

# I PROCESSI FISICI DEI FENOMENI DI GELATA IN AMBIENTE MONTANO. RISULTATI DALLE CAMPAGNE SPERIMENTALI DEL PROGETTO GEPRI.

## THE PHYSICS OF FROST PHENOMENA IN A MOUNTAIN ENVIRONMENT. RESULTS FROM THE EXPERIMENTAL CAMPAIGNS OF THE GEPRI PROJECT.

Massimiliano de Franceschi\*, Dino Zardi

Gruppo di Fisica dell'Atmosfera, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Università degli studi di Trento  
Via Mesiano, 77 – 38050 Mesiano (TN)

\* Corresponding author: Tel: +39 0461 882687 - Fax: +39 0461 881946 E-mail: Massimiliano.deFranceschi@ing.unitn.it

Received 15/01/2008 – Accepted 08/02/2008

### Riassunto

Nel presente lavoro vengono mostrati i risultati di due campagne di misure intensive svoltesi nella Valle dell'Adige nel 2003 e nel 2004 nell'ambito di un progetto volto al miglioramento delle conoscenze e delle previsioni delle gelate tardive in ambiente ad orografia complessa. Il setup sperimentale ha permesso di individuare l'alternanza e la sovrapposizione di diversi processi base, quali irraggiamento ed avvezione di aria fredda ad opera di correnti di densità, che concorrono a realizzare l'evoluzione notturna della temperatura dell'aria in prossimità del suolo.

Viene anche presentato un evento molto particolare occorso nel 2003 e che ha causato danneggiamenti anche ingenti specie nelle aree in cui sono entrati in funzione gli impianti di protezione mediante irrigazione soprachioma a causa della presenza di correnti di aria fredda da nord con uno scarso contenuto di vapor d'acqua.

**Parole chiave:** gelata, raffreddamento, valle, micrometeorologia, irraggiamento, avvezione, correnti di densità.

### Abstract

*In the present work the results of two intensive measurement campaigns performed in the Adige Valley (Northern Italy) during 2003 and 2004 are presented. The investigations have been executed within a project specifically devoted to a better understanding and forecasting of late frost events over complex terrain. The experimental setup allowed the identification of alternating and superimposing base processes, such as radiative cooling and advection of cold air due to density currents, which realize the evolution of nocturnal air temperature close to the ground.*

*A very interesting event occurred in 2003 is also presented: it caused consistent damages especially in those areas in which protection sprinklers have been deployed in concomitance with northerly cold flows characterized by low water-vapour content.*

**Key words:** frost, cooling, valley, micrometeorology, radiation, advection, density currents.

### Introduzione

Uno degli obiettivi perseguiti dal progetto GePri ("Le gelate primaverili in Trentino: climatologia, caratterizzazione micrometeorologica e modellistica applicata", finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento nell'Ambito del Fondo Unico per la Ricerca 2001-2004) è costituito dall'approfondimento e da una migliore caratterizzazione dei processi fisici che conducono al raffreddamento notturno degli strati d'aria adiacenti al suolo nella stagione primaverile in un contesto geografico caratterizzato da orografia complessa tipico del Trentino (Eccel e Toller, 2001; Eccel *et al.*, 2004).

Nel caso di terreno piano e uniforme, le gelate primaverili possono essere più facilmente classificate, sulla base del meccanismo che le determina, in gelate avvetive, radiative, evaporative e miste (avvetive/radiative) (Geiger *et al.*, 2003). Le prime sono associate all'afflusso a scala sinottica di una massa d'aria caratterizzata da una temperatura inferiore allo zero della scala centigrada, generalmente di origine polare, e possono essere previste con le tecniche di previsione meteorologica collau-

date a scala sinottica. Le gelate da irraggiamento invece sono legate alla formazione di intense stratificazioni termiche notturne, particolarmente accentuate in nottate limpide e serene, poco ventose e caratterizzate da un'umidità relativa piuttosto bassa. Caratteristico delle gelate per irraggiamento è il raggiungimento dei valori minimi di temperatura a poche decine di centimetri dal suolo, con danni che spesso risultano limitati alla sola parte inferiore della pianta. Le gelate da evaporazione sono associate a condizioni particolari e non molto comuni e si verificano quando i tessuti della pianta sono inizialmente ricoperti da un sottile velo d'acqua, l'umidità dell'aria è molto bassa e la temperatura è vicina allo zero: in presenza di forte vento l'acqua presente sulla superficie delle piante evapora, sottraendo così una grande quantità di energia ai tessuti vegetali che si raffreddano. Situazioni simili si verificano ad esempio all'inizio dell'irrigazione antibrina, specie se effettuata soprachioma. Le gelate miste da avvezione / irraggiamento sono dovute alla sovrapposizione dei due feno-



**Fig. 1** - Immagine effettuata al termine della seconda campagna di misure della strumentazione installata da DICA all'interno dei filari presso l'azienda sperimentale "Maso delle Part".

**Fig. 1** - Picture taken at the end of the second measurement campaign of the instrumentation set up by DICA within the rows of apple trees at "Maso delle Part" experimental station.

meni precedentemente illustrati: all'afflusso di masse d'aria fredda e secca, che abbassa la temperatura dell'aria – eventualmente anche senza scendere sotto lo zero – segue una notte serena e poco ventosa, durante la quale la perdita di calore per irraggiamento produce un ulteriore abbassamento locale della temperatura.

