espressa come integrale orario della temperatura sotto una certa soglia, calcolato per ogni evento, mentre lo sviluppo della coltura è introdotto nel calcolo attraverso opportuni pesi che esprimono la sua sensibilità in relazione alla data in cui si verifica l'evento. Zinoni *et al.* (2004) perfezionano poi questa metodologia introducendovi modelli fenologici e calcolano il danno in base alla sensibilità della coltura espressa come perdita produttiva percentuale associata all'intensità dell'evento. Inoltre, introducono alcuni possibili modelli di calcolo del danno produttivo anche sulla base delle indicazioni fornite da Snyder *et al.* (2005), che tengono in conto le perdite dovute a eventi successivi sui residui di produzione. Occorre inoltre tenere in considerazione l'effetto dovuto al tempo intercorso tra un evento e il successivo, dato che a questo è legato il danno complessivo di due gelate successive; la pianta, infatti, può avere il tempo di rigenerare gli organi colpiti in precedenza, oltre a manifestare un certo grado di indurimento.

Considerate la frammentarietà e la scarsa affidabilità dei dati storici relativi ai danni da gelo, indispensabili per la calibrazione dei modelli, è interessante l'approccio proposto da Jurgens (1997), che introduce un indice vegetazionale per la determinazione dei danni applicabile a livello territoriale, impiegando sensori termici nell'infrarosso medio e vicino.

La previsione della temperatura degli organi vegetali, o almeno della temperatura dell'aria, è fondamentale per garantire un'adeguata pianificazione delle opere di difesa. Soprattutto per le gelate di tipo radiativo, dove l'efficacia delle tecniche di protezione è tale da contrastare anche notevolmente il raffreddamento, un'adeguata stima del valore termico minimo e della possibile evoluzione delle temperature, in relazione anche alla loro distribuzione spaziale, sono strumenti indispensabili per l'agricoltore. I primi approcci scientifici per la previsione delle gelate risalgono alla fine del 1800, mentre le prime pubblicazioni in questo campo sono dell'inizio del secolo scorso; esse contengono formulazioni matematiche di tipo empirico che

stimano il minimo termico notturno in base a semplici espressioni matematiche che contengono le variabili meteorologiche più rilevanti, misurate al tramonto: temperatura, umidità, copertura nuvolosa, vento. La natura empirica di tali metodi ne limita l'utilizzo alle sole zone geografiche e alle condizioni meteorologiche specifiche in cui si è effettuata la calibrazione e rende necessaria una nuova elaborazione nelle altre aree. Una procedura che ancora oggi è utilizzata, in versione originale oppure modificata, è la formula di Young (1920):

$$T_m = T_d - (H - n)/4 + V_d + V_H$$

dove  $T_m$  è la temperatura minima notturna prevista,  $T_d$  la temperatura di rugiada,  $H$  l'umidità relativa,  $n$  un indice di copertura nuvolosa,  $V_d$  e  $V_H$  parametri dipendenti rispettivamente da  $T_d$  e  $H$ . Le grandezze meteorologiche sono misurate al tramonto.

I metodi semi-empirici di Reuter (1951) si basano su analisi semplificate del bilancio energetico e del flusso di calore superficiali. Per esempio, Brunt (1941) ne quantifica i termini e, in particolare, la radiazione ad onda lunga atmosferica in uscita dalla superficie terrestre:

$$R_N = \sigma T^4 (a - b\sqrt{e})$$

dove  $R_N$  è la radiazione netta ad onda lunga,  $\sigma$  la costante di Boltzmann,  $T$  la temperatura del suolo,  $e$  la pressione di vapore, mentre  $a$  e  $b$  sono due costanti. Il valore di  $R_N$  è poi inserito nella formula seguente, che rappresenta una soluzione analitica dell'equazione che descrive la conduzione di calore nel terreno per stimare la caduta di temperatura al suolo ( $\Delta T_s$ ) ad un generico tempo  $t$  espresso in ore:

$$\Delta T_s(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R_N \sqrt{K}}{k} \sqrt{t}$$

dove  $K$  e  $k$  sono rispettivamente la diffusività termica e la conducibilità termica del terreno. La natura empirica di metodi di questo tipo risiede nell'utilizzo di coefficienti che sono specifici per il sito, le cui caratteristiche micro-meteorologiche locali sono così implicitamente integrate nei modelli. Un elenco piuttosto esauriente delle tecniche previsionali empiriche e semi-empiriche sono contenute in Bagdonas *et al.* (1978).

Con il progresso della micro-meteorologia e la potenza di calcolo dei moderni elaboratori, si sono sviluppati negli ultimi anni modelli meccanicistici per la simulazione dei bilanci energetici e radiativi e della

dinamica dello strato limite notturno. Le pubblicazioni, di carattere descrittivo ed interpretativo, sono numerose, ma ancora limitate sono le applicazioni a livello operativo: tra queste il sistema previsionale utilizzato in Florida, che contiene il modello di Sutherland (1980) e il modello sviluppato da Cellier (1993), preceduto da una versione semplificata di tipo semi-empirico dello stesso Autore (Cellier, 1984).

