

La ventilazione naturale delle serre

Pietro Picuno

Dipartimento tecnico-economico per la gestione del territorio agricolo-forestale, Università della Basilicata, Potenza

Introduzione

La diffusione nell'impiego delle serre nei Paesi mediterranei sta avvenendo in maniera sempre più rapida (Sirjacob, 1990) in virtù della possibilità, assicurata da condizioni miti e da un elevato irraggiamento solare anche in periodo invernale, di ottenere in maniera economica produzioni fuori stagione; attualmente l'estensione delle colture protette con copertura in materiale plastico nell'area del bacino del Mediterraneo ha raggiunto il valore di circa 130 mila ha (La Malfa e Magnani, 1994), di cui 70 mila ha di serre e tunnel, quasi sempre privi di alcun impianto (Scarascia Mugnozza, 1995).

Uno dei principali fattori limitanti la diffusione della protezione delle coltivazioni in tali zone, tuttavia, è costituito dalle elevate temperature che si possono raggiungere in ambiente confinato, non solo nella stagione estiva ma anche in diverse giornate del periodo invernale (Sevila *et al.*, 1992): in assenza di impianti per la ventilazione forzata o il raffrescamento artificiale, le uniche possibilità per una riduzione delle temperature interne alle serre sono affidate agli interventi sulle aperture, consentendo un ricambio d'aria per ventilazione naturale, con effetti benefici anche sui tenori di umidità relativa e di concentrazione di anidride carbonica, le cui escursioni possono così venire limitate (Scarascia Mugnozza, 1995).

Attesa quindi la progressiva estensione nell'uso della ventilazione naturale per il controllo del microclima nelle serre, resa possibile da ragioni di convenienza economica legate ai minori costi ottenuti sia nella fase di investi-

mento che, soprattutto, in quella di gestione, appare necessaria una più approfondita conoscenza dei meccanismi che ne costituiscono il fondamento, in modo da poter:

- analizzare l'efficienza nella distribuzione dell'aria all'interno della serra per diverse configurazioni geometriche e per differenti condizioni esterne (temperatura dell'aria, velocità e direzione del vento), in modo da ottenere condizioni termo-igrometriche il più possibile omogenee all'interno dell'ambiente confinato (Sase e Nara, 1985);

- definire relazioni da utilizzare per il calcolo della portata che siano il più possibile semplificate, in modo da poterle non solo impiegare in fase di progettazione ma anche implementare negli algoritmi di regolazione e controllo di eventuali impianti per l'apertura automatizzata delle sportellature di ventilazione.

Nel presente lavoro, pertanto, sono stati raccolti ed approfonditi i risultati dei principali studi condotti sull'argomento, in modo da poterli comparare tra loro e ricavare, di conseguenza, indicazioni utili circa le soluzioni impiantistiche che garantiscono una maggiore efficienza nel ricambio dell'aria nonché per poter stabilire, partendo dalla teoria generale di base, formulazioni semplificate impiegabili per il calcolo della portata di ventilazione naturale.

Soluzioni tecnologiche per la ventilazione naturale

La ventilazione naturale, ossia il ricambio dell'aria senza l'intervento di mezzi artificiali, si ottiene grazie alla

circolazione dell'aria all'interno dell'ambiente confinato per effetto delle differenze di pressione esistenti tra diverse aperture praticate lungo la sua superficie esterna; tali differenze di pressione, dovute principalmente all'effetto di differenze di temperatura tra i diversi strati dell'aria e all'effetto del vento che spirava all'esterno dell'ambiente, possono venire particolarmente esaltate attraverso la realizzazione di aperture nella superficie laterale a differenti altezze.

Nelle serre, in particolare, la ventilazione naturale viene solitamente ottenuta mediante la realizzazione di sportellature disposte sui lati o sul tetto, ovvero in entrambe tali posizioni. L'apertura delle sportellature disposte sia sui lati che sul colmo consente il ricambio dell'aria in virtù dell'"effetto camino", originato dalla differenza di temperatura tra i diversi strati dell'aria (Tesi, 1992); tale soluzione, che consente un incremento di efficienza nel ricambio dell'aria, costituisce una delle ragioni alla base delle prescrizioni contenute nella Normativa italiana (Uni, 1971), secondo le quali le serre devono essere dotate di aperture di aerazione aventi i valori minimi di superficie, espressi in termini percentuali rispetto alla superficie coperta della serra, riportati in tabella 1 in funzione della regione italiana in cui la serra è ubicata.

Tale norma prevede inoltre che, in casi particolari e previo accordo tra committente e fornitore, le aperture laterali possono venire soppresse a condizione di maggiorare adeguatamente la percentuale di aerazione al colmo.

Il ricorso alla ventilazione naturale, diffuso in passato in fabbricati agricoli

RICERCA E SPERIMENTAZIONE

Tab. 1 - Percentuali minime di aperture per l'aerazione rispetto alla superficie di base previste dalla Normativa UNI 6781-71.

Regioni	Aperture di aerazione	
	Di tetto (percentuale minima)	Perimetrali (percentuale minima)
Settentrionali	16%	2%
Centrali	24%	3%
Meridionali e insulari	32%	4%

e zootecnici di non elevato livello tecnologico, si sta affermando di recente anche in quelli di maggiore pregio. I sistemi di ventilazione naturale sono infatti caratterizzati solitamente da un minore consumo di energia e più basse esigenze di manutenzione rispetto ai sistemi meccanici.

Le difficoltà connesse ad un preciso controllo del flusso d'aria, peraltro, tipiche di una ventilazione in cui il movimento dell'aria non è dovuto all'intervento di organi meccanici ma risulta legato soltanto a fattori naturali, possono essere superate in virtù dell'adozione di microprocessori per il controllo e il monitoraggio continuo accoppiati a sensori di pressione differenziale; queste apparecchiature sono diventate all'attualità tanto accurate quanto ormai economiche (Brockett e Albright, 1987), e consentono una esatta e istantanea definizione puntuale del campo fluidodinamico che caratterizza la ventilazione rendendo pertanto possibile la quantificazione del flusso d'aria.

