

Capitolo 4

La temperatura dell'aria

La temperatura dell'aria è una misura del livello energetico che caratterizza l'atmosfera. In particolare la temperatura in vicinanza della superficie dipende da tre ordini di processi e cioè il bilancio energetico di superficie (trattato nel capitolo 5), gli scambi verticali (ivi compresi i moti convettivi e gli effetti di compressione dovuti a getti o anticicloni dinamici) e gli scambi orizzontali (avvezioni calde o fredde).

Nel caso dell'area italiana trascurare gli effetti avvevativi significa trascurare la consistente variabilità esistente nell'attività invernale del gelido anticiclone russo e nelle miti correnti atlantiche. Se si trascurano gli effetti di compressione si ignorano fenomeni legati agli anticicloni dinamici o delle stesse correnti a getto, che con la loro azione sono in grado di causare ondate di caldo di breve durata ma intensità assai rilevante. Mentre gli effetti avvevativi e convettivi saranno trattati in una apposita sezione, qui di seguito si descriverà in modo sommario il bilancio energetico di superficie.

4.1 Bilancio energetico di superficie e temperatura dell'aria

Il primo principio della termodinamica (principi di conservazione dell'energia) stabilisce che l'energia non si crea o si distrugge ma si trasforma, convertendosi da una forma all'altra. Un importante limite alla conversione dell'energia da una forma all'altra è imposto dal secondo principio della termodinamica il quale afferma che in natura esistono alcuni processi irreversibili (Plank, 2002).

Una realizzazione del primo principio della termodinamica è data dal bilancio energetico di superficie, il quale descrive i flussi di energia che si instaurano rispetto ad una qualsivoglia superficie (la superficie del terreno, la superficie di una foglia o di un frutto, la pelle di un animale, ecc.). Tali flussi sono descritti dalla seguente equazione di bilancio:

$$R_n + G + H + LE = \Delta Q_s + \Delta Q_p$$

dove R_n : flusso di radiazione netta;
 B : flusso di calore nel suolo;
 LE : flusso di calore latente il quale comprende tutti i flussi di energia che comportano cambiamenti di stato dell'acqua (evapotraspirazione, sublimazione, condensazione, ecc.).

H^1 : flusso di calore sensibile e cioè il flusso di energia che avviene attraverso i fenomeni di convezione e conduzione, senza comportare cambiamenti di stato dell'acqua.

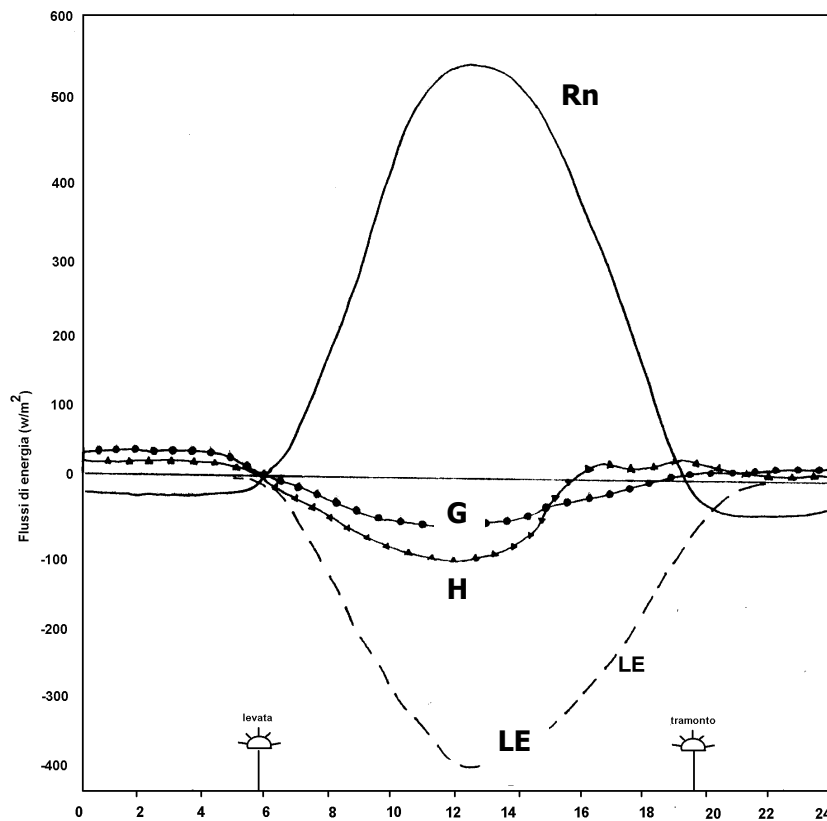
ΔQ_p : immagazzinamento netto di energia chimica per fotosintesi.

ΔQ_s : immagazzinamento netto di energia in altre forme.

Le unità di misura utilizzate in tale equazione in caso di densità di flusso istantanea saranno $W m^{-2}$.

In tale equazione vengono in questa sede indicati come positivi i flussi netti diretti verso la superficie del terreno, negativi quelli che se ne allontanano². Inoltre il termine ΔQ_p può essere considerato trascurabile in quanto al massimo l'1% dell'energia intercettata dalla coltura viene

Figura 4.1 – Bilancio energetico in una giornata soleggiata di luglio. Dati del 26 luglio 1976 rilevati a Pitt Meadows, B.C. (49°N) su peschto inerbato (misure di Black e Goldstein, 1977, riportate in Oke, 1978).



utilizzata per la fotosintesi mentre ΔQ_s può essere considerato trascurabile se il bilancio relativo ad un dato volume di suolo è riferito alle 24 ore, nel qual caso gli ingressi e le uscite grossomodo

¹ I termini calore sensibile e calore latente sono molto antichi e vengono da un'epoca remota in cui si pensava che il calore fosse una sostanza. Il calore sensibile è tale in quanto può essere "sentito" e cioè percepito da noi e dai nostri strumenti; il calore latente è invece una forma "occulta" di calore, immagazzinata dall'acqua durante i processi di fusione ed evaporazione e liberata nei processi inversi (condensazione e solidificazione).

² Tale convenzione è quella in uso nei più tradizionali testi di micrometeorologia (es: Geiger, 1961, Oke, 1978). Negli anni più recenti (Stull, 1999) si è invece affermata la convenzione è opposta, nel senso che si considerano negativi i flussi diretti verso la superficie e positivi quelli che se ne allontanano.

si compensano oppure se si riferisce il bilancio ad una superficie bidimensionale (priva cioè di possibilità di accumulo) anziché ad un volume. In questi casi l'equazione di bilancio energetico (5) viene ad essere ridotta a:

$$R_n + G + H + LE = 0$$

Tale equazione in sostanza indica che nelle ore diurne l'input energetico costituito dalla radiazione netta R_n positiva è utilizzato per:

- riscaldare l'aria a contatto con la superficie (innescando un flusso di calore sensibile H negativo);
- evaporare, o traspirare se ci sono dei vegetali, acqua dalla superficie (innescando un flusso di calore latente LE negativo);
- riscaldare l'interno del suolo (innescando un flusso di calore nel suolo G).

Al contrario di notte la perdita di energia dovuta al termine R_n negativo provoca:

- il raffreddamento dell'aria a contatto con la superficie (innescando un flusso di calore sensibile H positivo);
- il raffreddamento del volume sottostante la superficie (innescando un flusso di calore nel suolo G).
- l'eventuale condensazione del vapore acqueo vicino alla superficie con formazione di rugiada o brina (flusso di calore latente LE positivo);

In figura 4.1 è riportato l'andamento giornaliero dei quattro termini del bilancio energetico di una superficie a frutteto. Si osservi che di giorno fra i flussi negativi domina il flusso di calore latente LE mentre quello di calore sensibile è assai più contenuto. Il fenomeno opposto si osserva su superfici rocciose o aree urbanizzate o ancora in presenza di vegetazione in condizioni di carenza idrica. In questi casi l'assenza di acqua evapotraspirabile produce il netto predominio del termine di calore sensibile H .

L'importanza del termine LE anche in termini di mitigazione dell'eccesso termico dovuto al predominio del calore sensibile H è stato anni fa (1966) mostrata da Priestley il quale osservava che la temperatura di una superficie di terreno ben rifornita d'acqua non può superare i 33-34°C mentre quella delle grandi superfici idriche oceaniche, che coprono il 70% circa della superficie terrestre, non può eccedere i 30°C.

La tabella 4.1 presenta i risultati di una determinazione sperimentale dei termini dell'equazione di bilancio energetico effettuata nel 1903 a Potsdam (D) su una superficie a prato. Durante il giorno si noti che gli scambi di calore sono interamente guidati dalla radiazione solare entrante e che la grande differenza che presenta il termine evapotraspirativo (LE) tra estate ed inverno. Durante la notte il calore è perso per la maggior parte come radiazione uscente mentre perdite più limitate sono legate al termine LE che in questo caso sarà legato ai fenomeni di evaporazione dalla superficie, essendo la traspirazione pressoché nulla stante la chiusura degli stomi. Sul valore notturno del termine LE agiscono anche i processi di condensazione (rugiada) e congelamento (brina). Tuttavia la liberazione di calore legata a tali fenomeni è di entità insignificante.

Tabella 4.1 – valori medi mensili in W/m^2 dei termini del bilancio energetico di superficie misurati su un prato a Potsdam da Albrecht nel 1903 (da Geiger).