Studi modellistici di carattere più descrittivo sono presentati da Figuerola e Mazzeo (1997). Il modello di Avissar e Mahrer (1988) descrive la dinamica dello strato limite notturno nelle tre dimensioni spaziali. Mihailović *et al.* (2002) hanno focalizzato i loro studi sulla modellistica dei flussi di calore all'interno dei frutteti con uno schema originale di parametrizzazione suolo-atmosfera-vegetazione applicato alla previsione della temperatura delle colture. Lhomme e Guilioni (2004) presentano una modellizzazione separata e semplificata della vegetazione e della superficie del suolo, focalizzando l'attenzione sulla previsione della temperatura degli organi vegetali. Antolini *et al.* (2004) hanno realizzato uno studio sulla qualità previsionale di modelli meteorologici ad area limitata, post-processor statistici e modelli topoclimatici, da cui emerge l'importanza di strumenti previsionali che forniscano previsioni a diversa scadenza.

In generale, è buona norma che l'agricoltore utilizzi tutte le misure per tutelarsi dalle potenziali perdite che possono compromettere un'intera annata produttiva; egli può integrare le previsioni fornite da un servizio pubblico con quelle ottenibili con semplici metodi empirici, sulla base di misure meteorologiche effettuate *in situ*. La decisione sull'azionamento o meno dell'impianto di difesa, inoltre, non può prescindere dalla conoscenza del rischio di gelo a livello locale, legato, per esempio, alla conformazione topografica, alle caratteristiche del frutteto e allo stato delle coltivazioni.

E' attualmente operativa presso ARPA-SIM dell'Emilia-Romagna una nuova metodologia integrata di previsione delle gelate sul territorio regionale; essa consiste nell'utilizzo combinato di modelli deterministici, metodi statistici e geostatica, in modo da integrare le previsioni di carattere sinottico con le informazioni geografiche e statistiche su scala locale. I dati EPS e DMO, relativi alle previsioni fornite quotidianamente da ECMWF, vengono post-processati operativamente tramite filtro di Kalman e utilizzati in maniera integrata per la previsione delle minime. Il dato EPS è considerato per valutare il rischio di avvezione d'aria fredda a lunga scadenza (7-10 giorni) e costituisce un supporto informativo per i consorzi di

bonifica in relazione alla programmazione della disponibilità idrica: le previsioni “EPS-Kalman filtrate” sono utilizzate per la media scadenza (2-6 giorni) e le “DMO-Kalman filtrate” per la breve scadenza (1 giorno). Gli operatori di ARPA-SIM utilizzano quotidianamente i dati previsionali a breve scadenza per realizzare le previsioni soggettive che sono visualizzabili dal primo pomeriggio al sito [www.arpa.emr.it/sim](http://www.arpa.emr.it/sim). Le previsioni soggettive forniscono un valore aggiunto alla previsione numerica grazie all’esperienza e alla conoscenza del territorio e alla valutazione esperta dei campi meteorologici più rilevanti, soprattutto nel caso di brusche variazioni a livello sinottico. Sarà presto avviato uno studio sul possibile utilizzo di altri campi meteorologici, di cui sia disponibile la previsione da ECMWF, per stimare più correttamente l’avvezione (per esempio il vento e la temperatura in atmosfera libera). E’ previsto anche lo studio di un modello radiativo di PBL (*Planetary Boundary Layer*) per la stima dell’evoluzione della strato limite notturno, in particolare in condizioni di forte deficit radiativo, per lo sviluppo di un possibile modello operativo di tipo pronostico. Nel caso di gelate radiative l’utilizzo del modello topoclimatico per la stima delle temperature minime sul territorio consente una dettagliata spazializzazione del dato previsionale. L’aumento del numero di stazioni della rete agro-meteorologica, nonché l’utilizzo di altre reti a rappresentatività locale e regionale, porterà ad un aumento sempre maggiore di punti di interpolazione, consentendo da un lato di ottenere più informazioni di tipo sinottico, e dall’altro di approfondire la dipendenza del campo termico al suolo con l’orografia (Antolini *et al.*, 2004).

Dal 2000, in seguito all’aumento delle frequenze delle gelate primaverili e autunnali, è anche attivo presso il CSA dell’ARPA Friuli-Venezia Giulia il sistema A.N.Gela (Algoritmo di Nowcasting per le Gelate). Si tratta di un sistema per la previsione a breve termine delle temperature notturne e la diffusione dell’informazione agli agricoltori sfruttando due tipi di fonte informativa: la previsione soggettiva dei revisori del CSA, basata su una post-elaborazione di modelli numerici a scala sinottica, e i dati di temperatura rilevati in 18 stazioni meteorologiche. I dati previsionali sono costantemente diffusi agli utenti via SMS, via teletext su emittenti locali e tramite web; il servizio è molto apprezzato dal mondo agricolo e le richieste di iscrizione sono in aumento. Infine, va citato il progetto GEPRI (Gelate Primaverili in Trentino), finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento e coordinato dall’ISA di San Michele all’Adige, riguardante

la climatologia, la caratterizzazione micro-meteorologica e la modellistica applicata alle gelate tardive nel territorio agricolo trentino. La ricerca riguardante i metodi previsionali è curata dall’Università di Trento e dall’ISA di San Michele a/A. L’attività svolta fino ad oggi ha riguardato l’implementazione di alcuni modelli empirici che sono stati tarati sui dati di alcune stazioni meteorologiche trentine. Le informazioni micro-meteorologiche raccolte permettono di compiere una taratura dei modelli limitatamente all’area studiata (zona di Mezzolombardo) e la verifica dell’attendibilità della previsione; è in corso la valutazione dell’estensibilità dei risultati forniti dai modelli anche ad altre zone della regione dove non sono attualmente disponibili informazioni dettagliate come i bilanci energetici alla superficie. L’obiettivo è quello di fornire una stima attendibile del decadimento della temperatura nel corso della notte a partire sia dai dati misurati, sia dalle previsioni meteorologiche su scala maggiore.

