

Coltura e clima: effetto microclimatico dell'ambiente serra

Cecilia Stanghellini* e Ep Heuvelink

Wageningen University and Research Center, Wageningen (Paesi Bassi)

Ricezione 14 febbraio 2007; accettazione 27 febbraio 2007

Crop and climate: microclimatic effect of the greenhouse environment

Abstract. The aim of a greenhouse is modification of the environment, to warrant improved conditions (with respect to field) for crop productivity. We start with a brief review of present knowledge about the effect of relevant climate factors on production, with particular attention to [sporadically] non-optimal temperatures, on the short- and long-term production processes. In the next section we consider the effect of a shelter (cover) and of its physical properties on the temperature within. We show that the energy balance makes it possible to determine the temperature within a passive greenhouse in given meteorological conditions, as it follows from two independent components: one solely determined by the radiative and thermal properties of the cover, the other only by the ventilation rate.

In order to get the widest possible short-term management range, the properties of the cover should be selected through an analysis of the long-term climate. Short term management of temperature within this range is done through regulation of ventilation, once number, area, place and type of openings has been determined in such a way that enough ventilation is possible also in the conditions of maximum load. Particular attention is given to the effect of limited ventilation on carbon dioxide concentration inside the house, and on the consequences in terms of productivity. Thereafter we discuss the criteria on which a cost-benefit analysis of active vs passive greenhouses should be based.

Finally, after a short introduction of the critical success factors of a horticultural holding, it is pointed out that the climate may be not the most important one, but certainly it is a factor with a large bearing on production costs. A careful analysis of the design parameters that affect conditions within a greenhouse makes it possible to select the most efficient combination, once the climatic conditions are known.

Key words: temperature and production; passive greenhouses; climate management; spectral properties; ventilation

Introduzione

La serricoltura olandese è leader nel mondo, in termini di tecnologia, controllo ambientale, innovazione e produttività. La superficie serricola è rimasta abbastanza costante negli ultimi 25 anni (circa 11.000 ha), e tuttavia la produttività e il valore si sono moltiplicati, fino a raggiungere, grazie all'applicazione di tecnologie sempre più avanzate, un valore del prodotto superiore a 667,000 €/ha all'anno, medio su tutto il settore (CBS, 2006; Vrom, 2006). Attualmente l'investimento in una serra nuova eccede il milione di € per ettaro. Non sottovalutiamo il fatto che, con costi di produzione intorno al 90% del prodotto lordo, la serricoltura olandese deve la sua redditività ai vantaggi competitivi di cui gode, in primis i prezzi elevati che ottiene sul mercato internazionale la sua produzione di alta qualità, certificata ed affidabile. Per esempio, il prezzo medio di asta del peperone olandese nel 2003 è stato maggiore di 0,96 €/kg al prezzo di quello coltivato su substrato in Almeria (Caballero e De Miguel, 2002; KWIN, 2003). Le maggiori spese di trasporto da Almeria alla Germania (che è il mercato di esportazione principale sia degli Olandesi che degli Spagnoli) non giustificano più di 0,15 €/kg di differenza.

Tuttavia, ovunque si siano costruite serre "all'Olandese" in Paesi meno avanzati (e spesso con sussidi governativi), la produttività che si è ottenuta è di molto inferiore ai valori citati. Stanghellini (2004) e Luo e Stanghellini (2005) hanno dimostrato che sebbene il disegno delle serre "Venlo", grazie alla sua lunga evoluzione, possa essere ben adattato alle attuali condizioni olandesi, non ci si può aspettare che abbia la stessa performance se applicato in altre condizioni climatiche e di mercato. Quindi è necessario tornare ai principi di base, per determinare la configurazione "ottimale" in condizioni date, in modo di permettere all'industria serricola di adattare le strutture di protezione alle condizioni locali. Allo stesso tempo, questo dovrebbe aiutare l'operatore a stimare più realisticamente il potenziale produttivo (in coltura protetta) di una certa zona.

* cecilia.stanghellini@wur.nl

La coltura

I processi produttivi di una pianta dipendono in larga parte dalla temperatura. In generale la velocità di una reazione aumenta con la temperatura, fino ad un massimo oltre il quale la reazione non avviene più, per esempio a causa della degenerazione di una proteina che è essenziale per la reazione, intendendo per degenerazione la perdita della forma e delle proprietà di una molecola. Anche se degenerazioni estreme non sono comuni nelle colture in serra, i vari processi produttivi hanno differenti valori “ottimali” della temperatura, e la temperatura “ideale” rimane un concetto elusivo.

Assimilazione netta

Un esempio è la differenza di sensibilità alla temperatura della fotosintesi e della crescita degli organi in cui si accumulano gli assimilati. La fotosintesi è relativamente insensibile alla temperatura in un dato range, per esempio fra 17 e 24 °C nel pomodoro (Heuvelink e Dorais, 2005). La ridistribuzione degli assimilati, invece, è molto sensibile alla temperatura. Con una temperatura relativamente bassa, quindi, lo sbilancio fra produzione e ridistribuzione degli assimilati ne provoca un accumulo nelle foglie. Se la capacità di immagazzinamento è sufficiente, questo si risolve appena la temperatura aumenta. In piante piccole o con periodi prolungati di bassa temperatura, però, l'accumulo di assimilati limita l'espansione fogliare, determinando foglie più spesse come nel pomodoro (Heuvelink, 1989; Venema *et al.*, 1999). Ciò ha un effetto negativo, soprattutto in colture giovani, perché riduce l'intercettazione della luce e quindi la fotosintesi. Nella fase iniziale della coltura, pertanto, una gestione corretta della temperatura è essenziale e l'effetto della temperatura nella crescita di piante giovani è lo stesso in molti genotipi (Smeets e Garretsen, 1986).

La respirazione, in particolare la respirazione di mantenimento, dipende direttamente dalla temperatura. A basse temperature il tasso di respirazione è più basso. D'altra parte, la formazione di organi (foglie, steli, frutti) più “spessi” a basse temperature, causa un incremento della respirazione per m² di coltura (a causa della maggiore biomassa presente). Il risultato di questi due effetti opposti è che a lungo termine la respirazione è meno sensibile alla temperatura di quello che in teoria si potrebbe pensare.

Sviluppo vegetativo

Lo sviluppo vegetativo (la differenziazione di nuove foglie), invece, reagisce linearmente alla tem-

peratura in un ampio range (per esempio 17-27 °C). Nel pomodoro, per esempio, si usa molto la “regola del pollice”, secondo la quale a 20 °C si genera un grappolo (quindi 3 foglie) per settimana, a 16 °C sono 0,8 grappoli per settimana e a 24 °C sono 1,2. Sempre nel pomodoro, De Koning (1994) ha osservato che, per quanto la velocità di differenziazione delle foglie cambi nelle varie cultivar, l'effetto di un incremento/decremento della temperatura è lo stesso. Il numero di foglie dipende quindi direttamente dalla temperatura media. La distanza internodale, invece, è soprattutto determinata dalla differenza fra temperatura diurna e notturna (DIF): un DIF alto risulta in una maggiore distanza internodale (Heuvelink, 1989), per esempio nel crisantemo (fig. 1). Una review sull'effetto della temperatura (e basse temperature in particolare) sulla fisiologia del crisantemo è stata pubblicata recentemente da Van der Ploeg e Heuvelink (2006).

La lunghezza di una pianta dipende quindi sia dalla temperatura media (numero di unità vegetative) che dalle variazioni intorno alla media (lunghezza di ciascuna unità). La vitalità (numero di laterali e di fiori) invece è determinata dalla quantità di zuccheri presenti e, in definitiva, dalla luce disponibile, attraverso la fotosintesi. Il meccanismo per cui la presenza di zuccheri determina la formazione di *sink* è apparentemente simile all'effetto di ormoni come la citokina, cioè mette in moto una catena di processi che fa sì che le gemme germoglino. La conoscenza attuale sui processi di sviluppo che sono modificati dal livello di

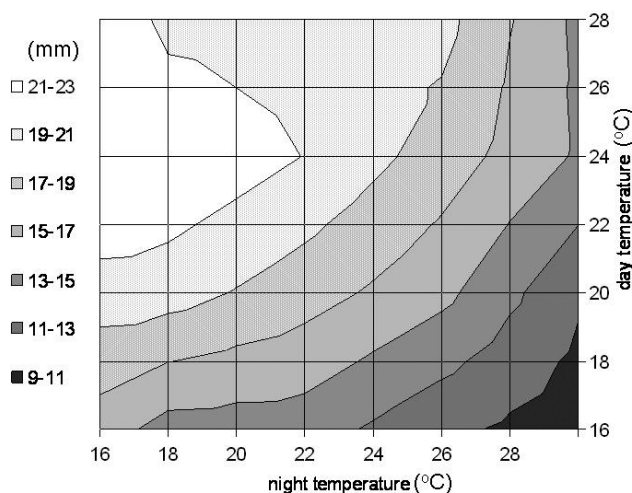


Fig. 1 - Lunghezza media finale dell'internodo 10 (mm) in funzione della temperatura media notturna e diurna (°C), nel crisantemo, cv Reagan Improved (ri-disegnato dai dati di Carvalho *et al.*, 2002).