Periodo	ora	S	B	H	LE
Giorno di giugno	12/13	283.8	-115.1	-65.5	-103.2
giorno di gennaio	12/13	63.5	-57.2	-2.1	-4.2
notte di giugno	00-01	-55.8	48.8	14.6	-7.7
notte di gennaio	00-01	-45.3	14.6	41.9	-11.2

La temperatura dell'aria risulta legata al termine di calore latente H. Infatti il flusso di calore sensibile è proporzionale alla differenza fra la temperatura di superficie T_s e la temperatura dell'aria T_a a una certa distanza dalla superficie stessa. Tale proporzionalità è espressa dalla seguente relazione:

$$H = -K_H * (T_s - T_a)$$

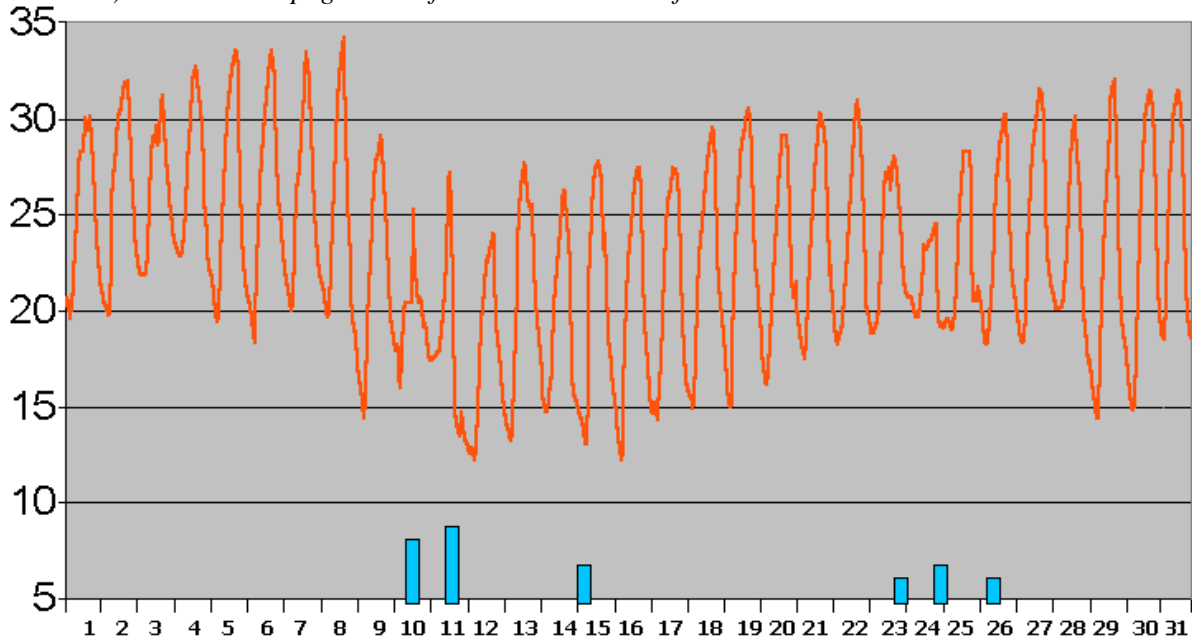
dove K_H è un coefficiente di proporzionalità detto coefficiente di scambio turbolento del calore sensibile.

Tale relazione indica che in presenza di una superficie più calda dell'aria che la sovrasta ($T_s > T_a$), fatto che si verifica nelle ore centrali del giorno in presenza di intenso soleggiamento, il termine H risulta fortemente negativo e dunque la superficie cede energia all'aria. Al contrario nelle ore notturne, con superficie del suolo più fredda dell'aria che la sovrasta, H è positivo e dunque l'aria cede energia alla superficie.

4.2 Temperatura dell'aria in superficie

La temperatura dell'aria presenta caratteristiche ciclicità giornaliera (figura 4.2) ed annuali (figura 4.3). Il ciclo giornaliero in condizioni di cielo sereno è caratterizzato da un minimo termico

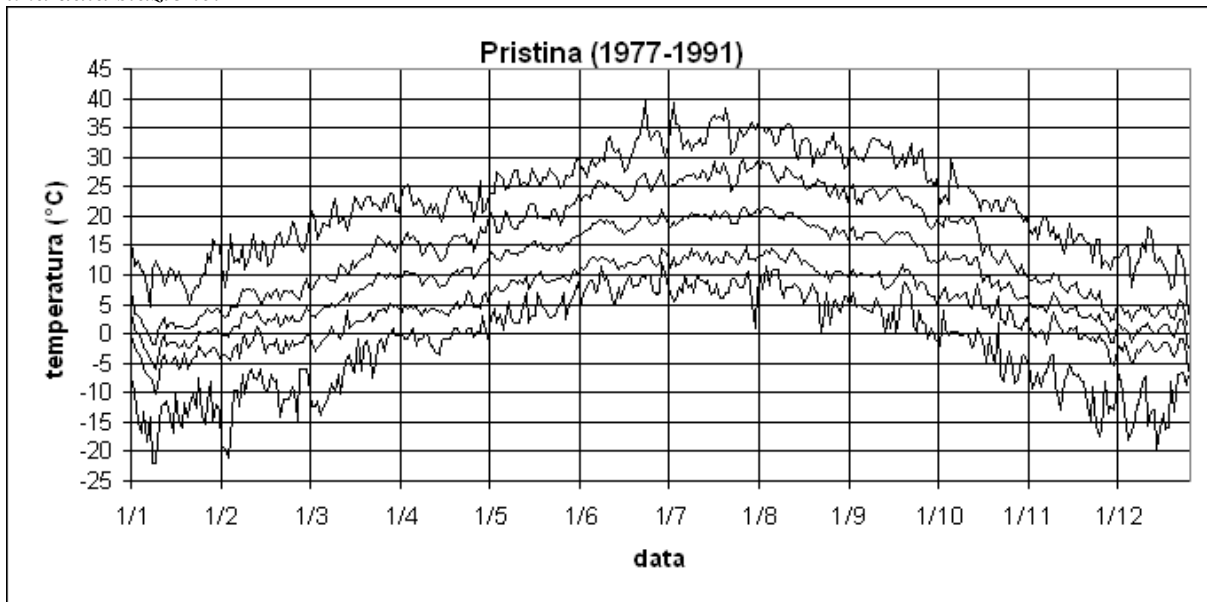
Figura 4.2 – diagramma delle temperature medie orarie registrate nel luglio 2000 dalla stazione di Castello d'Agogna in Lomellina (fonte: Ersal - Sar). Si noti la diminuzione dell'escursione termica giornaliera in corrispondenza con i periodi piovosi (segnalati dalle barrette poste alla base del diagramma) e si noti inoltre la diminuzione delle temperature minime registrata il 12 luglio ed i giorni successivi in coincidenza con una robusta irruzione di aria artica. Tale brusca diminuzione delle temperature (che in alcune stazioni lombarde di pianura sono addirittura scese lievemente al di sotto dei 10°C) è stata accompagnata da fenomeni di sterilità fiorale su riso.



co intorno all'alba e da un massimo che viene in genere raggiunto 3-4 ore prima del tramonto (Allen et al., 1998).

Vicino al terreno la temperatura e l'umidità presentano gradienti molto elevati. Ad esempio fra la superficie del terreno e 1.70 m di altezza possono essere registrati gradienti di oltre 10°C in giornate soleggiate. È per tale ragione che l'OMM prescrive di localizzare i sensori per la misura

Figura 4.3 – Andamento della temperatura dell'aria a Pristina (Kosovo) nei diversi giorni dell'anno e per il quindicennio 1977 – 1991. Le linee dall'alto verso il basso rappresentano rispettivamente massima assoluta, media delle massime, media delle medie, media delle minime e minima assoluta. Questo tipo di grafico si rivela assai efficace per cogliere in modo sintetico i caratteri climatici di una data stazione.



della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria in superficie ad altezza di m 1.50 - 1.80 da terra.

La figura 4.3 illustra in modo assai efficace anche la variabilità delle temperatura dell'aria in superficie riscontrabile in una stazione delle medie latitudini (Pristina si trova in Kosovo, nei Balcani, a circa 42° di latitudine Nord, all'incirca la tessa latitudine di Roma). Si noti che in ogni giorno dell'anno le temperature si distribuiscono su di un intervallo assai ampio; ciò fa sì che gli esseri viventi (vegetali e animali) che vivono all'aperto debbano essere dotati notevoli capacità di adattamento. Ad esempio nel mese di gennaio la temperatura dell'aria appare compresa fra un massimo assoluto di oltre 15°C ed un minimo assoluto di circa -22°C; questo valore molto rigido e proibitivo per svariate colture è frutto di un'irruzione di aria polare continentale dalla Siberia, cui il Kosovo è particolarmente esposto configurandosi come un bacino circondato da montagne ed aperto verso Est. Analogamente fra giugno e luglio si osservano massimi assoluti di circa 40°C, frutto di avvezioni meridionali causate da promontori aniclonici subtropicali.

A considerazioni analoghe si prestano i dati riportati in tabella 4.2 che mostrano i massimi ed i minimi assoluti registrati in alcune località italiane nel periodo 1925-1950.

La temperatura è una grandezza meteorologica relativamente facile da rilevare e che risulta ben correlata con altre grandezze (in primis la radiazione solare e l'umidità relativa) la cui misura è più complessa e costosa. Per tale ragione sono stati sviluppati nel tempo algoritmi in grado di stimare la radiazione solare globale e l'umidità relativa a partire dai valori di temperatura giornaliera (par. 3.2.3).

Tabella 4.2 - minime e massime assolute registrate in alcune località italiane nel periodo 1925-1950 (fonte: Servizio Meteorologico dell'Aeronautica)

Aosta	-16.6	37.2
Torino	-14.0	37.5
Milano	-14.2	38.2
Bologna	-14.0	39.5
Trento	-12.4	38.4
Venezia	-12.4	36.0
Udine	-13.9	33.5
Trieste	-14.3	37.0
Genova	-8.0	37.0
Firenze	-10.0	40.5
Perugia	-12.6	38.6
Ancona	-7.1	35.8
L'Aquila	-22.3	39.0
Campobasso	-11.8	40.0
Napoli	-3.9	38.8
Potenza	-10.9	39.0
Bari	-5.0	44.0
Palermo	-3.4	42.0
Cagliari	-3.1	40.3

4.3 Ricostruzione di dati a partire dalle temperature massime e minime giornaliere

La ricostruzione dell'andamento orario della temperatura a partire dai dati giornalieri di temperatura massima (T_x) e minima (T_n) può essere di notevole utilità, ad esempio per l'applicazione di modelli che richiedono in ingresso dati orari. Tale ricostruzione si fonda in genere sull'interpolazione dei dati di T_x e T_n per mezzo di curve di sinusoidi o cosinusoidi.

Nella figura 4.4 si riportano i risultati ottenuti applicando il metodo di de Wit in un caso estivo ed in un caso invernale.

Sempre dai valori T_x e T_n è altresì possibile stimare la radiazione solare globale giornaliera. Tale ricostruzione si fonda sul fatto che in presenza di tempo soleggiato l'escursione è più elevata che non in presenza di cielo coperto. Pertanto al crescere dell'escursione cresce la radiazione solare globale giornaliera espressa in MJ m^{-2} .