### La difesa passiva delle colture

La difesa passiva racchiude tutte quelle tecniche messe in campo preventivamente rispetto al momento in cui si verifica la gelata e che sono atte a limitarne il danno. Le diverse soluzioni di intervento riguardano la pianificazione delle colture attraverso la scelta oculata e appropriata delle specie (e delle cultivar) e della loro collocazione all’interno di una particolare area o all’interno della superficie aziendale, gli interventi strutturali atti a ridurre il rischio e le tecniche agronomiche atte a limitare gli scambi di calore tra terreno e atmosfera. L’analisi comparata tra le esigenze termiche delle diverse specie e cultivar e i valori termici dell’area di coltivazione deve costituire un momento essenziale della pianificazione delle coltivazioni. La distribuzione dei frutteti deve tenere in conto sia le temperature minime osservate nelle varie zone, sia le temperature massime, che inducendo un anticipo di fioritura delle piante potrebbero portarle precocemente verso fasi fenologiche a rischio (tab. 1). La scelta assume enorme importanza in territori a orografia variabile, in cui è normale registrare differenze anche di alcuni gradi tra diversi appezzamenti.

Barriere artificiali situate nelle zone più basse degli appezzamenti possono creare ostacolo al drenaggio di aria fredda, così come barriere naturali (siepi, dossi) e/o artificiali (strade, muretti, ferrovie) possono aumentare localmente il rischio di gelata nell’area a monte rispetto alla pendenza del terreno (eventualmente riducibile con punti di drenaggio all’interno

delle barriere stesse). Le barriere, al contrario, svolgono azione di protezione contro i flussi avvertivi con un'efficienza proporzionale al loro grado di impermeabilità all'aria, alla loro altezza e alla loro disposizione, favorendo la funzionalità degli eventuali sistemi attivi di protezione messi in atto.

L'approfondita conoscenza del territorio e della leggi fondamentali della micro-meteorologia, oltre che la messa a punto di metodi di difesa attiva efficaci nelle diverse zone e per le diverse tipologie di frutteto, può favorire una corretta pianificazione degli impianti, inserendo anche il rischio di gelata nel concetto di vocazionalità.

### La difesa attiva

La difesa attiva si basa sull'attuazione di interventi specifici effettuati contestualmente al verificarsi della gelata. Essa prevede l'esecuzione di interventi atti a modificare il bilancio energetico e termico del sistema durante le notti di gelo. Le diverse tecniche utilizzate si possono ricondurre ai seguenti principi fisici: recupero di calore dall'ambiente (suolo, atmosfera), cessione di calore da parte di una sorgente esterna (combustione, congelamento), azione di contrasto della perdita di calore del suolo e dell'ambiente (Zinoni *et al.*, 2000).

La formazione di nebbie artificiali rappresenta il metodo di difesa a pieno campo più antico, in grado di fornire una efficace protezione in presenza di gelate puramente radiative (Mezzetti e Veronesi, 1974). L'immissione di vapore acqueo aumenta l'umidità assoluta dell'aria in prossimità del suolo e, di conseguenza, accresce il potere schermante dell'aria rispetto all'emissione di radiazione infrarossa dal suolo, ostacolando la perdita di calore. La complessità del metodo e la genesi, spesso mista, delle gelate, hanno di fatto relegato questo metodo in aree marginali, caratterizzate da scarsa propensione all'innovazione tecnologica. L'uso di serre e di tunnel costituisce il sistema più efficace, ma anche il più oneroso, la cui attuazione è giustificata solo per colture di alto pregio praticate su superfici relativamente limitate (orticole e floricole).

Nella gran maggioranza dei casi la difesa attiva si basa sull'uso dell'irrigazione, sull'apporto di calore mediante combustione o sul rimescolamento dell'aria. Quest'ultimo metodo può essere realizzato con tecniche diverse, ma tutte orientate a rimuovere la stratificazione d'aria fredda e densa che si forma in prossimità del suolo. Il metodo classico, nato in California nel 1920, è costituito da una torre alta circa 12 m alla

cui sommità è posto un rotore e un sistema di ventilazione ad 1 o 2 eliche. Le diverse caratteristiche costruttive permettono di proteggere una superficie che varia da 3 a 6 ettari per ventilatore. L'efficacia dei ventilatori è massima quando l'inversione termica è molto accentuata ed essi vanno messi in funzione con un certo anticipo rispetto al momento della gelata, soprattutto quando la vegetazione è umida. È importante il loro uso esclusivamente in condizioni di calma di vento, mentre con ventosità superiori a 2,5 m/s può verificarsi un incremento del danno della gelata (Snyder *et al.*, 2005). Recentemente sono stati realizzati ventilatori a bassa potenza (circa 1,5 Kw) con asse verticale (fig. 4) che operano in modo opposto rispetto ai ventilatori tradizionali (Anconelli *et al.*, 2004). L'aria fredda che tende a stratificarsi al suolo viene infatti sospinta verso l'alto e lascia il posto ad aria più tiepida richiamata dagli strati sovrastanti. I ventilatori ad asse verticale sono stati proposti per territori ondulati e utilizzati in combinazione con teli di protezione laterale che evitano il drenaggio di aria fredda limitrofa. Tra i metodi di rimescolamento dell'aria, l'elicottero si presenta come mezzo ad alta efficacia in grado di coprire vaste zone (da 22 a 44 ha) con aumento apprezzabile della temperatura compreso tra 3,5 e 4 °C. L'impiego di questi sistemi è comunque estremamente limitato, dati sia il costo, sia la necessità di un volo notturno che non sempre è ammesso dalle normative vigenti.