Nell'ambito di vari studi condotti sul problema delle gelate (si veda ad es. Rossi *et al.*, 2002; Zinoni *et al.*, 2000a, b) si sono esaminate le dinamiche di questo fenomeno prevalentemente in aree caratterizzate da terreno pianeggiante o collinare, nelle quali il meccanismo dominante del raffreddamento può essere considerato di tipo radiativo. Questo risulta talvolta accentuato dalla presenza di vento, essenzialmente a causa dell'intensificazione dei flussi turbolenti associati, ma si realizza comunque in maniera mediamente uniforme su ogni piano orizzontale se le caratteristiche del terreno e dell'uso del suolo non presentano marcate eterogeneità. Nel caso di terreno complesso, ed in particolare nelle aree poste in prossimità di pendii, il raffreddamento del suolo determina lo sviluppo di correnti di densità (Stull, 1988): l'aria più fredda, e perciò più densa, in prossimità del suolo scorre nelle direzioni di massima pendenza determinando flussi, anche intensi, detti venti catabatici. Ciò comporta una diminuzione della temperatura dovuta all'apporto di aria più fredda ad opera di tali correnti ed

il processo può risultare nel complesso più marcato di quello riscontrato su terreno pianeggiante. Va notato inoltre come il fenomeno presenti caratteri distinti, sui quali la letteratura scientifica non offre ad oggi ancora un panorama completo ed una interpretazione univoca dei dati (cf. ad esempio Oke, 1987; Zinoni *et al.* 2000b; Zinoni *et al.*, 2002; Geiger *et al.*, 2003).

Su orografia complessa, come nel caso delle valli Alpine, e segnatamente in quelle del Trentino oggetto di studio del progetto GePri, i processi che si realizzano sono più complessi. In particolare, alla peculiarità climatica generale che caratterizza le vallate Trentine, si sovrappone l'effetto del meccanismo di raffreddamento notturno che agisce in maniera fortemente difforme tra aree anche relativamente vicine. A causa della complessità orografica del territorio si verificano così ampie variazioni spaziali delle temperature in prossimità del suolo, il che rende più difficile prevedere le gelate e pianificare adeguate azioni preventive.

Per poter approfondire la conoscenza di tali fenomeni e meglio comprendere i dettagli dei singoli processi fisici, tra le diverse attività del progetto GePri si sono effettuate due campagne intensive di monitoraggio meteorologico progettate ad hoc, con l'obiettivo ulteriore di fornire maggiori e più dettagliate informazioni per la simulazione fisico-matematica mediante modelli numerici a scopi previsionali. Questo lavoro presenta i risultati di tali campagne e si articola nel modo seguente: nel secondo capitolo si descrive il sito di misura, il setup sperimentale e si illustrano sinteticamente i fenomeni meteorologici tipici delle due campagne di misura; nel terzo capitolo si descrivono i tipici cicli notturni di raffreddamento e in particolare i singoli fenomeni osservati e la loro interazione, evidenziando l'importanza dei fattori locali giungendo infine a descrivere il particolare evento di gelata dell'aprile 2003.

L'analisi dei dati e le valutazioni qui presentate sono in parte state utilizzate nel lavoro di Dalla Nora *et al.* (2006) per lo sviluppo di un modello di previsione per le temperature minime.

## Materiali e Metodi

Il tratto trentino della Valle dell'Adige si sviluppa per circa 100 km, in direzione Sud-Nord, ed è caratterizzato da un fondovalle debolmente acclive, che presenta quote comprese tra 120 m s.l.m. e 260 m s.l.m. tra Ala e Salorno. La larghezza del fondovalle, delimitato da ripidi pendii su entrambi i lati, è pari a circa 2 km, ad eccezione della zona in prossimità dell'abitato di Mezzolombardo, ove la larghezza della valle raddoppia (Piana Rotaliana). In particolare in corrispondenza di Mezzolombardo i pendii orientali si addolciscono e verso Nord-Ovest si ha l'imbocco della Valle di Non.

Le campagne di misure previste dal progetto sono state condotte nell'area sperimentale "Maso delle Part" gestita dall'Istituto Agrario di San Michele all'Adige (FEM) e situata in località Rupe di Mezzolombardo (latitudine 46.22° N, longitudine 11.08° E) su di una superficie di circa 12 ha e ad una quota di 203 m s.l.m. L'altezza media delle creste circostanti è pari a 1200 m rispetto al fondovalle sul lato occidentale e 600 m su quello orien-

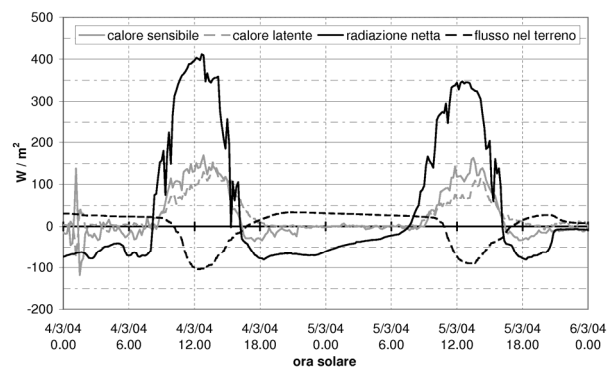
tale. L'area è interamente coltivata a meleto, con un'altezza media delle piante che durante le campagne di misura era pari a circa 2.5 m.