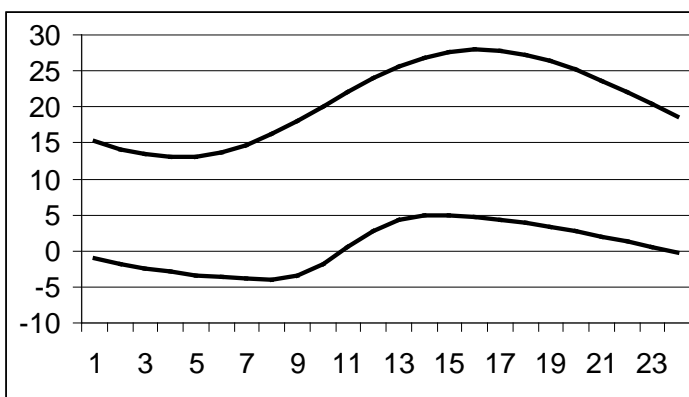


Figura 4.4 - Risultati della simulazione dell'andamento giornaliero delle temperature dell'aria svolta con l'algoritmo di de Wit. Il caso estivo (curva alta) è stato simulato assumendo i seguenti dati di partenza (per il significato delle sigle vedere nel testo): $h_{lev}=4.5$; $h_{tram}=21$; $h_{max}=16.0$; $t_{maxp}=29$; $t_{mins}=12$; $t_{min}=13$; $t_{max}=28$. Invece il caso invernale è stato simulato adottando i seguenti dati in ingresso: $h_{lev}=8$; $h_{tram}=17$; $h_{max}=14$; $t_{maxp}=5$; $t_{mins}=-4$; $t_{min}=-4$; $t_{max}=5$.

Ad esempio il modello di Hargreaves descritto nel quaderno FAO n. 56 si fonda sul calcolo della radiazione potenziale al di fuori dell'atmosfera, stimata con il seguente algoritmo:

calcolo	equazione
fattore di distanza dal sole dd	$dd=1+0.0334*\cos(0.01721*doy-0.0552)$
declinazione solare dec	$dec=\arcsin(0.39785*\sin(4.869+0.0172*doy+0.03345*\sin(6.224+0.0172*doy)))$
lunghezza del giorno hs	$hs=2*\arccos(-\tan(dec)*\tan(lat))$
radiazione potenziale giornaliera potrad	$potrad=117.5*dd*(0.5*hs*\sin(lat)*\sin(dec)+\cos(lat)*\cos(dec)*\sin(0.5*hs))/\pi$

ove doym è il giorno dell'anno (1-366) e lat è la latitudine.

Dalla radiazione potenziale passa alla radiazione solare globale giornaliera Rglob [MJ m⁻²] applicando il coefficiente moltiplicativo tt che esprime la trasmissività atmosferica:

$$tt=k_{rs}*\sqrt{(T_x-T_n)^{0.5}}$$

ove k_{rs} è un coefficiente che esprime il livello di continentalità e che vale 0.19 per aree costiere e 0.16 per aree continentali interne. In proposito si consiglia di riservare 0.16 a situazioni veramente continentali, mentre ad esempio per zone ad influsso marittimo ancora pronunciato come la Valpadana conveniente utilizzare 0.19.

$$R_{glob}=potrad * tt$$

4.4 Effetti fisiologici della temperatura

Tutti i processi fisiologici propri degli esseri viventi sono caratterizzati da una temperatura minima ed una massima per il loro svolgimento (**temperature cardinali**) nonché una **temperatura ottimale**, o meglio un intervallo di temperature ottimali³.

Tabella 4.3 – temperature cardinali e ottimali riferite ad alcune specie (da Larcher, 1983 - modificato).

Specie		Minima	ottimale	massima
Clamydomonas nivalis	Alga che si sviluppa nella neve	-3	1	4
Herpotrichia juniperi	Fungo parassita che si sviluppa sui rami di conifera coperti di neve	-4	14	23
Hustilago zea	Fungo parassita del mais	10	20 / 27	35
Zea mais	Pianta coltivata	8	22 / 27	36
Salmonella paratyphi	Batterio patogeno di animali a sangue caldo	12	35 / 38	50
Mastigocladus e Synechococcus	Microrganismi termofili dei geysers	45	68 / 73	82

³ Si rammenta che i valori delle temperature cardinali e delle temperature critiche riportati in questo capitolo sono da considerare puramente indicativi in quanto sussiste una forte variabilità legata ad esempio alla varietà oppure alla fase fenologica o alle condizioni in cui si viene a trovare il vegetale in esame.

Da ciò deriva che in termini più generali è possibile individuare temperature cardinali e ottimali per lo sviluppo dei diversi esseri viventi (tabella 4.3).

Particolarmente importante in termini agronomici è la conoscenza dei cardinali minimi al di sotto delle quali risulta inibita la germinazione (tabella 4.4) e lo sviluppo (tabelle 4.5 e 4.6). A tale proposito occorre rammentare che le specie vegetali possono essere distinte in **microterme**, specie con cardinali minimi molto bassi, (es: frumento tenero: 5°C, pisello: 4°C), **mesoterme**, con cardinali minimi intermedi (es: patata: 5 / 7°C; mais e vite: 7 / 10 °C) e **macroterme**, specie con cardinali minimi elevati, dell'ordine dei 15-18°C (es. melone, sorgo, canna da zucchero).

Tabella 4.4 – Soglie termiche per la germinazione di alcune specie coltivate (da F. Crescini)

Avena	1-2	orzo	1-2
Barbabietola	4-5	patata (germogliamento)	8-10
canapa	1-3	peperone	11-12
carota	4-5	pisello	2-4
cavolo	4-5	pomodoro	6-7
cocomero	12-13	riso	11-12
cotone	12-14	segale	0-1
fagiolo	10-12	senape	0-1
fava	1-3	sorgo	9-10
frumento	0-1	sulla	5
girasole	8-9	tabacco	13-14
lino	0-1	trifoglio bianco	1-3
lupinella	3	trifoglio incarnato	1
lupino giallo	3-4	trifoglio pratense	1
Mais	8-9	veccia	1
Medica	2	zucca	14

Tabella 4.5 - Temperature cardinali per alcune specie erbacee coltivate

	minimo	ottimale	Massimo
Frumento tenero	0	20-22	32
Frumento duro	0	22-25	32
Mais	6 - 8	24-30	35
Patata	5 / 7	14 - 18	33
Vite	7	22-27	35

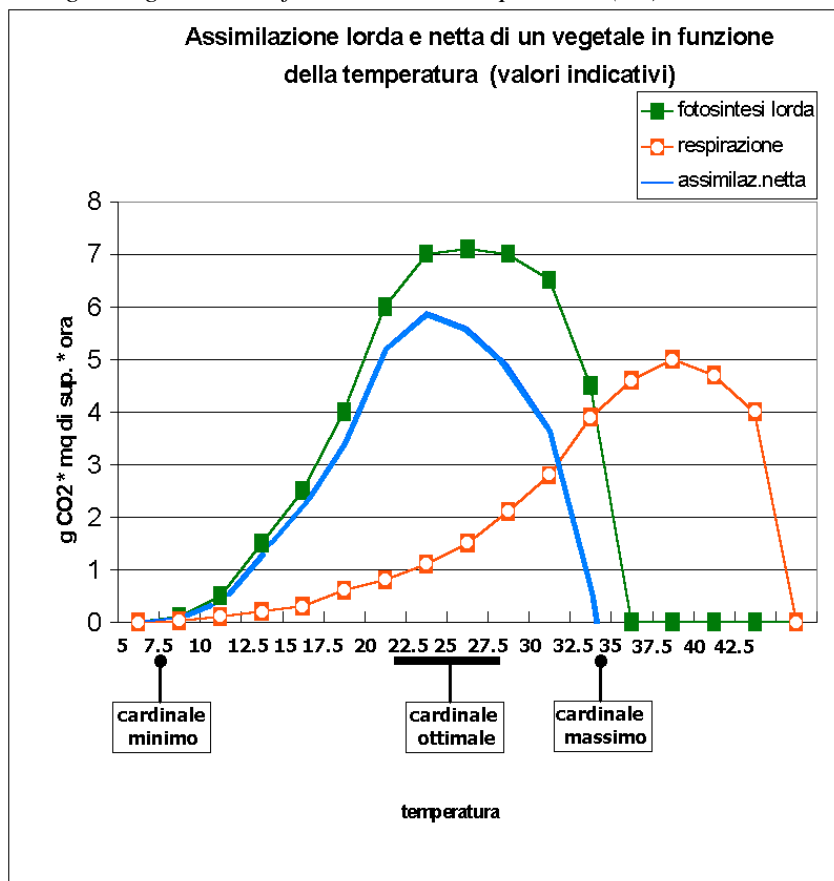
Tabella 4.6 – Soglie termiche al di sotto delle quali è inibito lo sviluppo (FAO, 1979).

Arachide	18	Girasole	12
Barbabietola	7	Pisello	5
Cavolo	10	Pomodoro	13
Cipolla	13	Soia	10
Medica	5	Sorgo	12
Fagiolo	10	tabacco	15

L'effetto delle temperature sui processi di fotosintesi e di respirazione è descritto in figura 4.5 dalla quale è possibile desumere l'andamento del processo di assimilazione netta, intesa come differenza fra l'anidride carbonica assimilata con la fotosintesi e quella consumata con la respirazione. Si osservi che oltre il limite superiore del cardinale ottimale la fotosintesi declina velocemente mentre la respirazione continua a crescere in modo più che lineare, per cui si giunge

ben presto ad un livello di temperatura in cui tutti i carboidrati prodotti con la fotosintesi vengono consumati con la respirazione, valore oltre il quale la pianta inizierà ad intaccare le riserve utilizzandole come substrato respiratorio. Aumentando ulteriormente la temperatura anche la respirazione inizierà a declinare, e ciò potrebbe ad esempio dipendere dal fatto che i processi di trasporto dei substrati (carboidrati) per il processo respiratorio non riescono a tenere il passo con la reazione biochimica.

Figura 4.5 – assimilazione lorda, respirazione e assimilazione netta in un vegetale generico in funzione della temperatura (°C).



La discesa delle temperature al di sotto del cardinale minimo e la salita al di sopra di quello massimo determina la temporanea interruzione dello sviluppo, che potrà essere ripreso al ripristinarsi di condizioni termiche idonee. Ciò non si verifica invece nel caso del superamento delle **temperature critiche** minima e massima, al di sotto e al di sopra delle quali è la sopravvivenza stessa di tessuti, organi, o dell'intero organismo vegetale ad essere compromessa.

Le temperature critiche possono essere anche espresse attraverso il concetto di *temperature lethality*, in base al quale avremo una TL50, intesa come temperatura a cui muoiono il 50% degli individui.

