

**UNIVERSITAT DE LLEIDA**

**TESI DOCTORAL**

**“VENTILACION NATURAL DE INVERNADEROS MULTITÚNEL”**

**PEDRO MUÑOZ ODINA**  
**Lleida, gener de 1998**

**UNIVERSITAT DE LLEIDA**

**Escola Tècnica superior d'Enginyeria Agrària.  
Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl.**

**TESI DOCTORAL**

**“VENTILACION NATURAL DE INVERNADEROS MULTITÚNEL”**

**PEDRO MUÑOZ ODINA**  
**Lleida, gener de 1998**

**UNIVERSITAT DE LLEIDA**

**Escola Tècnica superior d'Enginyeria Agrària.  
Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl.**

## **TESI DOCTORAL**

**“Ventilación Natural de Invernaderos Multitúnel”**

**Memòria presentada per a optar al Grau de Doctor**

**Doctorand**

**Pedro Muñoz Odina**

**Vist i plau**

**Director de la tesi**

**Tutor de la tesi**

**Dr. Juan Ignacio Montero Camacho.**

**Dr. Josep Maria Villar Mir**

**Lleida, gener de 1998**

## RESUMEN

El cultivo bajo invernadero en regiones de clima mediterráneo ha experimentado un gran aumento en los últimos años. La mayor parte de estos invernaderos son estructuras de bajo coste con cubierta de plástico. No obstante, se observa una clara tendencia hacia equipamientos e invernaderos con un mayor nivel tecnológico que permitan un mejor control de las condiciones de cultivo. En este sentido, los invernaderos multitúnel se están imponiendo cada vez más en los países de la zona mediterránea.

Debido a las características climáticas (altos valores de radiación y elevadas temperaturas) el principal problema de estos invernaderos es la elevada temperatura del aire interior que se produce desde principios de primavera hasta finales de otoño, hecho que provoca graves efectos sobre la calidad y el rendimiento de los cultivos. La ventilación natural es el procedimiento más sencillo y económico para reducir la temperatura del interior del invernadero.

A pesar de su gran importancia y, debido a la dificultad de su estudio, no se conoce con suficiente precisión la ventilación natural de los invernaderos multitúnel con cubierta de plástico.

En esta tesis, se analiza la ventilación natural de los invernaderos multitúnel con cubierta de plástico y dos tipos de aperturas de ventilación (rectangular continua e intercambiable). Al mismo tiempo, se evalúa el efecto que supone la incorporación de mallas de sombreado y anti-insectos en las aperturas de ventilación.

Con este fin, en el capítulo 2 se presenta la base teórica de los modelos más utilizados para estudiar y cuantificar la ventilación natural de invernaderos: el modelo del balance de energía y el del flujo de aire originado por las diferencias de presión.

En el tercer capítulo, se presentan los resultados obtenidos al determinar en campo mediante la técnica del gas trazador la tasa de ventilación de un invernadero multitúnel de tres naves con los dos sistemas de ventanas (rectangular continua e intercambiable) con y sin mallas en las aperturas de ventilación. A partir de los resultados experimentales se ha podido determinar una expresión empírica para el cálculo de la tasa de ventilación en función de la velocidad del viento exterior, demostrando la nula influencia de la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior sobre la tasa de ventilación (para velocidades de viento superiores a  $1 \text{ ms}^{-1}$ ). También se ha demostrado la clara influencia de la dirección del viento sobre la tasa de ventilación del invernadero distinguiéndose claramente entre la ventilación a barlovento y la ventilación a sotavento.

Por otro lado, también se ha cuantificado la reducción del flujo de aire al incorporar mallas anti-insectos en las aperturas de ventilación de forma que en la mayoría de los casos no puede garantizarse la tasa mínima de ventilación. Finalmente y a partir de los datos experimentales se deduce que el sistema de techo intercambiable es claramente superior al de ventanas rectangulares continuas.

En el capítulo cuarto se presentan los resultados obtenidos al comparar los métodos del balance de energía y del gas trazador para determinar la tasa de ventilación de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales. De acuerdo con los ensayos experimentales, se observa que el método del balance de energía es útil para invernaderos con valores bajos de tasa de ventilación produciéndose grandes errores cuando la tasa de ventilación supera el valor de  $0.2 \text{ Renov/h m}_{\text{suelo}}^2$ . Además, se observa la gran sensibilidad del método del balance de energía a pequeñas variaciones en la diferencia de temperatura existente entre el aire interior y exterior.

El capítulo 5 se dedica al estudio de las características de flujo de las aperturas de ventilación de los sistemas utilizados en el trabajo experimental. A partir de los ensayos con modelos a escala se han podido establecer los valores de los coeficientes de descarga, observándose claras diferencias entre las ventanas situadas en una nave lateral del invernadero y las localizadas en una nave interior. También se ha cuantificado el importante descenso del valor del coeficiente de descarga al incorporar mallas en las ventanas y se han obtenido expresiones que permiten calcular los valores del coeficiente de descarga de las diferentes combinaciones ventana y malla conociendo únicamente la longitud y altura de la ventana.

En el capítulo 6, después de obtener los valores correspondientes del coeficiente de efecto de viento para cada una de las configuraciones evaluadas, se han podido establecer los diferentes modelos que permiten cuantificar la tasa de ventilación del invernadero en función de la velocidad y la dirección del viento exterior. La comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los calculados con los modelos presenta un ajuste muy bueno en todos los casos estudiados, hecho que parece confirmar la utilidad de estos modelos.

Finalmente en el capítulo 7 se presentan las conclusiones generales y se indican algunas sugerencias de cara a futuras investigaciones sobre el tema.

## RESUM

El conreu sota hivernacle en regions amb clima mediterrani ha experimentat un gran augment en els darrers anys. La majoria d'aquests hivernacles són estructures de baix cost amb coberta de plàstic. Malgrat tot, s'observa una clara tendència vers equipaments i hivernacles amb un nivell tecnològic més gran que possibiliti un millor control de les condicions de conreu. Es per això, que els hivernacles multitúnel s'estant imposant cada cop més als països de la mediterrània.

Degut a les característiques climàtiques (valors de radiació i temperatura elevats) el principal problema d'aquests hivernacles és la elevada temperatura de l'aire interior que es produeix des de principis de primavera fins a finals de la tardor, fet que origina greus efectes sobre la qualitat i rendiment dels conreus. La ventilació natural és el procés més senzill i econòmic per reduir la temperatura de l'interior de l'hivernacle.

Malgrat la seva importància, com a conseqüència de la dificultat del seu estudi, no es coneix amb precisió la ventilació natural dels hivernacles multitúnel amb coberta de plàstic.

En aquesta tesi, s'analitza la ventilació natural dels hivernacles multitúnel amb coberta de plàstic i dos tipus d'obertures de ventilació (rectangular continua i intercanviable). Al mateix temps, s'avalua l'efecte que provoca la incorporació de xarxes d'ombreig i anti-insectes a les obertures de ventilació.

Amb aquest objectiu, el capítol 2 presenta la base teòrica dels models més utilitzats per estudiar i quantificar la ventilació natural dels hivernacles: el model del balanç d'energia i el del flux d'aire originat per les diferències de pressió.

Al tercer capítol es presenten els resultats obtinguts al determinar en camp mitjançant la tècnica del gas traçador la taxa de ventilació d'un hivernacle multitúnel de tres naus amb el dos sistemes de finestres (rectangular continua i intercanviable) amb i sense xarxes a les obertures de ventilació. Els resultats experimentals han permès determinar una expressió empírica pel càlcul de la taxa de ventilació en funció de la velocitat del vent exterior, demostrant-se la nul·la influència de la diferència de temperatura entre l'aire interior i exterior sobre la taxa de ventilació (per velocitats de vent superiors a  $1 \text{ ms}^{-1}$ ). També s'ha demostrat la clara influència de la direcció del vent sobre la taxa de ventilació dels hivernacles, fet que ha permès diferenciar la ventilació a sobrevent i sotavent.

D'altra banda, també s'ha pogut quantificar la reducció del flux d'aire originada quan s'incorporen xarxes anti-insectes a les obertures de ventilació de forma que en la

majoria dels casos no es pot garantir la taxa mínima de ventilació. Per finalitzar destacar que els resultats mostren que el sistema de sostre intercanviable es superior al de finestres rectangulars contínues.

En el quart capítol es mostren els resultats obtinguts quan es comparen els mètodes del balanç d'energia i del gas traçador per determinar la taxa de ventilació d'un hivernacle multitúnel amb obertures laterals i zenitals. D'acord amb els assajos experimentals s'observa que el mètode del balanç d'energia és útil per hivernacles amb valors baixos de taxa de ventilació produint-se grans errors quan la taxa de ventilació es superior a  $0.2 \text{ Renov/h m}_{\text{sol}}^2$ . A més a més, s'observa la gran sensibilitat del mètode del balanç d'energia a petites variacions de la diferència de temperatura entre l'aire interior i exterior.

El capítol 5 s'ha dedicat a l'estudi de les característiques de flux de les obertures de ventilació dels sistemes utilitzats en el treballs experimentals. Els assajos amb models a escala han permès determinar els valors dels coeficients de descàrrega, observant-se clares diferències entre les finestres localitzades a una nau lateral de l'hivernacle i les localitzades a una nau interior. També s'ha quantificat el descens del valor del coeficient de descàrrega quan s'afegeixen xarxes a les finestres i s'han obtingut expressions que possibiliten el càlcul dels valors del coeficient de descàrrega de les diferents combinacions finestra i xarxa a partir de la longitud i l'alçada de les finestres.

En el capítol 6, després d'obtenir els valors corresponents del coeficient d'efecte del vent per cada una de les configuracions avaluades s'han pogut determinar els diferents models que permeten quantificar la taxa de ventilació de l'hivernacle en funció de la velocitat i la direcció del vent exterior. La comparació dels resultats experimentals i els calculats presenta en tots els casos un ajust molt bo, fet que sembla confirmar la utilitat d'aquests models.

Per finalitzar el capítol 7 recull les conclusions generals i una sèrie de suggeriments vers futures investigacions.

## **SUMMARY**

Greenhouse cultivation in Mediterranean countries has experienced a considerable growth during the past years. Most of the greenhouses are low cost structures covered with plastic films, but a clear trend towards the construction of better equipped and more technologically advanced greenhouse to allow for a better control of the growing conditions can be observed. In this ground, the importance of the so called multitunnel type structure is increasing in the Mediterranean area.

Due to prevailing environmental conditions (high solar radiation levels and high temperatures), the main problem facting cultivation in this area is the high temperature that develops inside of the greenhouses and its negative influence on yield and quality of the production. Natural ventilation is the easiest and cheapest way to reduce the excessive internal temperature. But, in spite of the importance of the subject, and perhaps due to the difficulty of approaching the problem, little is known over ventilation of multitunnel greenhouses with plastic cladding.

In this dissertation, the natural ventilation of this type of structure is analyzed. Two types of window ( a continuous rectangular roof vents, and roll up roof vents) are considered. Also, the effect of the incorporation of screens on the openings is evaluated. With this goal in mind, the theory of the two most well known methods for estimating ventilation rates, namely the wind pressure driven and the energy balance methods, is presented in chapter two.

Chapter three includes the results obtained from direct measurements of the ventilation rate on the three-span greenhouse with continuous roof and roll up roof vents.

Measurements were taken for both types of opening with and without screening. The decay rate tracer gas method was used to determine the ventilation rate. Later, empirical regressions between ventilation rate, wind speed and internal-open air temperature difference were established for each type of opening. Results indicate the minor importance of the thermal difference on the ventilation rate in comparison with the eolian effect. It is also shown the clear effect of wind direction on the air exchange process: when the wind faces the opening (windward sides) the ventilation rate is clearly higher than when the wind blows for the opposite direction (leeward sides). The screening has a negative effect on the ventilation rate. In most cases, the air exchange rate of screened greenhouses with continuous rectangular roof vents is not adequate to guarantee acceptable environmental conditions. The roll up roof ventilation

system proved to be more efficient. The experimental results prove that adequate ventilation is achieved by kind of opening with most types of screens on the windows. Chapter four presents the comparison of ventilation rates values calculated by the energy balance method and measures by the tracer gas technique. Results seems to agree when the ventilation rate is less than  $0.2 \text{ Renov/h m}_{\text{soil}}^2$ , but strong discrepancies appear when this values is surmounted. It is also shown the very high sensitivity of the energy balance method to small differences on the internal-external temperatures difference.

Chapter five is devoted to the study of the flow characteristics on the kind of openings previously pointed out. Test were conducted on small scale greenhouses to determine the discharge coefficients of openings as a function of their aspect ratios. Significant differences where found between openings located in the roof of central and lateral spans. Discharge coefficients of screened windows were always lower than those obtained for unscreened openings. Expressions to calculate the discharge coefficient as a function of the length and width of the opening were derived.

Different models to calculate the ventilation rate for each type of openings as a function of wind speed and direction are presented in chapter six. As a previous step, the global wind coefficients for each case study were determined. The agreement between results provided by the simplified models and the measured ventilation rate values was very high. From this fact can be concluded that the models presented in this chapter are useful tools to quantify ventilation of multispan tunnel type greenhouses.