Le due campagne di misura si sono svolte rispettivamente dal 20 marzo al 13 maggio 2003 e dal 4 dicembre 2003 al 10 maggio 2004.

I dati raccolti nel corso della prima campagna hanno permesso in particolare di studiare ed analizzare le caratteristiche dell'evento di gelata verificatosi tra il 7 ed il 9 aprile 2003 (Eccel e Pantezzi, 2003). Durante questa prima fase di misure, alla stazione agrometeorologica situata all'interno dell'azienda e gestita da FEM, è stata affiancata ulteriore strumentazione da parte del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA) tra i filari di una delle parcelle più a Sud. Tali strumenti erano composti da un anemometro ad ultrasuoni (Gill Mod. HS Research) affiancato da un igrometro a risposta rapida (LiCor Mod. LI-7500) per la misura dei flussi turbolenti (Kaimal e Finnigan, 1994; Sozzi *et al.*, 2002), unitamente ad un sodar (Scintec Mod. MFAS-64) per la misura dei profili verticali di velocità e direzione del vento. La quota di misura dei parametri turbolenti era pari a 6.5 m dal suolo, mentre il sodar era impostato per raggiungere quote pari a 600 m dal suolo con una risoluzione di 10 m.

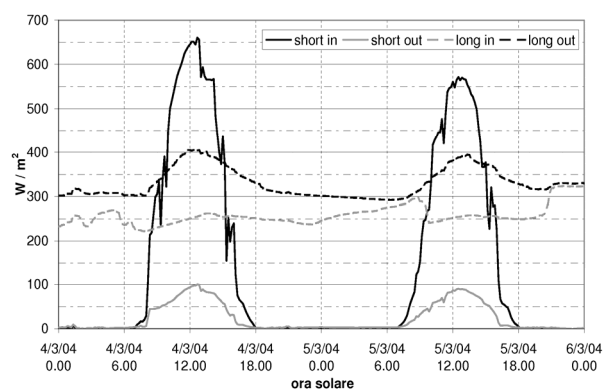
Nella seconda campagna di misure si possono invece individuare due fasi distinte: nella prima, fino al 20 febbraio 2004, si sono installati solo strumenti convenzionali per misurare i processi di raffreddamento tipici della stagione invernale; nella seconda, fino al 10 maggio 2004, sono stati aggiunti strumenti avanzati per una miglior caratterizzazione dei processi di raffreddamento primaverili oggetto principale di questo studio. In particolare, la strumentazione utilizzata durante la precedente campagna di misure è stata ulteriormente ampliata dal DICA aggiungendo, sempre nello stesso sito, i seguenti strumenti: una stazione meteorologica convenzionale per "replicare" all'interno dei filari quella gestita da FEM; un profilo di temperatura in aria mediante 8 termocoppie (di tipo T, Cu-C) disposte tra 0.3 m e 5 m dal suolo; un radiometro a 4 canali (Kipp & Zonen Mod. CNR-1) posto a 1.5 m di altezza; un sensore IR (Apogee Mod. IRST-P) per la misura della temperatura superficiale del terreno all'interno del filare; una piastra di flusso di calore nel suolo (Lastem Mod. DPE-260) posta ad 1 cm di profondità nella mezzeria del filare; un profilo di temperatura nel terreno mediante 4 sensori del tipo PT100 fino ad una profondità di 50 cm (Fig. 1).

Le condizioni meteorologiche di entrambe le campagne di misura, fatta eccezione per l'episodio registrato nell'aprile 2003 di cui si parlerà in dettaglio più avanti, non sono state particolarmente diverse da quanto evidenziato nel corso di precedenti indagini condotte sempre lungo la Valle dell'Adige (de Franceschi, 2003). In particolare, per quanto concerne gli scenari di cielo sereno, potenzialmente responsabili di eventi di gelata, durante la stagione invernale essi sono stati caratterizzati da una prevalente assenza di vento in prossimità del suolo o da correnti settentrionali che talora hanno assunto forte intensità, principalmente nel caso di eventi di Föhn. Viceversa, con l'avvicinarsi della primavera, si è assistito ad un progressivo sviluppo del tipico sistema di



**Fig. 2** - Andamento dei flussi di energia in prossimità della superficie nelle giornate del 4-5 marzo 2004.

*Fig. 2 - Surface energy fluxes for the period 4-5 March 2004.*



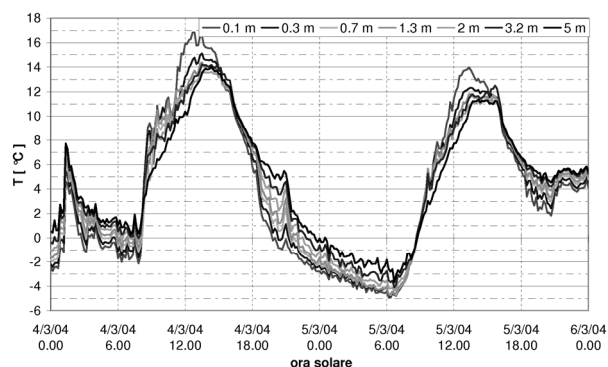
**Fig. 3** - Bilancio energetico ad onda lunga ed onda corta misurato dal radiometro netto a 4 canali nelle giornate del 4-5 marzo 2004.