Le potenzialità termiche di un certo sito o territorio possono essere espresse in termini di unità di calore cumulate su un determinato periodo, utilizzando il metodo delle somme termiche, descritto nel capitolo dedicato alle tecniche agrometeorologiche.

4.5 Stima delle risorse termiche

Partendo dalle temperature è possibile stimare le risorse termiche. Un primo metodo di stima è quello fondato sulle **unità termiche**, stimate sottraendo alla temperatura media giornaliera il valore del cardinale minimo, con la formula seguente:

$$TU = (T_x + T_n) / 2 - C_{\min}$$

Il cumulo di unità termiche conseguito su un certo periodo è più indicato come somma termica.

Esempio: per una coltura con cardinale minimo di 6°C stimare le unità termiche cumulate in 5 giorni che presentano le seguenti temperature:

giorno	Tn	Tx
01 maggio	17.5	25.3
02 maggio	18.3	23.2
03 maggio	15.7	20.8
04 maggio	17.9	18.4
05 maggio	19.5	26.5

Procedimento:

giorno	Tn	Tx	Td (Tx+Tn)/2	UT (Td-6)
01 maggio	17.5	25.3	21.4	15.4
02 maggio	18.3	23.2	20.8	14.8
03 maggio	15.7	20.8	18.3	12.3
04 maggio	17.9	18.4	18.2	12.2
05 maggio	19.5	26.5	23.0	17.0
Totale (somma termica)				71.6

Tale metodo presenta lo svantaggio di sovrastimare le temperature sovraottimali, per cui se ad esempio si è di fronte a una temperatura media giornaliera di 40°C, la pianta non solo non produce ma può subire danni. In queste condizioni il metodo a unità termiche sopra presentato darà la ragguardevole cifra di 34°C.

Per superare tale inconveniente si possono utilizzare dei troncamenti, per cui, per giorni con Tx superiori al cardinale massimo C_{max} , si utilizza C_{max} in luogo di Tx:

$$TU = (Tn + C_{max}) / 2 - C_{min}$$

Un troncamento più drastico prevede invece che nei giorni con Tx superiori al cardinale massimo C_{max} , in luogo di Tx si utilizzi il cardinale massimo meno l'eccesso ($Tx - C_{max}$), per cui:

$$TU = (Tn + C_{max} - (Tx - C_{max})) / 2 - C_{min}$$

Il seguente esempio è sviluppato nell'ipotesi di $C_{min}=10$ e $C_{max}=33$:

Tn	Tx	UT normali	UT con troncamento	UT con troncamento più drastico
19.2	38.4	18.8	16.1	13.4
20.3	39.3	19.8	16.7	13.5
21.5	37.9	19.7	17.3	14.8

I metodi a ore normali di caldo (Normal Heat Hours – HNN) si fondano sull'utilizzo di funzioni di risposta che traducono un'ora trascorsa a una particolare temperatura in una frazione di ora normale che è compresa fra 0 e 1.

Un esempio di curva di risposta valida per una coltura con cardinale minimo di 10°C, cardinale massimo di 35 e cardinale ottimale compreso fra 22 e 28°C è riportata in figura 4.5. Per tale curva si osserva che un'ora trascorsa a 23°C vale 1 ora normale, un'ora trascorsa a 5°C vale 0 ore normali e un'ora trascorsa a 12°C vale 0.2 ore normali.

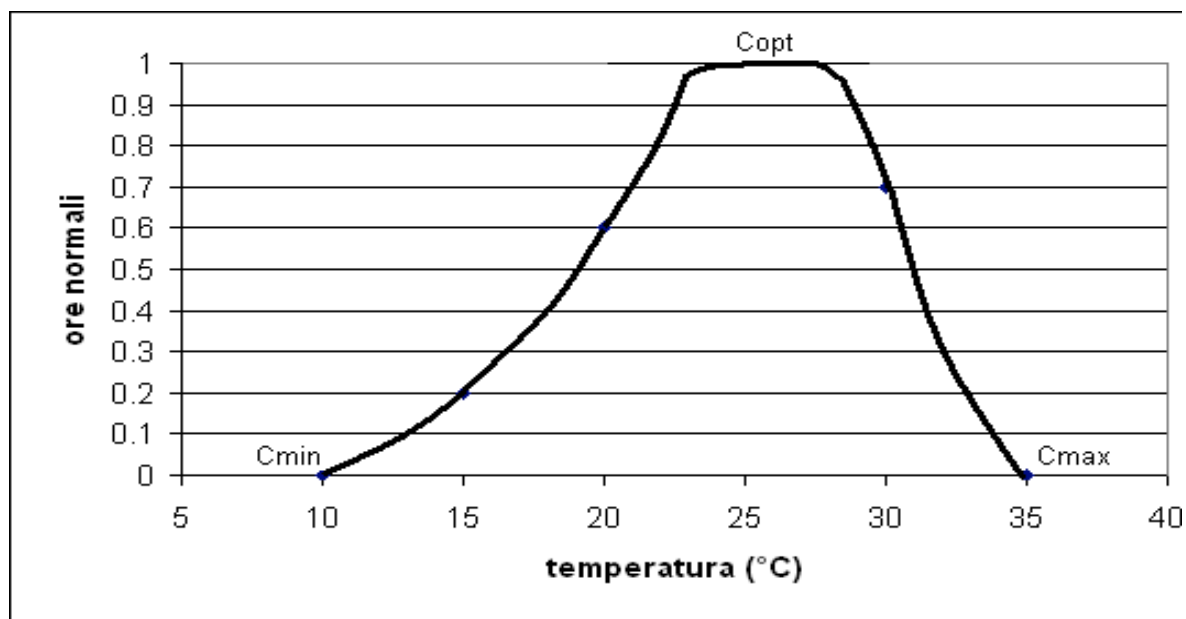


Figura 4.6 – Curva di risposta che consente di tradurre un'ora trascorsa ad una data temperatura in una frazione compresa fra 0 e 1 di ora normale di caldo NHH. Tale curva si riferisce ad una coltura (es: vite, mais) in cui il cardinale minimo è 10°C ed il cardinale massimo è 35°C ed il cardinale ottimale è compreso fra 23 e 28°C. Ad esempio n'ora trascorsa a 20°C vale 0.6 NHH.

4.6 Le alte temperature e i loro effetti

Le ondate di caldo nell'area italiana hanno alla loro base fenomeni sinottici e a mesoscala fra cui in particolare i promontori anticiclonici africani, i venti catabatici (foehn) e gli effetti di compressione della massa d'aria nei bassi strati provocati dalle correnti a getto. Le fasi calde legate al getto o ai fenomeni di foehn sono in genere di durata ridotta mentre più prolungate possono essere quelle legate a promontori africani.

Con riferimento alle temperature elevate possiamo anzitutto considerare che il protoplasma coagula a temperature superiori a 54°C.

Inoltre su piante arboree si ricordano le scottature da sole che possono derivare da potature eccessive e per le quali un possibile rimedio è dato dall'imbiancatura dei tronchi.

Per quanto riguarda invece le erbacee, possiamo citare il caso del frumento tenero (*Triticum aestivum*). In tale coltura le alte temperature in prossimità della fioritura determinano fenomeni di sterilità (temperature superiori a 30°C tre giorni prima dell'antesi provocano sterilità mentre 2-3 giorni dopo l'antesi provocano aborto fiorale) con conseguente contrazione del numero di granelli per spiga. Inoltre alte temperature associate a carenza idrica durante la fase di riempimento delle cariossidi danno luogo a fenomeni di striminzimento (stretta) che si traducono in una diminuzione del valore commerciale del prodotto.

4.7 Le basse temperature e i loro effetti

La discesa delle temperature a valori inferiori a 0°C (gelata) è un fenomeno relativamente frequente alle nostre latitudini e sulle cui cause tratteremo nel capitolo dedicato alla micrometeorologia.

Dal punto di vista fisiologico una gelata comporta un'importante serie di conseguenze: anzitutto l'acqua presente negli spazi intercellulari del tessuto fogliare condensa e nello stesso tempo ha inizio la plasmolisi con fuoriuscita dell'acqua dalle cellule; quest'acqua si accumula negli spazi intercellulari e, proseguendo l'abbassamento termico, congela. Nel caso in cui questo fenomeno avvenga gradualmente ed il ghiaccio accumulatosi negli spazi intercellulari sia scarso e comunque non in quantità tale da causare lacerazioni sulle pareti delle cellule, il fenomeno può essere reversibile e, con il ritorno di temperature più elevate, l'acqua scongelerà e sarà riassorbita dalle cellule.

Durante la fase di congelamento dell'acqua si manifestano fenomeni di degradazione a carico della clorofilla, facilmente visibili. Tuttavia anche la scomparsa della clorofilla e la comparsa di colorazioni anomale possono essere temporanee ed al risalire delle temperature i tessuti possono tornare verdi (Baldacci, 1977).

Rispetto alla resistenza al freddo le piante sono suddivisibili in tre grandi categorie:

- piante sensibili al freddo (es. varie specie tropicali): subiscono danni per temperature inferiori a 0°C.
- piante sensibili al gelo (es. varie specie di zone temperate calde): subiscono danni per temperature di pochi gradi inferiori a 0°C.
- piante tolleranti al gelo (es. varie specie di zone a inverno freddo): subiscono danni a seguito di esposizioni prolungate al gelo.

In particolare le piante tolleranti al gelo mettono in atto meccanismi di resistenza che si manifestano in particolare attraverso il fenomeno dell'**indurimento dei tessuti** (hardening), consistente nella riduzione dell'acqua e nell'aumento della concentrazione dei succhi cellulari, con conseguente sensibile riduzione della temperatura soglia per il congelamento. Ovviamente i meccanismi di resistenza si instaurano quando le piante sono in una fase di sviluppo idonea (si veda il caso del frumento tenero - tabella 4.7) ed allorché l'esposizione al freddo avviene con gradualità (si veda il caso dell'olivo - figura 4.7). Pertanto più dannose risulteranno, anche per specie tolleranti al gelo, tanto le gelate precoci che le gelate tardive (queste ultime perché i tessuti ormai reidratati non sono più in grado di resistere al gelo).

Fra i **fenomeni anomali della vegetazione legati al freddo** possiamo segnalare:

- morte delle piante
- displasie legate a morte di porzioni più o meno grandi di tessuti delle strutture vegetative
- sterilità fiorale dovuta a danni alle strutture riproduttive
- carenze di elementi minerali indotte da limitazioni alle attività microbiche del terreno che intervengono nei cicli degli elementi minerali (es: a temperature inferiori a 5°C l'ureasi non è attiva) e da limitazioni di assorbimento prodotte dalle basse temperature.