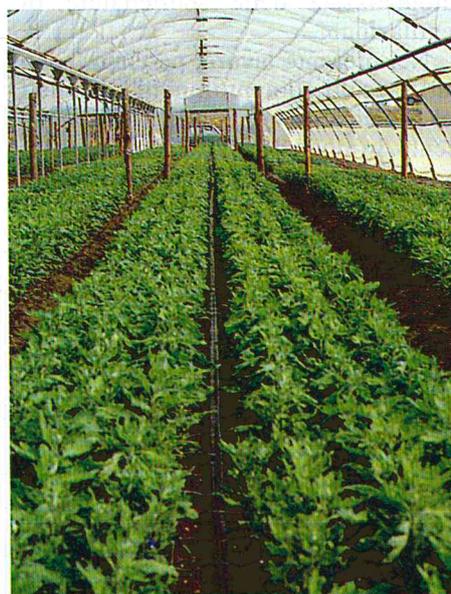
Al fine di consentire anche una regolazione automatizzata dell'impianto di ventilazione, tuttavia, resta la necessità di implementare, negli algoritmi di controllo, modelli analitici capaci di effettuare il calcolo della portata di ventilazione naturale in funzione dei valori dei parametri climatici esterni ed interni alla serra e dello stato degli impianti; tali modelli è opportuno che siano i più semplici possibile (Sase e Nara, 1985), in modo da consentire, attraverso rapide operazioni di calcolo, un veloce adattamento al mutare delle condizioni esterne. Modelli matematici sofisticati non sarebbero oltretutto implementabili negli algoritmi di controllo non solo per la loro complessità, ma anche per il rischio di una possibile incapacità di convergere nella ricerca della soluzione, nel momento in cui le condizioni da porre all'inizio del calcolo non doves-

sero venire definite con precisione (Boulard e Baille, 1993).

Fattori che influenzano la ventilazione naturale

Negli studi condotti con la finalità di analizzare i meccanismi che governano la ventilazione naturale e di ottenere relazioni esprimenti la portata di ventilazione in maniera semplice ed accurata sono state anche ricavate considerazioni generali circa l'influenza che i diversi fattori, ossia velocità e direzione del vento e differenza di temperatura, hanno sulla ventilazione naturale:

- Nelle relazioni proposte compare solitamente il modulo del vettore velocità, ma non è parimenti riportata una dipendenza dalla direzione che il vento assume rispetto all'orientamento della serra ed alla tipologia delle aperture; su tale aspetto sono concordi molti Autori (Boulard e Draoui, 1995; Boulard *et al.*, 1996; Fernandez e Bailey, 1992; Feuilloley *et al.*, 1994; Papadakis *et al.*, 1996) che hanno constatato nei loro esperimenti una influenza scarsa o addirittura nulla di tale parametro sul va-



lore della portata di ventilazione. In qualche altro caso, invece, (de Jong e Bot, 1992a) è stato rilevato che non vi era influenza della direzione del vento sulla portata di ventilazione solo per determinati valori del coefficiente di forma delle sportellature, ossia del rapporto larghezza/altezza, mentre per altri valori si notava una dipendenza del flusso d'aria di ventilazione dalla direzione del vento, dovuta probabilmente ad una differente influenza sulla turbolenza generata localmente dall'apertura delle finestre;

- circa l'effetto combinato dei due principali fattori che influiscono sulla ventilazione naturale, ossia la velocità del vento e la differenza di temperatura tra interno ed esterno, è stato osservato che vi è un valore "soglia" di v per cui diventa trascurabile l'influenza della differenza di temperatura sulla portata di ventilazione; al proposito, Papadakis *et al.*, (1996) individuano tale valore in $1,8 \text{ m s}^{-1}$, mentre Brockett e Albright (1987) riportano, tra gli altri, il criterio di valutare il rapporto $v^2/\Delta T$: nel caso in cui esso risulta maggiore di 0,22 (avendo espresso v in m s^{-1} e ΔT in $^{\circ}\text{C}$), la componente di ventilazione dovuta al vento diventa predominante rispetto a quella dovuta alla convezione termica. È comunque una affermazione condivisa da tutti gli Autori quella che individua nell'intervallo tra 1 e 2 m s^{-1} tale valore soglia (Boulard *et al.*, 1996; de Jong e Bot, 1992; Feuilloley *et al.*, 1994; Fernández e Bailey, 1992; Papadakis *et al.*, 1996).

Per quanto riguarda poi l'analisi di soluzioni impiantistiche in grado di assicurare una migliore efficienza nella distribuzione dell'aria di ventilazione, alcuni autori hanno condotto specifiche prove su serre sperimentali, in modo da poter ricavare indicazioni in merito. In particolare Papadakis *et al.*, (1996), mediante prove condotte su serre ubicate nella Francia meridionale e ventilate attraverso aperture continue praticate sul colmo e sui lati, hanno potuto osservare come in ogni caso la ventilazione attraverso le sole aperture laterali è molto meno efficiente di quella che ha luogo quando sono aperte le sole sportellature di colmo ovvero sia quelle di colmo che quelle laterali. Gli stessi autori hanno potuto ulteriormente rilevare, dalle prove sperimentali effettuate con bassi va-

RICERCA E SPERIMENTAZIONE

lori della velocità del vento, come la prevalenza dell'“effetto camino”, dovuto alla componente di ventilazione legata alla convezione termica, fa sì da rendere più efficiente la configurazione con sportellature di ventilazione aperte sia al colmo che sui lati, mentre all'aumentare della velocità del vento la sola ventilazione attraverso le aperture di colmo risulta più efficiente.

Altri autori hanno appuntato la loro attenzione sull'analisi dell'influenza che ha sulla ventilazione la geometria delle finestrate; in particolare, de Jong e Bot (1992b) hanno esaminato come la forma e la posizione delle finestre incidono sulla distribuzione e la fluttuazione dei valori della pressione nei punti circostanti le aperture, dando così luogo a differenti portate di ventilazione a parità di tutti gli altri fattori; essi hanno così potuto concludere che il parametro più importante atto a definire il comportamento della finestra nei riguardi della ventilazione sia, per aperture di forma rettangolare, il rapporto larghezza/altezza.

Il calcolo della portata di ventilazione

Espressioni analitiche proposte per il calcolo

Il movimento dell'aria all'interno di ambienti confinati è, in generale, governato da un sistema di equazioni differenziali (Picuno e Godosi, 1995) che esprimono analiticamente i principi di conservazione della massa, del momento, dell'energia, e definiscono le condizioni del moto (laminare o turbolento) e l'eventuale trasporto di massa di altri gas contenuti nell'aria. Una volta definite le condizioni al contorno del dominio esaminato, il sistema di equazioni differenziali anzidette, alle derivate parziali, può venire risolto, ottenendo così in ogni punto i valori di tutte le variabili (pressione, temperatura, componenti del vettore velocità, ecc.) necessarie per definire il movimento dell'aria e, di conseguenza, le caratteristiche della ventilazione.