Fig. 1 - Final length of internode 10 (mm), as a function of mean night and day temperature (°C), in *Chrysanthemum* 'Reagan Improved' (re-drawn from data from Carvalho *et al.*, 2002).

zuccheri solubili è stata recentemente rivista da Gibson (2005). L'esistenza e la potenziale importanza nelle piante di una espressione genetica regolata dagli zuccheri è nota da non più di 10 anni (Koch, 1996). Sia l'aumento che la diminuzione possono sollecitare reazioni. Molti dei geni coinvolti hanno un ruolo (diretto o indiretto) nel metabolismo degli zuccheri, il che fa supporre che la modificazione possa risultare da adattamento. Le conseguenze non sono solo la modificazione del metabolismo ma anche dell'allocazione di carboidrati fra gli organi e della morfologia.

Allegazione e crescita dei frutti

Una bassa temperatura ritarda la differenziazione delle foglie e quindi anche la velocità con cui si generano nuovi fiori/grappoli nel pomodoro. Inoltre, temperature fuori del range 10-30 °C (i limiti esatti dipendono dalla cultivar) sono dannose a uno o più dei processi necessari per una buona allegazione dei frutti (Picken, 1984). Molti autori hanno dimostrato che la produzione e lo sviluppo del polline è molto sensibile alla temperatura. La fertilità dei granelli di polline viene sensibilmente ridotta con temperature fuori dell'ampio range 5-37 °C (Ho e Hewitt, 1986). L'effetto di basse temperature sull'allegazione è soprattutto attraverso la formazione di polline di bassa qualità. Janse (2003) ha quantificato l'effetto di basse temperature sporadiche sulla produzione di cetriolo, con un esperimento in cui utilizzò 20 compartimenti, tutti mantenuti alla temperatura media di 20 °C. Nel trattamento di controllo applicò il regime standard commerciale, gli altri trattamenti avevano tutti una deviazione totale di 24 gradi-giorno, ottenuta con una media di 16 °C per 6 giorni; di 12 °C per 3 giorni e di 10 °C per 2,5 giorni. Dopo il periodo freddo, la media giornaliera veniva alzata a 22 °C, fino a che si era

cumulata una deviazione opposta di 24 gradi-giorno. In un ulteriore trattamento la media di 16 °C per 6 giorni è stata ripetuta dopo circa un mese. In ogni caso il periodo freddo ha causato una lieve riduzione di produzione, che però è stata compensata più tardi, e non vi sono state differenze significative nella produzione totale. I due regimi a più bassa temperatura hanno portato ad un aumento del numero di frutti, con conseguente perdita di qualità e aumento degli scarti. Janse ha osservato che una temperatura di 5 °C provoca un danno irreversibile se è protratta per più di 6 ore. Durante il giorno già 8 °C possono causare danni irreversibili.

Anche all'estremo opposto, sembra importante il bilancio luce/temperatura. Per esempio, in condizioni di bassa luminosità l'allegazione diventa quasi impossibile già a temperature medie eccedenti 20 °C, mentre una simile temperatura sarebbe ideale per la crescita vegetativa. Peet *et al.* (1998), usando camere climatiche ad intensità di luce 550 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ per 12 ore, hanno osservato un effetto negativo sullo sviluppo del polline a regimi di temperatura di 30/24 e anche 32/26 °C (giorno/notte), cioè temperature medie rispettivamente di 27 e 29 °C. Sato e Peet (2005) hanno dimostrato che, per quanto la sensibilità a vari regimi di temperatura possa cambiare fra cultivar, c'è comunque la tendenza a una riduzione della vitalità del polline innalzando la temperatura media del regime a 29 °C. Il lavoro di Pressman *et al.* (2002) ha confermato che una temperatura media di 29 °C influenza negativamente la vitalità del polline, cioè granelli formati a questa temperatura non sono in grado di fertilizzare gli ovuli che si erano formati a temperature più basse. La tabella 1 dimostra che un certo stress si osserva nel pomodoro a partire da temperature medie di 25 °C. Confrontando una tempera-

Tab. 1 - Compilazione delle osservazioni sull'effetto di regimi di alta temperatura sul pomodoro. La perdita di produzione è in relazione al raccolto osservato a 25°C (da Loaiza Mejia, 2005)

Tab. 1 - A compilation of literature about the effect of high temperature regimes on tomato. Production loss (third column) is with respect to harvest at 25°C (from Loaiza Mejia, 2005)

Temperatura (°C)	Durata	Perdita di produzione (%)	Riferimento
42	6 ore	100	Heckathorn <i>et al.</i> , 1998
40	4 ore per 9 giorni	100	Klueva <i>et al.</i> , 2000; Iwahori, 1965; Sugiyama <i>et al.</i> , 1966 Sato <i>et al.</i> , 2000; Peet <i>et al.</i> , 1998
35	Media per 30 giorni	40	Rivero <i>et al.</i> , 2004
32/36	33 giorni	25	Sato <i>et al.</i> , 2000; 2001; 2002
27	Media giornaliera	15	Peet <i>et al.</i> , 1997
26	Media giornaliera	5	Peet <i>et al.</i> , 1998

tura media di 26 °C (Peet *et al.*, 1997) e 29 °C (Pressman *et al.*, 2002) con 25 °C, si è osservato un minor numero di frutti, di peso ridotto e contenenti meno semi. Il valor medio del regime sembra più importante dell'ampiezza del ritmo, il che implica qualche meccanismo di compensazione. Inoltre, dato che il meccanismo principale sembra una bassa vitalità del polline, si può dedurre che le varietà partenocarpiche dovrebbero essere più tolleranti alle alte temperature (Rylski, 1979).

La durata dello sviluppo del frutto, da fiore a frutto maturo, aumenta a basse temperature, similmente a quello che si constata per lo sviluppo vegetativo. Lo sviluppo complessivo di un frutto di pomodoro a 20 °C è 8 settimane, mentre a 17 °C ne occorrono 10 (De Koning, 1994). In generale una durata di sviluppo più lunga implica frutti più grossi, assumendo che il numero di frutti non cambi. Quest'effetto può essere modificato attraverso la manipolazione dei grappoli, della densità degli steli (o più piante per m² o più steli per pianta).

Distribuzione degli assimilati e produzione

Nelle colture a frutto, i frutti sono il principale "sink" di assimilati e quindi la loro presenza ne determina la ridistribuzione/allocazione. Il contenuto di materia secca dei frutti diminuisce a temperature basse. Questo implica che a parità di disponibilità di assimilati, si produce più polpa (Khayat *et al.*, 1985). In condizione di disponibilità limitante di assimilati, De Koning (1994) ha osservato una diminuzione di circa 0,1 nel contenuto di materia secca (%) per ogni grado sotto 23 °C (nel range 17-23 °C). Assumendo che la variazione di temperatura in questo range non modifichi il peso secco dei frutti, con un contenuto di materia secca di 6% a 23 °C, per esempio, una diminuzione di 5 °C nella temperatura media significherebbe un aumento di circa 9% nel peso fresco dei frutti. Naturalmente sapore e qualità non ne godono! Con un apporto non limitante di assimilati de Koning non ha osservato effetti della temperatura sul contenuto di materia secca dei frutti. Le varie cultivar possono differire nel contenuto di materia secca in condizioni date. In definitiva, per quanto il raccolto nel pomodoro, per esempio, venga determinato in primo luogo dall'intercettazione cumulativa di luce e dalla allocazione degli assimilati (indice di raccolto), l'effetto della temperatura è ugualmente importante. Come detto, una temperatura bassa ritarda lo sviluppo vegetativo e quindi l'intercettazione della luce e di conseguenza la produzione di assimilati. Quest'effetto di feed-back è particolarmente negativo nelle fasi iniziali di una coltura. In aggiunta, basse temperature ritardano la maturazione dei frutti e quindi il raccolto.

In relazione ai fattori climatici, in conclusione, di tutti i processi alla base della produzione vegetale la fotosintesi dipende principalmente dalla quantità di luce disponibile, dalla concentrazione di anidride carbonica e, in misura minore, dalla temperatura; in tutti gli altri la temperatura è il fattore determinante. Solo ora si sta cominciando ad apprezzare anche l'effetto indiretto della fotosintesi sulla formazione di organi, attraverso l'influenza degli zuccheri sull'espressione di alcuni geni. Non è particolarmente inatteso che, in base alla rassegna appena fatta, si possa concludere che la buona gestione richiede condizioni di luce e anidride carbonica non limitanti per l'assimilazione e che la temperatura "ottimale" per la produzione della maggior parte delle colture ortive dovrebbe avere un marcato ritmo diurno ed essere contenuta nel range fra i 16-18 °C gradi notturni e i 20-25 °C diurni (a seconda della luce disponibile). Ognuno dei fattori climatici può essere limitante, nel senso che la produzione viene limitata dal fattore più sfavorevole, indipendentemente dal valore assunto dagli altri fattori. Questo concetto, tutt'altro che intuitivo, doveva essere chiaro agli antichi romani, dato che l'imperatore Tiberio usava mangiare cetrioli che venivano "coltivati in ceste fornite di ruote, così che si potevano mettere facilmente al sole e trasportare dentro ripari trasparenti nelle giornate fredde" (Plinio, 77 A.C.).