Finally, general conclusions and suggestions to carry future research are presented in chapter seven.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mis agradecimientos a todos aquellos que, de una forma u otra han contribuido a la realización de esta Tesis:

En primer lugar al Doctor Juan Ignacio Montero director de la Tesis por su ayuda y esfuerzo tanto en el planteamiento, ejecución y resolución de todos los ensayos y resultados. En especial, por los tres últimos meses de mi beca en Inglaterra.

Al Dr. Josep Maria Villar por su labor como tutor, sus indicaciones e ideas aportadas para la realización de la Tesis.

A Assumpció Antón compañera y colega que ha tenido que trabajar a mi lado en las más diversas condiciones soportando los resultados de algunas de mis brillantes ideas. También, como no, a Carme Biel por suavizar mi llegada al Centre de Cabrils y por los cuatro años de convivencia y ayuda en el trabajo.

Por descontado, debo agradecer su ayuda y cooperación a todo el personal del Departament de Tecnologia Hortícola que a lo largo de estos cuatro años han contribuido para que esta trabajo llegue a buen término.

Recordar aquí con especial afecto a mis compañeros becarios de la comunidad de Vilassar. En especial a las “dos Marías”, Blanca siempre dispuesta para acompañarme a la Universidad y Ana por sus consultas sobre los ensayos de “tomates” que tanto me ayudaron a plantear mis experimentos. Al tercero en discordia, el Dr. Orozco, espero que le lleguen mis mejores deseos al otro lado del Atlántico. A Tarek y a Jordi que han demostrado que la convivencia de razas, culturas e ideas no solo es posible sino necesaria.

A mis amigos de Lleida (Inda, Alfredo, Jaume, Jesús, etc.) siempre presentes cuando ha sido necesario.

Por último un agradecimiento muy especial a mis hermanos y en especial a Marian, la verdadera culpable de que yo finalmente presente este documento. Salut.

Esta tesis ha sido posible gracias a la colaboración del Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA) del Centre de Cabrils y a la financiación de los proyectos INIA SC93-119 y CICYT AGF96-2512-C03-02

## ÍNDICE DE MATERIAS

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto general de los invernaderos en la zona mediterránea	1
1.2. Tipo y problemática de los invernaderos mediterráneos	4
1.3. La ventilación natural de los invernaderos	6
1.4. Técnicas de evaluación de la ventilación natural de los invernaderos	9
1.5. Objetivos de la tesis	11
1.6. Organización de la tesis	13
<b>CAPÍTULO 2. MODELOS DE VENTILACIÓN</b>	<b>14</b>
2.1. Modelo del balance de Energía	14
2.2. Flujo de aire originado por las diferencia de presión	19
2.2.1. Bases de los mecanismos de ventilación	19
2.2.2. Fuerzas implicadas en la ventilación natural	20
2.2.2.1. Flujo de aire debido al viento exterior. (efecto eólico)	21
2.2.2.2. Flujo de aire debido a la temperatura. (efecto térmico)	25
2.2.3. Intercambio de aire debido a la contribución de los efectos térmicos y eólicos.	30
<b>CAPÍTULO 3. MEDIDA EXPERIMENTAL DE LA VENTILACION DE LOS INVERNADEROS</b>	<b>33</b>
3.1. Introducción	33
3.2. Material y métodos	33
3.2.1. Técnicas del gas trazador	33
3.2.1.1. Método de inyección constante	35

3.2.1.2. Método del descenso de la concentración	36
3.2.2. Dispositivo experimental	37
3.3. Resultados	45
3.3.1. Ventanas cenitales rectangulares continuas	45
3.3.2. Ventanas cenitales intercambiables	54
3.4. Discusión	60
3.5. Conclusiones	66
<b>CAPÍTULO 4. BALANCE DE ENERGÍA</b>	<b>67</b>
4.1. Introducción	67
4.2. Material y métodos	67
4.2.1. Cálculo de la tasa de ventilación mediante el método del balance de energía	67
4.2.1.1. Fundamento teórico	67
4.2.1.2. Dispositivo experimental	69
4.2.2. Cálculo de la tasa de ventilación mediante la técnica del gas trazador	71
4.2.2.1. Dispositivo experimental	71
4.3. Resultados	73
4.4. Discusión	77
4.5. Conclusiones	82

<b>CAPÍTULO 5. CARACTERÍSTICAS DE FLUJO DE LAS VENTANAS DE INVERNADEROS MULTITÚNEL</b>	<b>83</b>
5.1. Introducción	83
5.2. Fundamento teórico para la determinación del factor de fricción	85
5.3. Materiales y Métodos	88
5.3.1. Dispositivo experimental	88
5.3.2. Procedimiento experimental	90
5.3.3. Expresiones generales de cálculo	92
5.4. Resultados	93
5.4.1. Valores de los coeficientes de descarga de ventanas rectangulares continuas	93
5.4.2. Valores de los coeficientes de descarga de ventanas intercambiables	100
5.4.3. Expresiones generales para el cálculo del factor de fricción	102
5.4.3.1. Ventana rectangular continua	102
5.4.3.2. Ventana intercambiable	106
5.5. Discusión	107
5.6 Conclusiones	110
<b>CAPÍTULO 6. DETERMINACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE VENTILACIÓN</b>	<b>111</b>
6.1. Introducción	111
6.2. Material y métodos	112
6.3. Resultados	116
6.3.1. Determinación del coeficiente de efecto de viento	116
6.3.1.1. Ventanas rectangulares continuas	116

6.3.1.2. Ventanas intercambiables	120
6.3.2. Modelos de ventilación	122
6.3.2.1. Ventanas rectangulares continuas	122
6.3.2.2. Ventanas intercambiables	127
6.4. Discusión	130
6.5. Conclusiones	132
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES GENERALES</b>	134
<b>CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA</b>	137

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2 MODELOS DE VENTILACIÓN

- Figura 2.1. Diferencias de presión causadas por el efecto térmico en una edificación. 26
- Figura 2.2. Esquema de la distribución vertical de presión y velocidad en ambas caras de una ventana de acuerdo con la aproximación de segundo orden. 28
- Figura 2.3. Esquema de la distribución vertical de presión y velocidad en ambas caras de una ventana de acuerdo con la aproximación de primer orden. 28

### CAPÍTULO 3 MEDIDA EXPERIMENTAL DE LA VENTILACIÓN DE LOS INVERNADEROS

- Figura 3.1. Características del invernadero experimental con ventanas cenitales rectangulares continuas y una malla incorporada en las aperturas de ventilación. 38
- Figura 3.2. Detalle de una ventana rectangular continua sin malla. 39
- Figura 3.3. Características del invernadero experimental con ventanas cenitales intercambiables y una malla incorporada en las aperturas de ventilación. 39
- Figura 3.4. Vista general de un invernadero multitúnel con el sistema de apertura de ventanas denominado intercambiable. 40
- Figura 3.5. Analizador de gases por infrarrojo (Ultramat 5M, Siemens, Alemania) utilizado en los ensayos para determinar la tasa de ventilación del invernadero. 41
- Figura 3.6. Esquema de la disposición de los sensores en los diversos ensayos de tasa de ventilación mediante la técnica del gas trazador. 43
- Figura 3.7. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla. 48

Figura 3.8. Tasa de ventilación ( $\Phi$ , $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ , $\text{ms}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla. a)Barlovento, b)Sotavento.	49
Figura 3.9. Tasa de ventilación ( $\Phi$ , $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ , $\text{ms}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas y malla anti-pulgón. a)Barlovento, b)Sotavento.	51
Figura 3.10. Tasa de ventilación ( $\Phi$ , $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ , $\text{ms}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas y malla anti-trip. a)Barlovento, b)Sotavento.	52
Figura 3.11. Tasa de ventilación ( $\Phi$ , $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ , $\text{ms}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla de sombreo. a)Barlovento, b)Sotavento.	57
Figura 3.12. Tasa de ventilación ( $\Phi$ , $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ , $\text{ms}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla anti-pulgón. a)Barlovento, b)Sotavento.	58
Figura 3.13. Tasa de ventilación ( $\Phi$ , $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ , $\text{ms}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla anti-trip. a)Barlovento, b)Sotavento.	59
Figura 3.14. Tasa de ventilación ( $\Phi$ , $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ , $\text{ms}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla e intercambiables con malla anti-pulgón. a)Barlovento, b)Sotavento.	65

## **CAPÍTULO 4 BALANCE DE ENERGÍA**

Figura 4.1. Características del invernadero experimental con aperturas de ventilación laterales y cenitales rectangulares continuas sin malla.	69
Figura 4.2. Comparación de los resultados de la tasa de ventilación ( $\Phi$ , $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales, obtenidos mediante la técnica del gas trazador y el método del balance de energía. (17/7/97).	74

Figura 4.3. Comparación de los resultados de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales, obtenidos mediante la técnica del gas trazador y el método del balance de energía. (18/7/97). 75

Figura 4.4. Comparación de los resultados de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales, obtenidos mediante la técnica del gas trazador y el método del balance de energía. (19/7/97). 76

Figura 4.5. Comparación de los resultados de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales, obtenidos mediante la técnica del gas trazador, el método del balance de energía y el método del balance de energía considerando un error de  $-1^\circ\text{C}$  en la medida de la diferencia de temperatura. (17/7/97). 79

## **CAPÍTULO 5 CARACTERÍSTICAS DE FLUJO DE LAS VENTANAS DE INVERNADEROS MULTITÚNEL**

Figura 5.1. Detalle del invernadero a escala construido en el interior de un invernadero mayor con el objetivo de evitar el efecto del viento exterior. 89

Figura 5.2. Esquema de los dos tipos de posiciones de las ventanas evaluadas en la determinación del coeficiente de descarga. a) Ventana situada en una nave lateral y b) Ventana situada en una nave interior. 92

Figura 5.3. Factor de fricción ( $F_0$ ) en función del coeficiente de forma ( $L_0/H_0$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas situadas en una nave interior o lateral. 103

Figura 5.4. Factor de fricción ( $F_0$ ) en función del coeficiente de forma ( $L_0/H_0$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas y malla de sombreo situadas en una nave interior o lateral. 104

Figura 5.5. Factor de fricción ( $F_0$ ) en función del coeficiente de forma ( $L_0/H_0$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas y malla anti-pulgón situadas en una nave interior o lateral. 104

Figura 5.6. Factor de fricción ( $F_0$ ) en función del coeficiente de forma ( $L_0/H_0$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas y malla anti-trip situadas en una nave interior o lateral. 105

Figura 5.7. Factor de fricción ( $F_0$ ) en función del coeficiente de forma ( $L_0/H_0$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla anti-pulgón situadas en una nave interior o lateral. 106

## **CAPÍTULO 6 DETERMINACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE VENTILACIÓN**

Figura 6.1. Relación entre los valores de la tasa de ventilación calculados y medidos mediante la técnica del gas trazador para un invernadero multitúnel con aperturas cenitales rectangulares continuas sin mallas a)Barlovento, b)Sotavento. 123

Figura 6.2. Relación entre los valores de la tasa de ventilación calculados y medidos mediante la técnica del gas trazador para un invernadero multitúnel con aperturas cenitales rectangulares continuas y malla anti-pulgón a)Barlovento, b)Sotavento. 125

Figura 6.3. Relación entre los valores de la tasa de ventilación calculados y medidos mediante la técnica del gas trazador para un invernadero multitúnel con aperturas cenitales rectangulares continuas y malla anti-trip a)Barlovento, b)Sotavento. 126

Figura 6.4. Relación entre los valores de la tasa de ventilación calculados y medidos mediante la técnica del gas trazador para un invernadero multitúnel con aperturas cenitales intercambiables y malla anti-pulgón a)Barlovento, b)Sotavento. 129

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1.- Distribución global de la superficie (ha) de invernaderos y abrigos.	3
Tabla 1.2.- Distribución de la superficie (ha) de invernaderos con cubierta de plástico en los principales países de la zona mediterránea.	3

### CAPÍTULO 3 MEDIDA EXPERIMENTAL DE LA VENTILACIÓN DE LOS INVERNADEROS

Tabla 3.1.-Combinaciones tipo de ventana y tipo de malla utilizadas para el estudio de la tasa de ventilación del invernadero multitúnel.	38
Tabla 3.2. Tasa de ventilación ( $\Phi$ , $m^3s^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ , $ms^{-1}$ ) y del gradiente de temperatura ( $\Delta T^{1/2}$ , K) de un invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla, con malla anti-pulgón y malla anti-trip. ( $\Phi=au+b\Delta T^{1/2}+c$ ).	45
Tabla 3.3.-Tasa de ventilación ( $\Phi$ , $m^3s^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ , $ms^{-1}$ ), del gradiente de temperatura ( $\Delta T^{1/2}$ , K) y de la dirección del viento (barlovento, sotavento) de un invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla, con malla anti-pulgón y anti-trip. ( $\Phi=au+b\Delta T^{1/2}+c$ ).	46
Tabla 3.4.-Tasa de ventilación ( $\Phi$ , $m^3s^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ , $ms^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla, con malla anti-pulgón y malla anti-trip. ( $\Phi=mu+p$ ).	47
Tabla 3.5.-Comparación de las rectas de regresión (barlovento-sotavento) para el invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas con y sin mallas anti-insectos.	53
Tabla 3.6. Tasa de ventilación ( $\Phi$ , $m^3s^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ , $ms^{-1}$ ) y del gradiente de temperatura ( $\Delta T^{1/2}$ , K) de un invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla de sombreado, anti-pulgón y anti-trip. ( $\Phi=au+b\Delta T^{1/2}+c$ ).	54