La soluzione rigorosa di tali equazioni, pur resa oggi più agevole in virtù del notevole aumento raggiunto nella velocità e potenza dei calcolatori elettronici e nella diffusione dei pro-

Tab. 2 - Notazioni impiegate nel testo.

Notazione	Significato	Unità di misura
Q	Portata di ventilazione	$m^3 s^{-1}$
Q_v	Portata di ventilazione dovuta al vento	$m^3 s^{-1}$
Q_T	Portata di ventilazione dovuta alla differenza di temperatura	$m^3 s^{-1}$
R	Numero di rinnovi orari del volume confinato	h^{-1}
S	Rapporto superficie aperture/superficie del terreno	%
A_o	Area della copertura	m^2
A	Area delle aperture di ventilazione	m^2
A_t	Area totale	m^2
H	Altezza della sportellatura di ventilazione	m
α	Angolo di apertura della sportellatura	rad
$G(\alpha)$	Coefficiente di ventilazione funzione dell'angolo α di apertura della sportellatura	adimens.
K_D	Coefficiente di scarico	adimens.
$K_f(\alpha)$	Coefficiente di fluttuazione della pressione	adimens.
F_o	Fattore di frizione per un'apertura rettangolare	adimens.
$f_w(\alpha)$	Coefficiente di forma della finestra	adimens.
v	Velocità del vento	$m s^{-1}$
ρ_a	Densità dell'aria ambiente	$kg m^{-3}$
ρ_o	Densità dell'aria in corrispondenza dell'apertura	$kg m^{-3}$
$\Delta T_{i,e}$	Differenza di temperatura tra esterno ed interno	K
f_v	Coefficiente moltiplicatore di v nella relazione (I)	adimens.
f_T	Coefficiente moltiplicatore di ΔT nella relazione (I)	$m s^{-1} K^{-1/2}$
g	Accelerazione di gravità	$m s^{-2}$
h	Altezza del “piano neutro”	m

grammi solutori di equazioni differenziali impieganti metodi alle differenze finite, resta peraltro abbastanza complessa da ottenere e, quindi, non impiegabile al fine di definire il valore della portata di ventilazione da inserire in un algoritmo di controllo del sistema di ventilazione naturale, il quale (Sase e Nara, 1985) prevede tempi di calcolo ridotti e conseguente intervento rapido.

Anche allo scopo, inoltre, di ottenere i valori di portata di ventilazione per un calcolo di progettazione dell'impianto, una definizione esatta e puntuale di tutti i parametri termofluidodinamici coinvolti può non essere necessa-

ria; a tale scopo appare molto più utile la ricerca di relazioni semplificate, che consentano una rapida definizione del valore della portata di ventilazione in funzione delle principali caratteristiche geometriche delle aperture di ventilazione e delle condizioni climatiche interne ed esterne alla serra, ossia la velocità del vento e la differenza di temperatura dell'aria tra esterno ed interno.

Sulla base di tale considerazione, il lavoro di ricerca svolto sinora dagli studiosi del settore può venire ricondotto a tre differenti approcci:

– ricerca di una relazione esprimente la portata di ventilazione nella forma

RICERCA E SPERIMENTAZIONE

“quadratica” in funzione della velocità del vento e della differenza di temperatura tra interno ed esterno;

– ricerca di una relazione esprimente la portata di ventilazione in funzione lineare della sola velocità del vento e di un “coefficiente di ventilazione”;

– ricerca di una relazione esprimente la portata di ventilazione attraverso l’individuazione dell’altezza del “piano neutro”.

Relazioni di tipo “quadratico”

La relazione esprimente il valore della portata di ventilazione in funzione della velocità del vento e della differenza di temperatura tra interno ed esterno della serra può essere scritta generalmente nella forma:

$$Q = A_0 \sqrt{f_v^2 v^2 + f_T^2 \Delta T_{i,e}} \quad (I)$$

ove i simboli hanno il significato riportato in tabella 2.

Essa deriva dal più generale criterio di quadratura suggerito dall’Ashrae (Ashrae, 1985), secondo cui

$$Q = \sqrt{Q_v^2 + Q_T^2}$$

Tale relazione è stata impiegata da diversi Autori che hanno studiato i meccanismi di ventilazione, applicandola alle singole situazioni sperimentali e ricavandone i valori dei coefficienti f_v e f_T che meglio si adattavano ai risultati delle prove sperimentali da essi condotte nelle differenti condizioni.

In particolare, Fernández e Bailey (1992), attraverso prove condotte su una serra sperimentale di tipo Venlo ubicata in Inghilterra, hanno ricavato i

valori dei coefficienti f_v e f_T della (I) riportati in tabella 3.

Tali valori sono stati ricavati dagli Autori sostituendo nella (I) al valore A_0 della superficie della copertura l’espressione:

$$A_t = 0,000545 A_0 + 0,00588 A \alpha e^{-\alpha/50}$$

Come si può osservare dalla tabella 3, i valori di f_v e f_T rimangono pressappoco costanti per differenti angoli di apertura della sportellatura di ventilazione, eccezion fatta per il caso di completa chiusura della serra ($\alpha = 0^\circ$) in cui il ricambio d’aria avviene per infiltrazione attraverso i giunti.

Papadakis *et al.*, (1996) attraverso prove condotte in tunnel sperimentali, sono pervenuti a determinare i valori dei coefficienti della (I) riportati nella tabella 4. Tali risultati sono stati ottenuti attraverso un procedimento di stima non lineare operato sulla base di un numero totale di 99 prove sperimentali, condotte per una parte ventilando solo attraverso le aperture laterali, per un’altra parte soltanto attraverso le aperture di colmo e per un’ultima parte tenendo aperte entrambe le finestrate di colmo e laterali.