La cessione di calore mediante combustione viene realizzata con tecniche diverse, utilizzando impianti fissi o semoventi. La combustione libera calore sotto forma di energia radiante e riscaldamento diretto dell'aria. La radiazione infrarossa si trasmette linearmente e riscalda gli organi vegetali visibili dal bruciatore, mentre l'aria riscaldata dalla combustione in bruciatori a gas (T compresa tra 635 e 1.000 °C) crea una convezione intorno al bruciatore e un conseguente rimescolamento dell'aria (fig. 5). L'effetto schermante del fumo prodotto dai bruciatori appare invece trascurabile rispetto al rilascio di calore. La quantità di calore richiesta per contrastare l'effetto della gelata è compresa tra 140 e 280 W m<sup>-2</sup> (da 5 a 10 GJ/ha/ora), in relazione all'intensità della gelata (Blanc *et al.*, 1963), equivalenti ad una quantità di carburante compresa tra 133 e 365 l/ha/ora. Negli ultimi anni i bruciatori a gas e le stufe a gasolio sono stati largamente sostituiti da candele a pani di paraffina e da contenitori di cere microcristalline, con costi di investimento molto inferiori e rese superiori del 40-60 % rispetto ai bruciatori classici. Per ottenere un giusto equilibrio tra efficacia ed efficienza del metodo è possibile aumentare il



Fig. 4 - Ventilatore ad asse verticale utilizzato per sollevare l'aria fredda stratificata in prossimità del suolo.

Fig. 4 - Vertical flow fan to push up the cold air that lies on the soil.

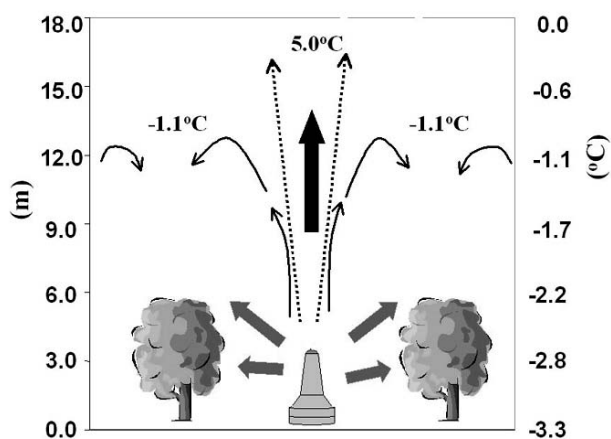


Fig. 5 - L'aria riscaldata dal bruciatore sale e si raffredda a contatto con l'aria ambiente; la sua diffusione e il raffreddamento ne aumentano la densità e successivamente essa ridiscende creando una circolazione interna al frutteto (Snyder *et al.*, 2005).

Fig. 5 - Hot air rises and cools until it reaches environmental temperature. Then it spreads out and cools until it becomes denser and descends. This creates an internal circulation in the orchard (Snyder *et al.*, 2005).

numero di riscaldatori al bordo dell'appezzamento e accendere i riscaldatori progressivamente durante la gelata in relazione alla sua intensità

Considerando la durata delle gelate primaverili, che può raggiungere anche le 10-12 ore per notte, con frequenze che negli anni dal '97 al 2003 hanno raggiunto in Pianura Padana le 10-12 notti per stagione, i costi di gestione dei metodi basati sulla combustione appaiono sicuramente elevati per la protezione delle colture ordinarie (Reggidori, 2004); tra l'altro, nel caso di bruciatori trasportabili trainati all'interno del frutteto, il consumo di carburante è ridotto rispetto ai

sistemi fissi, ma è ridotto anche l'incremento di temperatura che viene a determinarsi.

Il metodo più diffuso, grazie al buon livello di protezione, alla polifunzionalità degli impianti e ai bassi costi di gestione, è l'irrigazione antibrina. Essa può essere effettuata in due modi: soprachioma, bagnando e facendo congelare l'acqua sugli organi da proteggere, e sottochioma, bagnando e facendo congelare l'acqua sul terreno per equilibrare la quantità di calore persa dal suolo. Il primo metodo mira ad aumentare direttamente la temperatura degli organi vegetali, mantenendoli su valori prossimi a 0 °C, mentre il secondo tende ad aumentare sensibilmente la temperatura dell'aria a livello della chioma.