Tabla 3.7.-Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ), del gradiente de temperatura ( $\Delta T^{1/2}$ , K) y de la dirección del viento (barlovento, sotavento) de un invernadero multitúnel con ventanas intercambiables y malla de sombreo, anti-pulgón y anti-trip. ( $\Phi=au+b\Delta T^{1/2}+c$ ). 55

Tabla 3.8. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla de sombreo, anti-pulgón y anti-trip. ( $\Phi=mu+p$ ). 56

Tabla 3.9. Comparación de las rectas de regresión (barlovento-sotavento) para el invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla de sombreo, anti-pulgón y anti-trip. 60

## **CAPÍTULO 5 CARACTERÍSTICAS DE FLUJO DE LAS VENTANAS DE INVERNADEROS MULTITÚNEL**

Tabla 5.1.-Combinaciones tipo de ventana (rectangular continua e intercambiable) y tipo de malla (sin malla, de sombreo, anti-pulgón y anti-trip) evaluadas en los ensayos a escala del coeficiente de descarga. 89

Tabla 5.2.-Valores del coeficiente de descarga y test de separación de medias para ventanas rectangulares continuas con diferentes coeficientes de forma ( $L_0/H_0$ ) situadas en una nave lateral o interior. 94

Tabla 5.3.- Coeficientes de descarga y test de separación de medias de una ventana rectangular continua con malla anti-pulgón a escala real y malla anti-pulgón a escala 1:3. 95

Tabla 5.4.-Valores del coeficiente de descarga y test de separación de medias para ventanas rectangulares continuas y malla anti-pulgón con diferentes coeficientes de forma ( $L_0/H_0$ ) situadas en una nave lateral o interior. 96

Tabla 5.5.-Valores del coeficiente de descarga y test de separación de medias para ventanas rectangulares continuas y malla de sombreo con diferentes coeficientes de forma ( $L_0/H_0$ ) situadas en una nave lateral o interior. 98

Tabla 5.6.-Valores del coeficiente de descarga y test de separación de medias para ventanas rectangulares continuas y malla anti-trip con diferentes coeficientes de forma ( $L_0/H_0$ ) situadas en una nave lateral o interior. 99

Tabla 5.7.-Valores del coeficiente de descarga y test de separación de medias para ventanas intercambiables y malla anti-pulgón con diferentes coeficientes de forma ( $L_0/H_0$ ) situadas en una nave lateral o interior. 101

## **CAPÍTULO 6 DETERMINACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE VENTILACIÓN**

Tabla 6.1.- Valores del coeficiente de efecto de viento " $C_w$ " para un invernadero multitúnel de tres naves con aperturas cenitales rectangulares continuas en función de la velocidad ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ) y la dirección del viento (barlovento-sotavento). 117

Tabla 6.2.- Valores del coeficiente de efecto de viento " $C_w$ " para un invernadero multitúnel de tres naves con aperturas cenitales rectangulares continuas y malla anti-pulgón en función de la velocidad ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ) y la dirección del viento (barlovento-sotavento). 118

Tabla 6.3.- Valores del coeficiente de efecto de viento " $C_w$ " para un invernadero multitúnel de tres naves con aperturas cenitales rectangulares continuas y malla anti-trip en función de la velocidad ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ) y la dirección del viento (barlovento-sotavento). 119

Tabla 6.4.- Valores del coeficiente de efecto de viento " $C_w$ " para un invernadero multitúnel de tres naves con aperturas cenitales intercambiables y malla anti-pulgón en función de la velocidad ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ) y la dirección del viento (barlovento-sotavento). 121

Tabla 6.5.-Modelos de cálculo de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $m^3s^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas sin malla en función de la dirección (barlovento-sotavento) y de la intensidad del viento ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ).

$$\Phi = \frac{S}{2} C_d C_w^{1/2} u. \quad 122$$

Tabla 6.6.-Modelos de cálculo de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas y malla anti-pulgón en función de la dirección (barlovento-sotavento) y de la intensidad del viento ( $u$ ,

$$\text{ms}^{-1}). \quad \Phi = \frac{S}{2} C_d C_w^{1/2} u. \quad 124$$

Tabla 6.7.-Modelos de cálculo de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas y malla anti-trip en función de la dirección (barlovento-sotavento) y de la intensidad del viento ( $u$ ,

$$\text{ms}^{-1}). \quad \Phi = \frac{S}{2} C_d C_w^{1/2} u. \quad 124$$

Tabla 6.8.-Modelos de cálculo de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla anti-pulgón en función de la dirección (barlovento-sotavento) y de la intensidad del

$$\text{viento } (u, \text{ms}^{-1}). \quad \Phi = \frac{S}{2} C_d C_w^{1/2} u. \quad 127$$

## **1.-INTRODUCCIÓN.**

### **1.1.-Contexto general de los invernaderos en la zona mediterránea.**

La superficie dedicada al cultivo bajo invernadero ha experimentado un aumento espectacular en los países de la zona mediterránea a lo largo de los últimos 20 años (Castilla, 1994; Lorenzo , 1994; Kittas y col., 1996). González (1995) cifra en más de 100.000 las hectáreas de invernaderos y abrigos en los países del área mediterránea frente a las aproximadamente 40.000 (Meijaard, 1995) de los países del norte de Europa (tabla 1.1). Dentro de los países mediterráneos son principalmente España e Italia los que presentan una mayor superficie de invernaderos (Wittwer y Castilla, 1995), contabilizando únicamente estos dos países más de 50.000 ha (Briassoulis y col., 1997).

Esta clasificación entre las zonas del norte de Europa y la mediterránea se debe al contraste entre los dos tipos de invernaderos o sistemas de producción utilizados en ambas zonas (Castilla, 1994; Wittwer y Castilla, 1995; Briassoulis y col., 1997). De acuerdo con Enoch (1986) existen dos tipos básicos de invernaderos: el primero busca el máximo control climático con el fin de optimizar la producción (invernaderos de vidrio de los países del norte de Europa: Holanda, Alemania , Reino Unido...); el segundo proporciona un mínimo control climático que permita a la planta la supervivencia y conseguir además un cultivo económicamente rentable (invernaderos con cubierta de plástico de los países mediterráneos: Italia, España, Grecia...).

El uso de invernaderos con cubierta de plástico en los países del área mediterránea se debe a la búsqueda de un equilibrio entre el nivel tecnológico y los costes de producción. El sistema de producción de estos países es mucho más simple y tecnológicamente inferior al de los países del norte europeo, pero en contrapartida la inversión y los costes de funcionamiento son claramente menores (Baille, 1994). Son precisamente estas características las que han permitido la gran expansión de estos invernaderos en las zonas de clima semiárido así como el gran aumento de la producción y la obtención de cultivos fuera de temporada que difícilmente podrían darse en la zona de forma natural debido a causas técnicas o económicas (Castilla, 1994).

Sobre la importancia del sector algunos datos pueden proporcionarnos una buena información. Wittwer (1981) cifra en unos 3-6 billones de pesetas la producción anual de las 150.000 ha de invernaderos existentes en esa fecha. Para los invernaderos

holandeses Meijaard (1995) proporciona una cantidad aproximada de 420.000 millones de pesetas. En el caso de España y, a pesar de la poca información disponible, podemos dar algunos datos representativos. Según Briassoulis y col. (1997) la producción en invernaderos representa más del 25% de la renta total hortícola española. En la zona de Almería, donde se sitúa la mayoría de la superficie, las casi 23.000 ha existentes produjeron unos 150.000 millones de pesetas durante el año 1992, cantidad que, unida a la demanda de bienes y servicios que esta actividad genera, representa aproximadamente el 35% del PIB de la provincia (López, 1994). Finalmente, y en caso de Cataluña las más de 500 ha situadas en la comarca del Maresme produjeron unos 12.679 millones de pesetas durante el año 1996 (Montero, 1997).

No obstante existen una serie de problemas asociados a este tipo de sistema de producción (Blanc, 1986), como son las limitaciones del agua para el riego (cantidad y calidad), el control de plagas y enfermedades y durante algunos periodos, las condiciones microclimáticas inadecuadas. Todo ello ha conducido a un freno en el crecimiento de la superficie de invernaderos en los últimos años (Lorenzo, 1994) y a la constatación de una clara tendencia hacia el aumento del nivel tecnológico de los equipamientos e invernaderos, la formación de los agricultores en su uso y ligada a ello un aumento en la calidad de la producción (Castilla, 1991<sup>a</sup>; Lorenzo, 1994).

Nos encontramos pues ante un sector de gran importancia económica dentro de la producción agrícola de los países de la ribera mediterránea que se encuentra, en estos momentos, en un proceso crucial de adaptación y mejora del sistema de producción (instalaciones, riego, fertilización etc.) que marcará la tendencia futura del sector.

**Tabla 1.1.- Distribución global de la superficie (ha) de invernaderos y abrigos.**

Area Geográfica	Tipo de estructura		
	Cubierta de plástico	Cubierta de vidrio	Total
Asia	138.200	3.000	141.200
Mediterráneo	95.300	7.900	103.200
Norte de Europa	16.700	25.800	42.500
América	15.600	4.000	19.600

Fuente: Wittwer y Castilla (1995).

**Tabla 1.2.- Distribución de la superficie (ha) de invernaderos con cubierta de plástico en los principales países de la zona mediterránea.**

País	Superficie
Argelia <sup>+</sup>	6.000
España <sup>*</sup>	28.350
Francia <sup>*</sup>	5.300
Grecia <sup>*</sup>	3.970
Israel <sup>+</sup>	2.200
Italia <sup>*</sup>	22.500
Marruecos <sup>+</sup>	4.000
Portugal <sup>*</sup>	3.000
Turquía <sup>+</sup>	11.000

Fuentes: <sup>\*</sup>Comité International des plastiques en Agriculture (1995) y <sup>+</sup>Baille A. (1994).

## **1.2.-Tipos y problemática de los invernaderos Mediterráneos.**

Como se ha descrito en el apartado anterior, los invernaderos con cubierta de plástico predominan de una manera clara en los países de la zona Mediterránea (tabla 1.1). Dentro de esta denominación se incluye una gran variedad de estructuras en muchos casos derivadas de las construcciones típicas del país como en el caso del invernadero tipo "parral" de la zona de Almería adaptado a partir de las estructuras tradicionales utilizadas para la obtención de uva de mesa (Castilla, 1991<sup>b</sup>; Lorenzo, 1994). Este hecho explica el que, a pesar de las similitudes climáticas entre los países mediterráneos, las estructuras de los invernaderos sean muy diferentes (Montero y Antón, 1993).

Muchas son las clasificaciones de invernaderos propuestas por diversos autores, así Basoccu (1983) clasifica los invernaderos en función del régimen térmico, Matallana y Montero (1995) clasifican los invernaderos en función de: a) el régimen térmico a mantener en su interior, b) el material de cubierta, c) la forma de la cubierta, y d) la estructura de soporte. Finalmente Montero y Antón (1993) para invernaderos de la zona mediterránea distinguen entre invernaderos artesanales e invernaderos industriales, donde por invernaderos industriales consideran aquellos modelos de estructura metálica prefabricados en el taller y transportados al campo para el montaje (p.e. multitúnel y multicapilla con cubierta de plástico) mientras que los invernaderos artesanales serían los de bajo costo con diferentes tipos de forma y estructura (p.e. invernadero "parral" de Almería, los túneles individuales, los invernaderos capilla con estructura de madera de Sicilia, el Maresme, etc.). Esta última clasificación es la que consideraremos para describir los invernaderos con cubierta plástica de la zona mediterránea.

Uno de los invernaderos más extendidos es el multitúnel con cubierta de plástico. Este tipo de invernadero se caracteriza por presentar arcos de tubo curvado como cubierta del techo, ventilación cenital continua (implementada o no con ventanas laterales), y la posibilidad de tener un número variable de naves.

La mayor parte de los cultivos en invernadero del área mediterránea se realizan en invernaderos de bajo costo con cubierta de plástico (Monteiro y col., 1989; Lorenzo, 1994). El sistema de producción de estos países se basa en el uso de estos invernaderos baratos con un mínimo o sin ningún aporte energético con el fin de adaptar las plantas a condiciones inferiores a las óptimas (Castilla y col., 1992; Tognoni y Serra, 1989).

mejorando especialmente el régimen de humedad ambiental y la protección de los cultivos contra el viento (Lorenzo, 1994).

Este sistema de producción que, como ya se ha comentado, ha permitido el aumento espectacular tanto de la superficie de cultivo protegido como de la renta agrícola de la zona, presenta, no obstante, una serie de problemas inherentes que pueden limitar y frenar su expansión, ya que se traducen en bajos rendimientos de los cultivos que además son de calidad irregular y grandes variaciones de producción a lo largo del periodo de cosecha (Monteiro, 1992), es decir producción inestable.

Tal y como señalan diversos autores (Blanc, 1986; Castilla, 1994; González, 1995) los principales problemas de estos invernaderos son: a) El escaso control climático que proporcionan estas estructuras de forma que en la mayoría de los casos el microclima interior se encuentra lejos del óptimo. b) Las limitaciones en el suministro de agua para el riego y la baja calidad de estas aguas en la mayoría de los casos y c) Los problemas patológicos y de plagas ya que en zonas con una elevada superficie dedicada a la horticultura intensiva bajo invernadero es muy fácil que un patógeno-insecto o ácaro encuentre un medio adecuado y termine constituyendo enfermedad o plaga (Lorenzo, 1994).