La serra

Le cose non sono cambiate molto per circa 2000 anni. Infatti, fino a pochi anni fa l'unica modificazione ambientale possibile era migliorare le condizioni di temperatura, attraverso protezioni più trasparenti possibile, ed in questo il vetro è sicuramente stato un passo avanti rispetto alla mica dei romani. La temperatura che si riesce ad ottenere dentro una protezione trasparente dipende dal bilancio dei vari flussi energetici. In una serra senza scambi di ventilazione con l'esterno, per esempio un tunnel ben chiuso (Fig. 2), trascurando le perdite attraverso il terreno, il bilancio dei flussi di energia è:

$$\text{radiazione solare trasmessa} = \text{perdite per conduzione} + \text{perdite radiative}$$

o, in simboli:

$$\tau I_{\text{sole}} \cong UC_1(T_{\text{in}} - T_{\text{out}}) + \varepsilon C_2(T_{\text{in}} - T_{\text{cielo}}) \quad (1)$$

dove I_{sole} è la radiazione solare; T_{in} , T_{out} e T_{cielo} sono rispettivamente la temperatura dentro, fuori e quella apparente del cielo (dipendente dalla temperatura e dall'umidità esterna); τ , U ed ε (sono rispettivamente: la trasmittività, il coefficiente di trasmissione

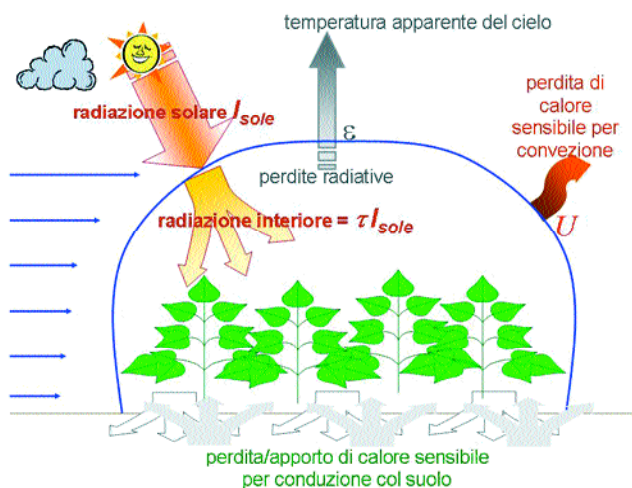


Fig. 2 - Illustrazione schematica dei flussi di energia entranti ed uscenti da una serra stagna. τ indica la trasmissività della copertura. Le perdite radiative dipendono dalle caratteristiche del materiale (emissività, ϵ) di copertura e dalla temperatura apparente del cielo, che a sua volta dipende dalle condizioni meteorologiche (principalmente temperatura e umidità).

Fig. 2 - Schematic representation of the energy fluxes in and out of an airtight greenhouse. τ is the transmissivity of the cover. The radiative losses depend from the properties (emissivity, ϵ) of the cover material and the apparent sky temperature that, in turn, is determined by meteorological conditions (mainly temperature and humidity).

termica e l'emissività della copertura; e C_1 e C_2 sono coefficienti.

La temperatura che si ottiene all'interno di questo tunnel ideale (la chiameremo T_{tunnel}) è quella che bilancia i flussi, cioè la soluzione dell'equazione (1). Come si può dedurre dall'equazione, T_{tunnel} dipende

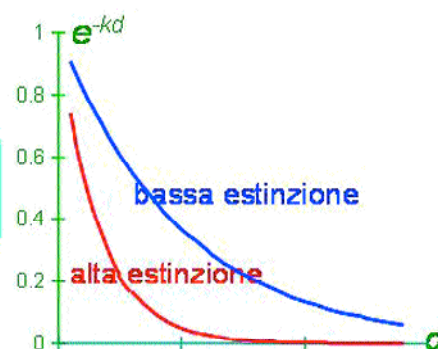
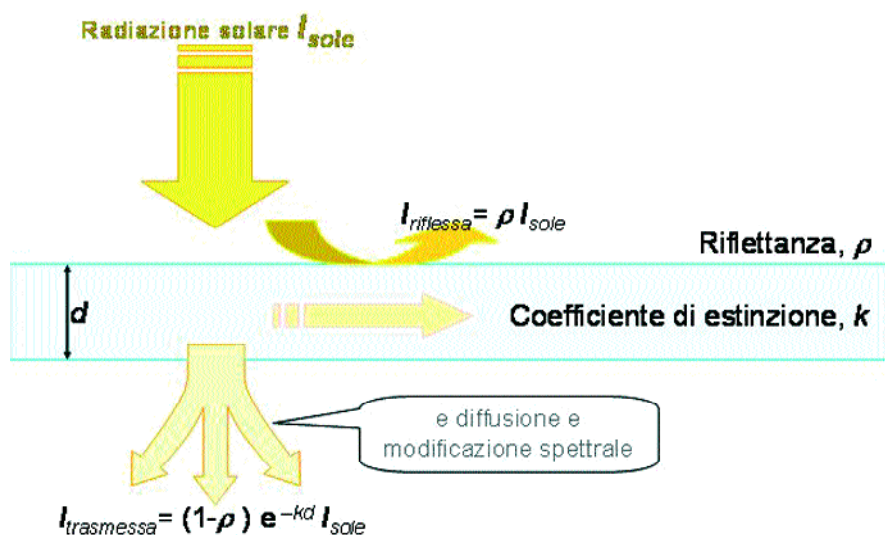


Fig. 3 - Descrizione schematica dell'azione della copertura sulla radiazione solare. I parametri del materiale che determinano la trasmissione della radiazione sono il suo spessore d , il coefficiente di estinzione k , e la riflettanza ρ , cioè la frazione di luce che viene riflessa dalla superficie. L'effetto combinato dello spessore e del coefficiente di estinzione è illustrato dal grafico a destra.

Fig. 3 - Schematic representation of the effect of the cover on sun radiation (I_{sole}). The parameters of the cover that have an effect on transmission of sun radiation are: thickness, d ; extinction coefficient, k and reflectance ρ , that is the fraction of light that is reflected at the cover surface. The combined effect of thickness and extinction coefficient is shown in the figure at right (bassa estinzione = small k ; alta estinzione = large k).

dalle condizioni meteorologiche (radiazione solare, temperatura e, in misura minore, umidità esterne) e dai tre parametri che descrivono le proprietà termiche e radiative della copertura. Le caratteristiche del materiale di copertura che determinano la trasmissività totale sono illustrate in figura 3 e nella tabella 2 sono riportate le proprietà più rilevanti di alcuni materiali di copertura più comunemente usati.

D'altra parte, in una serra perfettamente ventilata (con un numero elevato di ricambi d'aria) la temperatura sarebbe sempre uguale a quella esterna, indipendentemente dalla quantità di radiazione e dalle proprietà della copertura. Il tasso di ventilazione determina il valore della temperatura all'interno della serra, fra questi due estremi. Le caratteristiche della copertura, idealmente, dovrebbero essere tali da far sì che la temperatura che si vuole mantenere all'interno, per garantire buone condizioni per la coltura, si trovi in questo intervallo, così che la regolazione della ventilazione è sufficiente (fig. 4).

Effetto della scelta delle proprietà termiche e radiative della copertura

La figura 4 mostra un esempio piuttosto comune di quando questo non è possibile: nel periodo invernale (o durante la notte) anche senza ventilazione la temperatura può essere troppo bassa. La soluzione ovvia è di somministrare energia all'ambiente riscaldando. Però si può anche ottenere un innalzamento della temperatura "tunnel" modificandone le proprietà, per esempio la conducibilità termica (doppio

Tab. 2 - Proprietà fisiche dei materiali usati più comunemente come copertura. Il coefficiente U è calcolato per una serra quadrata di 0,5 ha di superficie, con vento di 4 m/s, tenendo in conto un ricambio di perdite di 0,5 volumi/h. Per quel che riguarda le perdite radiative il polietilene (PE) è leggermente più sfavorevole degli altri materiali.

Tab. 2 - Physical properties of most common cover materials. The coefficient U is calculated for a 0.5 ha square greenhouse, exposed to a wind of 4 m/s, assuming leakages of 0.5 vol/h. Thermal radiation properties of polyethylene (PE) are slightly less favorable than of glass.