*Fig. 3 - Short- and long-wave energy balance measured by means of the 4-channels net radiometer for the period 4-5 March 2004.*

circolazioni di valle, con venti che in questo caso spiravano dai quadranti meridionali durante le ore centrali della giornata e settentrionali nel corso della notte. La durata delle correnti ascendenti è inizialmente limitata a poche ore nel primo pomeriggio, a causa dello scarso apporto energetico determinato dalla combinazione tra effetti di oscuramento dovuti all'orografia e ridotta altezza del sole sull'orizzonte, benché in progressivo aumento con l'avanzare della stagione.

### Un processo di raffreddamento tipico

Prima di descrivere, nel paragrafo seguente, la particolare gelata realizzatasi nel corso della prima campagna, è opportuno richiamare il processo di raffreddamento notturno solitamente riscontrabile nel sito di misura in condizioni di sostanziale assenza di significative forzanti a scala sinottica. Per fare ciò si esaminerà una delle notti (tra il 4 e il 5 marzo) prese in esame nel corso della seconda campagna particolarmente rappresentativa, dato che, a parità di condizioni a scala sinottica, tali fenomeni si ripetono con regolarità, seppure con uno sviluppo temporale che varia all'avanzare della stagione primaverile. Il tramonto locale si è verificato intorno alle 15:30



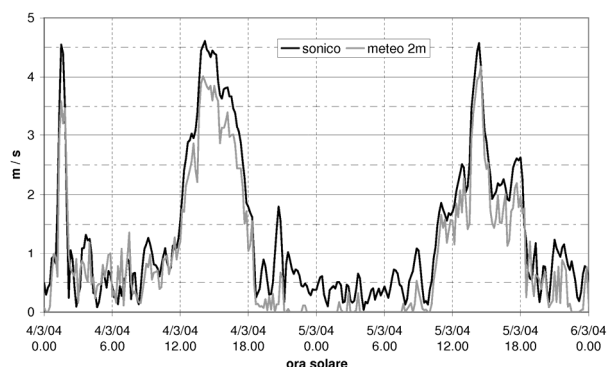
**Fig. 4** - Profilo di temperatura entro i primi 5 m dal suolo nelle giornate del 4-5 marzo 2004. Sono riportate le diverse quote di misura.

**Fig. 4** - Air temperature profile in the first 5 m above ground for the period 4-5 March 2004. Measurement heights are reported in the figure.

(ben individuato dalla radiazione netta in Fig. 2 e ancor più dalla radiazione ad onda corta incidente in Fig. 3), mentre la radiazione diffusa incidente si è mantenuta positiva fino alle 18:00 circa. La diminuzione della temperatura può quindi essere suddivisa in 4 fasi (Fig. 4).

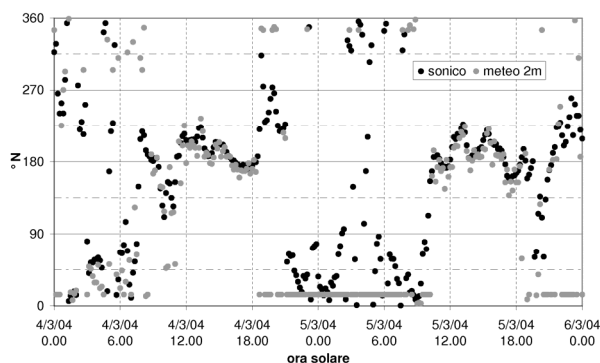
La prima fase, corrispondente al periodo compreso tra le 15:00 e le 18:40, è stata caratterizzata dal persistere della brezza di valle che soffia da Sud (Figure 5 e 6). Gli scambi turbolenti (analizzati con la tecnica nota come eddy correlation: Kaimal e Finnigan, 1994; de Franceschi e Zardi, 2003) si sono mantenuti intensi, ma i flussi di calore hanno presentato un comportamento molto diverso: il flusso di calore latente era positivo, mentre quello sensibile negativo, raggiungendo un valore pari a  $-35 \text{ W m}^{-2}$  poco dopo il tramonto. Il vento di valle ha cessato intorno alle 18:40, quando la sua intensità è scesa a valori inferiori a  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  e di conseguenza i flussi turbolenti tendevano ad annullarsi. La temperatura dell'aria ha mostrato una brusca riduzione, di circa  $2.5 \text{ °C h}^{-1}$ , che ha interessato contemporaneamente tutti i livelli di misura: in questo periodo i valori sono scesi da  $14 \text{ °C}$  a  $6 \text{ °C}$ . Il processo di raffreddamento ha mostrato qui un chiaro comportamento di tipo misto, con effetti radiativi (cf. le componenti ad onda lunga di Fig. 3) e avvevivi (cf. la velocità del vento di Fig. 5), e si è inoltre rivelato relativamente rapido, proprio a causa degli intensi scambi turbolenti indotti dall'elevata velocità del vento (cf. il massimo negativo del flusso di calore sensibile di Fig. 2).