La solución a todos estos problemas pasa por un aumento en la investigación y el desarrollo tecnológico que permita mejorar técnicas ya existentes u obtener nuevas con el objetivo de mejorar el control sobre la producción. "Parece lógico que uno de los requisitos indispensables para hacer más sostenibles a los sistemas agrícolas sea una inversión, también sostenida, en investigación y extensión agraria" (Feres, 1997). Así de acuerdo con Castilla (1994) el anhelado incremento en la calidad de la producción requiere una mejora de los invernaderos con el objetivo de conseguir un mayor control del microclima interior, y dentro de las técnicas de control del clima en los países templados, la ventilación es seguramente la que tiene mayor importancia.

### **1.3.-La ventilación natural de los invernaderos.**

La ventilación natural es un proceso fundamental que influye en el clima interior del invernadero (Bailey, 1995; Kittas y col., 1995; Boulard y col., 1996; Mistriotis y col., 1997). En el caso de edificaciones, la ventilación contribuye fuertemente en los procesos de intercambio de masa y energía con el ambiente exterior y, en consecuencia, un buen diseño de los sistemas de ventilación puede mejorar tanto el control climático como el uso de la energía (de Jong y Bot, 1992<sup>a</sup>; ASHRAE, 1993; Mistriotis y col., 1997). En particular, y en el caso de los invernaderos, la ventilación contribuye al control de la temperatura, la humedad y la concentración de gases (como el CO<sub>2</sub>) del aire interior, y consecuentemente influye fuertemente en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Bot, 1993; Castilla, 1994; Kittas y col., 1995; Boulard y col., 1996; Mistriotis y col., 1997).

Las características climáticas de los países de la zona mediterránea (altos valores de radiación solar y elevadas temperaturas) provocan que desde principios de la primavera hasta finales de otoño se produzcan calentamientos excesivos que afectan al rendimiento y a la calidad de los cultivos protegidos (Kittas y col., 1996). La refrigeración de los invernaderos durante los períodos cálidos es pues un problema fundamental para conseguir un buen control climático (Boulard y Baille, 1995; Montero y col., 1996).

La ventilación también es muy importante durante el periodo invernal. Una tasa de ventilación deficiente además de incidir negativamente sobre la composición del aire interior (principalmente al producirse déficits en la concentración de CO<sub>2</sub> (Hand, 1984; Lorenzo y col., 1990; Lorenzo, 1994), provoca excesos de humedad, favoreciendo la condensación en la cara interior de las cubiertas y el goteo sobre el cultivo. Esto se traduce en una disminución en la transmisión de radiación solar (Jaffrin y Makhlonf, 1990) con la consecuente pérdida de producción. Además la humedad excesiva favorece el desarrollo de enfermedades criptogámicas (Hand, 1984; Mistriotis y col., 1997) y puede originar deficiencias minerales en los cultivos (Lorenzo, 1994; Mistriotis y col., 1997) como consecuencia de restricciones en la transpiración (Stanghellini y van Meurs, 1992; Holder y Cockshull, 1990).

Descartada la ventilación mecánica por razones obvias de gasto energético y mantenimiento (Mistriotis y col., 1997) la ventilación natural es el método más

utilizado, económico y práctico para garantizar unas condiciones microclimáticas óptimas durante el periodo estival e invernal ( Papadakis y col., 1996; Boulard y Draoui, 1995; Montero y col., 1996).

Aunque los fundamentos de la ventilación natural se encuentran claramente establecidos (Bruce, 1978; Bot, 1983; de Jong, 1990; Bailey, 1995) debido a la dificultad de su estudio, y a pesar de su gran importancia, no existe todavía en la actualidad una ley de ventilación universalmente aplicable. Esto se debe a que el flujo de aire a través de las ventanas no depende únicamente de parámetros determinados mediante leyes físicas, sino que es función de otra serie de parámetros como son: tipo y localización de las ventanas, altura y anchura del invernadero (ASHRAE, 1993).

La mayoría de los estudios de ventilación natural de los invernaderos se han realizado en los países del norte de Europa y en invernaderos del tipo "Venlo" con cubiertas de vidrio y caracterizados por presentar como sistema de ventilación un conjunto de ventanas cenitales discontinuas (Businger, 1954; Bot, 1983; Nederhoff y col., 1983; de Jong, 1990; Fernández y Bailey, 1992). Estos estudios son poco aplicables a los invernaderos de la zona mediterránea que tienen sistemas de ventilación con aperturas continuas y que además son de características geométricas diferentes (Kittas y col., 1995).

En los últimos diez años se ha producido un aumento considerable del número de estudios dedicados a los invernaderos de zonas con clima cálido y, en particular, los dedicados a la ventilación natural (Boulard, 1993; Papadakis y col., 1996; Boulard y Draoui, 1995; Boulard y col., 1996; Montero y col., 1996; Kittas y col., 1995 y 1996; etc.). No obstante, los resultados de que se dispone hasta el momento son para condiciones concretas (climáticas, de estructura de invernaderos etc.) de forma que no existen todavía expresiones generales que describan la ventilación natural (Mistriotis y col., 1997). Uno de los principales problemas para la obtención de estos modelos es el desconocimiento de las características de flujo de las ventanas (particularmente el coeficiente de descarga) parámetro fundamental para determinar la tasa de ventilación de un invernadero (de Jong y Bot, 1992<sup>b</sup>) y que hasta el momento para el tipo de ventanas de los invernaderos mediterráneos únicamente se ha determinado de una manera indirecta a partir de medidas experimentales de la tasa de ventilación (Boulard y Baille, 1995).

En otro orden de cosas hay que destacar que en los últimos años, y de acuerdo con la sensibilidad cada vez más patente hacia la protección del medio ambiente, unido

a la normativa estricta y restrictiva impuesta por la Unión Europea respecto al uso de productos fitosanitarios y control de residuos sobre vegetales, se ha generalizado la utilización de sistemas y técnicas menos agresivas con el medio, como pueden ser los programas de control integrado (Lorenzo, 1994).

Dentro de este objetivo el uso de mallas anti-insecto en las aperturas de ventilación (Castilla, 1994) se está generalizando, ya que frenan la entrada de insectos (y enfermedades como virosis cuyos vectores son insectos) reduciendo de esta forma el número de tratamientos, su costo y los posibles problemas de residuos debidos a ellos (Montero y col., 1996). No obstante, es poca la información de que se dispone sobre este tipo de mallas y en particular no existen trabajos que evalúen su impacto sobre la ventilación natural. Únicamente Bot y Van Holsteijn (1990) a partir de medidas experimentales obtienen reducciones de hasta un 40% de la tasa de ventilación en invernaderos tipo "Venlo". Sase y Christianson (1990), Kosmos y col. (1993) Montero y col.(1996) presentan datos sobre las características de estas mallas (porosidad, coeficiente de descarga etc.) sin haber evaluado su influencia sobre la tasa de ventilación pero constatando el claro descenso de ésta que se puede producir al incorporar las mallas.

Finalmente y para terminar destacar que Montero y Montero (1992) con el fin de aprovechar los beneficios de la utilización de mallas anti-insecto y corregir los posibles efectos negativos sobre la tasa de ventilación presentan la alternativa de un invernadero con cubierta intercambiable que permite substituir la cubierta de plástico por cualquier tipo de malla en función de las condiciones climáticas externas, con lo que al mismo tiempo que aprovechan las ventajas del uso de mallas anti-insecto corrigen el posible efecto negativo sobre la tasa de ventilación al aumentar la superficie de las aperturas del sistema de ventilación.

#### **1.4.-Técnicas de evaluación de la ventilación natural de los invernaderos.**

Existen diversas técnicas o métodos de medida desarrolladas con el objetivo de determinar la ventilación natural de edificaciones y que pueden ser o son aplicadas al estudio de la ventilación natural de los invernaderos

Las técnicas mas utilizadas son las de medida directa que emplean algún tipo de “gas trazador” mezclado con el aire del edificio del que se quiere determinar la ventilación. Estos métodos de medida muy utilizados para el estudio de la ventilación natural y forzada de instalaciones industriales (Baturin, 1976) se han generalizado también en el caso de instalaciones ganaderas (van’t Klooster y Heitlager, 1994) y en particular para invernaderos tanto con cubierta de vidrio (Nederhoff y col., 1983; de Jong y Bot, 1992<sup>a</sup>) como de plástico (Boulard y Draoui, 1995; Montero y col., 1996).

Otra de las técnicas comúnmente empleada es la denominada del “balance de energía”. Esta técnica basada en el balance de masa y energía del invernadero permite calcular de forma indirecta el valor de la tasa de ventilación del invernadero (Fernández y Bailey, 1992). Para ello, es necesario determinar todas las componentes del balance de energía y, una vez medidos todos los parámetros restantes se obtiene la tasa de ventilación del invernadero.

La caracterización del flujo de aire en función de la diferencia de presión existente en las ventanas del invernadero es otra de las técnicas mas utilizadas pues permite la cuantificación de la ventilación y la obtención de modelos. Para ello deben medirse las diferencias de presión existentes entre el interior y el exterior del invernadero y determinar una serie de parámetros como son el coeficiente de descarga de las ventanas y los denominados coeficientes de presión (permanente y fluctuante).

En los últimos años y coincidiendo con el desarrollo de la informática se están introduciendo nuevos métodos que permiten determinar la tasa de ventilación.

Uno de ellos es el uso de las técnicas de visualización de fluidos y análisis de imagen en modelos a escala (Lane-Serff, 1989; Massons y col., 1989) ampliamente utilizado para el análisis de la dinámica de fluidos en edificios y naves industriales y que Oca (1996) aplica a la determinación de la ventilación natural de invernaderos por efecto térmico. No obstante, en este trabajo no se considera el efecto eólico y, en el caso

de invernaderos multitúnel continúa todavía la investigación para verificar la utilización de estas técnicas.

Finalmente, otro de los métodos reconocidos como útiles para el estudio de los procesos de ventilación es el uso de programas de simulación de dinámica de fluidos (“Computational Fluid Dynamics” CFD) (IEA, 1992). Esta técnica utilizada ya para instalaciones ganaderas se presenta como una herramienta útil para el estudio de la ventilación natural de invernaderos multitúnel de dos naves en el trabajo de Mistriotis y col. (1997).

Todas estas técnicas presentan sus ventajas e inconvenientes pero hay consideraciones importantes que limitan, por el momento, el empleo de algunas de ellas y que, por tanto, eliminan su posible utilización en el presente trabajo de investigación.

Así las técnicas de visualización de flujos y análisis de imagen presentan la ventaja de trabajar en el laboratorio y con modelos a escala, cosa que permite un claro abaratamiento de los costes experimentales, pues evidentemente resulta mucho más cómodo, fácil y económico cambiar la posición de las aperturas de ventilación en una maqueta que en un invernadero real. Además utiliza agua como fluido de trabajo y el único coste importante que se presenta es al inicio de la investigación en la construcción de los tanques necesarios para los ensayos y en la adquisición del equipo informático y de visualización y captación de imágenes oportuno. No obstante, y tal y como se ha comentado con anterioridad presenta una serie de graves inconvenientes como son la no inclusión del efecto eólico así como la dificultad de modelizar la incorporación de mallas a las aperturas de ventilación. Por último al ser todavía una técnica en fase experimental necesita medidas complementarias que permitan verificar la posibilidad de su aplicación (Oca, 1996).

En lo referente al uso de programas de CFD de nuevo nos encontramos con problemas similares, tal y como señalan Mistriotis y col. (1997) en la primera publicación que utiliza esta técnica para el estudio de la ventilación natural de invernaderos, los resultados que obtienen no son extrapolables ni para el mismo invernadero analizado localizado en otras condiciones ni para otro tipo de instalaciones similares. Además de nuevo son necesarias todavía medidas directas que permitan calibrar la metodología y obtener con mayor exactitud los modelos que rigen la ventilación natural de los invernaderos. Por último, destacar que todo este proceso debe repetirse en el caso de incorporar mallas en las aperturas de ventilación, pues la

incorporación de las mallas (de sombreado o anti-insectos) varía las ecuaciones que gobiernan el proceso de ventilación natural.

Todas estas consideraciones justifican el uso generalizado de las técnicas restantes, es decir, del método del balance de energía del invernadero, de las técnicas del gas trazador y de la caracterización del flujo de aire en función de la diferencia de presión en las ventanas, ya que permiten determinar la tasa de ventilación de los invernaderos con y sin mallas sin que la incorporación de éstas modifique la metodología experimental

### **1.5.-Objetivos de la tesis.**

De acuerdo con el objetivo de conseguir un mayor control sobre las condiciones de cultivo, en los últimos años dentro de la zona mediterránea se está imponiendo el cambio hacia invernaderos con mejores estructuras y sistemas de automatización que permitan incrementar el grado de control del clima, riego, fertilización etc. Una de estas estructuras es el denominado "invernadero multitúnel" muy extendido en diversas zonas de España, Italia y Francia tanto para la producción de hortalizas como de flor cortada y planta ornamental en maceta (Montero y Antón, 1993).