Il livello di protezione dell'irrigazione soprachioma è molto elevato, fino a temperature dell'aria di -7 °C ed oltre (Snyder *et al.*, 2005), ma può presentare anche rischi molto elevati. Per questo va posta molta attenzione ai momenti di inizio e termine dell'irrigazione e alla portata degli irrigatori, in relazione sia all'intensità della gelata, sia al movimento dell'aria. Infatti, la formazione di ghiaccio sugli organi vegetali aumenta la loro conducibilità e li rende più sensibili alla temperatura esterna e all'abbassamento termico determinato dall'eventuale sublimazione del ghiaccio che li avvolge, soprattutto al sorgere del sole (Reggidori, 2004). La precipitazione sulla fila non dovrebbe poi scendere sotto i 3-3,5 mm/ora per gelate di media intensità e 6-7 mm/ora con gelate più severe. L'inizio dell'irrigazione va programmato utilizzando la misura del termometro a bulbo umido, mentre l'arresto deve essere effettuato quando la temperatura è di alcuni gradi sopra 0 °C. Al sorgere del sole, con l'irrigazione in funzione, sono stati osservati abbassamenti termici a contatto del legno, sotto lo strato di ghiaccio, di 1,5-2,5 °C per effetto della sublimazione (Anconelli *et al.*, 2004); l'irrigazione deve proseguire quindi fino a quando il ghiaccio non presenta un aspetto opaco ed inizia a distaccarsi dalla pianta

L'irrigazione sottochioma viene proposta come metodo alternativo a quello soprachioma per le zone che hanno una limitata disponibilità di acqua, alta frequenza di gelate e terreni tenaci con problemi di ristagno idrico (Zinoni *et al.*, 1992). La sua efficacia è massima nelle aree pianeggianti e si espleta determinando un aumento massimo della temperatura dell'aria in corrispondenza del suolo, che si esaurisce nello spazio verticale compreso tra 3 e 6 m, in relazione al gradiente verticale della temperatura e al volume di acqua distribuita (fig. 6). Utilizzata in modo adeguato ha permesso di ottenere ottimi risultati con temperature di -3 / -4 °C e risultati buoni o soddisfacenti fino a

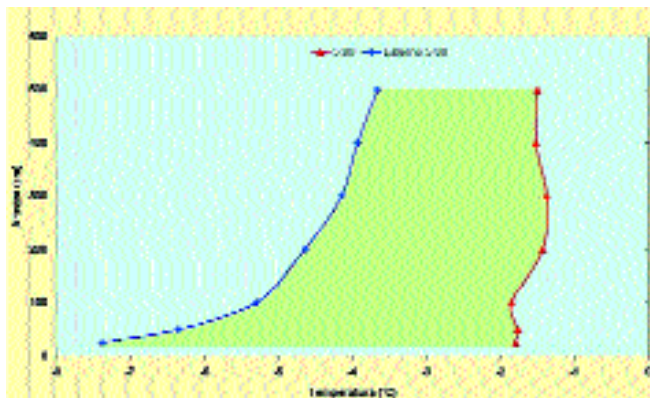


Fig. 6 - Gradiente verticale della temperatura dell'aria registrata in un frutteto alle 5 del mattino durante una gelata per irraggiamento in presenza di irrigazione climatizzante sottochioma (linea rossa) rispetto ad una zona in cui non era presente l'irrigazione (linea blu). Appaiono evidenti sia la resa termica di circa 3°C registrata a livello della chioma, sia la modificazione del profilo di inversione, che viene annullato dal rilascio di calore da parte del ghiaccio formatosi al suolo (Rossi *et al.*, 2004).

*Fig. 6 - Vertical gradient of the air temperature recorded in a orchard at 5:00 in the morning during a radiation frost. Red line refers to the presence of below ground irrigation, and blue line to an open area where irrigation was not present. Both thermal gain (of about 3°C) at canopy level and the change of the inversion profile due to the latent heat release of the ice at the surface are evident (Rossi *et al.*, 2004).*

temperature di -5 / -6 °C (Anconelli *et al.*, 2004). Il metodo si presta anche per una turnazione all'interno dell'azienda con tempi di ritorno che possono raggiungere i 4-6 minuti, al fine di aumentare la superficie protetta e favorire sia un risparmio di acqua, sia una maggiore sostenibilità ambientale (Zinoni *et al.*, 2000). La maggiore efficacia si ottiene operando con microirrigatori che bagnino tutta la superficie del terreno; sono sufficienti spruzzatori da 40-70 l/ora con un sesto di impianto tale da garantire una pluviometria media compresa tra 1,5 e 2,5 mm/ora. Sono da preferire microirrigatori dinamici che presentano un organo distributivo rotante, con gocce di diametro maggiore e una gittata più ampia, soprattutto nei casi di gelate con temperature inferiori a -4 / -5 °C. La quantità di acqua da distribuire dovrebbe variare in relazione all'intensità della gelata, ma in generale si è osservato che le pluviometrie orarie sopra riportate (in funzione della temperatura della gelata), al netto degli eventuali intervalli di funzionamento, sono idonee per una difesa adeguata (Zinoni *et al.*, 2004).

## Conclusioni

La risposta dell'ambiente e del sistema frutteto alle gelate non appare sempre univoca e sovente si mettono in discussione alcuni aspetti che in altre occasioni

apparivano come certezze. Il sistema in cui la gelata si sviluppa e espleta il suo effetto è infatti assai complesso ed in esso i fattori fisici e biologici interagiscono con elevati fattori di variabilità (Lookinbill e Urban, 2003). La variabilità del profilo della temperatura che si osserva vicino al suolo, il diverso stadio di sviluppo delle varie specie, la struttura della chioma degli alberi, oltre ai molti altri fattori ambientali che intervengono in modo casuale e diversificato, contribuiscono a modificare l'esito della gelata. Infatti, l'andamento stagionale precedente l'evento atmosferico condiziona non solo lo sviluppo della pianta, ma anche il suo stato di idratazione, il turgore dei tessuti ed il loro stato nutrizionale; l'escursione termica successiva la gelata determina la velocità di reidratazione dei tessuti; la frequenza delle gelate, la loro genesi e i fattori fisici che le regolano, in particolare la componente dinamica dell'aria, determinano lo strato di vegetazione interessato dai danni e la loro intensità; infine, l'intensità e la durata del fenomeno climatico determinano la quantità di calore perso.