La seconda fase si è sviluppata dalle 18:40 alle 20:50 ed è stata caratterizzata da deboli correnti provenienti da  $250^\circ \text{ N}$ , ovvero dai monti ad Ovest del sito di misura. La diminuzione di temperatura si è realizzata più lentamente rispetto alla fase precedente e la stratificazione termica è divenuta progressivamente più intensa, con valori alle quote inferiori che si riducevano più rapidamente di quelli alle quote superiori: la temperatura misurata a 0.3 m dal suolo è stata di circa  $5 \text{ °C}$  inferiore rispetto a quella misurata a 5 m. In questa fase i dati sodar (di cui si riporta in Fig. 7 una panoramica dei due giorni



**Fig. 5** - Velocità del vento misurata mediante anemometro ad ultrasuoni (curva nera - sonico) a 6.5 m dal suolo e anemometro convenzionale (curva grigia - meteo 2m) a 2 m dal suolo entro i filari. Si noti come quest'ultimo risulta fermo durante la notte mentre l'anemometro ad ultrasuoni sia ancora in grado di misurare venti deboli al di sopra della chioma delle piante.

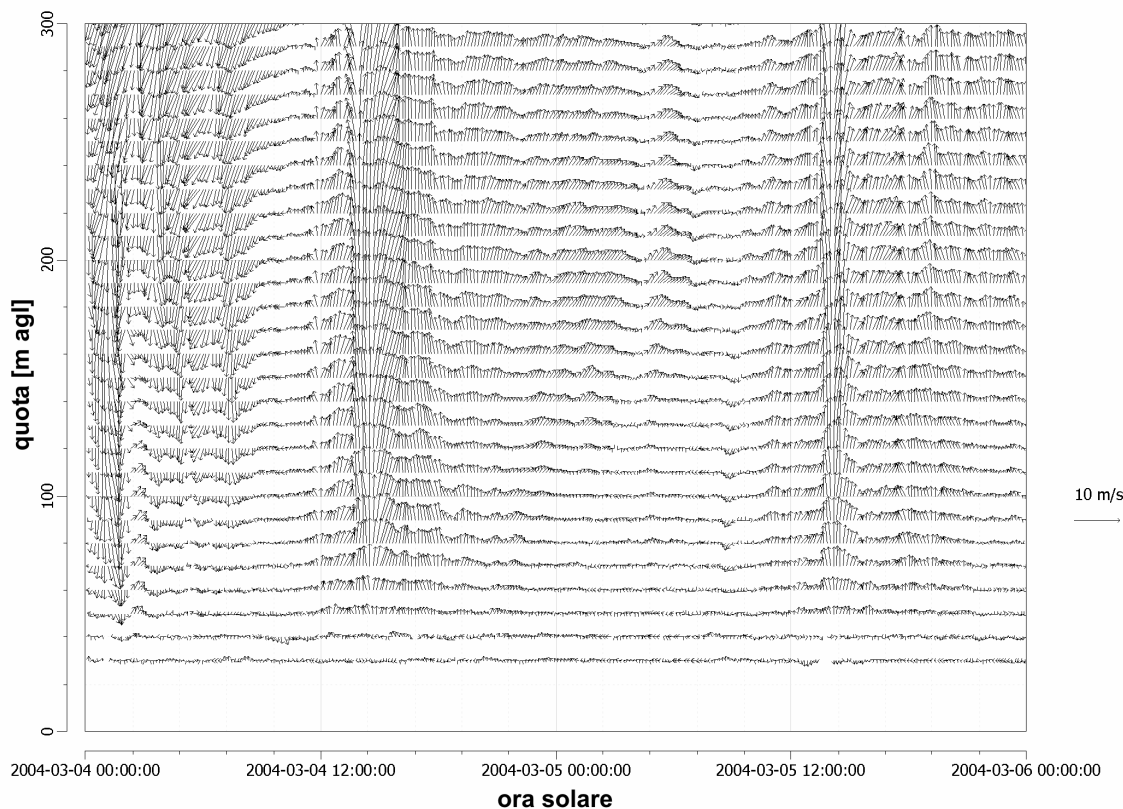
**Fig. 5** - Wind speed measured by means of an ultrasonic anemometer (black line labelled as sonico) at 6.5 m above ground and a conventional anemometer (grey line labelled as meteo 2m) at 2 m above ground inside the rows. The latter clearly stops during the night, while the ultrasonic anemometer is still able to measure weak winds above the trees.



**Fig. 6** - Direzione del vento misurata mediante anemometro ad ultrasuoni a 6.5 m dal suolo (cerchi neri) e banderuola convenzionale a 2 m dal suolo entro i filari (cerchi grigi). Si noti come quest'ultima resti costantemente nella stessa posizione durante la notte per effetto delle debolissime intensità all'interno dei filari.

**Fig. 6** - Wind direction measured by means of an ultrasonic anemometer at 6.5 m above ground (black circles) and a conventional wind vane at 2 m above ground inside the rows (grey circles). The latter clearly indicates the very same direction during the night due to the very weak wind intensity inside the rows.

qui considerati) hanno mostrato chiaramente la presenza di una corrente di densità che, discendendo dai pendii occidentali, raggiungeva la verticale del sito di misura. Si possono inoltre notare due raffiche consecutive che hanno raggiunto rispettivamente valori pari a  $1 \text{ m s}^{-1}$  alle 19:20 e  $2 \text{ m s}^{-1}$  alle 20:40. Anche in questo caso i dati del sodar mostrano che questo flusso si è sviluppato su tutta la verticale, con un massimo d'intensità a circa 300 m dal suolo. Complessivamente in tale fase gli scambi



**Fig. 7** - Rappresentazione vettoriale del profilo verticale del vento misurato dal sodar nelle giornate del 4-5 marzo 2004.  
**Fig. 7** - Vector plot of the vertical wind profile measured by the sodar for the period 4-5 March 2004.

turbolenti si sono mantenuti molto deboli, con un flusso di calore latente sostanzialmente nullo e di calore sensibile pari a circa  $-15 \text{ W m}^{-2}$ , ma in corrispondenza ad ogni raffica si osserva un'oscillazione dei valori di temperatura a tutte le quote di misura.