La apuesta por este tipo de invernaderos que permiten un mayor control del clima interior, y suponen una inversión superior a la de los invernaderos tradicionales pero muy lejana de la de los invernaderos de vidrio del Norte de Europa, es clara y así parece confirmarlo el considerable aumento de trabajos de investigación realizados en multitúneles( Papadakis y col., 1996; Mistriotis y col., 1997).

Por todo esto, el presente trabajo se centra en el estudio de la ventilación natural de este tipo de estructura considerando también el efecto que sobre ésta puede producir la incorporación de mallas anti-insecto. Análogamente y sobre el mismo tipo de estructura se pretende caracterizar la ventilación natural con el nuevo sistema de ventilación (ventana intercambiable) y comprobar la utilidad de este tipo de apertura.

En consecuencia con todo lo anterior se planteó la realización de la presente tesis doctoral con los siguientes objetivos:

1º) Determinar experimentalmente mediante la técnica del gas trazador la tasa de ventilación, en función de la temperatura y dirección del viento exterior, de los invernaderos multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas e intercambiables.

2º) Evaluar el impacto de la incorporación en las aperturas de ventilación de las mallas anti-insecto y de sombreo.

3º) Determinar experimentalmente la tasa de ventilación de un invernadero multitúnel mediante la técnica del balance de energía y contrastar los resultados obtenidos con los medidos mediante la técnica del gas trazador.

4º) Determinar las características de flujo y, en particular el coeficiente de descarga, de las ventanas cenitales rectangulares continuas e intercambiables evaluando la influencia sobre este parámetro de la localización de las ventanas (interiores o laterales) en el invernadero.

5º) Obtener modelos matemáticos que permitan caracterizar y/o determinar la tasa de ventilación de los invernaderos multitúnel a partir de parámetros de fácil medida.

## **1.6.-Organización de la tesis.**

Una vez finalizado el presente capítulo que constituye la introducción de la tesis y en el que se marcan los objetivos del trabajo, en el segundo capítulo se presenta la base teórica de los dos modelos utilizados para el cálculo de la ventilación natural de los invernaderos, el modelo del balance de energía y el de las diferencias de presión obteniéndose en cada caso las ecuaciones que van a permitir cuantificar la tasa de ventilación del invernadero.

En el tercer capítulo y, de acuerdo con lo señalado en el primer y segundo objetivo, se presenta la teoría de la técnica del gas trazador y el invernadero experimental en el que se llevaron a cabo las medidas de la tasa de ventilación para los dos sistemas de ventilación (rectangular continua e intercambiable) con y sin mallas en las aperturas de ventilación, mostrándose los resultados y las expresiones empíricas obtenidas.

El capítulo cuarto afronta el tercer objetivo de la tesis y se realizan los ensayos experimentales con el objetivo de determinar la tasa de ventilación del invernadero multitúnel mediante el método del balance de energía y la técnica del gas trazador contrastándose los resultados obtenidos con ambas técnicas.

En el quinto capítulo se aborda el cuarto objetivo de la tesis y se presentan los modelos a escala en los que se han determinado los coeficientes de descarga de las diferentes combinaciones tipo de ventana y malla obteniéndose también expresiones generales que permiten el cálculo del coeficiente de descarga a partir de las características geométricas de las ventanas.

La determinación de los coeficientes de efecto de viento y la obtención de los modelos finales de cálculo que permiten el cálculo de la tasa de ventilación en cada una de las configuraciones, de acuerdo con el quinto y último objetivo, se presentan en el sexto capítulo. Las conclusiones finales se presentan en el capítulo séptimo siendo el octavo y último el dedicado a recoger la bibliografía utilizada relacionada con el tema de investigación.

## **2.-MODELOS DE VENTILACIÓN.**

La descripción cualitativa de los procesos que rigen la ventilación natural de los invernaderos es relativamente simple. No obstante es necesario un conocimiento mucho más preciso de los procesos físicos con el objetivo de obtener una descripción cuantitativa. Dos son, principalmente, los enfoques para modelizar los procesos de ventilación: el primero de ellos se basa en el balance de energía del invernadero e implica un conocimiento profundo de los procesos de transporte de masa y energía. El segundo se basa en el estudio de la distribución de presión alrededor del invernadero y en las aperturas de ventilación utilizando la ecuación de Bernoulli.

En el presente capítulo se describen los modelos que se obtienen a partir de ambas consideraciones y que han de permitir determinar de forma cuantitativa la tasa de ventilación del invernadero.

### **2.1.-Modelo del Balance de Energía.**

De acuerdo con Bot y van de Braak (1995) las componentes o partes de las que debe considerarse el balance de energía en el caso de los invernaderos son cuatro: 1) la cubierta, 2) el aire, 3) el cultivo y 4) el suelo.

Para el estudio de la ventilación, si en el invernadero no se utiliza ningún sistema de calefacción según, Fernández y Bailey (1992) el balance de energía se puede expresar de acuerdo con la ecuación:

$$\boxed{E_s - E_c - E_{st} - E_v = 0} \quad (2.1)$$

Donde  $E_s$  es la energía solar captada por el invernadero,  $E_c$  son las pérdidas energéticas a través de la cubierta,  $E_{st}$  es la energía almacenada en el invernadero y  $E_v$  es la energía perdida mediante el proceso de ventilación.

La energía perdida mediante ventilación presenta dos componentes (Boulard y Baille, 1994; Bot y van de Braak, 1995). Una debida al calor latente:

$$E_{\text{lat}} = \frac{\Phi}{S_g} \rho \lambda (w_i - w_0) \quad (2.2)$$

donde:  $\Phi$  es la tasa de ventilación del invernadero,  $\rho$  la densidad del aire  $S_g$  la superficie de cultivo del invernadero,  $\lambda$  el calor latente de vaporización del agua y  $(w_i - w_0)$  la diferencia de humedad absoluta entre el aire interior y el exterior.

y la segunda debida al calor sensible:

$$E_{\text{sen}} = \frac{\Phi}{S_g} \rho C_p (T_i - T_0) \quad (2.3)$$

donde:  $C_p$  es el calor específico del aire y  $(T_i - T_0)$  es la diferencia de temperatura entre el aire interior y el exterior.

La energía solar en el invernadero viene dada por:

$$E_s = S_i - S_r \quad (2.4)$$

donde:  $S_i$  es la radiación solar interior y  $S_r$  la reflejada por el cultivo.

En el caso de las pérdidas a través de la cubierta, Boulard y Baille (1994) presentan una ecuación empírica en función de la velocidad del viento exterior según la cual y para el caso del invernadero multitúnel con cubierta de plástico la energía intercambiada a través de la cubierta vendrá dada por la ecuación:

$$E_c = K_c \Delta T \quad (2.5)$$

donde:  $K_c = A + Bu$  siendo  $u$  la velocidad del viento exterior,  $A$  y  $B$  constantes que en el caso de un invernadero con cubierta de plástico toman los valores  $A=6$  y  $B=0.5$ , y  $\Delta T$  es el gradiente de temperatura entre el aire interior y el exterior.

Para esta misma componente, Fernández y Bailey (1992) plantearon la ecuación:

$$E_c = U \frac{S_c}{S_g} (T_i - T_0) \quad (2.6)$$

donde:  $S_c$  es la superficie de la cubierta y  $U$  el coeficiente específico de pérdidas a través de la cubierta.

Los valores de  $U$  se determinan de acuerdo con Jolliet (1991) considerando de forma independiente el intercambio entre la cubierta del invernadero, en su cara interior, y el aire exterior ( $K_0$ ) y el intercambio entre la cubierta del invernadero y el cielo supuesto cuerpo negro “sky” ( $K_s$ ) a partir de la ecuación :

$$U = K_0 + K_s + K_s q_s \quad (2.7)$$

y los diferentes valores vienen dados por:

$$K_0 = \frac{1}{S_g} \left( \frac{G_{cub-int} G_{cub-ext}}{G_{cub-int} + G_{cub-ext} + G_{cub-sky}} \right) \quad (2.8)$$

$$K_s = \frac{1}{S_g} \left( \frac{G_{cub-int} G_{cub-sky}}{G_{cub-int} + G_{cub-ext} + G_{cub-sky}} \right) \quad (2.9)$$

$$q_s = \frac{T_0 - T_s}{T_i - T_0} \quad (2.10)$$

donde: los factores  $G$  denominados coeficientes térmicos de acoplamiento (thermal coupling coefficients) relacionan las pérdidas térmicas con la diferencia de temperatura existente entre el aire interior, el exterior, el cielo supuesto cuerpo negro y la superficie exterior de la cubierta, y  $T_s$  es la temperatura equivalente del cielo supuesto cuerpo negro (Sky temperature).

Las expresiones de cálculo para cada uno de los factores G se encuentran claramente detalladas en el trabajo de Jolliet (1991)

Finalmente y para la energía almacenada en el interior del invernadero, Boulard y Baille (1994) consideran el invernadero como un colector solar y a la energía almacenada como masa térmica del invernadero  $E_{st} = Q_m$ , siendo este término muy pequeño en comparación con el resto de flujos y, generalmente despreciable ( $Q_m=0$ ).

Por el contrario Bot y van de Braak (1995) consideran la energía almacenada en: a) la cubierta, b) el aire del invernadero, c) el cultivo y d) el suelo. Utilizando para su cálculo la expresión:

$$E_{st} = \frac{M C_p (T_b - T_f)}{t_b - t_f} \quad (2.11)$$

donde: M es la masa de cada componente por unidad de superficie del invernadero,  $(T_b-T_f)$  la diferencia de temperatura del componente al inicio y al final del experimento y  $t_b-t_f$  la diferencia de tiempo entre el inicio y el final del experimento.

De acuerdo con lo expuesto las posibilidades para determinar la tasa de ventilación son dos, la primera utilizando el modelo simplificado de Boulard y Baille (1994) combinando las ecuaciones 2.2., 2.3, 2.4 y 2.5 suponiendo que la energía almacenada es despreciable frente a las otras componentes se obtiene:

$$(S_i - S_r) - K_c \Delta T - \frac{\Phi}{S_g} \rho \lambda (w_i - w_0) - \frac{\Phi}{S_g} \rho C_p (T_i - T_0) = 0 \quad (2.12)$$

y a partir de esta expresión, operando se puede determinar la tasa de ventilación del invernadero, de acuerdo con la ecuación:

$$\Phi = S_g \frac{(S_i - S_0) - K_c \Delta T}{\rho \left[ \lambda (w_i - w_0) + C_p (T_i - T_0) \right]} \quad (2.13)$$

La segunda posibilidad es la utilización del modelo complejo planteado por Fernández y Bailey (1992) y Bot y van de Braak (1995) combinando para ello las ecuaciones 2.2, 2.3, 2.4, 2.6 y 2.11 a partir de las cuales obtenemos la expresión:

$$(S_i - S_r) - U \frac{S_s}{S_g} (T_i - T_0) - \frac{\Phi}{S_g} \rho \lambda (w_i - w_0) - \frac{\Phi}{S_g} \rho C_p (T_i - T_0) - E_{stc} - E_{sta} - E_{stg} - E_{sts} = 0 \quad (2.14)$$

donde U se determina de acuerdo con las ecuaciones anteriores (2.7, 2.8, 2.9 y 2.10) y las diferentes componentes de la energía almacenada ( $E_{stc}$  en la cubierta,  $E_{sta}$  en el aire del invernadero,  $E_{stg}$  en el cultivo y  $E_{sts}$  en el suelo) aplicando a cada caso la ecuación 2.11.

De acuerdo con esto, se obtiene finalmente:

$$\Phi = \frac{S_g}{\rho} \frac{(S_i - S_r) - U \frac{S_s}{S_g} (T_i - T_0) - E_{stc} - E_{sta} - E_{stg} - E_{sts}}{\lambda (w_i - w_0) + C_p (T_i - T_0)} \quad (2.15)$$

Por tanto, basándose en el balance de energía se puede determinar la tasa de ventilación del invernadero, aplicando una u otra ecuación (2.13 o 2.15) en función de la disponibilidad de datos y del grado de complejidad del modelo que se quiera emplear.

La utilización del modelo representado por la ecuación 2.15 con cierta fiabilidad implica la determinación de un gran número de variables incluidas las necesarias para el cálculo de los factores térmicos a partir de las expresiones obtenidas por Joliet (1991).

Generalmente y según lo expresado por los mismos autores (Fernández y Bailey, 1992), al aplicar este tipo de modelos los errores de cálculo y medida incrementan considerablemente el error final en la determinación de la tasa de ventilación. Así el cálculo incorrecto de alguno de los factores implicados (por ejemplo la convección entre la cubierta y el aire exterior) o el funcionamiento incorrecto de un solo sensor afecta de forma muy importante al resultado final obtenido por el modelo.

Por ello, en el presente trabajo se utilizó el modelo simplificado propuesto por Boulard y Baille (1994) (ecuación 2.13) para el cálculo y cuantificación de la tasa de ventilación ya que al considerar un número inferior de parámetros de sencilla determinación los posibles errores son más fácilmente detectables.

## 2.2.-Flujo de aire originado por las diferencias de presión.

Este modelo se basa en el estudio de los mecanismos que determinan el intercambio de aire a través de las aperturas de ventilación. Para ello estudia las diferencias de presión creadas alrededor del invernadero y entre el interior y el exterior de éste con el objetivo de poder aplicar el teorema de Bernoulli y conseguir una expresión simple que permita determinar la tasa de ventilación del invernadero a partir de parámetros de fácil medida.