Materiale	Spessore	U (W m ⁻² °C ⁻¹)	τ (%)
Vetro semplice	4 mm	8,8	82
Vetro doppio		5,2	67
PMMA (doppio)	16 mm	5,0	76
Policarbonato (doppio)	12 mm	4,8	61
PE semplice	200 μm	8,0	81
PE doppio		6,0	65

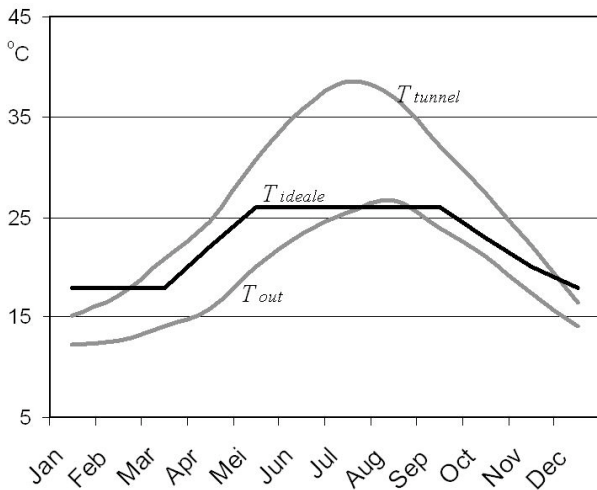


Fig. 4 - Andamento tipico delle temperature medie mensili: T_{out} rappresenta la temperatura esterna, T_{tunnel} rappresenta la temperatura all'interno di una copertura senza scambi di ventilazione e T_{ideale} è la temperatura ottimale per la coltura. T_{out} sono i valori medi di Gela, gli altri grafici sono solo un esempio. Una figura molto simile si applica anche all'andamento diurno della temperatura.

Fig. 4 - Typical trend of mean monthly temperatures: T_{out} is outside temperature; T_{tunnel} represents temperature within a shelter without ventilation and T_{ideale} represents optimal temperature for the crop. T_{out} are actual mean values at Gela; the other lines are drawn just for example. A very similar figure would describe the daily trend of temperatures as well.

strato) o l'emissività (schermo di alluminio). Il caso opposto si ha d'estate (o a metà giornata): la temperatura "ideale" può essere molto vicina, o addirittura minore, alla temperatura esterna. Si può dimostrare che la temperatura interna è data all'incirca da:

$$T_{in} \cong T_{out} + \frac{UC_1 + \varepsilon C_2}{UC_1 + \varepsilon C_2 + n(1+C_3)} (T_{tunnel} - T_{out}) \quad (2)$$

dove T_{out} è la temperatura esterna, C_3 è un fattore che tiene conto della differenza di umidità interna ed esterna (all'incirca contenuto fra 2 e 5) e n è il tasso di ventilazione (ricambi per ora). Come si vede dall'equazione (2), la diminuzione della temperatura in funzione del tasso di ventilazione è asintotica, come illustrato dalla figura 5, cioè la temperatura si avvicina a quella esterna solo a tassi di ventilazione molto elevati. La ventilazione di una serra è comunque limitata, a maggior ragione quando ci siano reti anti-insetto (Campen, 2005), e quindi quello che si fa spesso è cambiare le proprietà della copertura, in questo caso la trasmittanza (per esempio con l'imbiancatura estiva), in modo da abbassare la temperatura di partenza, e ottenere quindi temperature più basse a parità di ventilazione (fig. 5).

Naturalmente, dato che ridurre l'ingresso di luce all'interno della serra ha comunque un effetto negativo sulla fotosintesi, l'imbiancamento di una serra ne riduce la produttività. Si ricorre a questo perché le temperature elevate avrebbero un effetto ancor peggiore. Stanno cominciando adesso ad apparire sul mercato dei film che offrono buone prospettive sotto questo punto di vista (Hoffman e Waayenberg, 2002). Il principio è semplice: la fotosintesi si avvale di luce di lunghezze d'onda (PAR = Photosynthetically Active Radiation) che rappresentano circa la metà dell'energia contenuta nella radiazione solare. L'altra metà, che è a lunghezze d'onda nell'infrarosso vicino (NIR = Near Infra-Red) contribuisce al riscaldamento della serra ed alla evapotraspirazione, ma non direttamente alla crescita vegetale. Un film che blocchi la radiazione NIR diminuisce il carico di energia della

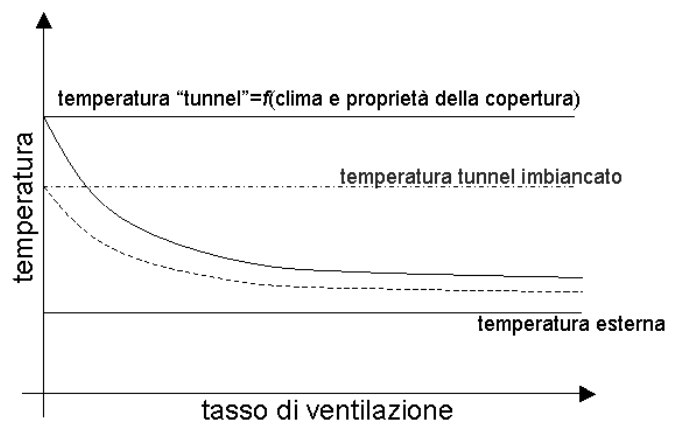


Fig. 5 - Andamento della temperatura all'interno della serra, in funzione del tasso di ventilazione. Le due curve rappresentano caratteristiche differenti della copertura, che determinano il valore di partenza (temperatura a tasso di ventilazione 0)

Fig. 5 - Trend of temperature within a shelter as affected by the ventilation rate. The two curves stand for different properties of the cover, that determine the temperature at nihil ventilation rate.

serra, ma non diminuisce la fotosintesi. Naturalmente ci sono molti mesi dell'anno in cui l'energia contenuta nello spettro NIR è molto utile e quindi l'ideale sarebbe un "imbiancamento" con un filtro NIR da eliminare alla fine dell'estate. Un prodotto di questo tipo (basato su un pigmento brevettato dalla ditta Merck) è stato lanciato alla HortiFair di Amsterdam nel 2004 ed ha vinto il premio per l'innovazione nel settore tecnologia. Aspetti da migliorare (e non poco) sono il costo, l'efficacia e la durata.

Effetto della progettazione delle aperture

Una volta stabilite le proprietà della copertura (e quindi T_{tunnel}), la serra deve essere progettata in modo da garantirsi la possibilità massima di controllo della temperatura attraverso la ventilazione, nell'intervallo $T_{out}-T_{tunnel}$. Come si deduce dall'equazione (2), questo equivale ad avere a disposizione un range molto esteso di valori del tasso di ventilazione n . Il tasso di ventilazione dipende all'incirca linearmente dalla velocità del vento e dalla superficie delle aperture. La quantità di energia che si riesce a dissipare (l'effetto raffreddante) ad un determinato tasso di ventilazione dipende non solo dalla differenza di temperatura fra l'interno ed esterno, ma anche dalla differenza di umidità, come si è visto nella equazione (2). Più secco è l'ambiente esterno e più alto è l'effetto raffreddante, sempre che la coltura sia fornita sufficientemente di acqua. Per la teoria si rimanda alla letteratura, dove si possono trovare lavori specialistici sul tema, anche relativi ad ambienti mediterranei (Mistriotis *et al.*, 1997).

Quindi, una volta determinata la quantità di energia da dissipare nelle condizioni peggiori, la necessità di aperture può essere determinata se si conosce la velocità del vento in quelle condizioni (Hemming *et al.*, 2006). Per esempio, a Gela una serra deve avere più aperture che in Almeria, come illustra la figura 6. Infatti, se si assume che la quantità di ore mensili sia un buon indice della energia che va dissipata (Almeria e Gela sono all'incirca alla stessa latitudine), allora come si vede dal pannello di sinistra, a parità di ore di sole ad Almeria c'è più vento, quindi in teoria basta una minor superficie di ventilazione. La temperatura esterna, infatti, è molto simile nelle due località, come dimostra il grafico a destra in figura 6.

Attraverso studi di fluidodinamica, Campen e Bot (2003) hanno dimostrato che non solo la superficie delle aperture, ma anche la loro geometria (roll-over o flap) è importante nel determinare l'efficienza di ventilazione. Per il caso specifico di Almeria Perez-Parra (2002) ha determinato l'imprescindibilità delle aperture laterali per ottenere una buona distribuzione di temperatura all'interno delle serre tipo "parral".