Si tratta, pertanto, di una serie di fattori la cui combinazione genera un sistema che nella realtà si presenta con caratteristiche proprie, nel suo insieme sempre diverso rispetto alle combinazioni precedenti e solo parzialmente noto in termini di risposta del sistema all'applicazione di tecniche protettive. Questo è il principale motivo per cui l'uso della difesa ha indotto nella pratica risultati spesso alterni e non sempre immediatamente riconducibili ad errori operativi o all'uso di tecniche improprie per l'ambiente da difendere (Anconelli *et al.*, 2004).

Le conoscenze della micro-meteorologia locale, assieme alle previsioni meteorologiche che preannunciano il verificarsi di situazioni di rischio, possono favorire l'adozione di metodi di difesa passivi e ottimizzare quelli di difesa attiva. Di grande importanza è, inoltre, la corretta valutazione del rischio per la programmazione degli impianti e la scelta dei criteri di difesa e, quindi, la stesura di mappe di rischio che correlino le caratteristiche topografiche del suolo con la sensibilità delle diverse specie coltivabili.

Lo studio delle caratteristiche meteorologiche e fisiche delle gelate tardive, integrato dalle conoscenze agronomiche ed eco-fisiologiche sulle piante da frutto e supportato dallo sviluppo di modelli previsionali e mappe di rischio climatico, apre oggi nuovi orizzonti per la previsione degli eventi calamitosi e la più razionale applicazione di sistemi preventivi di protezione delle piante.

La difesa, attiva e passiva, rappresenta per molte aree a vocazione frutticola un elemento fondamentale

per assicurare costanza e qualità della produzione, ma non assicura sempre l'esito desiderato. Con essa, infatti, si tende a ridurre il rischio, ma non si assicura la totale protezione delle piante. In questo contesto, e con queste consapevolezza, va operata la scelta, ricercando il metodo più efficace ed efficiente in relazione alla redditività della coltura, al rischio climatico della zona e della specie coltivata, ai costi fissi e operativi dei vari sistemi, alla polifunzionalità degli impianti, al rischio operativo proprio delle diverse tecniche di difesa (Zinoni *et al.*, 2000).

## Riassunto

Le gelate tardive rappresentano in frutticoltura una delle principali calamità naturali su scala mondiale per entità e vastità dei danni, la cui incidenza è in costante aumento, anche a causa dell'aumento della variabilità climatica. Gli impatti sull'economia e sulla produttività aziendale possono essere molto rilevanti, ma le informazioni sulle reali possibilità di protezione delle colture sono ancora relativamente limitate. La ricerca nel campo della previsione, della valutazione del rischio e della difesa, unitamente ai nuovi orientamenti della selezione varietale, mira, con diverso grado d'integrazione, a ridurre il livello di rischio. Sulla vulnerabilità delle colture un ruolo molto importante rivestono le caratteristiche genetiche delle diverse specie e varietà, ma anche le fasi fenologiche e le pratiche agronomiche e colturali. Le caratteristiche strutturali e la collocazione spaziale dei frutteti giocano un ruolo molto importante sugli scambi della radiazione e dell'energia tra il suolo e l'atmosfera, che sono i fattori maggiormente responsabili delle gelate radiative, particolarmente pericolose in primavera, quando è massima la vulnerabilità delle piante in fase di fioritura o allegagione. Le conoscenze della micro-meteorologia locale, assieme alle previsioni meteorologiche che preannunciano il verificarsi di situazioni di rischio, possono favorire l'adozione di metodi di difesa passivi e ottimizzare quelli di difesa attiva. Di grande importanza è, inoltre, la corretta valutazione del rischio per la programmazione degli impianti e la scelta dei criteri di difesa e, quindi, la stesura di mappe di rischio che correlino le caratteristiche topografiche del suolo con la sensibilità delle diverse specie coltivabili.