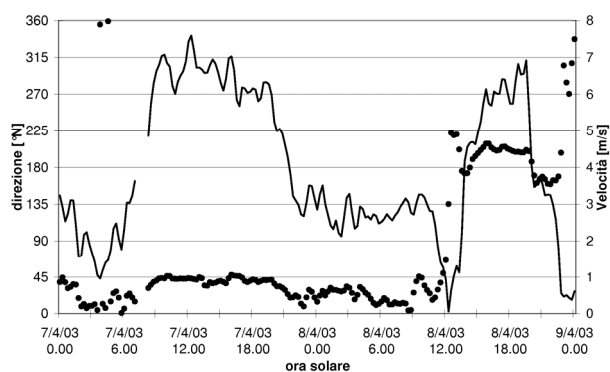
La terza fase ha avuto una durata di soli 30 minuti (a partire dalle 21:00) ed è caratterizzata da una diminuzione molto rapida della temperatura a tutte le quote. A 5 m dal suolo la diminuzione di temperatura è di circa  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  e a 0.3 m di circa  $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ : la stratificazione è sempre presente, ma la sua intensità è ridotta a  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  tra le due quote estreme. Il vento è sempre debole e il suo profilo verticale resta quello di un tipico flusso di pendio discendente, con un massimo a circa 80 m dal suolo. Nel corso di questa fase la temperatura diminuisce principalmente per avvezione di aria fredda trasportata da questo debole vento catabatico da Nord.

Alle 21.30 inizia la quarta fase (l'ultima e la più lunga) che termina alle 6:50 della mattina successiva. Durante questo periodo le temperature diminuiscono di circa  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  in 10 ore a tutte le quote e l'intensità della stratificazione termica rimane approssimativamente costante ( $3 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Il vento è molto debole, inferiore a  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ , e di conseguenza i flussi turbolenti sono trascurabili: il raffreddamento è esclusivamente di tipo radiativo e la radiazione netta ad onda lunga bilancia il flusso di calore nel terreno.

### Un evento atipico

Nel corso delle due campagne di misura non si sono avuti significativi eventi di gelata tardiva indotta dai cicli di raffreddamento appena presentati, ma è stato possibile assistere ad un evento particolarmente interessante che ha portato, nella notte a cavallo tra il 7 e l'8 aprile 2003, ad una brusca diminuzione della temperatura al di sotto dello zero. Nelle giornate precedenti tale evento si è avuta una perturbazione cui ha fatto seguito il 6 aprile un afflusso di aria polare da nord che ha indotto un sensibile calo delle temperature sull'intera regione. In particolare, la notte del 7 aprile il vento si è stabilizzato sui  $3 \text{ m s}^{-1}$ , con temperature in diminuzione e flussi di calore che non presentavano comportamenti particolari. In questo caso si è avuta diretta conferma, dal personale dell'azienda, che l'impianto antibirina è stato azionato alle 1:15. Si può quindi osservare un comportamento del tutto analogo a quello della nottata precedente: vento ancora forte intorno ai  $3 \text{ m s}^{-1}$ , flusso di calore latente attorno ai  $120 \text{ W m}^{-2}$  e temperature in forte calo, fino a  $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Questo evento di gelata è stato il risultato della combinazione di più fattori, ed in particolare può essere imputato a due fenomeni distinti: il primo legato al passaggio di un fronte freddo che, provocando una brusca diminuzione della temperatura, l'ha portata vicino ai livelli di rischio; il secondo dovuto all'irraggiamento notturno e alle condizioni che lo hanno favorito. Il fatto che il ven-



**Fig. 8** - Velocità (linea continua – scala di destra) e direzione del vento (punti – scala di sinistra) misurate mediante l'anemometro ad ultrasuoni il 7-8 aprile 2003.

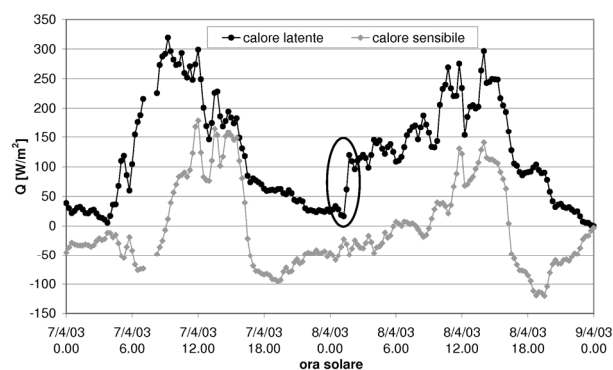
**Fig. 8** - Wind speed (continuous line – right scale) and direction (circles – left scale) measured by the ultrasonic anemometer during the period 7-8 april 2003.

to durante la notte si sia mantenuto su valori intorno ai  $2.5 \text{ m s}^{-1}$  (Fig. 8) ha consentito accanto alla stratificazione termica della bassa atmosfera il persistere di scambi turbolenti di calore sensibile e latente di una certa entità (Fig. 9).