Inutile rimarcare che, per la regolazione precisa della temperatura è necessario che la capacità di ventilazione così stabilita possa anche essere utilizzata in maniera variabile, adattando continuamente il tasso di ventilazione (l'apertura) alle condizioni meteorologiche esterne, in funzione della temperatura che si vuole ottenere dentro la serra. In pratica, si tratta di invertire l'equazione (2), risolvendola per n , quando la T_{in} che

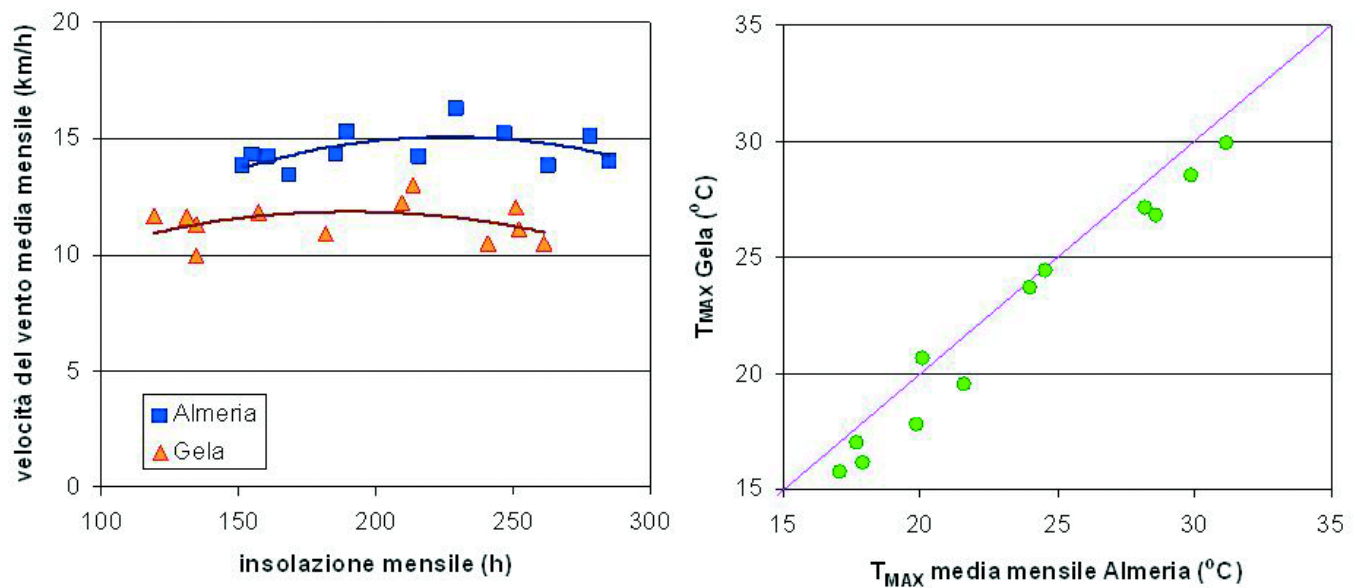


Fig. 6 - Grafico a sinistra: velocità del vento media vs le ore di sole mensili, a Almeria ed a Gela. Grafico a destra: media mensile delle temperature massime di Gela vs quelle corrispondenti ad Almeria.

Fig. 6 - Left hand side: monthly mean wind speed vs monthly sun hours, Almeria and Gela. Right hand side: monthly mean of daily maxima in Gela vs the corresponding values in Almeria.

si desidera sia nota, in considerazione di variazioni negli altri fattori (temperatura esterna, radiazione solare, umidità). Un sistema ingegnoso (ancora in fase di sviluppo) per determinare on-line il tasso di ventilazione -che è un prerequisito per la sua regolazione attraverso l'inversione dell'equazione (2)- è stato sviluppato da Bontsema *et al.*, 2006. Il sistema è basato sul bilancio dei flussi di energia e non richiede misure aggiuntive oltre quelle che si fanno automaticamente nelle serre olandesi.

Ventilazione e anidride carbonica

Come è ben noto, il processo di fotosintesi implica l'assorbimento di molecole di anidride carbonica presenti nell'aria. Il primo passo della reazione può spesso essere limitante, dato il ruolo cruciale dell'enzima Rubisco. La Rubisco reagisce ugualmente -ma in modo mutuamente esclusivo- con l'O₂ e con la CO₂. Dato che la concentrazione di ossigeno nell'aria è circa 600 volte più alta di quella dell'anidride carbonica, aumentare la concentrazione di anidride carbonica ha un effetto molto marcato sulla fotosintesi, non solo per la presenza di più "materiale base", ma anche per la modificazione in senso benefico del rapporto CO₂/O₂. Similmente, è noto che abbassare la concentrazione di ossigeno stimola la fotosintesi anche se non se ne prevedono applicazioni commerciali. D'altra parte, è ugualmente noto che aumentando la concentrazione di CO₂ dai 350 vpm (cm³ m⁻³) attuali dell'atmosfera a 1.000 vpm, il tasso di fotosintesi aumenta fra 30 e 50% (Nederhoff, 1994). La reazione all'incremento di concentrazione è una reazione così detta di saturazione, nel senso che a concentrazioni elevate l'effetto diventa sempre minore (Stanghellini e Bunce, 1993).

La concentrazione di anidride carbonica in un ambiente semichiuso, anche ventilato, è sempre minore della concentrazione esterna. Infatti, la coltura assorbe CO₂ dall'ambiente interno, dove quindi si crea una depressione. La conseguente differenza di concentrazione attraverso le aperture genera un flusso di anidride carbonica dall'esterno all'interno. La legge di conservazione della massa richiede che questo flusso sia uguale al flusso di assimilazione. Quindi, fino a che c'è assimilazione (e quindi flusso di "riempimento") ci deve essere una differenza di concentrazione positiva fra esterno ed interno. In simboli:

$$A = VnH(CO_{2,out} - CO_{2,in}) \Rightarrow CO_{2,in} = CO_{2,out} - \frac{A}{nH} \quad (3)$$

dove A è il flusso di assimilazione e V è l'apporto di CO₂ dalla ventilazione in g di CO₂ per m² di serra per ora, n è il tasso di ventilazione (volumi per ora) e H è

l'altezza media della serra in m, cioè i m³ di volume della serra per ogni m² di superficie della stessa. CO_{2,out} e CO_{2,in} sono la concentrazione esterna ed interna in g per m³. L'equivalenza fra g e cm³ è data dalla legge di Avogadro e, per l'anidride carbonica:

$$1 \text{ cm}^3_{CO_2} \cong 2 \text{ mg}_{CO_2} \Rightarrow 350 \text{ vpm} \cong 700 \frac{\text{mg}_{CO_2}}{\text{m}^3} \quad (4)$$

Concentrazioni diurne estive inferiori a 200 vpm all'interno di serre anche ventilate sono abbastanza frequenti. Per esempio, Goldsberry (1986) ha misurato valori più bassi di 200 vpm anche a radiazioni medie, e Sheng e Bao (2003) hanno osservato livelli eccessivamente bassi per molte ore del giorno, in serre del tipo "solare" cinese.

Nederhoff (1994) propose una "regola del pollice" (basata su molte misure in serre commerciali) per stimare l'effetto sulla produzione del pomodoro di un incremento di 100 vpm nella concentrazione ambiente di CO₂.

$$\Delta \text{ raccolto} = 1.5 \left(\frac{1000}{CO_2} \right)^2 \% \quad (5)$$

dove la variazione è in percentuale e CO₂ è la concentrazione attuale (vpm), da cui si considera l'incremento di 100 vpm. Per esempio, supponendo che si osservi una concentrazione di 250 vpm, riportarla a 350 vpm comporterebbe un incremento di produzione di circa 24%, che è come dire che l'esaurimento di CO₂ causa una perdita di produzione del 24%. L'equazione (5) è un buon esempio della "legge del beneficio decrescente": incrementare la concentrazione di CO₂ da 350 a 450 vpm comporta un aumento stimato della produzione "solo" del 13%. Oltre all'effetto diretto sulla crescita, in vista di quanto detto sopra, cioè la funzione "pseudormonale" degli assimilati nello stimolare produzione di germogli laterali e fiori, c'è anche un effetto indiretto sullo sviluppo. La ventilazione subottimale della serra può essere quindi il fattore limitante, quando non ci sia arricchimento di anidride carbonica, almeno fino alla concentrazione esterna.