Feuilleley *et al.*, (1994), per le tipologie di serre più diffuse in Francia meridionale, hanno proposto una relazione analoga alla (I), ove viene espresso il numero di rinnovi orari nella forma:

$$R = a S \sqrt{\Delta T} + b S v + c \quad (II)$$

ove i valori dei coefficienti a , b , c , ricavati empiricamente dagli autori, sono riportati nella tabella 5 per due differenti tipologie di serre esaminate e per

diverse classi di velocità del vento, in assenza di vegetazione all’interno della serra, mentre gli altri simboli hanno il significato riportato in tabella 2. Come si può osservare dalla tabella 5, i valori dei coefficienti a , b , c sono molto diversi a seconda della tipologia di serra esaminata, il che non consente di poter ritenere generalizzabile l’impiego della relazione (II) se non limitatamente alle tipologie di serre esaminate dagli autori.

Altri autori hanno approfondito l’esame dei coefficienti f_v e f_T della (I): in particolare, Boulard e Baille (1995) hanno ricavato per f_T l’espressione:

$$f_T = \sqrt{\frac{2g H}{T} \frac{H}{4}}$$

avendo posto nella (I) $A_0 = A K_D/2$.

Relazioni comprendenti il “coefficiente di ventilazione”

Le relazioni comprendenti il “coefficiente di ventilazione” sono solitamente espresse nella forma

$$Q = G(\alpha) v A \quad (III)$$

e derivano sostanzialmente da quelle del tipo (I): infatti, mentre la relazione (I) esprime la dipendenza della portata di ventilazione dalla differenza di temperatura tra interno ed esterno e dalla velocità del vento, la (III) si limita alla dipendenza da quest’ultimo parametro ed è pertanto da assumere nel momento in cui il salto termico tra aria esterna ed interna diventa ininfluenza rispetto alla velocità del vento cosa che avviene, come innanzi citato, quando la velocità del vento, supera il valore “soglia”.

In tal caso, pertanto, trascurando $\Delta T_{i,e}$, la relazione (I) si riduce a:

$$Q = A_0 f_v v \quad (IV)$$

che diventa la (III), avendo posto

$$G(\alpha) = A_0 f_v / A$$

Il primo tentativo di definire una relazione avente una struttura simile a quella della (III) risale al 1959, quando Whittle e Lawrence, mediante prove condotte con l’uso di traccianti gassosi, effettuarono una serie di misure del tasso di rinnovo orario dell’aria in piccole serre sperimentali in vetro in cui le

Tab. 3 - Valori dei coefficienti della (I) secondo Fernández e Bailey (1992) per differenti valori dell’angolo α di apertura delle sportellature di ventilazione.

Aperture di ventilazione		f_v	f_T
Percentuale (%)	Angolo α (gradi)		
0	0	0,215	0,143
10	3,9	0,184	0,163
20	7,8	0,182	0,163
30	11,6	0,182	0,163
40	15,4	0,182	0,164

Tab. 4 - Valori dei coefficienti della (I) secondo Papadakis *et al.* (1996).

Coefficiente	Valore medio	Errore standard	Coefficiente di correlazione
f_v	0,114	0,004	0,825
f_T	0,090	0,011	0,825

aperture vennero tenute completamente chiuse e quindi soggette solamente ad un ricambio d'aria causato dall'imperfetta tenuta.

I risultati ottenuti dagli Autori evidenziarono in tale situazione una marcata dipendenza del tasso di rinnovo orario dalla velocità del vento mentre pressoché alcuna dipendenza venne osservata in funzione della differenza di temperatura; attraverso un procedimento statistico di trattamento dei valori sperimentali, gli Autori pervennero ad una relazione del tipo

$$R = m v + n \quad (V)$$

ove m e n erano opportuni coefficienti sperimentali i cui valori, ottenuti considerando R espresso in h^{-1} e v in mph , risultavano rispettivamente compresi negli intervalli $[0,08 \div 0,382]$ e $[0,24 \div 0,40]$.

La relazione (V), ricavata nel caso di serra chiusa e ventilazione per sola imperfetta tenuta, ha una struttura analoga alla (III), ma se ne discosta lievemente poiché i parametri assumono, com'è ovvio, valori differenti rispetto al caso di un regolare flusso d'aria che transita attraverso aperture di ventilazione.

Boulard e Baille (1993), realizzando un modello matematico descrittivo del microclima interno delle serre, per tenere conto della ventilazione ne hanno quantificato la portata mediante una relazione analoga alla (III), in cui

$$Q = \frac{1}{2} K_D \sqrt{f_v} A v$$

Un approccio sistematico al problema della ventilazione naturale nelle serre, con un'analisi puntuale dei meccanismi che la regolano e degli effetti che le soluzioni impiantistiche e le condizioni esterne possono determinare, è stato sviluppato da Bot (Bot, 1983) con riferimento alla ventilazione di una serra del tipo Venlo. Nel suo lavoro, oltre ad essere analizzati i processi fisici che influiscono sul microclima delle serre, sono state in particolare esaminate le caratteristiche del flusso d'aria attraverso una singola apertura. Dalle prove, condotte mettendo in relazione il flusso generato da una specifica differenza di pressione sulla finestra con le sue dimensioni e con il suo angolo di apertura, attraverso l'introduzione di opportu-

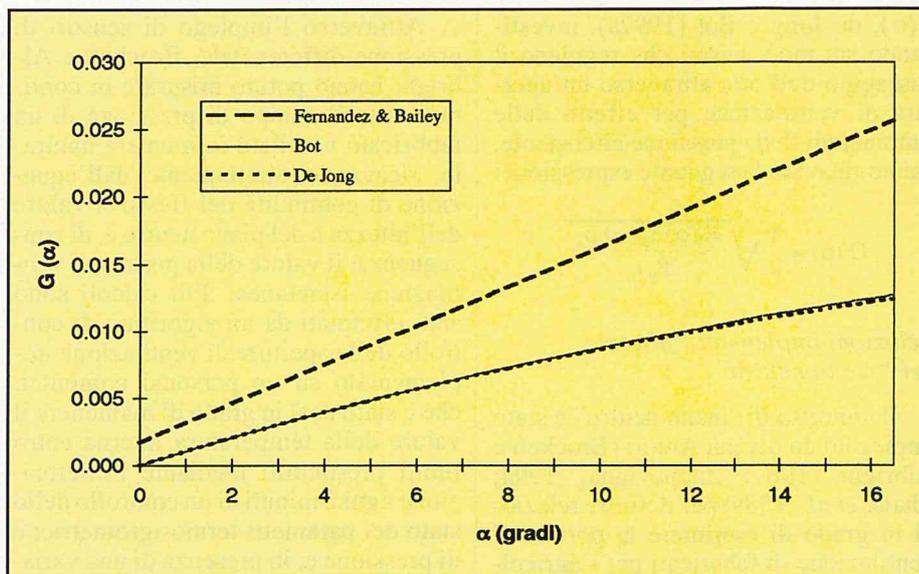


Figura 1 - Valori del coefficiente di ventilazione $G(\alpha)$ in funzione dell'angolo di apertura delle sportellature.