### 2.2.1.-Bases de los mecanismos de ventilación.

La ventilación natural de un invernadero, a través de las aperturas diseñadas con ese fin, es debida a la diferencia de presión existente a ambos lados de la ventana (ASHRAE, 1993). De acuerdo con Boulard y Baille (1995) la relación existente entre la diferencia de presión y la velocidad del aire a través de la ventana puede determinarse, considerando el aire incompresible, a partir de la ecuación de Bernoulli de acuerdo con la expresión:

$$\Delta P(y) = \frac{1}{2} \rho F_0 v^2(y) \quad (2.16)$$

donde  $\Delta P(y)$  es el perfil vertical de diferencia de presión,  $\rho$  la densidad del aire,  $v(y)$  el perfil vertical de velocidad y  $F_0$  el factor de fricción de la ventana que da idea de la resistencia que opone la ventana al flujo de aire.

Si definimos el coeficiente de descarga de la ventana como  $C_d = F_0^{-1/2}$ , y se desprecian los efectos viscosos (de Jong, 1990)  $C_d$  depende únicamente de la geometría de la ventana.

Conociendo la diferencia de presión, se puede determinar la velocidad del aire en la apertura a partir de la expresión:

$$v(y) = \frac{|\Delta P(y)|}{\Delta P(y)} C_d \left( \frac{2}{\rho} |\Delta P(y)| \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

donde el signo de la relación  $|\Delta P(y)| / \Delta P(y)$  marcará el sentido del flujo a través de la ventana.

Si se integra la ecuación 2.17 a lo largo de la altura H de una ventana de longitud L y superficie  $A_0$  ( $A_0=LxH$ ) se puede determinar el flujo de aire ( $\Phi_v$ ) que la atraviesa:

$$\Phi_v = L \int_0^H v(y) dy \quad (2.18)$$

Si se considera una ventana sencilla, la superficie total se puede dividir en una de entrada ( $A_0/2$ ) y otra de salida ( $A_0/2$ ) (Kittas y col., 1995; Boulard y Baille, 1995) de forma que la ecuación 2.18 quedará:

$$\Phi_v = L \int_0^{H/2} v(y) dy \quad (2.19)$$

De acuerdo con las ecuaciones 2.17 y 2.19 el flujo de aire a través de una ventana ( $\Phi_v$ ) se puede determinar conociendo la diferencia de presión a ambos lados de la ventana y el coeficiente de descarga de ésta.

### 2.2.2.-Fuerzas implicadas en la ventilación natural.

Las diferencias de presión causantes de la ventilación natural se producen o son debidas a dos fuerzas principales (ASHRAE, 1993; de Jong, 1990; Bot, 1983; Oca, 1996):

- a) Fuerzas del viento. Originadas por la velocidad del viento exterior.
  
- b) Fuerzas térmicas. También denominadas gravitacionales ("flotabilidad") originadas por la diferencia de temperatura existente entre el interior y el exterior del invernadero.

### 2.2.2.1.-Flujo de aire debido al viento exterior. (efecto eólico).

Cuando el aire sopla sobre o alrededor de un edificio el campo de velocidades del viento genera diferentes presiones en diferentes localizaciones, lo que se traduce en una determinada distribución de presiones sobre las superficies exteriores de éste (Dick, 1950; ASHRAE, 1993).

Generalmente el efecto del viento sobre la ventilación natural se divide en dos componentes claramente diferenciadas (Bot, 1983; de Jong, 1990; Kittas y col., 1996). La primera de ellas es el denominado "efecto permanente" (Steady effect) resultado de considerar que los valores medios de la diferencia de presión (respecto a la presión barométrica de referencia) entre las aperturas de un invernadero se encuentran relacionados con la energía cinética volumétrica del campo de viento ( $1/2 \rho u^2$ ) a una altura de referencia, de acuerdo con la expresión (de Jong, 1990):

$$\Delta \bar{P} = \frac{1}{2} \rho K_p u^2 \quad (2.20)$$

donde  $u$  es la velocidad media del viento exterior a una altura determinada y  $K_p$  es el coeficiente adimensional medio de presión del viento.

Si las aperturas se encuentran en posiciones con diferentes valores de presión (y en consecuencia con diferente coeficiente de presión) la diferencia de presión estática media originará un flujo de aire desde las zonas con un  $K_p$  negativo hacia las zonas con un valor de  $K_p$  positivo, tal y como ocurriría en el caso de un invernadero con aperturas laterales y cenitales (Bot, 1983).

No obstante, en el caso de un invernadero con una o varias naves con aperturas cenitales en la misma dirección, el valor que tomaría  $K_p$  sería idéntico en todas las ventanas y, en consecuencia con lo visto anteriormente, el flujo de aire sería nulo.

Es en estos casos en los que se muestra de forma evidente la existencia de una segunda componente del efecto del viento, la denominada "efecto fluctuante" (Warren, 1977; Bot, 1983) que es debida a las variaciones de presión originadas por el carácter fluctuante de la velocidad del viento que provoca que las distribuciones de presión sean también fluctuantes produciéndose diferencias momentáneas de presión (de Jong, 1990; Boulard y Baille, 1995; Oca, 1996). La amplitud de estas fluctuaciones será también responsable de la renovación del aire interior.

El mecanismo por el cual la ventilación, a través de una o varias aperturas, se debe al carácter fluctuante de la velocidad del viento es bastante complejo y consiste en la combinación de diversos efectos (Malinowski, 1971).

En el caso de invernaderos del tipo “Venlo”, invernaderos de vidrio característicos de Holanda, con ventanas cenitales discontinuas, de Jong (1990) y de Jong y Bot (1992<sup>a</sup>) introducen el concepto de coeficiente de fluctuación de presión ( $K_f$ ) que relaciona la amplitud de la fluctuación de presión sobre la ventana con la energía cinética volumétrica del campo de velocidad en el nivel de referencia, obteniendo la ecuación:

$$\Delta\tilde{P} = \frac{1}{2} \rho_a K_f u^2 \quad (2.21)$$

donde:  $u$  es la velocidad media del viento exterior a la altura de referencia,  $K_f$  es el coeficiente de fluctuación de presión y  $\rho_a$  el valor de la densidad del aire en la ventana.

De acuerdo con de Jong (1990) la resistencia al flujo de una apertura rectangular viene dada por la expresión:

$$\Delta P_w = \frac{1}{2} \rho_a F_0 \bar{v}^2 \quad (2.22)$$

donde:  $\Delta P_w$  es la diferencia de presión originada por el viento,  $\bar{v}$  es la velocidad media del aire en la ventana,  $\rho_a$  la densidad del aire en la ventana y  $F_0$  el factor de fricción.

y la relación entre la diferencia de presión y el flujo volumétrico ( $\Phi_v$ ) a través de la ventana viene dada por:

$$\Delta P_w = \frac{1}{2} \rho_a F_0 \left[ \frac{\Phi_v}{A_0} \right]^2 \quad (2.23)$$

donde  $\Phi_v$  es el flujo volumétrico a través de la ventana y  $A_0$  es la superficie de la ventana.

Considerando el intercambio de aire a través de todas las ventanas del invernadero “Venlo” se puede asumir que las características de ventilación son idénticas para todas ya que trabajan en condiciones muy similares. Si se aplica la hipótesis de trabajo de que el flujo a través de una ventana concreta es todo de entrada (o de salida) y que la diferencia de fluctuación de presión genera un flujo constante de ventilación, entonces las ecuaciones 2.21 y 2.23 se pueden combinar asumiendo que  $\Delta P_w = \Delta \tilde{P}$ .

Considerando que la mitad de las ventanas funcionan como ventanas de salida de flujo y la otra mitad de entrada, se puede determinar una expresión para el flujo de salida o (entrada) a través de cada ventana del tipo (de Jong, 1990):

$$\Phi = \frac{A_0}{2} \frac{\rho_0}{\rho_a} C_d K_f^{1/2} u \quad (2.24)$$

Expresión que nos indica que existe una relación lineal entre el flujo de aire y la velocidad media del viento en el nivel de referencia. La expresión 2.24 combina la resistencia al flujo de aire producida por la ventana (definida mediante  $C_d$ ) y el coeficiente de fluctuación de presión cerca de la ventana  $K_f$ .

Si consideramos el número total de ventanas y su superficie, podemos determinar el flujo de aire total del invernadero debido al efecto eólico a partir de la expresión:

$$\Phi_w = \frac{S}{2} \frac{\rho_0}{\rho_a} C_d K_f^{1/2} u \quad (2.25)$$

donde  $S$  es la superficie total de ventilación del invernadero.

No obstante es necesario conocer los valores del coeficiente de descarga que es función de la geometría de la ventana y del coeficiente de fluctuación de presión, función de la geometría y de la posición de las ventanas en la cubierta (de Jong y Bot, 1992<sup>b</sup>).

En el caso de un invernadero multitúnel de acuerdo con lo expresado por Boulard y Baille (1995) y Boulard y col. (1997) la ventilación por efecto eólico se debe, o tiene su origen, en dos mecanismos:

- a) Variaciones de presión debidas a un cambio de presión interna, originada por la compresibilidad del aire. (Esto es lo que sucedería en el caso de un invernadero con aperturas muy pequeñas situadas en la dirección del viento).
- b) Una difusión turbulenta (en el caso de grandes aperturas de ventilación) originada por una fluctuación espacial de la presión que produce el intercambio de aire entre el interior y el exterior.

A pesar de la complejidad del proceso, si se considera un coeficiente de fluctuación de presión que englobe o describa el efecto fluctuante de la velocidad del viento, se puede obtener una expresión sencilla y muy similar a la ecuación 2.20 (Boulard y Baille, 1995; Kittas y col., 1996;):

$$\boxed{\Delta \tilde{P} = \frac{1}{2} \rho C_f u^2} \quad (2.26)$$

donde  $C_f$  es el coeficiente de presión debido al carácter fluctuante de la velocidad del viento.

De esta forma obtenemos dos ecuaciones (2.20) y (2.26) en las que  $\Delta \bar{P}$  y  $\Delta \tilde{P}$  dependen linealmente de  $u^2$ , es por ello que la mayoría de los trabajos de ventilación (Papadakis y col., 1996; Kittas y col., 1997) introducen una expresión que permita incluir ambos efectos a pesar de que no pueda cuantificarse separadamente la aportación de cada componente ( $\Delta \bar{P}$  y  $\Delta \tilde{P}$ ), la expresión utilizada en estos casos es:

$$\boxed{\Delta P_w = \frac{1}{2} \rho C_w u^2} \quad (2.27)$$

donde  $C_w$  es el "coeficiente de efecto del viento" que recoge conjuntamente los efectos de  $K_p$  y  $C_f$ , y  $\Delta P_w$  la diferencia de presión originada por el viento que incluye la aportación de las dos componentes(permanente y turbulenta).

La utilización de este coeficiente global  $C_w$  si bien no permite distinguir de forma separada los mecanismos de funcionamiento de cada una de las componentes del viento si permite determinar el efecto global de éstas y en consecuencia, cuantificar la diferencia de presión debida al efecto del viento.

En el caso de un invernadero multitúnel con una sola ventana o con varias pero con las mismas características de ventilación, se considera que la mitad del área total de apertura se utiliza para la entrada de aire y la otra mitad para la salida (Papadakis y col., 1996). De acuerdo con esta simplificación, se puede definir el flujo volumétrico utilizando la expresión:

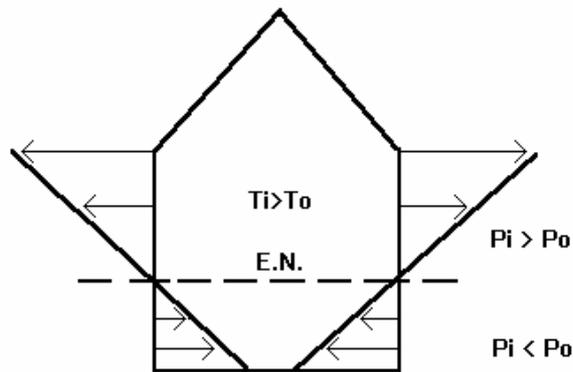
$$\Phi_w = \frac{S}{2} C_d C_w^{1/2} u \quad (2.28)$$

donde  $\Phi_w$  es el flujo volumétrico de aire debido al efecto eólico.

De esta forma, se consigue obtener una expresión lineal en función de la velocidad del viento que será la empleada para estudiar la ventilación natural del invernadero multitúnel debida al efecto eólico.

#### **2.2.2.2.-Flujo de aire debido a la temperatura. (efecto térmico).**

La diferencia de temperatura del aire entre el interior y el exterior del invernadero origina o produce diferencias de densidad y, en consecuencia, diferencias de presión que son las causantes de la ventilación (ASHRAE, 1993). Cualitativamente la distribución de presiones en un edificio, en que la temperatura interior ( $T_i$ ) es homogénea y superior a la exterior presenta la forma:



**Figura 2.1. Diferencias de presión causadas por el efecto térmico en una edificación.**

La altura a la cual la presión interior y exterior se igualan, se denomina "eje neutro". Por debajo de éste la presión interior es menor que la exterior y por encima sucede lo contrario. Por tanto las ventanas situadas por debajo del eje neutro dejan entrar el aire al invernadero y las situadas por encima dejan salir el aire (Bruce , 1978). Puede darse el caso de que el eje neutro pase por alguna de las ventanas, en ese caso parte de la ventana permitirá la entrada de aire y la otra parte lo dejará salir (Oca, 1996).