Tabella 4.7 – Soglie di danno da gelo sul frumento tenero

Fase fenologica	Soglia di danno (°C)	Effetto
Emergenza	-6 / -8	Mortalità piante
Accestimento	-15 / -20	Mortalità piante
Levata	-2 / -5 (*)	Congelamento dei tessuti più teneri ed acquosi; displasie a carico dell'apparato fogliare
Fasi prossime alla fioritura	0 / -1	Sterilità fiorale per devitalizzazione dei sacchi pollinici

(*) per la fase di levata Gate e Grosman (1986) fissano la soglia critica inferiore a -5°C per il frumento e a -3°C per il grano duro.

Un commento particolare meritano i **danni a gelo ai fruttiferi** alla luce delle ripercussioni economiche che tali eventi comportano. In generale si deve segnalare che nelle specie arboree da frutto le gemme sono gli organi più sensibili e le gemme a fiore sono più sensibili di quelle a legno. Unica eccezione a ciò è rappresentata dalle gelate autunnali. In tal caso le gemme a fiore resistono meglio di quelle a legno perché entrano in riposo prima.

Effetto tipico del gelo sulle gemme è la cascola con distacco della gemma dal punto di inserzione. Le radici hanno anch'esse alta sensibilità al gelo ma risultano in genere protette dal terreno. Il fusto ed i rami hanno in genere buona resistenza al gelo; la parte più delicata è il sottile strato cambiale (strato subcorticale di cellule attive che assicura la crescita radiale del fusto). I danni da gelo a rami e fusti provocano seccumi, fessurazioni, cancri corticali, gommosi, ecc. Per quanto riguarda le gemme a fiore la sensibilità al gelo aumenta man mano che si avvicina l'antesi, per arrivare alla piena fioritura con soglie di danno a 0°C .

Le temperature critiche per danni da gelo relative ad alcune specie di fruttiferi sono riassunte nelle tabelle 4.8 e 4.9.

Fig. 4.7 – temperature critiche per olivo (*Olea europaea* L.) dopo un periodo di temperature elevate - linea sottile - e dopo una graduale esposizione al freddo - linea spessa (Larcher, 1983).

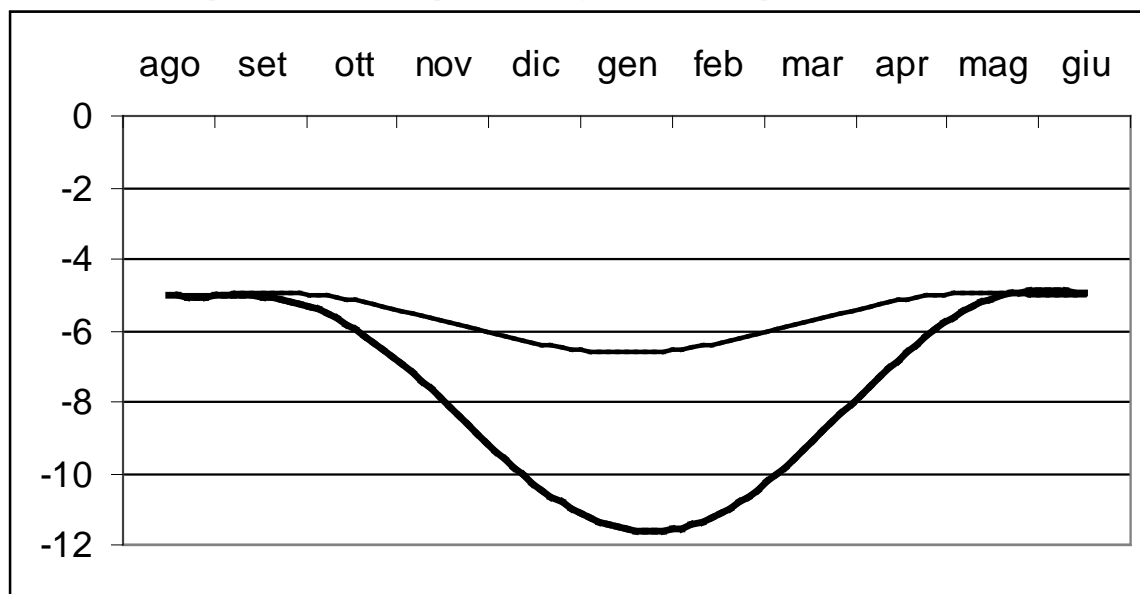


Tabella 4.8 – Temperature soglia di danno per il melo (da Brunetti e Rosini).

	Fase fenologica			
	pieno riposo	bottoni fiorali	antesi piena	allegagione
Fusto	-20/-40°C (*)			
Gemme e fiori	-10/-15°C (*)	-2.8°C	-1.7°C	-1.1°C
Radici	-12°C			

(*) il valore varia con la cultivar.

Tabella 4.9 – Sensibilità di diverse colture arboree alle basse temperature in funzione dello sviluppo. Per ogni fase fenologica vengono indicate le temperature (°C) a cui si registra il 10% (a) ed il 90% (b) di danni alla produzione (da Cicogna e Gani).

(a)

Melo		Pera		Pesco		Albicocco	
Fase fenologica	Soglia (°C)	Fase fenologica	soglia (°C)	Fase fenologica	soglia (°C)	Fase fenologica	soglia (°C)
Inizio rigonfiamento	-9	Inizio rigonfiamento	-9	Inizio rigonfiamento	-8		
Punte verdi	-7.8	Apertura gemme	-6.7	Inizio fioritura	-5	Bottoni separati	-6.7
Orecchiette di topo	-5	Comparsa mazzetti fiorali	-3.3	Piena fioritura campanulaceo	-4	Bottoni bianchi	-4.1
Mazzetti affioranti	-2.8	Mazzetti divaricati	-3.3	Piena fioritura rosaceo	-2.8	Inizio fioritura	-3.9
Bottoni rosa	-2.2	Inizio fioritura	-2.2	Inizio caduta petali	-2.2	Piena fioritura	-2.8
Mazzetti divaricati	-2.2	Inizio caduta petali	-2.2	Allegagione	-2.2	Allegagione	-2.2
Inizio fioritura	-2.2	Allegagione	-2.2				
Fioritura	-2.2						
Sfioritura	-2.2						

(b)

Melo		Pera		Pesco		Albicocco	
Fase fenologica	soglia (°C)	Fase fenologica	soglia (°C)	Fase fenologica	soglia (°C)	Fase fenologica	soglia (°C)
Inizio rigonfiamento	-16	Inizio rigonfiamento	-17	Inizio rigonfiamento	-16		
Punte verdi	-12	Apertura gemme	-14	Inizio fioritura	-15	Bottoni separati	-18
Orecchiette di topo	-9.4	Comparsa mazzetti fiorali	-9	Piena fioritura campanulaceo	-7.8	Bottoni bianchi	-10
Mazzetti affioranti	-6.1	Mazzetti divaricati	-5.6	Piena fioritura rosaceo	-4.4	Inizio fioritura	-7.2
Bottoni rosa	-4.4	Inizio fioritura	-5	Inizio caduta petali	-3.9	Piena fioritura	-5.6
Mazzetti divaricati	-3.9	Inizio caduta petali	-4.4	Allegagione	-3.9	Allegagione	-3.9
Inizio fioritura	-3.9	Allegagione	-4.4				
Fioritura	-3.9						
Sfioritura	-3.9						

Fra i **meccanismi ecologici a base ormonale** messi in atto dalle diverse specie vegetali per garantirsi uno sviluppo in condizioni termiche idonee segnaliamo la dormienza delle gemme e dei semi e la vernalizzazione.

La **dormienza delle gemme** è uno stato di latenza tipico delle gemme a fiore e / o a legno che viene superato esponendo le gemme a basse temperature. Infatti le piante arboree da frutto sviluppano le loro gemme a legno e a fiore in estate e, all'approssimarsi dell'inverno, le gemme già formate entrano in riposo in risposta al giorno breve ed alle basse temperature. Le gemme dormienti sono in

grado di sopportare temperature di parecchi °C al di sotto dello zero e non si riattivano neppure in presenza di fasi calde nel corso dell'inverno.

La dormienza è mantenuta fintanto che le gemme non abbiano accumulato un sufficiente numero di ore normali di freddo (chill units) e solo al raggiungimento di tale cumulo le gemme a fiore ed a legno sono in grado di riprendere il loro regolare sviluppo in risposta a temperature più elevate. Se invece viene raggiunta la primavera senza che il fabbisogno di freddo sia stato soddisfatto, faranno la loro comparsa una serie di fenomeni quali:

- 1) ritardata emissione delle foglie;
- 2) cascola delle gemme a fiore o anomalie fiorali;
- 3) fioritura ritardata e più protratta nel tempo;
- 3) riduzione della qualità dei frutti

La dormienza delle gemme legata al mancato soddisfacimento del fabbisogno di freddo è detta **endo-dormienza** per sottolineare la causa fisiologica (accumulo di ormoni). Una volta superata l'endodormienza, la pianta si troverà in un stato di **eco-dormienza** (dormienza legata alle basse temperature), risultando pronta alla ripresa vegetativa che avrà luogo non appena le temperature supereranno lo 0 di vegetazione (cardinale minimo).

Fenomeno analogo alla dormienza delle gemme è quello della **dormienza dei semi**, superabile attraverso l'esposizione dei semi a basse temperature.

Tabella 4.10 – Esempi di specie biennali soggette a vernalizzazione

Specie spontanee	Specie coltivate
<i>Lunaria biennis</i>	alcune cultivar di lattuga e cicoria
<i>Verbascum thapsus</i>	varie cultivar di frumento tenero (*), carota, segale, barbabietola

(*) nel caso del frumento tenero sono dette **invernali** le cultivar che necessitano di vernalizzazione, **alternative** le altre.

La **vernalizzazione** è invece il fenomeno per cui l'induzione fiorale in diverse specie biennali (tabella 4.10) è associata all'esposizione a basse temperature. Le piante soggette a vernalizzazione sono spesso anche longidiurne, per cui assistiamo alla presenza di un doppio meccanismo per garantire l'andata a fiore nel periodo più propizio (fine primavera). Inoltre si segnala che in varietà di frumento tenero invernale (longidiurne soggette a vernalizzazione) una buona vernalizzazione diminuisce la necessità di giorni lunghi per ottenere l'induzione fiorale, il che dimostra lo stretto legame esistente tra i due meccanismi.