Il clima

Il potenziale produttivo di una zona (e quindi la necessità di climatizzazione per la produzione massima) si valuta bene attraverso grafici come quello mostrato in figura 7, originariamente introdotti da Alpi e Tognoni nel 1969 (in bibliografia è riportata la

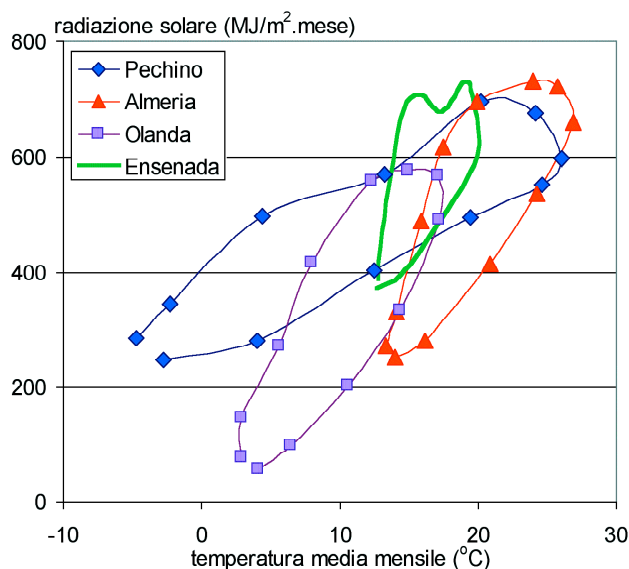


Fig. 7 - Analisi comparata delle condizioni climatiche in varie regioni mondiali con importante presenza di colture protette. I punti sono valori medi mensili e la linea è interrotta fra Dicembre e Gennaio. In tutti i casi la primavera è nella parte alta del ciclo. Ensenada è all'estremo Nord-Occidentale del Messico (Baja California) e come protezione si utilizzano reti.

Fig. 7 - Comparison of climatic conditions in world regions (Beijing, Northern China; Almeria, Southern Spain, The Netherlands and Ensenada, BC, North-western Mexico), all with a significant diffusion of protected cultivation. Symbols represent mean month values of temperature (x-axis) and sun radiation (y-axis) and the line is broken between December and January. Spring is in the upper left part of the cycle, in all cases.

4a edizione, 1990). La figura 7 conferma, per esempio, che la presenza di luce è il fattore limitante in autunno-inverno in Olanda e che le temperature eccessive possono limitare la produttività nei mesi estivi nella Spagna Meridionale. Più interessante è l'esempio della Cina settentrionale (stessa latitudine di Almeria) dove la grande escursione termica implicherebbe il riscaldamento invernale e il raffreddamento estivo. Dato che la situazione economica non permette costi di produzione elevati, è stato perfezionata la serra "solare" cinese (Luo, 2006), caratterizzata da un elevato immagazzinamento termico che, smorzando l'escursione termica diurna -anche quella molto estesa- permette la coltivazione per la maggior parte dell'anno, esclusi brevi periodi vicino ai solstizi. Altro esempio interessante nella figura 7 è Ensenada, in Messico. Come si vede, la combinazione (quasi perfetta) di temperatura e radiazione sembrerebbe non richiedere alcuna protezione. I motivi per cui la produttività sotto rete è più elevata che in pieno campo sono due: la zona è desertica e ventosa, ad alta evaporazione potenziale. La presenza della rete crea un microclima "umido" intorno alla coltura, che evita stress idrico e limita anche l'incidenza di attacchi di fitofagi. In termini economici questo deve più che

bilanciare gli svantaggi causati dalla copertura, riduzione di anidride carbonica e ombreggiamento, per limitare l'aumento di temperatura.

Uno studio a priori delle condizioni climatiche permette di individuare quei parametri di progetto che contribuiscono a determinare la "gestibilità" dell'ambiente serra. Le condizioni tipiche dell'Italia o Spagna Meridionale (ma non delle regioni al Nord) sono tali che una serra "passiva" (cioè senza riscaldamento e raffreddamento), se ben progettata, potrebbe mantenere al suo interno le condizioni che vogliamo ottenere per le colture ortive per la maggior parte dell'anno. Naturalmente questo implica che ci sono periodi in cui le condizioni all'interno della serra sono sub-ottimali, con conseguente diminuzione (o esclusione) di produzione.

Come si dimostra nelle serre olandesi, abbiamo oggi la tecnologia per mantenere all'interno le condizioni che si possono desiderare, in termini di temperatura, luce, anidride carbonica e umidità, cioè con mezzi sufficienti si può coltivare tutto ed ovunque. È anche vero che più elementi climatici siamo in grado di manipolare, più elevata è la produzione e, per esempio, l'efficienza di uso dell'acqua (fig. 8) o del suolo. Dato però che i costi di produzione sono determinati in gran parte dal clima, cioè da quanta "climatizzazione" è necessaria per produrre, è chiaro che la gestione economica dell'impresa richiede non più del livello di climatizzazione che si giustifica con i prezzi di mercato dei prodotti. De Pascale e Maggio (2005) e De Pascale *et al.* (2006) hanno analizzato a fondo recentemente questo argomento.

Serra passiva o serra attiva?

Solo un'analisi costi/benefici (incremento di produzione contro il "costo" del miglioramento climatico) può permettere di decidere cosa veramente ha senso in determinate condizioni. È noto che è più facile quantificare i costi che non l'incremento di produzione, sicuramente a priori. I modelli di produzione vegetale che si potrebbero applicare sono stati sviluppati (e calibrati) nelle serre "ottimali" dell'Olanda (Heuvelink, 1999). La parte iniziale di questa rassegna dovrebbe ormai aver chiarito che la nostra conoscenza dell'effetto finale di eventi sporadici, come per esempio alcune notti a temperatura sotto 10 (°C, è molto limitata. Similmente, sappiamo poco di come temperature elevate ma discontinue influiscano sulla produzione. È un fatto che un numero crescente di produttori in zone temperate, come la Sicilia o Almeria, dispone di qualche forma di riscaldamento di soccorso, mentre per ora sembra più conveniente non coltivare in luglio ad Almeria, piuttosto che

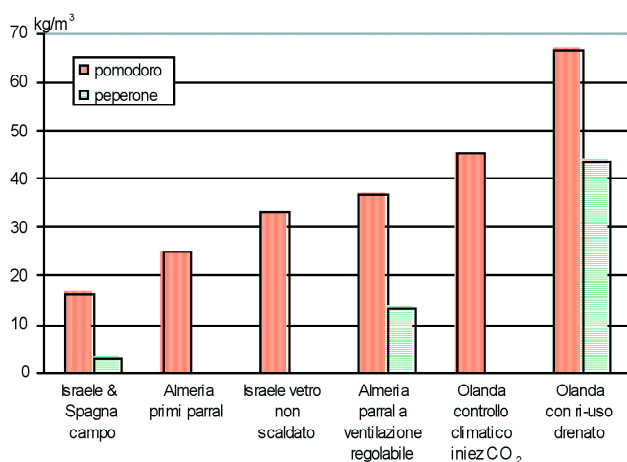


Fig. 8 - Prodotto fresco (kg) di pomodoro e peperone per m³ di acqua utilizzata, per i sistemi produttivi indicati (Stanghellini *et al.*, 2003).

Fig. 8 - Fresh yield per m³ of irrigation water, in various growing systems, from field (left) to fully controlled glasshouse, with re-use of drain water (right). From Stanghellini *et al.*, 2003.

installare dei sistemi di raffreddamento (Anton *et al.*, 2006). Quello che sembra certo è che la regolazione fine della ventilazione (nella versione più semplice: una cremagliera comandata da un motorino regolato da un termostato) comporta un aumento della produttività. L'entità si può dedurre dalla figura 8, dove sono riportati dati per entrambi i tipi di serre nella regione di Almeria.

Altre possibilità per ovviare a condizioni sporadicamente subottimali sono gli schermi mobili, le cui caratteristiche potrebbero essere determinate in funzione delle condizioni climatiche esterne, e l'immagazzinamento di energia in eccesso, per il successivo rilascio quando occorre. In tutti questi casi, nell'analisi

dei possibili benefici, è da tener conto anche che questi sistemi, quando ci sono, possono contribuire a migliorare le condizioni anche nei momenti in cui queste non sono strettamente limitanti.

Un'importantissima modifica "attiva", spesso dimenticata, è la somministrazione di anidride carbonica. In Olanda questa è un sottoprodotto del riscaldamento, più costoso di quello che si potrebbe pensare, dato lo sfasamento fra la necessità di riscaldamento e il fabbisogno di CO₂. Poiché è più facile immagazzinare calore che un gas, si sopperisce allo sfasamento producendo di giorno acqua calda che si immagazzina in grandi depositi isolati termicamente, per poi utilizzarla per il riscaldamento notturno. Di solito la somministrazione è regolata in modo tale da garantire 700 vpm in assenza di ventilazione, che scendono linearmente fino al livello esterno, quando si abbia la ventilazione massima, in modo da garantire l'assenza di dispersione. Uno sviluppo molto recente, reso possibile dalla liberalizzazione del mercato dell'energia elettrica in Olanda, è la produzione di energia elettrica attraverso la cogenerazione (elettricità/calore), utilizzando il gas di scarico per fertilizzazione carbonica. L'energia elettrica viene utilizzata in azienda (in gran parte per illuminazione artificiale) e la parte eccedente immessa in rete. Si sono già verificati alcuni casi critici nella rete di distribuzione olandese, in cui l'energia elettrica ha raggiunto prezzi di mercato così alti che ai produttori conveniva vendere tutta quella che riuscivano a produrre piuttosto che illuminare le serre. Anche nella regione di Almeria la fertilizzazione carbonica è sempre più diffusa, soprattutto fra i produttori orientati all'esportazione. Di solito [consorzi di] produttori "affittano" un grande contenitore che

Tab. 3 - Fattori critici di successo e loro valutazione nel caso della floricoltura latino-americana in relazione a quella olandese e israeliana (Rabobank International, 2000).