Si se conoce el valor de la diferencia de presión a nivel del suelo ( $\Delta P_0$ ) y la distribución vertical de la temperatura del aire, se puede determinar la distribución vertical de diferencias de presión a partir de la aproximación de Boussinesq. De acuerdo con ella se considera que todas las propiedades del fluido, con excepción de la densidad, permanecen constantes, despreciándose igualmente las variaciones de densidad salvo cuando dan lugar a fuerzas gravitacionales. Si, con el fin de simplificar el problema, se asume que la temperatura del aire interior y exterior son homogéneas (Bruce, 1978; Zhang y col., 1989). De acuerdo con esto:

$$\Delta P(y) = \Delta P_0 - \rho g \left( \frac{\Delta T}{T} \right) y \quad (2.29)$$

donde T es la temperatura del aire exterior,  $\Delta T$  es la diferencia entre el interior y el exterior y g es la aceleración de la gravedad.

En consecuencia la ecuación 2.17. queda de la forma:

$$v(y) = \frac{|\Delta P(y)|}{\Delta P(y)} C_d \left[ \frac{2}{\rho} \left( \Delta P_0 - \rho g \left( \frac{\Delta T}{T} \right) y \right) \right]^{1/2} \quad (2.30)$$

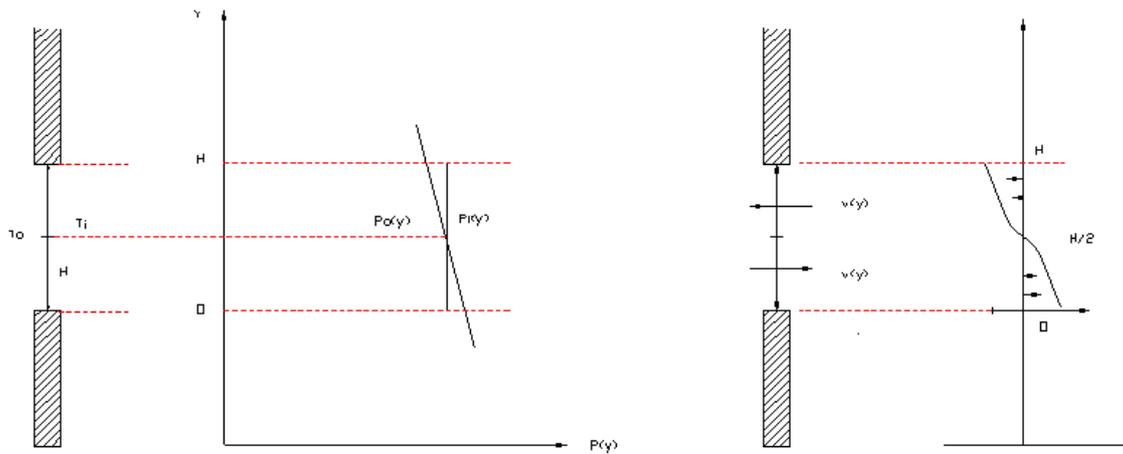
e integrando la ecuación 2.19 con  $v(y)$  de acuerdo con la expresión 2.30 podemos determinar el flujo de aire.

La integración de la ecuación 2.19 no es una tarea fácil pues generalmente no se suele conocer el valor de la velocidad del aire en cada punto de la ventana. De acuerdo con Boulard y Baille (1995) se pueden considerar dos hipótesis respecto al flujo a través de las ventanas: (1) La velocidad del aire en la ventana sigue una distribución vertical dada por la ecuación 2.30, y (2) se asume, con el fin de simplificar la forma del modelo, que las velocidades de los flujos de aire de entrada y de salida son constantes. Estas dos hipótesis las denominan aproximación de segundo y de primer orden respectivamente.

(1) Aproximación de segundo orden. En este caso, se considera que la velocidad del flujo de aire de entrada (parte inferior de la ventana) o del flujo de salida (parte superior) viene dada por la ecuación 2.30 (figura 2.2). Combinando la ecuación 2.19 y la 2.10 e integrando a lo largo de la superficie de entrada se tiene:

$$\Phi_T = \frac{L C_d}{3 \left( \frac{\Delta T}{T} \right) g} \left[ \left( 2g \frac{\Delta T}{T} \right) \left( \frac{H}{2} \right) \right]^{3/2} \quad (2.31)$$

donde  $\Phi_T$  es el flujo volumétrico de aire debido al efecto térmico, L es la longitud de la ventana y H la altura vertical de la ventana.

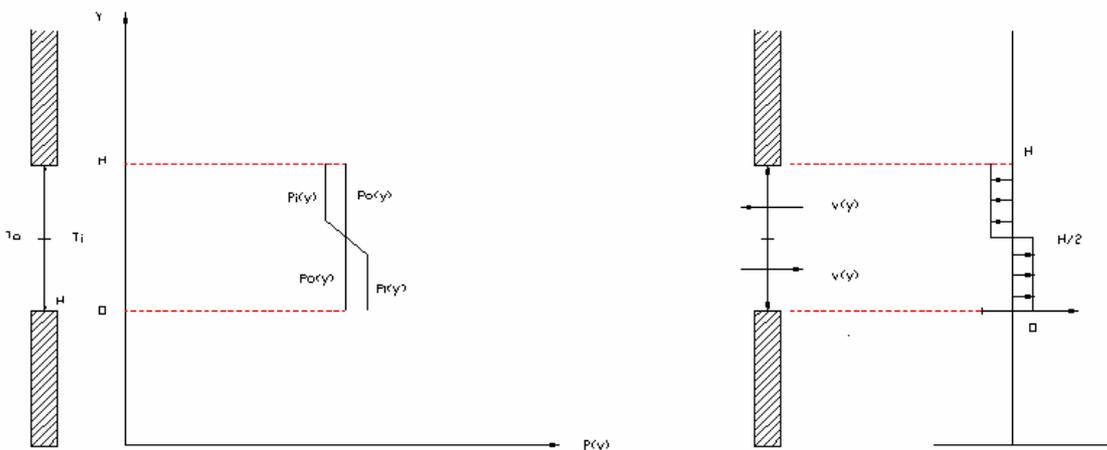


**Figura 2.2. Esquema de la distribución vertical de presión y velocidad en ambas caras de una ventana de acuerdo con la aproximación de segundo orden.**

(2) Aproximación de primer orden. En este caso se realiza una simplificación para facilitar el cálculo. Esta consiste en considerar que la velocidad del flujo de aire de la ecuación 2.30 tiene un valor constante e igual a "v" para el flujo de entrada y "-v" para el flujo de salida (figura 2.3).

De acuerdo con esto, si se denomina h a la altura del centro geométrico de la superficie de entrada, la ecuación 2.30 quedará:

$$v = \frac{|\Delta P|}{\Delta P} C_d \left[ \frac{2}{\rho} \left( \Delta P_0 - \rho g \left( \frac{\Delta T}{T} \right) h \right) \right]^{1/2} \quad (2.32)$$



**Figura 2.3. Esquema de la distribución vertical de presión y velocidad en ambas caras de una ventana de acuerdo con la aproximación de primer orden.**

Si  $h_0$  es la altura correspondiente al eje neutro, de acuerdo con lo visto con anterioridad en ese punto  $\Delta P=0$  y  $v=0$ , con lo que a partir de la ecuación 2.32 con  $v=0$  tendremos:

$$\Delta P_0 = \rho g \left( \frac{\Delta T}{T} \right) h_0 \quad (2.33)$$

y substituyendo la expresión para  $\Delta P_0$  en la ecuación 2.32 tenemos:

$$v = \frac{|\Delta P|}{\Delta P} C_d \left[ 2g \left( \frac{\Delta T}{T} \right) (h_0 - h) \right]^{1/2} \quad (2.34)$$

Finalmente si se substituye la expresión de  $v$  en la ecuación 2.19 para determinar el flujo de aire y se integra entre 0 y  $H/2$  (superficie de entrada de aire) o entre  $H/2$  y  $H$  (superficie de salida de aire) se obtiene la expresión:

$$\Phi_{VT} = \frac{A_0}{2} C_d \left[ 2g \frac{\Delta T}{T} \frac{H}{4} \right]^{1/2} \quad (2.35)$$

Si se considera la superficie total de ventilación del invernadero  $S$  y, se supone que la mitad de la superficie es de entrada de aire y la otra mitad es de salida (Boulard y Baille, 1995) se obtiene la ecuación:

$$\Phi_T = \frac{S}{2} C_d \left[ 2g \frac{\Delta T}{T} \frac{H}{4} \right]^{1/2} \quad (2.36)$$

Expresión mas simple para el cálculo del flujo de aire debido al efecto térmico que la ecuación 2.32.

### 2.2.3.-Intercambio de aire debido a la contribución de los efectos térmicos y eólicos.

En realidad, los efectos térmicos y eólicos se producen simultáneamente de forma que las componentes se pueden superponer con el objetivo de determinar la presión a cada lado de la apertura (de Jong, 1990). De acuerdo con esto, el incremento de presión producido por el efecto combinado del viento ( $\Delta P_w$ ) y la temperatura ( $\Delta P_T$ ) vendrá dado por:

$$\Delta P = \Delta P_w + \Delta P_T \quad (2.37)$$

Por otro lado, diversos trabajos (de Jong, 1990; ASHRAE, 1993) recomiendan considerar la suma vectorial de ambos flujos de ventilación utilizando la expresión:

$$\Phi = \left( \Phi_w^2 + \Phi_T^2 \right)^{1/2} \quad (2.38)$$

Esta segunda expresión (2.38) utilizada por de Jong (1990) para invernaderos de vidrio tipo "Venlo" le proporcionó resultados con errores máximos del 20% entre los valores observados (mediante medida experimental) y los previstos utilizando modelos.

Para invernaderos multitúnel con cubierta de plástico Boulard y Baille (1995) plantean dos hipótesis al combinar ambos efectos:

1) Considerar que la presión final resultante es consecuencia de la suma de las diferencias de presión debidas a ambos efectos (eólico y térmico) obteniéndose en este caso la misma expresión que la ecuación 2.37.

2) La segunda se basa en la diferencia entre los flujos turbulento y estático para determinar el flujo total como la suma de ambos flujos considerados de forma independiente. Obteniendo la expresión:

$$\Phi = \left( \Phi_s + \Phi_w \right) \quad (2.39)$$

donde  $\Phi_S$  es el flujo estático debido al efecto térmico y  $\Phi_W$  es el flujo turbulento debido al efecto eólico. Esta hipótesis, tal y como señalan los autores, lleva implícito considerar que la mayor parte del efecto eólico es turbulento y que se puede determinar utilizando la expresión 2.28.

La aplicación de estas dos hipótesis les lleva a obtener una serie de modelos en función de las diferentes aproximaciones consideradas.

El hecho de disponer de medidas experimentales de la tasa de ventilación para el mismo tipo de invernadero (Boulard y Draoui, 1995) les permite validar cada uno de los modelos obteniendo los mejores resultados en el caso de considerar que la diferencia de presión total es igual a la suma de las diferencias de presiones de cada uno de los efectos por separado. Es decir obtienen los mejores resultados al considerar su primera hipótesis y utilizar la expresión 2.37. No obstante, las diferencias observadas son mínimas y el ajuste para los diferentes modelos lo suficientemente bueno como para no poder descartar la aplicación de uno u otro.

De hecho, la mayoría de los modelos empleados en los estudios de ventilación natural de invernaderos multitúnel consideran la segunda hipótesis planteada por Boulard y Baille (1995) utilizando la ecuación 2.39 y determinando el flujo de aire debido al efecto térmico a partir de la aproximación de primer orden (ecuación 2.35) y el flujo de aire debido al efecto eólico a partir de la ecuación 2.28 (Boulard y col., 1996, 1997; Kittas y col., 1995, 1996 y 1997; Montero y col., 1996). Estas consideraciones les llevan a obtener la siguiente expresión para el cálculo del flujo de aire:

$$\Phi = \frac{S}{2} C_d \left[ 2g \frac{\Delta T H}{T} \frac{H}{4} \right]^{1/2} + \frac{S}{2} C_d \left[ C_w^{1/2} u \right] \quad (2.40)$$

donde  $S$  es la superficie total de las aperturas de ventilación.

En la mayoría de ocasiones la influencia del efecto térmico es despreciable en comparación con el efecto eólico. Diversos autores señalan el valor de velocidad de viento de  $1.5 \text{ ms}^{-1}$  (Papadakis y col., 1996; Boulard y col., 1996; Mistriotis y col., 1997) como límite a partir del cual el efecto térmico prácticamente no tienen ninguna influencia sobre el intercambio de aire a través de las ventanas del invernadero multitúnel. De acuerdo con esto, proponen una simplificación de la expresión 2.40 en la

que no se considera el efecto térmico. En este caso el flujo de aire intercambiado se determinaría a partir de la expresión:

$$\Phi = \frac{S}{2} C_d C_w^{1/2} u \quad (2.41)$$

donde: S es la superficie total de las aperturas de ventilación,  $C_d$  el coeficiente de descarga de las ventanas,  $C_w$  el coeficiente de efecto del viento y u la velocidad media del viento exterior a una altura determinada.