Tab. 5 - Valori dei coefficienti a, b, c della (II) secondo Feuilloley *et al.*, (1994) per differenti tipologie di serre e per diverse classi di velocità del vento.

Tipologia di serra	"Richel"			"BN"		
	a	b	c	a	b	c
Classe di vento						
$v < 1 \text{ m s}^{-1}$	0,71	-0,88	1,84	-0,055	1,69	7,84
$1 \text{ m s}^{-1} < v < 2 \text{ m s}^{-1}$	0,31	0,69	8,46	0,096	0,77	16,2
$v > 2 \text{ m s}^{-1}$	0,45	0,25	9,58	0,31	0,27	21,6

ni coefficienti di forma, è stata ricavata una espressione della portata di ventilazione nella forma (III), ove per il coefficiente di ventilazione è stata proposta l'espressione:

$$G(\alpha) = 1,07 \cdot 10^{-3} \alpha e^{-\alpha/50} \quad (VI)$$

Tale relazione sintetizza lo scostamento da una relazione semplicemente lineare tra flusso di ventilazione ed angolo di apertura, attraverso l'introduzione di un fattore esponenziale che esprime come con l'aumentare dell'angolo α di apertura diminuisca l'efficienza complessiva della ventilazione; infatti, con l'aumentare di α diminuisce il termine $e^{-\alpha/50}$ e pertanto $G(\alpha)$, e con esso la portata di ventilazione Q , aumentano in maniera progressivamente minore rispetto all'incremento dell'angolo α .

De Jong (1990), attraverso prove condotte sulla stessa serra di tipo Venlo oggetto degli esperimenti di Bot sopra citati, ha successivamente ricavato un'analoga relazione:

$$G(\alpha) = 2,29 \cdot 10^{-2} (1 - e^{-\alpha/21,1}) \quad (VII)$$

Anche Fernández e Bailey (1992), infine, avendo rilevato nei loro esperimenti come il ruolo svolto dalla velocità del vento risultava predominante sugli altri fattori per valori superiori a 1 m s^{-1} indipendentemente dall'angolo di apertura dello sportello di ventilazione, hanno concluso come la differenza di temperatura tra interno ed esterno esercita una influenza molto limitata, al punto da poterla trascurare ed esprimere il flusso di ventilazione mediante la relazione (III). Pertanto, essi hanno proposto per $G(\alpha)$ la seguente espressione:

$$G(\alpha) = 1,71 \cdot 10^{-3} + 8,31 \cdot 10^{-2} \alpha \quad (VIII)$$

dalla quale si può desumere come, a differenza dalle relazioni sopra riportate, il valore di $G(\alpha)$, e quindi in virtù della (III) la portata di ventilazione, cresce in maniera esattamente lineare con l'aumentare del valore dell'angolo di apertura. Un raffronto tra le tre relazioni (VI), (VII) e (VIII), proposte per il coefficiente $G(\alpha)$, è rappresentato in figura 1.

Quanto ai fattori che influiscono sul valore del coefficiente di ventilazione

$G(\alpha)$, de Jong e Bot (1992a), investigando sui meccanismi che regolano il passaggio dell'aria attraverso un'apertura di ventilazione per effetto delle fluttuazioni della pressione circostante, hanno ricavato la seguente espressione:

$$G(\alpha) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_f(\alpha) f_w(\alpha) \rho_a}{F_0 r_0}}$$

Relazioni impieganti l'altezza del "piano neutro"

Il concetto di "piano neutro" è stato impiegato da diversi Autori (Brockett e Albright, 1987; Zappavigna, 1994; Zhang *et al.*, 1989) per definire relazioni in grado di esprimere la portata di ventilazione di fabbricati per l'agricoltura e la zootecnia.

In sintesi, il piano neutro è il piano orizzontale lungo il quale si fanno equilibrio le pressioni esterne ed interne all'ambiente confinato, che invece assumono valori diversi al di fuori, generando così il movimento dell'aria dall'esterno verso l'interno o viceversa, a seconda di dove risulta maggiore il valore della pressione (Zappavigna, 1994).

Attraverso l'impiego di sensori di pressione differenziale, Brockett e Albright hanno potuto misurare in continuo tutto il campo di pressione di un fabbricato ventilato in maniera naturale, ricavando direttamente dall'equazione di continuità del flusso il valore dell'altezza h del piano neutro e, di conseguenza, il valore della portata di ventilazione istantanea. Tali calcoli sono stati effettuati da un algoritmo di controllo delle aperture di ventilazione implementato su un personal computer, che è stato così in grado di mantenere il valore della temperatura interna entro limiti prestabiliti mediante l'effettuazione ogni 2 minuti di un controllo dello stato dei parametri termo-igrometrici e di pressione e, in presenza di una variazione delle condizioni ambiente, intervenendo per variare l'apertura delle finestre di ventilazione.

Zhang *et al.* (1989), infine, hanno proposto un modello matematico in grado di calcolare la temperatura interna e la portata di ventilazione in fabbricati per la zootecnia ventilati naturalmente a causa dell'effetto combinato del vento e della convezione termica; tale model-

lo, basato sulla conoscenza dei valori della temperatura esterna, velocità e direzione del vento, geometria della serra e delle aperture di ventilazione, ha consentito il calcolo della portata di ventilazione attraverso la determinazione analitica dell'altezza del piano neutro.

Risultati e discussione

La ventilazione naturale conseguente ad un corretto proporzionamento delle aperture di ventilazione rappresenta una scelta economica e razionale per il controllo del microclima interno delle serre ed il contenimento delle escursioni dei valori di temperatura, umidità relativa e concentrazione di CO_2 ; da numerose prove svolte si evince l'importanza di adottare negli apprestamenti protetti, particolarmente nel caso di serre multiple, superfici di ventilazione adeguate, disposte sia lungo le pareti laterali sia sulla copertura all'altezza della linea di colmo.