**Parole chiave:** rischio climatico, difesa antibrina, previsione delle gelate, ecofisiologia.

## Bibliografia

- ALDEN J., HERMANN R.K., 1971. *Aspects of the cold hardiness mechanisms in plants*. Bot. Rev. 37: 37-142.
- ANCONELLI S., PRATIZZOLI W., ZINONI F., 2004. *Valutazioni in campo: effetto climatizzante della difesa antibrina*. In: CRPV, Centro Ricerche Produzioni Vegetali (a cura di). "Previsione e difesa dalle gelate tardive - Risultati del progetto DISGELO", Notiziario Tecnico CRPV n. 70.
- ANTOLINI G., ZINONI F., SELVINI A., 2004. *Specializzazione delle previsioni meteorologiche per la stima delle gelate*. In: CRPV, Centro Ricerche Produzioni Vegetali (a cura di). "Previsione e difesa dalle gelate tardive - Risultati del progetto DISGELO", Notiziario Tecnico CRPV n. 70.
- AVISSAR R., MAHRER Y. 1998. *Mapping frost-sensitive areas with a three-dimensional local-scale numerical mode*. Parts I and II. J. Appl. Meteorol. 27.
- BAGDONAS A., GEORG J.C., GERBER J.F., 1978. *Techniques of frost prediction and methods of frost and cold protection*. World Meteorological Organization, Technical Note 487: 1-160.
- BECKMAN T.G., 2004. *Modifying bloom and harvest date of peach with interstem and rootstocks*. J. Amer. Pomological Soc. 58: 12-20.
- BLENNOW K., PERSSON P. 1998. *Modelling local scale-frost variations using mobile temperature measurements with a GIS*. Agric. For. Meteorol. 89: 59-71.
- BOUCHET R.J., 1965. *Problemes des geles de printemps*. Agric. Meteorol. 2: 167-195.
- BRUNT D., 1941. *Physical and dynamical meteorology*. Cambridge University Press, 1-428.
- BLANC, M.L., GESLIN, H., HOLZBERG, I.A. & MASON, B. 1963. *Protection against frost damage*. WMO, Tech. Note No. 51. Geneva, Switzerland, pp 62.
- CAMPBELL G.S., NORMAN J.M., 1998. *An introduction to environmental biophysics*. Springer Verlag, New York, 286 pp.
- CELLIER P., 1984. *Une méthode simple de prévision de températures de l'air et de la surface du sol en conditions de gelées radiatives*. Agronomie 4: 741-747.
- CELLIER P., 1993. *An operational model for predicting minimum temperatures near the soil surface under clear sky conditions*. J. Appl. Meteorol. 32: 871-883.
- FIGUEROLA P.I., MAZZEO N.A., 1997. *An analytical model for the prediction of nocturnal and dawn surface temperatures under calm, clear sky conditions*. Agric. For. Met. 85: 229-237.
- GEORGIADIS T., DALPANE E., ROSSI F., NEROZZI F., 1996. *Orchard-atmosphere physical exchanges: Modelling the canopy aerodynamics*. Acta Hort. 416: 177-183.
- GRAY G.R., CHAUVIN L.P., SARHAN F., HUNER N.P.A., 1997. *Cold acclimation and freezing tolerance. A complex interaction between light and temperature*. Plant Physiol. 114: 467-474.
- HAAN C.T., 1979. *Risk analysis in environmental modifications*. In Barfield, B.J. & Gerber, J.F., (eds) Modification of the aerial environment of crops. Am. Soc. Agric. Eng. Monogr. 2. St Joseph, Mich.: 30-51.
- HOLDEN N.M., BRERETON A.J., 2004. *Definition of agroclimatic regions in Ireland using hydro-thermal and crop yield data*. Agric. Forest Meteorol. 122: 175-191.
- HUGHES M.A., DUNN A. M., 1996. *The molecular biology of plant acclimation to low temperature*. J. Exp. Bot. 47: 291-305.
- JURGENS C., 1997. *The modified normalized difference vegetation index (mNDVI) – A new index to determine frost damages in agriculture based on Landsat TM data*. Int. J. Remote Sensing 18(17): 3583-3594.
- KANG S.K., MOTOSUGI H., YONEMORI K., SOGIURA A., 1998. *Supercooling characteristics of some deciduous fruit trees as related to water movement within the bud*. J. Hort. Sci. and Biotechnology 73: 165-172.
- KNOLLHOFF D.S., TAKLE, E.S., GALLUS W.A., BURKHEIMER D.,