Si noti in particolare come i flussi di calore latente (Fig. 9) e conseguentemente il contenuto di vapore d'acqua in atmosfera (Fig. 10) tra le 0:00 e le 1:00 hanno risentito chiaramente dell'accensione degli irrigatori antibrina, i quali ne hanno determinato un brusco aumento a partire dalle ore 2:00 (Fig. 10). Il valore particolarmente basso di vapore acqueo, prima che iniziasse l'intervento di difesa, è stato comunque una condizione fondamentale per l'ulteriore diminuzione di temperatura, poiché percentuali elevate di umidità avrebbero molto probabilmente attenuato gli effetti della gelata per irraggiamento, compensando la perdita radiativa con il calore latente liberato in seguito a condensazione o congelamento. Una o due ore dopo l'alba, in corrispondenza dell'aumento della curva di radiazione, le temperature sono tornate a salire, raggiungendo nel corso della giornata, serena e soleggiata, valori compresi tra i  $10\text{-}12 \text{ }^\circ\text{C}$ , superiori di  $3\text{-}4 \text{ }^\circ\text{C}$  a quelli del giorno precedente, in virtù anche di un'attenuazione del flusso settentrionale: intorno alle 12:00 si è infatti assistito ad una repentina variazione della direzione del vento ben individuata anche dal minimo di velocità registrato dall'anemometro ad ultrasuoni (Fig. 8). Il vento, più intenso nel pomeriggio, si è poi attenuato nel corso della serata, favorendo la stratificazione dell'atmosfera e il verificarsi di una nuova gelata la notte seguente.

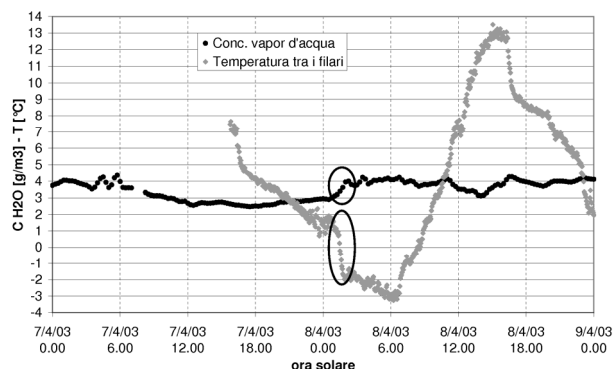
## Conclusioni

Dall'analisi dei dati raccolti nel corso delle campagne di misura qui descritte, appare chiaro come i fenomeni di raffreddamento notturno nell'area d'indagine siano caratterizzati principalmente dall'alternarsi di processi avveviti e radiativi. Nonostante questa complessa alternanza di fenomeni, resta possibile utilizzare metodi previsionali non eccessivamente complessi in termini di formulazione ed implementazione, purché si abbia



**Fig. 9** - Flusso di calore latente (simboli e curva nera) e sensibile (simboli e curva grigia) nelle giornate 7-8 aprile 2003. È evidenziato il momento in cui l'attivazione degli irrigatori soprachioma ha indotto un aumento considerevole del flusso di calore latente.

**Fig. 9** - Latent (black symbols and line) and sensible (grey symbols and line) heat fluxes during 7-8 april 2003. Highlighted the time at which the sprinklers have been activated, thus inducing a relevant increment of the latent heat flux.



**Fig. 10** - Concentrazione di vapor d'acqua in atmosfera misurata mediante igrometro IR accoppiato all'anemometro ad ultrasuoni (cerchi neri – dati DICA) e temperature medie all'interno dei filari (simboli grigi – dati forniti da FEM). Sono evidenziati l'aumento di concentrazione e la repentina diminuzione di temperatura verificatesi in concomitanza con l'attivazione degli irrigatori soprachioma.

**Fig. 10** - Water vapour concentration measured in the atmosphere by means of the IR hygrometer coupled with the ultrasonic anemometer (black circles – data by DICA) and average temperatures inside the rows (grey symbols – data provided by FEM). Highlighted are the increase in concentration and the fast drop in temperature in concomitance with the activation of the sprinklers.

l'accortezza di legare in modo opportuno i parametri di taratura di tali modelli a variabili meteorologiche adeguatamente scelte per ogni sito in esame (Dalla Nora *et al.*, 2006). È inoltre importante notare come la gelata del 7-8 aprile 2003 abbia mostrato chiaramente che ai fini di un'efficace azione di difesa sia importante valutare e prevedere adeguatamente il comportamento del vento ed in particolare l'evoluzione temporale della sua velocità. A questo proposito è bene sottolineare come attualmente, in un territorio ad orografia complessa come il Trentino, risulta piuttosto difficile prevedere con sufficiente precisione temporale le variazioni locali dell'intensità