Sulla base degli studi innanzi riferiti e delle relazioni analitiche elaborate dai diversi Autori al fine del calcolo della portata per un appropriato dimensionamento delle finestre, si possono ricavare le seguenti considerazioni:

per la progettazione dell'impianto di ventilazione di una serra, la relazione (I) appare la più idonea per una verifica delle portate di ventilazione conseguente ad un precedente dimensionamento delle sportellature di ventilazione sulla base delle prescrizioni contenute nell'apposita Normativa tecnica italiana (Uni, 1971). La relazione (I) può venire impiegata assumendo più probabili combinazioni dei valori di v e ΔT , funzione della località in cui la serra viene realizzata, e dei valori di f_v e f_T per i quali, in via di prima approssimazione, sembrano più confacenti allo scopo i valori proposti da Papadakis *et al.* (1996), riportati in tabella 4, poiché si riferiscono a serre in plastica ubicate in zone mediterranee e, pertanto, più affini alla realtà italiana rispetto alla serra di tipo Venlo oggetto delle sperimentazioni condotte in Inghilterra da Fernández e Bailey (1992). Allo scopo di consentire un rapido utilizzo della relazione (I), essa è stata diagrammata nella figura 2 calcolata sia secondo Fernández e Bailey che secondo Papadakis *et al.*;

– di notevole importanza appare,

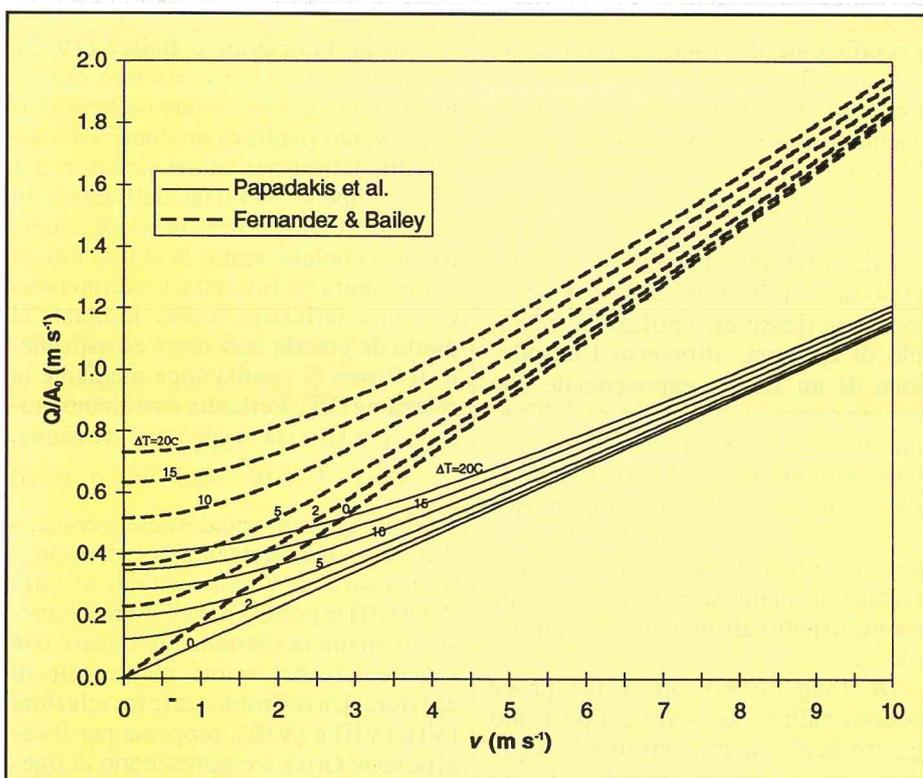


Figura 2 - Abaco per la determinazione della portata di ventilazione per unità di area della copertura in funzione della velocità del vento v e per diversi valori della differenza di temperatura ΔT tra interno ed esterno della serra.

inoltre, il ruolo che può essere svolto dalla ricerca scientifica nell'analisi e definizione di più esatti valori dei coefficienti che compaiono nelle relazioni (I) e (III) e nell'esame delle relazioni che legano i valori da loro assunti alla geometria della serra e degli impianti di ventilazione. Tale ricerca può venire condotta secondo due tipi di approccio: il primo, di tipo sperimentale, volto a definire i valori delle grandezze in gioco attraverso prove condotte su serre campione; il secondo, di tipo numerico, inteso a simulare la realtà attraverso modelli matematici basati sulla soluzione delle equazioni che governano i processi fisici. Solo da un impiego integrato delle due metodologie, tuttavia, possono ricavarsi indicazioni tanto dettagliate quanto realistiche;

– anche al fine dell'implementazione in qualità di algoritmi per l'eventuale controllo automatizzato degli impianti, infine, le relazioni innanzi riportate appaiono dotate di un'adeguata semplicità che, insieme ad una sufficiente precisione, le rende atte a definire correttamente il processo di ventilazione naturale nelle serre.

Conclusioni

La ventilazione è uno dei principali fattori che influenzano il bilancio di massa e di energia delle serre; nonostante la sua rilevante importanza, tuttavia, non esistono all'attualità modelli matematici in grado di descrivere analiticamente i processi fisici che determinano il flusso d'aria attraverso le aperture delle serre con un adeguato grado di accuratezza conservando, al contempo, una struttura sufficientemente semplice da poter essere implementati negli algoritmi di controllo automatizzato.

Dall'esame dei contributi che i diversi ricercatori hanno proposto, si può desumere come la tendenza è in generale quella di esprimere la dipendenza della portata di ventilazione dalla differenza di temperatura tra interno ed esterno nonché dalla velocità del vento, ma non dalla sua direzione.

Gli studi più recenti, tuttavia, stanno evolvendo verso un'analisi più dettagliata delle componenti del vettore velocità in modo da tenere in conto l'effetto che le turbolenze hanno sul valore complessivo del flusso d'aria che tran-

sita attraverso le aperture, nonché verso la definizione dell'influenza esercitata dalla forma e dalla disposizione delle aperture di ventilazione, per diverse tipologie di serre e in funzione della posizione geografica in cui sono ubicate.