Sempre nel caso del frumento tenero si è constatata la sensibilità alla vernalizzazione anche da parte dei semi in fase di germinazione. A tale fenomeno si ispira il processo di jarovizzazione, in virtù del quale varietà invernali di grano tenero vanno regolarmente a fiore se il seme addizionato del 50% del proprio peso in acqua viene esposto a temperature vicine a 0°C per alcune settimane.

Processo opposto alla vernalizzazione è la **devernalizzazione**, in virtù della quale piante già vernalizzate in seguito all'esposizione al freddo possono fare ritorno all'originale condizione "vegetativa" per esposizione a temperature elevate. Ad esempio si è osservato che bulbi di cipolla conservati per alcuni mesi in frigorifero non vanno a fiore se esposti a temperature di 27°C prima del trapianto, il che può trovare applicazione pratica per evitare fioriture indesiderate.

I meccanismi di dormienza e vernalizzazione dei vegetali presentano una evidente base ormonale in quanto si tratta di fenomeni legati a processi di sintesi o inattivazione di fitormoni.

Rilevante è anche l'effetto delle basse temperature sugli insetti, la cui attività si verifica al di sopra di un cardinale minimo variabile in relazione alla specie. A tale proposito è da segnalare la

soglia di 12°C al di sotto della quale le api non escono dall'alveare per cui risulta inibita l'impollinazione delle specie entomofile (es. vari fruttiferi) che dipendono da tali insetti.

Da ricordare infine che la storia dell'agricoltura italiana ed europea è profondamente marcata da alcune stagioni invernali particolarmente rigide, di regola associate ad irruzioni di aria artica o polare continentale dalla Siberia. Si tratta di stagioni invernale passate agli annali per aver causato gravi danni alle produzioni, danni che nel passato si traducevano spesso in carestie. Fra le stagioni invernali estreme e di cui si conserva memoria storica segnaliamo le seguenti: 1234-35, 1480-81, 1607-08, 1739-40, 1829-30, 1879-80, 1884-85, 1928-29, 1944-45, 1956-57, 1984-85.

Infine nella tabella 4.11 si riportano le minime assolute delle temperature minime e massime registrate da alcune stazioni meteorologiche dell'Emilia Romagna nel gennaio 1985.

Tabella 4.11 – valori minimi assoluti raggiunti dalle temperature minime e massime giornaliere in alcune stazioni dell'Emilia Romagna nel gennaio 1985 (Nucciotti e Simonini, 1995).

Località	Minimo assoluto delle massime giornaliere	Data	Minimo assoluto delle minime giornaliere	Data
Piacenza	-8	7/1	-22	10/1
Parma	-7.8	10/1	-23.4	10/1
Reggio	-7	8-10/1	-20	10-11/1
Modena	-7	8-10/1	-22	11/1
Bologna	-7.2	8/1	-16.4	11/1
S.Pietro Capofiume	-10	11/1	-24.8	11/1
Ferrara	-7.4	10/1	-21.5	11/1
Forlì	-5.6	8/1	-18.6	11/1
Cervia	-6.2	8/1	-16.5	12/1
Ravenna	-5.8	11/1	-14.2	11/1
Rimini	-5.6	8/1	-17.2	12/1

Da ultimo si deve segnalare che il freddo in agricoltura può giocare un ruolo positivo allorché provoca una mortalità significativa delle forme svernanti dei patogeni animali e vegetali (insetti, acari, batteri, funghi, ecc.) riducendone così il potenziale di reinfestazione primaverile. Infatti, anche se spesso non esistono modelli in grado di esprimere in termini quantitativi tale fenomeno, è noto che i periodi primaverili che seguono inverni particolarmente miti sono più favorevoli ad infestazioni rilevanti di vari patogeni animali e vegetali.

4.8 Soddisfacimento del fabbisogno di freddo – Chill Units

Il superamento della dormienza è legato al soddisfacimento del fabbisogno in ore normali di freddo (Normal Chill Hours - NCH). Le NCH, analogamente alle ore normali di caldo NHH, vengono stimate grazie a una apposita curva di risposta sul tipo di quella proposta in figura 4.8, la quale è espressa dall'equazione polinomiale

$$NCH = -0.0208 T^2 + 0.2917 T - 0.0333$$

Ove t è la temperatura dell'ora considerata (°C).

Un esempio di applicazione di tale metodo sull'arco di un giorno è riportato nella tabella che segue, che si chiude con una stima finale di 16.1 ore normali di freddo cumulate nelle 24 ore.

Tabella 4.12 – Stima delle ore normali di freddo cumulate in una giornata di tardo autunno.

ora	T (°C)	Ore normali freddo	ora	T (°C)	Ore normali fre ddo
1	5	0.9	13	15	0.0
2	5	0.9	14	12	0.5
3	4	0.8	15	10	0.8
4	2	0.5	16	9	0.9
5	-1	0.0	17	8	1.0
6	1	0.2	18	8	1.0
7	3	0.7	19	7	1.0
8	6	1.0	20	7	1.0
9	9	0.9	21	8	1.0
10	12	0.5	22	5	0.9
11	17	0.0	23	4	0.8
12	19	0.0	24	6	1.0
NCH totali cumulate nelle 24 ore					16.1 ore

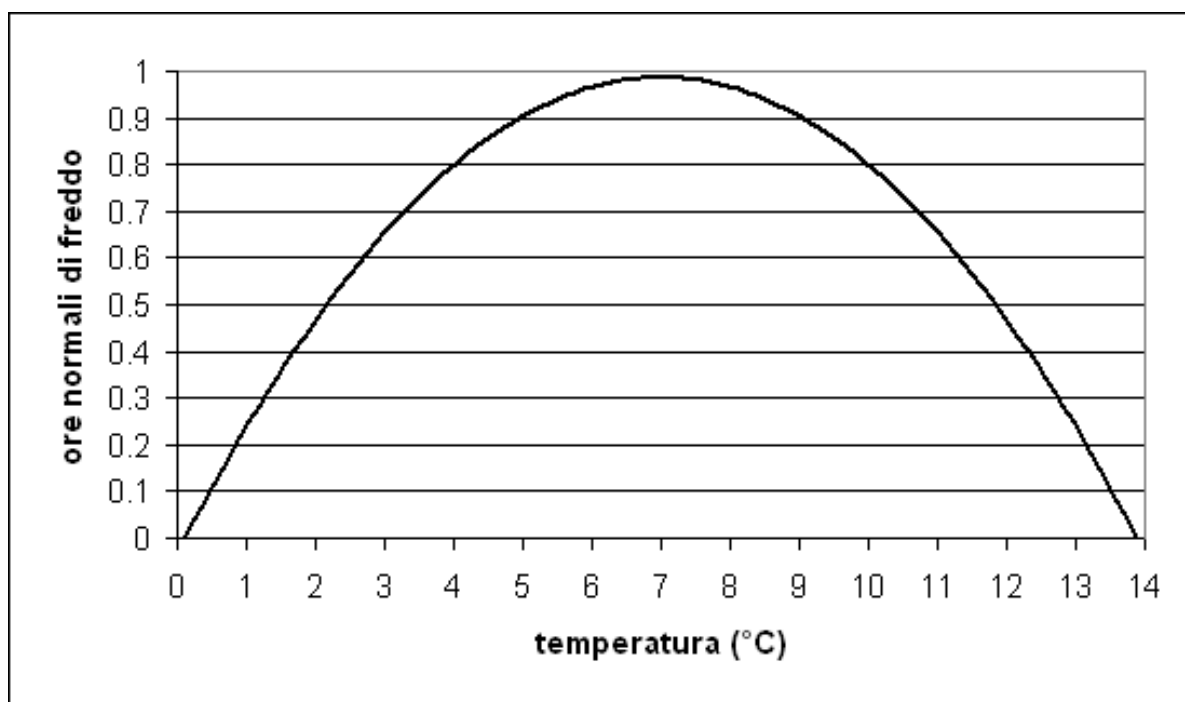


Figura 4.8 – Stima delle ore normali di freddo (Normal Chill Hours - NCH) tramite una curva di risposta. Un'ora trascorsa a 5°C vale 0.9 NHC mentre un'ora trascorsa a 13°C

Applicando il modello sopra descritto ai dati di alcune stazioni italiane sono stati ottenuti i cumuli di unità di freddo riportati in tabella 4.13. Tali dati ci forniscono un'idea di massima circa le risorse in termini di freddo delle diverse aree territoriali italiane.

Nella tabella 4.14 sono riportate le unità di freddo richieste da alcune specie e varietà di fruttiferi.

Tabella 4.13 – cumuli di unità di freddo riferiti ad alcune stazioni del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica. Le temperature medie orarie stimate a partire dalle temperature minime e massime giornaliere applicando ai valori massimi e minimi giornalieri il modello di de Wit in precedenza descritto.

Stazione	Periodo	Unità di freddo medie	Unità di freddo minime	Anno del minimo	Unità di freddo massime	Anno del massimo
Milano	1951-85	1907	1431	1964-65	2169	1981-82
Trieste	1960-95	2470	2065	1961-62	2791	1981-82
Pisa	1960-95	1832	1437	1990-91	2166	1980-81
Alghero	1960-95	1254	951	1968-69	1781	1963-64
Cagliari	1960-95	1122	490	1990-91	1638	1963-64
Napoli	1960-95	1581	1111	1990-91	1937	1967-68
Brindisi	1960-95	1265	813	1964-65	1784	1982-83

Tabella 4.14 – Unità di freddo per alcune varietà di fruttiferi (dati Università della California - <http://fruitsandnuts.ucdavis.edu/weather/aboutchilling.html>)

Specie	varietà	Ore normali di freddo
MELO	Fuji	600
	Belle de boskoop	800-1000
	Braeburn	700
	Calville blanc	800-1000
	Cox orange pippin	800
	Elstar	800-1000
	Golden delicious	700
	Granny smith	600
	Gravenstein	600
	Jonagold	700-800
	Mutsu	600
	Pink lady	400-500
	Red delicious	700
	Rome beauty	1000
ALBICOCCO	Varie	400-500
FICO	Varie	100
CILIEGIO	Varie	700-800
PESCO	Elberta	800
	Redhaven	800
	Suncrest	700
MANDORLO	Varie	250 -500
CASTAGNO	Varie	400 - 500
PISTACCHIO	Varie	800
NOCE	Varie	400 - 700
PERO – gruppo europeo	Bartlett	800
	D'anjou	800
	Sensation red Bartlett	700
PERO – gruppo asiatico	Varie	300 - 500
SUSINI EUROPEI	Stanley	800
SUSINI CINO-GIAPPONESI	Burbank	400
	Shiro	600
	Santa rosa	300
VITE	Varie	200

4.9 LE GELATE

Le gelate, di cui abbiamo già discusso nel capitolo 3, sono associate a cause sinottiche (irruzioni di aria artica o polare continentale) cui si associano cause locali (drenaggi di aria fredda dalle pendici verso i fondivalle) o a microscala (temperatura della superficie e degli strati prossimi alla tessa come frutto del bilancio energetico di superficie).