Tab. 3 - Critical success factors and their evaluation for latin American floriculture in relation to the Dutch and Israelian ones (Rabobank International, 2000)

Fattori	Olanda	Colombia / Ecuador	Israele	Messico
Vicinanza al mercato estero	Ottimo	Critico	Critico	Ottimo
Clima	Buono	Ottimo	Ottimo	Ottimo
Costo del suolo e materie prime	Critico	Ottimo	Critico	Critico
Costo della mano d'opera	Critico	Buono	Buono	Buono
Costo del capitale	Ottimo	Critico/Buono	Critico	Molto critico
Infrastruttura	Ottimo	Ottimo	Ottimo	Critico
Accesso a tecnici esperti	Ottimo	Buono	Buono	Critico
Dimensione mercato interno	Buono	Molto critico	Molto critico	Buono
Stabilità sociopolitica	Ottimo	Critico	Critico/Buono	Critico

è gestito dall'azienda che fornisce la CO₂. Una conseguenza positiva degli accordi internazionali sulla limitazione delle emissioni è che il costo della CO₂ (un sottoprodotto di molti processi industriali) in bombola è sceso negli ultimi anni ed è ormai comparabile col costo di produzione di CO₂ attraverso la combustione (circa 0,11 €/kg).

Discussione

Per quanto in questo lavoro si parli di produzione in serra in relazione al clima, è bene tenere presente che il clima è solo uno dei fattori che contribuiscono al successo economico di una impresa orticola. Per esempio, in un'analisi delle prospettive della nascente floricoltura Latino-Americana, la Rabobank International (2000) ha identificato ben nove "fattori critici di successo", ed il clima è solo uno di questi. Nella valutazione in relazione alla situazione olandese ed israeliana, come riportato nella tabella 3, il clima è indicato come uno dei fattori in cui l'America Latina (o almeno le regioni dove si sta sviluppando l'orticoltura protetta) gode di un vantaggio competitivo. Ciò nonostante, in considerazione dei fattori negativi potenzialmente critici, la Rabobank concludeva raccomandando la massima prudenza agli orticoltori olandesi che prendessero in considerazione l'investimento in America Latina.

La serricoltura italiana (nella diversità delle sue regioni) deve competere sul mercato Europeo con le produzioni (e commercializzazioni) garantite, annuali e certificate dell'Olanda o, all'altro estremo, con le produzioni a basso costo del Marocco (orticole) o Africa Orientale (floricole) e lo spazio fra questi due estremi è più limitato di quello che si potrebbe pensare, dato che l'Italia non può comunque competere con i Paesi a basso costo di produzione. Un'analisi realistica quindi deve prendere l'orticoltura protetta olandese a riferimento, analizzare (e sfruttare) i possibili vantaggi competitivi. Ovviamente il principale vantaggio è il clima più favorevole e quindi i minori costi energetici. L'energia rappresenta circa il 30% dei costi totali di produzione nelle serre olandesi (KWIN, 2006), quindi, una serra in Italia che, senza riscaldamento, riuscisse ad ottenere il 70% della produzione olandese, sarebbe competitiva. Questo nell'ipotesi che gli altri costi di produzione ed il valore del raccolto siano gli stessi. Per quel che riguarda i costi di produzione, un altro 30% dei costi variabili di produzione in Olanda è la mano d'opera. È pur vero che in Italia il costo del lavoro è lievemente minore, però di solito si impiegano più unità a parità di superficie produttiva.

Un altro 20% dei costi di produzione è rappresentato in Olanda dai costi di capitale (valore del terreno, finanziamento, ecc). Chiaramente, la ridotta necessità di climatizzazione permette di costruire serre meno costose, purché questo non abbassi la produzione più di quanto abbassi i costi. Dal lato dei benefici, le produzioni certificate e la garanzia di consegne a ciclo annuale attraverso alleanze strategiche fra [consorzi di] produttori, sono ormai elementi essenziali nel determinare il valore del raccolto, ampiamente utilizzati dai produttori olandesi.

Ottenere il 50% delle produzioni olandesi in una serra a costo zero di capitale e di energia, e poi riuscire anche a vendere il raccolto ai prezzi "olandesi" è chiaramente un'utopia. La sfida è quindi determinare lo "spazio" competitivo esistente, bilanciando investimenti, costi di produzione e produttività, anche in vista degli altri fattori critici di successo elencati in tabella 3.

Conclusioni

L'ambiente climatico italiano (nella diversità delle sue regioni) dovrebbe permettere una buona produttività anche in serre non completamente climatizzate o, in alcune regioni, esclusivamente passive. È però indispensabile utilizzare accorgimenti che limitino al massimo la perdita di produzione rispetto a serre climatizzate. Questo implica in primo luogo una selezione accurata delle caratteristiche fisiche (trasmissività, emissività e conducibilità termica) della copertura e di eventuali schermi mobili. In secondo luogo è indispensabile assicurarsi la capacità di ventilazione necessaria e la sua possibilità di regolazione, per garantire che si faccia il massimo uso dell'intervallo di cui si dispone per il controllo della temperatura. Un aspetto che merita forse più considerazione in molte zone è la possibilità di immagazzinare calore in eccesso durante il giorno, e utilizzarlo per smorzare le basse temperature notturne. In ultimo, ma solo per ribadire l'importanza, è indispensabile rivalutare l'economicità della fertilizzazione carbonica, in vista dell'evoluzione nei prezzi.

Un capitolo a parte, che esula dallo scopo di questa rassegna, è l'attenzione indispensabile al processo di commercializzazione: quello che conta in un'impresa è il "bottom line". Aumentare il valore del raccolto dovrebbe ricevere almeno la stessa attenzione che aumentare la produttività o diminuire i costi di produzione. Il rovescio della medaglia di una climatizzazione scadente è anche la minor prevedibilità della produzione e spesso una maggiore incidenza di patologie, tutti fattori che incidono negativamente sul valore del prodotto.

Riassunto

In questo lavoro si comincia con una review breve di quello che si sa a proposito dell'effetto dei fattori climatici principali sui processi che determinano la produzione vegetale, con attenzione particolare a eventi sporadici di temperature non-ottimali. Nella sezione successiva si esamina l'effetto della presenza di una copertura (e delle sue proprietà fisiche) sulla temperatura nella serra. Si dimostra che l'analisi dei flussi di energia rende possibile di separare la temperatura all'interno di una serra passiva in due componenti indipendenti: una che è funzione esclusivamente delle proprietà termiche e radiative della copertura, e l'altra solo del tasso di ventilazione. Particolare attenzione viene data all'effetto di una ventilazione limitata sulla concentrazione di anidride carbonica all'interno, ed alle sue conseguenze in termini di produttività. La sezione successiva è dedicata all'analisi dei criteri fondamentali per una valutazione economicamente corretta del binomio serra attiva-serra passiva.

Parole chiave: temperatura e produzione; serre passive, controllo climatico, proprietà radiative, ventilazione

Bibliografia

- ALPI A., TOGNONI F., 1990. *Coltivazione in serra: attuali orientamenti scientifici e tecnici*. Edagricole, Bologna 4^a Ed., 346 pp.
- ANTON A., MONTERO J.I., MUNOZ P., PÉREZ-PARRA J., BAEZA E., SORIANO T., ESCOBAR I., HERNANDEZ J., CASTILLA N., 2006. *Environmental and economic evaluation of greenhouse cooling systems in southern Spain*. Acta Hort., 719:211-214.
- BONTSEMA J., VAN HENTEN E.J., KORNET J.G., HEMMING J., 2006. *On-line schatting van het ventilatievoud van kassen*. Plant Research International, Wageningen, 60 pp.
- CABALLERO P., DE MIGUEL M.D., 2002. *Costes e intensificaciòn en la hortofruticultura Mediterránea*. In: J.M.Garcá (Ed), La Agricultura Mediterránea en el Siglo XXI. Instituto Cajamar, Almería: 222-244.
- CAMPEN J.B., 2005. *Greenhouse design applying CFD for Indonesian conditions*. Acta Horticulturae, 691: in press.
- CAMPEN J.B., BOT G.P.A., 2003. *Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional Computational Fluid Dynamics*. Biosystems Engineering 84(1): 69-77.
- CARVALHO S.M.P., HEUVELINK E., VAN KOOTEN O., 2002. *Effect of day and night temperature on internode and stem length in chrysanthemum: is everything explained by DIF?* Annals of Botany, 90:111-118.
- CBS, NEDERLANDS CENTRAAL BUREAU VOOR DE STATISTIEK, 2006. *Landbouwtellingen 2005*. www.cbs.nl.
- DE KONING A.N.M., 1994. *Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach*. PhD dissertation Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- DE PASCALE S., MAGGIO A., 2005. *Sustainable protected cultivation at a mediterranean climate*. Perspectives and challenges. Acta Hort. 691:29-42.
- DE PASCALE S., MAGGIO A., BARBIERI G., 2006. *La sostenibilità delle colture protette in ambiente Mediterraneo: limiti e*