RIASSUNTO

La ventilazione naturale, cui spesso si fa ricorso particolarmente nel caso di serre ubicate in zone mediterranee, è legata all'azione del vento e della differenza di temperatura tra interno ed esterno dell'apprestamento protetto. Da un punto di vista analitico, la portata di ventilazione è linearmente proporzionale al modulo della velocità del vento che, a partire da valori di $1-2 \text{ m s}^{-1}$, risulta predominante rispetto alla convezione termica, mentre non è dipendente dalla sua direzione. Sulla base dei principali studi condotti in merito, sono state riassunte le considerazioni relative alle soluzioni impiantistiche che danno un'efficiente ventilazione nelle serre e disegnati abachi impiegabili per il calcolo della portata.

SUMMARY

GREENHOUSE NATURAL VENTILATION: AIRFLOW RATE CALCULATION AND PLANT EFFICIENCY

Natural ventilation, often used in Mediterranean greenhouses, is due to wind and thermal difference between greenhouse inside and outside. Ventilation airflow is linearly dependent with wind speed, that prevails over thermal convection for low values ($1-2 \text{ ms}^{-1}$) and is independent of its direction. On the basis of the main studies conducted about this subject, the main considerations relating to more efficient plant solutions are summarized, and diagrams for airflow calculation are drawn.

BIBLIOGRAFIA

- Ashrae (1985) - *Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers, Atlanta, USA.
- Bot G.P.A. (1983) - *Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model*. Thesis Agric. University, Wageningen, The Netherlands.
- Boulard T. e Baille A. (1993) - *A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling*. Agric. For. Meteorol., 65: 145-157.
- Boulard T. e Baille A. (1995) - *Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents*. J. Agric. Engng. Res., 61: 37-48.
- Boulard T. e Draoui B. (1995) - *Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis*. J. Agric. Engng. Res., 61: 27-36.
- Boulard T., Meneses J.F., Mermier M. e Papadakis G. (1996) - *The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses*. In corso di stampa su: Agric. For. Meteorol.
- Brockett B.L. e Albright L.D. (1987) - *Natural ventilation in single airspace buildings*. J. Agric. Engng. Res., 37: 141-154.
- de Jong T. (1990) - *Natural ventilation of large multi-span greenhouses*. Thesis Agric. University, Wageningen, The Netherlands.
- de Jong T. e Bot G.P.A. (1992a) - *Air exchange caused by wind effects through (window) openings distributed evenly on a quasi-infinite surface*. Energy and buildings, 19: 93-103.
- de Jong T. e Bot G.P.A. (1992b) - *Flow characteristics of one-side-mounted windows*. Energy and buildings, 19: 109-112.
- Fernández J.E. e Bailey B.J. (1992) - *Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates*. Agric. For. Meteorol., 58: 229-245.
- Feuilloley P., Mekikdjian C., Lagier J. e Yard C. (1994) - *Natural aeration of plastic tunnels in mediterranean area*. Cemagref Internal Report.
- La Malfa G. e Magnani G. (1994) - *I materiali plastici per le colture protette*. Colture Protette, 23, (11): 43-48.
- Papadakis G., Mermier M., Meneses J.F. e Boulard T. (1996) - *Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings*. In corso di stampa su: J. Agric. Engng. Res.
- Picuno P. e Godosi Z. (1995) - *La verifica dell'efficienza dell'impianto di ventilazione con l'ausilio dell'analisi fluidodinamica*. Rivista di Suinicoltura, 36, (3): 71-80.
- Sase S. e Nara M. (1985) - *A control algorithm for natural ventilation based on wind tunnel testing*. Acta Horticulturae, 174: 75-80.
- Scarascia Mugnozza G. (1995) - *Quali strutture per il serricoltore italiano*. Colture Protette, 24, (10): 61-65.
- Sevila F., Feuilloley P. e Mekikdjian (1992) - *La ventilación natural de los invernaderos en las áreas mediterráneas*. Atti del XII Congresso Internazionale dei Plastici in Agricoltura, Granada (Spagna), 3-8 Maggio 1992: B32-41.
- Sirjacobs M. (1990) - *Critères agro-climatiques utiles à l'identification de mésoclimats appropriés aux cultures arbitrées en régions méditerranéennes*. Plasticulture, 85, (1): 47-54.
- Tesi R. (1992) - *Mezzi di protezione per l'ortofloro-frutticoltura ed il vivaismo*. Edagricole, Bologna: 129-131.
- Whittle R.M. e Lawrence W.J.C. (1960) - *The climatology of glasshouses*. II. Ventilation. J. Agric. Engng. Res., 5: 36-41.
- Zappavigna P. (1994) - *La ventilazione degli edifici zootecnici per convezione termica: teoria generale e metodi di calcolo semplificati*. Rivista di Ingegneria Agraria, 25, (2): 91-101.
- Zhang J.S., Janni K.A. e Jacobson L.D. (1989) - *Modeling natural ventilation induced by combined thermal buoyancy and wind*. Transactions of the ASAE, 32, (6): 2165-2174.
- UNI 6781-71 (1971) - *Serre a struttura metallica. Istruzioni per l'impostazione generale del progetto strutturale e per il calcolo*. UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano. □

Informazioni e norme per i collaboratori

Di seguito si riportano alcune indicazioni per i collaboratori che volessero proporre articoli per la sezione "Ricerca e sperimentazione" della rivista "Colture Protette".

Si ricorda che i lavori e la corrispondenza devono essere indirizzati al seguente recapito: Redazione di "Colture Protette", c/o Edagricole spa, via Emilia Levante 31, 40139 Bologna.

1) Accettazione per la pubblicazione

I lavori ricevuti vengono sottoposti al giudizio del Comitato scientifico della rivista ed al direttore, i quali decidono sulla accettabilità, eventualmente proponendo modifiche atte a migliorare il contenuto generale e specifico del lavoro. La redazione comunica all'autore l'accettazione o la non accettazione del lavoro o le modifiche proposte.

I manoscritti, modificati a cura dell'autore secondo i suggerimenti ricevuti, saranno esaminati in ultima istanza ancora da Comitato scientifico e direttore, i quali disporranno sull'accettazione per la pubblicazione. Dei lavori non accettati per la pubblicazione viene trattenuta agli atti della redazione una copia.

2) Invio dei lavori

I lavori, preparati secondo le norme appresso indicate, debbono essere inviati in duplice copia indicando il nome dell'autore, e l'indirizzo a cui spedire le bozze, eventuale corrispondenza, ecc. L'Autore deve conservare una copia del lavoro per la correzione delle bozze.