Fenomeni micrometeorologici di rilievo alle nostre latitudini sono le **gelate da irraggiamento**. Per comprendere tali fenomeni occorre considerare che di giorno l'aria non si riscalda direttamente per effetto della radiazione solare ma solo indirettamente per cessione di calore da parte del suolo. Di notte il suolo, non ricevendo energia dal sole, perde via via calore irraggiandolo verso lo spazio e si raffredda, raffreddando anche lo strato d'aria ad esso più prossimo e realizzando così il fenomeno dell'inversione termica, per cui lo strato d'aria più vicino al suolo è più freddo di quelli superiori.

Importanza notevole in zone ad orografia complessa possono avere le gelate per scivolamento di masse d'aria fredda (**gelate da avvezione locale**). Alla base di tali gelate è sempre l'irraggiamento notturno, più sensibile nelle aree culminali e sulle pendici in virtù di un fattore di visione del cielo più ampio rispetto a quello proprio dei fondivalle. Pertanto nelle ore serali e notturne le pendici e le aree culminali produrranno grandi quantità d'aria fredda che essendo più densa scivolerà a valle accumulandosi nei fondivalle, nelle zone pedemontane ed in generale nei compluvi (fenomeno del lago freddo).

Infine una notevole importanza nel determinare gelate alle medie latitudini hanno i meccanismi avvevativi che causano l'apporto di masse d'aria fredda provenienti da latitudini medio-alte. Si hanno così le **gelate da avvezione sinottica** che per l'area italiana sono in particolare legate ad avvezioni di aria polare continentale dall'area russo – siberiana (anticiclone russo) oppure ad avvezioni di aria artica da aree a Nord del circolo polare (es: Scandinavia).

Occorre segnalare che i fenomeni che stanno alla base delle gelate possono verificarsi in qualunque periodo dell'anno. Tuttavia è solo in un periodo più limitato, definibile stazione per stazione in base ad un'analisi climatologica, che il loro verificarsi può dar luogo alla discesa della temperatura a valori inferiori a 0°C.

Da segnalare inoltre che frequentemente la genesi delle gelate vede la compresenza dei tre meccanismi di genesi sopra indicati, per cui ad esempio nel tardo autunno una gelata su una pianura costiera del Centro Italia può avere alla propria origine l'apporto di aria fredda dall'Europa Orientale cui si somma il drenaggio d'aria fredda dai rilievi appenninici e l'irraggiamento notturno.

Da ricordare infine che gli standard di rilevamento della temperatura dell'aria prevedono che i sensori di temperatura delle stazioni meteorologiche siano posti ad una altezza di circa 1,50 - 1,80 m da terra. Ciò fa sì che il dato di temperatura minima rilevato possa risultare significativamente superiore a quello registratosi a livello del terreno. Per ovviare a tale differenza sono state proposte formule di correzione che consentano di stimare il verificarsi di una gelata a livello suolo disponendo del dato di temperatura dell'aria misurato da una stazione meteo standard.

Ad esempio si segnala la seguente formula empirica (Hulme et al., 1995), ricavata a partire dai dati di 93 stazioni europee e che è atta a stabilire il numero di giorni mensili con gelo a livello del suolo (Frs) partendo dai giorni con gelo registrati da un sensore meteo in posizione standard (Fra):

$$\text{Frs} = 5.2 + (0.738 \times \text{Fra}) - (0.284 \times \text{Tmn})$$

ove Tmn=temperatura media delle minime mensile (se Tmn ≥ 9°C allora Frs=0).

4.10 LA LOTTA PREVENTIVA ALLE GELATE

Nel mondo agronomico e nel parlare comune è invalsa l'abitudine di indicare con il termine di "brinate" gli eventi di gelata. Da ciò discende poi l'uso del termine "antibrina" per indicare i sistemi di protezione dalle gelate. Giova a tale proposito ricordare che la brina non è di per sé dannosa ed, anzi, attraverso la liberazione di calore legata al cambiamento di stato (da gassoso a solido) determina un certo effetto positivo che tuttavia si rivela irrilevante ai fini pratici. Pertanto qui si parlerà di lotta alle gelate e non alle brinate.

L'aria fredda e l'aria calda si comportano in buona misura come fluidi non miscibili. Pertanto nel caso di gelate da scivolamento è buona norma:

1. favorire il drenaggio lungo le pendici delle masse d'aria fredda in scivolamento;
2. evitare ostacoli che possono produrre accumuli d'aria fredda;
3. sfruttare barriere naturali o artificiali.

Nel caso di gelate da irraggiamento occorre:

1. favorire il rimescolamento per mezzo di ventilatori antigelo;
2. fornire calore alle colture attraverso l'irrigazione antigelo;
3. limitare l'irraggiamento attraverso la produzione di cortine di fumi o nebbie.

L'**irrigazione antigelo** è il sistema più diffuso per la difesa dalle gelate e si basa sul fatto che l'acqua congelandosi cede energia all'ambiente (calore latente di congelamento 80 cal/grammo di acqua) impedendo l'ulteriore diminuzione della temperatura dei tessuti vegetali.

Per gelate molto intense solo l'irrigazione soprachioma risulta completamente affidabile (Tonioli e Ferrari, 1997). Tale tecnica prevede di iniziare a irrigare appena la temperatura raggiunge 0°C e di continuare senza interruzioni fino a quando la gelata non sia finita e la temperatura sia di nuovo risalita al di sopra dello zero termico. Con intensità di irrigazione di 1-1,5 mm/ora si può avere un incremento di temperatura di 4,5°C mentre con intensità di 3-3,5 mm/ora si può arrivare ad un incremento di 6°C. Con l'irrigazione soprachioma si possono limitare i danni sia delle gelate dovute all'irraggiamento notturno sia di quelle per avvezione.

Nelle gelate da irraggiamento notturno non eccessivamente intense (le più comuni in pianura padana) si rivela efficace anche l'irrigazione sottochioma (Zinoni 1998). Con questa tecnica l'incremento termico è più limitato, specie nella parte alta del frutteto: a terra, dove l'acqua congela, la temperatura si dispone a 0°C mentre a 150 cm da terra l'incremento termico è di circa 1,5°C rispetto alla temperatura di partenza. Per tale tecnica si può utilizzare l'impianto presente se dotato di microjet che devono bagnare tutto il terreno con una nebulizzazione non eccessiva.

Con questo tipo di irrigazione antigelo è possibile dividere l'azienda in settori e bagnare ogni settore per 2-3 minuti con una sosta di 6-7 minuti. In tale modo si ha risparmio di acqua e di energia utilizzata o, a parità di costi, è possibile ampliare la superficie difesa.

4.11 Termoperiodo giornaliero

Il **termoperiodo giornaliero** (e cioè l'escursione termica fra giorno e notte) rappresenta un importante fattore per la produzione di diverse specie (es. la vite) nelle quali la temperatura ottimale per la fotosintesi è superiore a quella ottimale per la traslocazione dei fotosintetati verso gli organi di accumulo.

Un classico esempio di termoperiodismo si ha nel pomodoro, la cui fruttificazione risulta più copiosa con temperature diurne di 26,5°C e temperature notturne di 17°C mentre in presenza di temperature notturne inferiori a 10°C o superiori a 22°C la fruttificazione è insoddisfacente in

virtù delle difficoltà di traslocazione degli zuccheri sintetizzati di giorno dalle foglie ai frutti in accrescimento.

Dal termoperiodo giornaliero ed in particolare dai buoni livelli di escursione termica giorno - notte discende l'intensa colorazione dei frutti, particolarmente ricercata nel melo per il quale costituisce un fattore di tipicità per le zone di coltivazione montane.

Si deve tuttavia evidenziare che il raggiungimento di buoni livelli di colorazione dei frutti, legata in particolare al tenore in antociani (vedi par. 3.1.10), dipende dall'interazione di più elementi meteorologici quali la radiazione solare e la temperatura e l'umidità relativa. In particolare i frutti sviluppatasi in zone esposte ad elevati livelli di radiazione solare globale e ad elevate dosi di radiazione ultravioletta, associati a basse temperature notturne, presentano una colorazione più intensa mentre viceversa frutti sviluppati in condizioni di elevata umidità relativa appaiono scarsamente colorati e possono sviluppare rugginosità, come nel caso di alcune cultivar di melo e pero.

4.12 Temperatura del terreno

La **temperatura del terreno** è la risultante dei flussi di calore al suo interno e manifesta una tipica ciclicità giornaliera, com'è possibile ricavare dall'osservazione dei dati in tabella 4.14, riferiti a un suolo nudo in una giornata estiva. Si noti anzitutto che l'escursione termica giornaliera si riduce molto rapidamente all'aumentare della profondità; in particolare è detta **profondità di estinzione** la profondità a cui l'escursione giornaliera si riduce a 1/100 di quella di superficie.

Si noti inoltre la gradualità della propagazione dell'onda termica verso il basso, segnalata dai seguenti elementi:

1. considerando i massimi termici alle diverse profondità si osserva ad esempio che il massimo a 5 cm viene raggiunto alle 16 (in coincidenza con la massima giornaliera della temperatura dell'aria) mentre il massimo a 20 cm viene raggiunto alle ore 24.

2. considerando i massimi termici alle diverse ore si osserva che nelle ore diurne (terreno riscaldato dal sole) i massimi sono raggiunti in superficie mentre in quelle notturne sono raggiunti a profondità via via crescenti. Si vedano in proposito le tautocrone di cui alla figura 4.15.

La temperatura del terreno riveste una importanza considerevole per la germinazione dei semi. Ad esempio nel caso di una coltura a ciclo primaverile – estivo come il mais la semina si svolge in condizioni ottimali quando la temperatura del terreno alle ore 7 del mattino è assestata stabilmente intorno ai 10°C a 5 cm di profondità. Ciò rende ragione dell'importanza del monitoraggio della temperatura del terreno nel periodo primaverile per una corretta programmazione delle semine delle colture estive.