- prospettive*. Italus Hortus, 13(1): 33-48.
- GIBSON S.I., 2005. *Control of plant development and gene expression by sugar signaling*. Current Opinion in Plant Biology, 8(1): 93-102.
- GOLDSBERRY K.L., 1986. *CO₂ fertilization of carnation and some other flower crops*. In: H.Z. Enoch, B.A. Kimball (eds), Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops II. Physiology, yield and economics. CRC press, Boca Raton: 117-140.
- HECKATHORN S.A., DOWNS C.A., SHARKEY T.D., COLEMAN J.S., 1998. *The small methionine-rich chloroplast heat shock protein protects photosystem II electron transport during heat stress*. Plant Physiology 116: 439-444.
- HEMMING S., WAAIJENBERG D., CAMPEN J.B., IMPRON, BOT G.P.A., 2006. *Development of a greenhouse system for tropical lowland in Indonesia*. Acta Hort. 710: 135-142.
- HEUVELINK E., 1989. *Influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants*. Sci. Hort. 38, 11-22.
- HEUVELINK E., 1999. *Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development*. Annals of Botany 83: 413-422.
- HEUVELINK E., DORAIS M., 2005. *Crop growth and yield*. In: Heuvelink E. (Ed.) Tomatoes. CABI publishing, Wallingford: 85-144.
- HO L.C., HEWITT J.D., 1986. *Fruit development*. In: J. G. Atherton and J. Rudich (Eds.), The Tomato Crop: a Scientific Basis for Improvement. Chapman, Hall, New York: 201-239.
- HOFFMANN S., WAAIJENBERG D., 2002. *Tropical and Subtropical greenhouses - a challenge for new plastic films*. Acta Hort. 578: 163-169.
- IWAHORI S., 1965. *High temperature injuries in tomato IV. Development of normal flower buds and morphological abnormalities of flower buds treated with high temperature*. J. Japanese Society of Horticultural Science 34: 33-41.
- JANSE J., 2003. *Bij nood kan komkommer tijdelijk 'koud'*. Groenten + fruit (19): 28-29.
- KHAYAT E., RAVAD D., ZIESLIN N., 1985. *The effect of various night-temperature regimes on the vegetative growth and fruit production of tomato plants*. Sci. Hort. 27: 9-13.
- KLUEVA N.Y., MAESTRI E., MARMIROLI N., NGUYEN H.T., 2001. *Mechanisms of Thermotolerance in Crops*. In: A.S. Basra (Ed), Crop Responses and Adaptations to Temperature Stress. Haworth Press, Inc., New York: 177-181.
- KOCH K.E., 1996. *Carbohydrate-modulated gene expression in plants*. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 4: 509-540.
- KWIN, KWANTITATIEVE INFORMATIE GLASTUINBOUW, 2006. *Praktijk Onderzoek Plant en Omgeving, Naaldwijk*.
- LOAIZA MEJIA V., 2005. *Preventing crop growth reduction because of heat stress: design and evaluation of cooling methods*. MSc Thesis, Tuinbouwproductieketens, Wageningen Universiteit, 99 pp.
- LUO W., 2006. *Roles and prospects of models in traditional Chinese solar greenhouse crop and climate management*. Acta Hort. 718: 245-253.
- LUO W., STANGHELLINI C., 2005. *Simulation of greenhouse management in the subtropics, Part II: Scenario study for the summer season*. Biosystems Engineering 90(4): 433-441.
- MISTRIOTIS A., ARCIDIACONO C., PICONO P., BOT G.P.A., SCARASCIA-MUGNOZZA G., 1997. *Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low wind speeds*. Agricultural and Forest Meteorology 88: 121-135.
- NEDERHOFF E.M., 1994. *Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops*. PhD thesis, Agricultural University, Wageningen.
- PEET M.M., WILLITS D.H., GARDNER R., 1997. *Response of ovule development and post-pollen production processes in male-*

- sterile tomatoes to chronic, sub-acute high temperature stress. *J. Exp. Bot.* 48: 101-111.
- PEET M.M., SATO S., GARDNER R.G., 1998. *Comparing heat stress effects on male-fertile and male-sterile tomatoes*. *Plant, Cell & Environment* 21: 225-231.
- PÉREZ-PARRA J.J., 2002. *Ventilación natural de invernaderos tipo parral*. PhD Thesis. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba, Spain.
- PICKEN AJF, 1984. *A review of pollination and fruit set in the tomato (Lycopersicon esculentum Mill.)*. *Hort. Sci.* 59: 1-13.
- PLINIUS S.G., 77 A.C.: *Naturalis Historia*. Liber XIX: 19,4 and 23,5. Ajasson de Grandsagne (ed.), 1829-1833. Bibliothéque Latine-Francaise. C.L.F. Panckoucke, Paris.
- PRESSMAN E., PEET M.M., MASON PHARR D., 2002. *The effect of heat stress on tomato pollen characteristics is associated with changes in carbohydrate concentration in the developing anthers*. *Annals of Botany*, 90: 631-636.
- RABOBANK INTERNATIONAL, 2000. *The Mexican Cut Flower Market*. Ministry of Agriculture, Environment and Fisheries, The Hague: 74 pp.
- RIVERO R.M., RUIZ J.M., ROMERO L.M., 2004. *Importance of N source on heat stress tolerance due to the accumulation of proline and quaternary ammonium compounds in tomato plants*. *Plant Biology*, 6: 702-707.
- RYLSKI I., 1979. *Fruit set and development of seeded and seedless tomato fruits under diverse regimes of temperature and pollination*. *J. Am. Soc. Hort.*, 104, 835-838.
- SATO S., PEET M.M., THOMAS J.F., 2000. *Physiological factors limit fruit set of tomato (Lycopersicon esculentum Mill.) under chronic, mild heat stress*. *Plant, Cell and Environment*, 23: 719-726.
- SATO S., PEET M.M., GARDNER R.G., 2001. *Formation of parthenocarpic fruit, undeveloped flowers and aborted flowers in tomato under moderately elevated temperatures*. *Scientia Hort.* 90: 243-254.
- SATO S, PEET M.M., THOMAS J.F., 2002. *Determining critical pre- and post- anthesis periods and physiological processes in Lycopersicon esculentum Mill. exposed to moderately elevated temperatures*. *Journal of Experimental Botany* 53(371): 1187-1195.
- SATO S., PEET M.M., 2005. *Effects of moderately elevated temperatures stress on the timing of pollen release and its germination in tomato (Lycopersicon esculentum Mill.)*. *J. Hort. Sci. & Biotech.* 80(1): 23-28.
- SHENG Y.Y., BAO T.X., 2003. *Variation of CO₂ concentration in solar greenhouse in Northern China*. *J. Appl. Ecol.* 14(3): 354-358.
- SMEETS L., GARRETSEN F., 1986. *Growth analyses of tomato genotypes grown under low night temperatures and low light intensity*. *Euphytica*, 35, 701-715.
- STANGHELLINI C., 2004. *Producción de vegetales en cultivo protegido: manejo óptimo del microclima*. Proceeding 5th Int. Sympo. Hydroponics, Universidad Autonoma de Chihuahua, Mexico, ISBN: 970-748-009-2: 31-39.
- STANGHELLINI C., BUNCE J.A., 1993. *Response of photosynthesis and conductance to light, CO₂, temperature and umidità in tomato plants acclimated to ambient and elevated CO₂*. *Photosynthetica* 29(4): 487-497.
- STANGHELLINI C., KEMPKES F.L.K., KNIES P., 2003. *Enhancing environmental quality in agricultural systems*. *Acta Hort.* 609: 277-283.
- SUGIYAMA T., IWAHORI S., TAKAHASHI K., 1966. *Effect of high temperature on fruit setting of tomato under cover*. *Acta Hort.*, 4: 63-69.
- VAN DER PLOEG A., HEUVELINK E., 2006. *The influence of temperature on growth and development of chrysanthemum cultivars: a review*. *J. Hort. Sci. & Biotech.* 81(2): 174-182.
- VENEMA J. H., POSTHUMUS F., VAN HASSELT P.R., 1999. *Impact of suboptimal temperature on growth, photosynthesis, leaf pigments and carbohydrates of domestic and high-altitude wild Lycopersicon species*. *J. Plant Physiology*, 155: 711-718.
- VROM, DUTCH MINISTRY OF ENVIRONMENT, 2006. <http://www.vrom.nl/pagina.html?id=25017>.