- MCCAULEY D., 2003. *Evaluation of a frost accumulation model*. Met. Applic. 10: 337-343.
- LAUGHLIN G.P., KALMA J.D., 1990. *Frost risk mapping for landscape planning: a methodology*. Theor. Appl. Climatol. 42: 41-51.
- LHOMME J.P., GUILIONI L., 2004. *A simple model for minimum crop temperature forecasting during nocturnal cooling*. Agric. For. Met. 123: 55-68.
- LI C.Y., JUNTILA O., PALVA E.T., 2004. *Environmental regulation and physiological basis of freezing tolerance in woody plants*. Acta Physiolo. Plant. 26: 213-222.
- LI Z.L., BECKER F., STOLL M.P., WAN Z., 1999. *Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images*. Remote Sens. Environ. 69: 197-214.
- LINDKVIST L., CHEN D., 1999. *Air and soil frost indices in relation to plant mortality in elevated clear-felled terrain in Central Sweden*. Climate Research 12: 65-75.
- LINDKVIST L., GUSTAVSSON T., BORGREN J., 2000. *A frost assessment method for mountainous areas*. Agric. For. Meteorol. 102: 51-67.
- LINDOW, S.E. 1983. *Methods of preventing frost injury caused by epiphytic ice nucleation-active bacteria*. Plant Disease 67: 327-333.
- LOOKINGBILL T.R., URBAN D.L., 2003. *Spatial estimation of air temperature differences for landscape-scale studies in montane environments*. Agric. For. Meteorol. 114: 141-151.
- MEZZETTI A., VERONESI G., 1974. *Gelate in agricoltura: Genesi, danni e difesa*. Edagricole, Bologna: 1-48.
- MIHAILOVIĆ D.T., LALIĆ B., ARSENIĆ I., EITZINGER J., DUŠANIĆ N., 2002. *Simulation of air temperature inside the canopy by the LAPS surface scheme*. Ecological Modelling 147(3): 199-207.
- MONTEITH, J.L., UNSWORTH, M.H. 1990. *Principles of environmental physics*. 2nd ed., Edward Arnold, London, 291 pp.
- OSAER A., VAYSSE P., 1998. *Gel de printemps, protection des vergers*. CTIFL, pp. 151.
- PALARA U., 2004. *Difesa attiva dalle gelate tardive: valutazioni in campo e analisi dei danni*. Notiziario Tecnico CRPV 70: 97-100.
- PALARA U., ROSSI F., 2004. *Scelte agronomiche per limitare il danno*. Il Divulgatore. Calamità naturali: strumenti tecnici e finanziari a sostegno delle produzioni: 25-30.
- PEREZ-GARCIA M., 2004. *Simplified modelling of nocturnal clear sky atmospheric radiation for environmental applications*. Ecol. Modelling 180: 395-406.
- PROEBSTING E.L., JR., MILLS H.H., 1978. *Low temperature resistance of developing flower buds of six deciduous fruit species*. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 103: 192-198.
- REGGIDORI G., 2004. *Analisi dei costi della difesa dalle gelate tardive in Emilia-Romagna*. In: CRPV, Centro Ricerche Produzioni Vegetali (a cura di). "Previsione e difesa dalle gelate tardive - Risultati del progetto DISGELO", Notiziario Tecnico CRPV n. 70.
- REUTER H., 1951. *Forecasting minimum temperatures*. Tellus 3: 141-147.
- RODRIGO J., 2000. *Spring frost in deciduous fruit trees-morphological damage and flower hardiness*. Scientia Hort. 85: 155-173.
- ROSSI F., 2000. *Sensibilità delle piante da frutto ai danni da gelo*. In: Zinoni F., Rossi F., Pitacco A., Brunetti A. (a cura di) *Metodi di previsione e difesa dalle gelate tardive*. Calderini Agricole, Bologna.
- ROSSI F., NEROZZI F., FACINI O., GEORGIADIS T., 1996. *Orchard-atmosphere physical exchanges: modelling the thermal canopy regime for the determination of sensible and latent heat fluxes*. Acta Hort. 416: 169-176.
- ROSSI F., FACINI O., LORETI S., NARDINO M., GEORGIADIS T., ZINONI F. 2002. *Meteorological and micrometeorological applications to frost monitoring in Northern Italy orchards*. Chemistry and Physics of the Earth 27: 1077-1089.
- ROSSI F., FACINI O., GEORGIADIS T., NARDINO M., 2004. *Formazione e caratteristiche delle gelate tardive*. Notiziario CRPV, 70, Previsione e difesa dalle gelate tardive: 13-27.
- SNYDER R.L., DE MELO E ABREU J.P., MATULICH S. 2005. *Frost protection: fundamentals, practice and economics*. Vol. I and II. United Nations, Food and Agriculture Organization, Rome, 263 pp. (in stampa).
- SNYDER R.L., PAW U.K.T., THOMPSON J.F., 1987. *Passive frost protection of trees and vines*. Univ. Calif., DANR Leaflet, 21429.
- SOBRINO J.A., 2000. *Teledetección*. Servicio de publicaciones, Universidad de Valencia, 467 pp.
- SOZZI R, GEORGIADIS T., VALENTINI M., 2002. *Introduzione alla turbolenza atmosferica. Concetti-Stime-Misure*. Pitagora Editrice, Bologna, 525 pp.
- SUTHERLAND R.A., 1980. *A short-range objective nocturnal temperature forecasting model*. J. Appl. Meteorol. 19: 247-255.
- TABONY R.C., 1985. *Relations between minimum temperature and topography in Great Britain*. J. Climatol. 5: 503-520.
- THOMASHAW M.F., 1999. *Plant cold acclimation. Freezing tolerance genes and regulatory mechanisms*. Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biol. 50: 571-599.
- YAMADA M., TAKAHASHI H., 2004. *Frost damage to Hemerocallis esculenta in a mire: relationships between flower bud height and air temperature profile during calm, clear nights*. Can. J. Bot. 82: 409-419.
- YOUNG F.D., 1920. *Forecasting minimum temperatures in Oregon and California*. Mon. Wea. Rev., 16, Supplement: 53-60.
- ZINONI F., SALSÌ A., GENNARI V., FERRI A., PITACCO A., 1992. *Gelate primaverili tardive*. Agricoltura, Regione Emilia-Romagna, Luglio-Agosto 1992.
- ZINONI F., ROSSI F., PITACCO A., BRUNETTI A. (a cura di), 2000. *Metodi di previsione e difesa dalle gelate tardive*. Calderini Agricole, Bologna.
- ZINONI F., ANTOLINI G., CAMPISI T., MARLETTO V., ROSSI F. 2002. *Characterization of Emilia Romagna in relation with late frost risk*. Chemistry and Physics of the Earth 27: 1091-1101.
- ZINONI F., ANTOLINI G., 2004. *Le gelate tardive: genesi e previsione*. Il Divulgatore. Calamità naturali: strumenti tecnici e finanziari a sostegno delle produzioni: 19-24.
- ZINONI F., ANTOLINI G., MARLETTO V., 2004. *Valutazione del rischio da gelata tardiva*. In: CRPV, Centro Ricerche Produzioni Vegetali (a cura di). "Previsione e difesa dalle gelate tardive - Risultati del progetto DISGELO", Notiziario Tecnico CRPV n. 70.