Tabella 4.15 – Esempio di andamento della temperatura di un terreno alle diverse profondità.

Profondità (cm)	Ora						escursione	ora del massimo
	4	8	12	16	20	24		
0	13.9	19.8	26.8	36.3	24.4	20.5	22.5	16
2	15.8	19.0	25.6	31.2	26.3	23.6	16.0	16
5	18.0	17.5	19.4	24.9	25.8	23.8	9.0	16
10	18.2	17.4	16.3	22.2	22.6	21.5	7.2	20
20	18.5	18.0	16.0	19.1	19.7	20.2	4.2	24
30	16.2	15.8	15.5	16.3	16.5	17.3	1.8	24

4.13 Colture protette o forzate

Nelle colture protette il ciclo colturale si attua in tutto o in parte con l'ausilio di mezzi di forzatura, atti a modificare una o più variabili guida meteorologiche, come la temperatura dell'aria e del terreno, la radiazione, il vento.

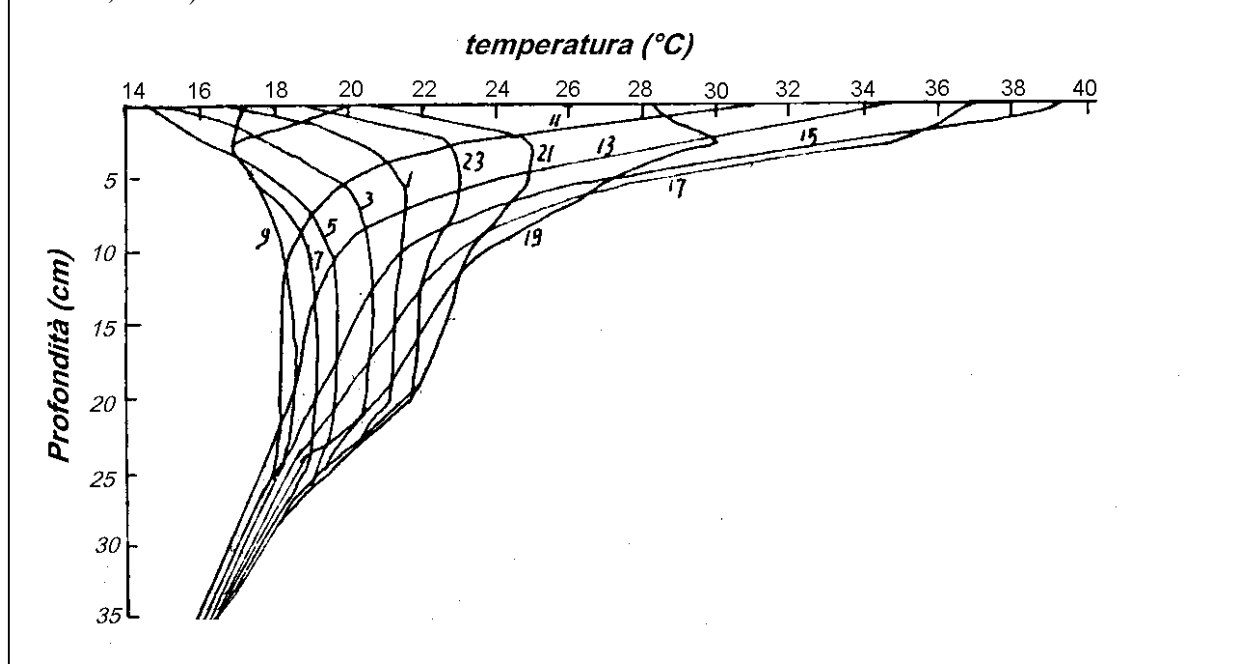
Ciò si rende utile ad esempio nelle seguenti circostanze:

- quando siano oggetto di coltivazione piante originarie di fasce climatiche differenti e che dunque non sono passibili di coltura all'aperto;
- per piante di normale coltura in piena aria delle quali s'intenda ottenere la produzione al di fuori dell'epoca normale (primizie, colture a raccolta tardiva);

La protezione può in alcuni casi limitarsi a fasi di sviluppo particolarmente delicate come semina, trapianto, ecc.

Si distinguono i seguenti tipi di colture protette: le protette in continuo, le semi-protette e le difese. Mentre nelle **colture protette** in continuo le protezioni (serre, tunnel, letti caldi, ecc.) sono mantenute per tutta la durata del ciclo, nelle **colture semiprotette** le protezioni si limitano a parti del ciclo e dunque sono realizzate con strutture mobili e più semplici (tunnel, cassoni, campane, ecc.).

Fig. 4.9 – tautocrone della temperatura del terreno riferite ad un suolo piano, omogeneo e nudo preso in un giorno estivo (per ogni curva si riporta in corsivo l'ora di osservazione) (da Pelosi, 1986).



Nel caso invece di **colture difese** la climatizzazione è molto limitata ed i mezzi messi in atto sono estremamente semplici: frangivento, coperture temporanee di vario genere, particolare sistemazione superficiale del terreno, pacciamatura, ecc.

Mentre la protezione in continuo è in genere riservata a piante floreali ed ortensi, la semi-protezione e la difesa sono spesso adottate anche per colture orticole di pieno campo (fragole, pomodori, peperoni, zucchini, ecc.).

Fra i mezzi di protezione si possono anzitutto citare i **ripari frangivento** che tendono a migliorare il microclima riducendo la ventosità. Se ne parlerà nel capitolo dedicato al vento.

Nel caso invece delle **sistemazioni superficiali del terreno** la forzatura si ottiene dando artificialmente al terreno una lieve inclinazione, in modo che risulti esposto a Sud. In virtù della legge del coseno questa esposizione aumenta l'intensità della radiazione incidente e quindi produce anticipi nella crescita delle colture. Una maniera assai semplice e di assolvere il terreno in direzione Est-Ovest e seminare o piantare sui versante Sud dei solchi così formati. Comuni nelle orticole del Centro e Nord-Europa sono le **coste o caldine**, appezzamenti larghi 130-150 cm ai quali, mediante spostamenti di terra, si produce un'inclinazione trasversale di circa 15° verso Sud.

Nel caso delle **pacciamature** il terreno viene ricoperto con materiali di colore scuro se ne riduce l'albedo e di conseguenza si aumenta il calore immagazzinato nel terreno. I materiali pacciamanti più comuni sono i film plastici neri ma effetti analoghi sono manifestati ad esempio da ceneri scure o scorie di carbone.

I **letti caldi** sono dispositivi nei quali su piccole superfici (es: semenzai, taleai) le condizioni di temperatura vengono migliorate sfruttando il calore prodotto dalla fermentazione di sostanze organiche quali letame fresco, foglie secche, pula, cascami di cotone, alghe, muschi, ecc.

A seconda del calore sviluppato e della temperatura raggiunta si distinguono i letti caldi propriamente detto (durata della fermentazione di 45 giorni circa, temperatura media raggiunta di 25-35°C), i letti semicaldi (durata 60 giorni, temperatura di 16-24°C) e i letti tiepidi (durata di più mesi, temperatura di 10-15°C). La massa fermentante è costituita per lo più da letame fresco di cavallo mescolato a foglie in proporzioni variabili a seconda che si desideri lo sviluppo di calore forte e di breve durata oppure moderato e prolungato: da 2/3 : 1/3 nel caso di letto caldo propriamente detto a 1/3 : 2/3 nel caso di letto tiepido; le foglie rallentano il processo fermentativo prolungando l'azione.

In genere per ridurre la dispersione del calore prodotto, il letto caldo viene completato da coperture quali i cassoni vetrati.

Le **serre** sono sistemi di protezione fissi che consistono di una struttura portante e di una copertura trasparente. Le strutture di sostegno possono essere realizzate in legname, metallo, cemento vibrato, materie plastiche. Scopo primario delle serre è quello di isolare l'ambiente esterno da quello interno, con possibilità di creare in quest'ultimo condizioni tali da alterare il bilancio energetico interno nei modi seguenti:

- impedendo la dispersione del calore sensibile per convezione o avvezione (trasporto orizzontale)
- impedendo la dispersione della radiazione a onda lunga emessa dai vegetali e dal terreno tramite materiali di copertura opachi a tale radiazione. In tal senso la scelta dei materiali di copertura si rivela cruciale. Ottimi da questo punto di vista si rivelano materiali in grado di intrappolare la radiazione infrarossa uscente dalla serra pur lasciando liberamente transitare li infrarosso di origine solare. In tal senso sono ottimi il vetro i laminati plastici in PVC (cloruro di polivinile) e le lastre rigide di PMM (polimetacrilato di metile).
- impedendo l'apporto avvertivo (orizzontale) di aria fredda, compito questo svolto dalle pareti laterali
- riscaldando artificialmente l'ambiente mediante generatori di calore (termosifoni, stufe ad aria calda, resistenze elettriche)
- Regolando la radiazione solare in arrivo tramite sistemi di ombreggiamento.

A ciò si aggiunga che le serre offrono protezione meccanica da eventi meteorici quali venti, piogge e neve.

Gli effetti sopra elencati vengono ricercati anche nel caso di altri sistemi di protezione quali i ripari individuali, i telai di vetro o plastica, i tunnel e i tunnel serra.

I ripari individuali vengono applicati a singole piante e sono costituiti ad esempio da campane di vetro (diametro 30-40 cm) o da cappucci di plastica.

I tunnel sono strutture mobili di forma semi-cilindrica, costituiti da una copertura di film plastico sorretta da archetti metallici, di dimensione tale da non consentire l'accesso alle persone. La climatizzazione migliore si ha con tunnel grandi, alti e larghi, poiché in essi diminuisce il rapporto superficie esterna/superficie coperta: quindi le dimensioni dovranno essere le massime possibili compatibilmente con il margine di convenienza economica. In generale sono le seguenti: larghezza: 50-150 cm; altezza 40-60 cm; archetti distanti da 150 a 50 cm a seconda della larghezza e del pericolo di venti forti. La sezione trasversale può essere ad arco a tutto sesto o a sesto ribassato o anche triangolare

Uno dei maggiori problemi della forzatura con serre o tunnel è costituito dal pericolo di alte temperature e di elevata umidità con rilevanti fenomeni di condensa. Se la copertura è prolungata nel tempo e comprende la delicatissima fase di fioritura e fecondazione e indispensabile l'arieggiamento periodico, realizzato in diversi modi: sollevamento periodico della sola copertura; sollevamento di tutta la struttura; impiego di film plastici perforati.