3) Preparazione dei lavori

a. I lavori debbono essere dattiloscritti, in righe a spazio doppio e ampi margini, su una sola facciata del foglio. Le pagine vanno numerate progressivamente.

b. I lavori non devono superare le quattro pagine a stampa. Pertanto, i dattiloscritti (comprensivi di testo, riassunto e bibliografia) non devono superare le otto cartelle, ciascuna indicativamente di 34 righe/pagina e 60 battute/riga.

c. Sotto il titolo, conciso ma informativo che dovrà essere contenuto in un massimo di due righe da 30 battute, vanno indicati nome e cognome dell'autore o degli autori. Dopo il titolo va riportato il riassunto in italiano (di non più di 100 parole) e in inglese. A quest'ultimo (summary) deve essere premesso il titolo tradotto in questa lingua.

d. In nota, nella prima pagina, verrà indicato: il titolo o qualifica degli autori, l'istituto presso il quale è stata eseguita la ricerca; il nome del direttore della ricerca; l'eventuale provenienza del contributo finanziario ottenuto per la ricerca; l'eventuale ripartizione dei compiti della ricerca tra gli autori stessi.

e. I lavori debbono di norma essere suddivisi in "introduzione", "materiali e metodi", "risultati e discussione", "conclusione" e, eventualmente, "ringraziamenti".

f. Le citazioni bibliografiche nel testo vanno messe fra parentesi, indicando il cognome dell'autore e l'anno di pubblicazione. I lavori pubblicati da un autore in uno stesso anno saranno distinti aggiungendo all'anno lettere minuscole dell'alfabeto in ordine progressivo. Nel caso che gli autori siano più di due, al nome del primo sarà fatta seguire l'abbreviazione et al. Gli articoli anonimi verranno citati come "Anonimo" seguito dalla data di pubblicazione.

g. Le tabelle debbono essere presentate su fogli distinti dal testo e debbono riportare dati arrotondati al massimo, in modo da limitare il numero delle cifre a quelle realmente significative. Non si pubblicano dati di singole ripetizioni o dati rilevati su disegni sperimentali e non sottoposti ad analisi statistica, ma solo medie corredate degli usuali parametri statistici. Non si accetta di pubblicare gli stessi dati sia in tabella che in forma grafica.

h. I grafici e le figure a tratto debbono essere presentati a parte (individualmente separati dal testo) ed essere eseguiti in maniera definitiva, pronti per la fotoincisione, su lucido con inchiostro di china nero e numerati. Nella esecuzione dei grafici si tenga conto di quanto

segue: tutte le figure vengono generalmente ridotte a 2 dimensioni fisse: 18,5 cm di larghezza (tutta pagina) e 9 cm di larghezza (1 colonna). I numeri, le cifre o le scritte inserite all'interno dei grafici vanno inserite dall'A. in una forma definitiva che ne assicuri la piena leggibilità anche a riduzione avvenuta. Consigliabili gli auto-adesivi.

i. Le fotografie e le diapositive dovranno essere presentate stampate nel miglior modo e numerate. La direzione si riserva il diritto di selezionarle e ridurre le fotografie presentate dall'autore.

l. Le didascalie delle figure (grafici e fotografie) debbono essere scritte su foglio a parte.

m. La bibliografia deve essere presentata su fogli a parte. L'elenco bibliografico deve comprendere solo i lavori citati nel testo. I vari riferimenti bibliografici, senza numerazione, saranno ordinati per ordine alfabetico di autore. I lavori di uno stesso autore saranno disposti secondo la data di pubblicazione; per quelli pubblicati da uno stesso autore in uno stesso anno si rimanda al punto f. I lavori in collaborazione saranno ordinati secondo l'ordine alfabetico del primo degli autori e, se vi sono in bibliografia altri lavori di questo autore, i lavori in collaborazione seguiranno quelli dell'autore singolo. Al cognome dell'autore, o di tutti gli autori, seguirà l'iniziale del nome e quindi, tra parentesi, la data di pubblicazione. Separato da un trattino, seguirà in corsivo, il titolo della pubblicazione, in tondo il nome abbreviato della rivista e infine i riferimenti al numero e alle pagine. Gli articoli anonimi verranno elencati per ultimi in bibliografia, sostituendo un tratto al nome dell'autore.

4) Terminologia

Si richiede l'adozione delle unità di misura e relativo simbolo del sistema internazionale (S.I.) che verrà indicato dopo il valore numerico.

Per quanto concerne nomi e parole di particolare interesse inseriti nel testo, si seguiranno le seguenti norme.

Le espressioni latine ed i nomi delle entità sistematiche saranno sottolineati perché vengano stampati in corsivo (es.: *sensu lato*; *Lactuca sativa* L. var. *capitata*); se lo stesso nome è ripetuto, ne sarà successivamente appuntato il nome del genere ed omissa l'autore (es. *L. sativa* var. *capitata*).

Il nome italiano delle specie sarà scritto normalmente, con l'iniziale minuscola (es.: frumento). Il nome di una cultivar va posto tra due apostrofi (es.: cv. "Orso"). L'uso di parole straniere va limitato ai casi in cui non esistono parole italiane corrispondenti mettendole tra virgolette.

5) Responsabilità

La responsabilità del contenuto dei lavori spetta interamente all'autore.

6) Correzione bozze

Le bozze dovranno essere restituite al più presto, ed in ogni caso, non oltre i 5 giorni dalla data di ricevimento.

In caso di ritardo dalla restituzione, oltre i 5 giorni, la redazione del periodico si ritiene autorizzata a procedere alla correzione d'ufficio delle bozze e non dare corso alla richiesta di estratti.

7) Estratti

Gli estratti vengono stampati su ordinazione da effettuarsi mediante apposito modulo che verrà allegato alle bozze.

Tutti gli estratti vengono forniti alle tariffe riportate nel foglietto che accompagnerà le bozze. Gli estratti sono rimessi con la stessa impaginatura e numerazione della pagina della rivista subito dopo la tiratura di ciascun fascicolo. È vietata la riproduzione anche parziale degli articoli pubblicati, a meno di un'autorizzazione scritta che viene concessa dall'Editore soltanto su una richiesta esplicita e con l'obbligo di citare la fonte.