del vento, che può inoltre presentare sensibili differenze anche tra zone adiacenti, creando condizioni che impediscono di fatto la possibilità di adottare strategie d'intervento comuni per tutti gli operatori di una stessa area agricola. In particolare valori elevati di velocità sono incompatibili con l'applicazione dell'irrigazione antibrina soprachioma, che in tali condizioni non solo risulta poco efficace, a causa dell'elevata dispersione del getto irrorato, ma può diventare anche dannosa, producendo un ulteriore raffreddamento per evaporazione degli organi vegetali. La presenza di vento provoca infatti una distribuzione dell'acqua non uniforme e discontinua sulle piante. Il rilascio del calore latente, in seguito alla solidificazione dell'acqua presente sulle chiome, viene a questo punto a mancare, mentre vengono favorite l'evaporazione dell'acqua stessa e la sublimazione del ghiaccio già formatosi su foglie e fiori con conseguente ulteriormente raffreddamento. Rilievi eseguiti in Piana Rotaliana dall'Istituto Agrario di San Michele all'Adige hanno a questo proposito messo in evidenza come per l'episodio considerato i danni maggiori si siano riscontrati proprio negli appezzamenti dotati di irrigatori antibrina e come in quelli non irrigati siano risultati poco significativi. Dove il vento è rimasto calmo per tutta la durata dell'irrigazione, l'accensione degli impianti antibrina è risultata invece efficace nella riduzione dei danni.

In questo senso il miglioramento del dettaglio delle previsioni sia in termini spaziali che temporali e della conoscenza delle grandezze meteorologiche rilevanti, costituisce la base per una più accorta pianificazione degli impianti e l'adozione di strategie di difesa più ragionate, capaci, attraverso interventi adeguati e tempestivi, di contrastare in modo efficace un fenomeno sempre più frequente e pericoloso per le colture.

### Ringraziamenti

Per la realizzazione delle campagne sperimentali si ringrazia innanzitutto il personale dell'azienda agricola sperimentale di "Maso delle Part", che ha mostrato grande disponibilità nelle fasi di installazione della strumentazione contribuendo efficacemente alla soluzione di diversi problemi logistici. Si ringraziano inoltre Marco Aniello, Marco Sitta e Chiara Bissoli che

hanno collaborato alle fasi sperimentali e all'analisi dei dati, anche grazie al supporto di borse di studio finanziate dalla Provincia Autonoma di Trento per il progetto GePri.

### Bibliografia

- Dalla Nora S., de Franceschi M., Zardi D., 2006. *Setup and Test of a Procedure for Prediction of late Frost events over complex Terrain. Atti del convegno "European Meteorological Society 6th Annual Meeting", Ljubljana, 4-8 Settembre 2006.*
- Eccel, E., Dalla Nora, S., de Franceschi, M., Ghielmi, L., Pitacco, A., Rea, R., Zardi, D., 2004. *GEPRI: un progetto di ricerca sulle gelate primaverili in trentino. Terra Trentina, 4, 16-19.*
- Eccel E., Pantezzi T., 2003. *La gelata di aprile 2003 in Trentino: i limiti degli impianti antibrina. Aiam News n.2-Aprile 2003.*
- Eccel E., Toller G., 2001. *Le gelate primaverili in val d'Adige – Singolarità micrometeorologiche studiate su un evento. AIAM meeting, 23 – 24 maggio 2001. Atti del congresso AIAM 2001.*
- de Franceschi, M., 2003. *Investigation of atmospheric boundary layer dynamics in alpine valleys. Ph.D. thesis, University of Trento.*
- de Franceschi, M., Zardi, D., 2003. *Evaluation of cut-off frequency and correction of filter-induced phase lag and attenuation in eddy covariance analysis of turbulence data. Boundary-Layer Meteorology 108, 289-303.*
- Geiger, R., Aron, R. H., Todhunter, P., 2003. *The climate near the ground (6<sup>th</sup> Edition), Rowman and Littlefield Publishers, Inc.*
- Kaimal, J., Finnigan, J., 1994. *Atmospheric boundary layer: their structure and measurement. Oxford University Press.*
- Lindkvist L., Gustavsson T., Bogren J., 2000. *A frost assessment method for mountainous areas. Agric. For. Meteorol. 102, 51-67.*
- Oke T.R., 1987. *Boundary Layer Climates. New York: Routledge, 435 pp*
- Rossi, F., Facini, O., S.Loreti, Nardino, M., Georgiadis, T., Zinoni, F., 2002. *Meteorological and micrometeorological applications to frost monitoring in Northern Italy orchards. Physics and chemistry of the earth, 27, 1077-1089.*
- Sozzi R., Georgiadis T., Valentini M., 2002. *Introduzione alla turbolenza atmosferica: concetti, stime, misure. Pitagora Editrice, Bologna.*
- Stull, R., 1988. *An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers.*
- Zinoni F., Marletto V., Van Soetendaal M., 2000a. *Caratterizzazione del territorio in relazione al rischio di gelate tardive. Atti del Workshop "Geostatistica per lo studio e la gestione della variabilità climatica". Milano, 16/02/2000.*
- Zinoni F., Rossi F., Pitacco A., Brunetti A., 2000b. *Metodi di previsione e difesa dalle gelate tardive. Calderini Edagricole, Bologna.*
- Zinoni F., Antolini G., Campisi T., Marletto V., Rossi F., 2002. *Characterisation of Emilia-Romagna region in relation with late frost risk. Physics and chemistry of the earth, 27, 1091-1101.*