Los modelos que determinan la tasa de ventilación a partir de las ecuaciones 2.40 y su simplificación 2.41 son los más extendidos para el cálculo de la ventilación natural de invernaderos multitúnel con aperturas cenitales y, por tanto, los que se analizarán y evaluarán en esta tesis.

## **3.-MEDIDA EXPERIMENTAL DE LA VENTILACIÓN DE LOS INVERNADEROS.**

### **3.1.-Introducción.**

Según se ha comentado en el capítulo 1 del presente trabajo de investigación, uno de los objetivos que se pretende obtener es la cuantificación de la tasa de ventilación del invernadero multitúnel. Además también se pretende determinar la tasa de ventilación del mismo tipo de invernadero con mallas en las aperturas de ventilación con el fin de cuantificar el impacto que sobre la ventilación natural implica la incorporación de mallas en las ventanas.

En el mismo capítulo se han explicado con el mayor detenimiento posible las diversas técnicas empleadas para determinar la tasa de ventilación de los invernaderos. Como ya se ha comentado una de las más utilizadas y fáciles de aplicar para el caso de invernaderos son las denominadas “técnicas del gas trazador” que pueden emplearse para invernaderos con o sin mallas en las ventanas.

Es por todo esto, que en el presente capítulo se pretende determinar mediante el uso de las técnicas del gas trazador la tasa de ventilación de un invernadero multitúnel con dos sistemas de aperturas de ventilación en los que también se han instalado mallas (de sombreado y anti-insectos) para evaluar y cuantificar su impacto sobre la ventilación natural.

### **3.2.-Material y métodos.**

#### **3.2.1.-Técnicas del gas trazador.**

Según Goedhart y col. (1984) el mejor método para determinar la ventilación de los invernaderos es medirla directamente mediante las técnicas del gas trazador.

Estas técnicas se denominan así porque utilizan para su proceso de medida un gas inerte y no reactivo (el "gas trazador"). Este gas es distribuido, mediante algún sistema, por el interior del edificio y su concentración se determina y monitoriza relacionándola luego con la tasa de ventilación (ASHRAE, 1993).

La elección del gas trazador es fundamental pues de acuerdo con Nederhoff y col. (1983) y van't Klooster y Heitlager (1994) debe cumplir las siguientes demandas:

- a) Debe ser fácilmente medible a bajas concentraciones.
- b) Debe tratarse de un gas inerte, no tóxico (para animales y plantas) y no inflamable.
- c) No debe ser un componente natural del aire (en el invernadero o en el exterior), o serlo a muy baja concentración.
- d) Su peso molecular debe ser muy similar al peso medio de los componentes del aire.

Entre los diferentes gases citados en la bibliografía (Baturin, 1976; Goedhart y col., 1984; Bot, 1983; de Jong, 1990; etc.) cabe mencionar, entre otros: metano ( $\text{CH}_4$ ), hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ); Argón-41 y Kriptón-85.

En función de los criterios anteriormente mencionados es evidente que el metano ( $\text{CH}_4$ ) no es inerte y además es inflamable. Por otro lado el  $\text{SF}_6$  y el Kriptón tampoco son deseables ya que presentan pesos moleculares muy elevados (146 y 85 respectivamente). El  $\text{CO}_2$  no es inerte ya que su concentración está influenciada por los procesos bioquímicos (fotosíntesis, respiración). El hidrógeno y los gases radioactivos a pesar de que permiten obtener buenos resultados (Wittle y Lawrence, 1960; Baturin, 1976) no son gases ideales para trabajar con ellos. Finalmente el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) satisface todos los requisitos y de acuerdo con diversos autores (Bot, 1983; de Jong, 1990; Fernández y Bailey, 1992; Boulard y Baille, 1995; Kittas y col., 1995) es el más adecuado de todos los anteriormente mencionados para determinar la tasa de ventilación del invernadero mediante la técnica del gas trazador.

Todas las técnicas de medida se basan en el balance de masa del gas trazador dentro del edificio. Asumiendo que la concentración en el exterior es cero, el balance toma la forma (Goedhart y col., 1984):

$$\boxed{V \left( \frac{dc}{dt} \right) = F(t) - Q(t) c(t)} \quad (3.1)$$

donde  $V$  es el volumen del edificio estudiado,  $c(t)$  es la concentración de gas trazador en el tiempo  $t$ ,  $dc/dt$  es la relación de cambio de concentración con el tiempo,  $F(t)$  es la cantidad de gas aportado en el tiempo,  $Q(t)$  es el flujo de salida de aire del edificio en el tiempo  $t$ .

La ecuación 3.1 se basa en las siguientes suposiciones: el flujo de aire fuera del edificio es el proceso dominante que renueva el gas trazador, el gas no reacciona químicamente ni es absorbido por las paredes interiores, la concentración de gas en el edificio es uniforme y puede representarse por un valor simple (ASHRAE, 1993).

Si se asume que la densidad del aire interior y exterior es idéntica,  $Q$  se refiere al flujo de aire en el edificio, y la relación  $Q(t)/V$  es la denominada Tasa de ventilación  $\Phi$ . Por tanto la ecuación 3.1 puede reescribirse:

$$\boxed{\frac{dc}{dt} = \frac{F(t)}{V} - \Phi c(t)} \quad (3.2)$$

Existen varias técnicas para determinar la tasa de ventilación utilizando gas trazador, en el caso de los invernaderos las más empleadas son el método de inyección constante y el método de descenso de la concentración (Bot, 1983; Goedhart y col., 1984; de Jong, 1990):

### 3.2.2.1.-Método de Inyección Constante.

Mediante esta técnica se inyecta el gas trazador al interior del invernadero de forma constante. Después de transcurrir un tiempo suficiente, el término transitorio se reduce a cero, la concentración alcanza el equilibrio y en ese caso  $dc/dt=0$  con lo que la ecuación 3.2 toma la forma:

$$\boxed{\Phi = \frac{F(t)}{V c(t)}} \quad (3.3)$$

La expresión 3.3 únicamente es válida para aquellos sistemas en los que el ratio de ventilación es constante, es decir para sistemas en o muy cerca del equilibrio. La utilización de ésta técnica por Bot (1983) se realizó tomando  $CO_2$  como gas trazador e inyectando una gran cantidad de gas para alcanzar el equilibrio. El uso de  $CO_2$  como gas

trazador puede presentar problemas si hay presencia de cultivo al medir la tasa de ventilación ya que interviene en los procesos de intercambio de las plantas (fotosíntesis, respiración) y además se encuentra a elevadas concentraciones en la atmósfera exterior. Una posible solución sería la utilización de otro gas como puede ser el N<sub>2</sub>O que elimina estos problemas. No obstante, para alcanzar el equilibrio sería necesario inyectar una elevada cantidad de gas, el precio del N<sub>2</sub>O es muy elevado en comparación con el del CO<sub>2</sub> lo que representaría un coste muy superior en la realización de los ensayos experimentales, coste que puede llegar a cuestionar la aplicabilidad de esta técnica.

Otros inconvenientes añadidos de éste método son la necesidad de determinar la concentración absoluta de gas así como la relación de inyección (ASHRAE, 1993).

### 3.2.1.2.-Método del Descenso de la Concentración. (Decay Rate Method)

Esta es la técnica habitualmente más empleada para la medida de la tasa de ventilación (ASHRAE, 1993) y la más sencilla al tratarse de un proceso estandarizado (ASTM, 1983).

Mediante esta técnica se inyecta una pequeña cantidad de gas trazador en el espacio y se mezcla con el aire interior, una vez finalizada la inyección  $F(t)=0$  con lo que integrando la ecuación 3.2 se obtiene:

$$\boxed{c(t) = c_0 e^{-\Phi t}} \quad (3.4)$$

donde  $c_0$  es la concentración de gas trazador en  $t=0$ .

Esta es la ecuación utilizada de forma general para determinar la tasa de ventilación de los invernaderos (de Jong, 1990; Fernández y Bailey, 1992; Kittas y col., 1995). Para ello se mide de forma periódica la concentración de gas trazador durante el descenso y se expresan los datos de forma logarítmica obteniéndose la expresión:

$$\boxed{\ln\left(\frac{c(t)}{c_0}\right) = -\Phi(t)} \quad (3.5)$$

Representando gráficamente los valores de  $\ln(c(t)/c_0)$  respecto al tiempo "t" la pendiente de la recta obtenida proporciona el valor de la tasa de ventilación del invernadero.

Esta técnica presenta la ventaja de necesitar una cantidad de gas trazador muy inferior. Además no es necesario determinar la concentración absoluta y únicamente son necesarias las concentraciones relativas (hecho que facilita la calibración del aparato). Finalmente y en contraste con la técnica de inyección constante tampoco es necesario conocer la relación de inyección de gas y únicamente se ha de asegurar que la concentración se encuentra dentro del rango del aparato de medida.

Todas estas ventajas han originado que ésta sea la técnica más utilizada no sólo en la determinación de la tasa de ventilación de invernaderos sino también de otro tipo de instalaciones como pueden ser las construcciones ganaderas (van't Klooster y Heitlager, 1994; Papadakis y col., 1996).

Tanto la ecuación 3.1 como la 3.5 asumen que la concentración del gas trazador es uniforme en el interior del edificio (de Jong, 1990): Si la mezcla del gas no es homogénea esta suposición no es adecuada y la determinación de la tasa de ventilación será errónea. Por ello debe asegurarse al realizar las determinaciones experimentales una distribución y mezcla homogénea del gas trazador con el aire del invernadero para evitar posibles errores de medida (ASHRAE, 1993). También es conveniente tomar muestras de aire en más de un punto del invernadero.

### **3.2.2.-Dispositivo experimental.**

La totalidad de los ensayos realizados con el fin de determinar la tasa de ventilación se llevaron a cabo utilizando la técnica del descenso de la concentración del gas trazador (decay rate method) en un invernadero multitúnel de tres naves y 230 m<sup>2</sup> de superficie localizado en el IRTA-Centre de Cabrils (Barcelona). Sobre este tipo de invernadero se estudiaron dos tipos de sistemas de ventilación: el que podemos denominar "clásico" caracterizado por presentar ventanas cenitales rectangulares continuas de apertura vertical con cremallera hasta una altura máxima de 0.6 m (figura 3.1), y el denominado "intercambiable" (figura 3.3) que se caracteriza por permitir la recogida del plástico de la cubierta y obtener una apertura equivalente a la mitad de la apertura del túnel (Montero y Montero, 1992). Debido al hecho de que ambos sistemas permiten la incorporación de mallas (de sombreado y anti-insectos) en las aperturas de

ventilación se procedió al estudio de las diferentes combinaciones tipo de ventana y tipo de malla posibles (tabla 3.1).

**Tabla 3.1.-Combinaciones tipo de ventana y tipo de malla utilizadas para el estudio de la tasa de ventilación del invernadero multitúnel.**

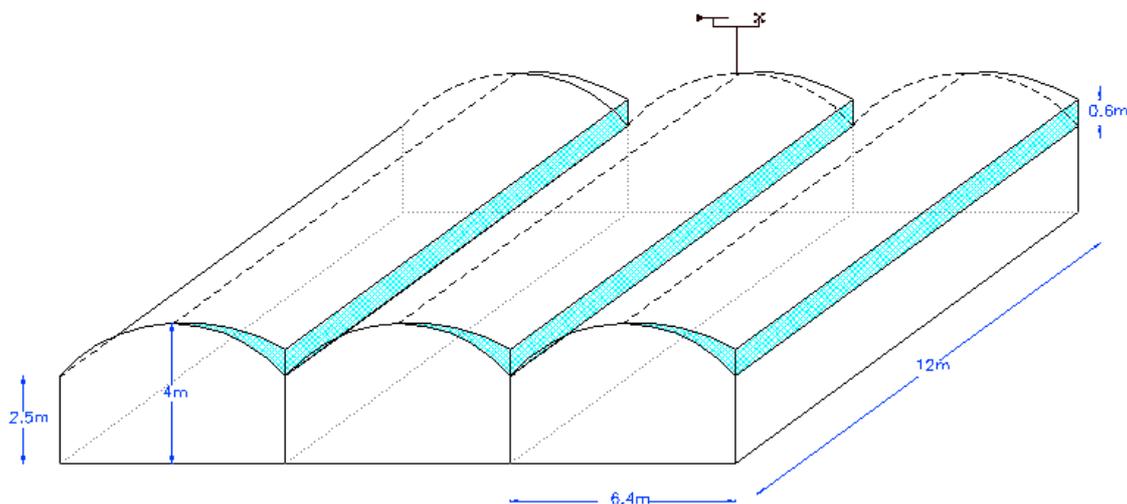
Tipo ventana	Tipo de malla			
	Sin malla	Malla sombreo	Malla anti-pulgón	Malla anti-trip.
Rectangular continua	X	(1)	X	X
Intercambiable	(2)	X	X	X

(1): Combinación no estudiada por su uso prácticamente nulo.

(2): No evaluada.

Las mallas analizadas fueron tal y como podemos observar en la tabla 3.1 una malla de sombreo caracterizada por presentar una transmisión del 56%. Asimismo se utilizó una malla anti-pulgón (Nicolón 66336) con un tamaño de cuadrícula de 0.4x0.4 mm y una porosidad del 45%, finalmente una malla anti-trip (Nicolón 96) con un tamaño de cuadrícula de 0.17x0.17 mm y una porosidad del 25%.

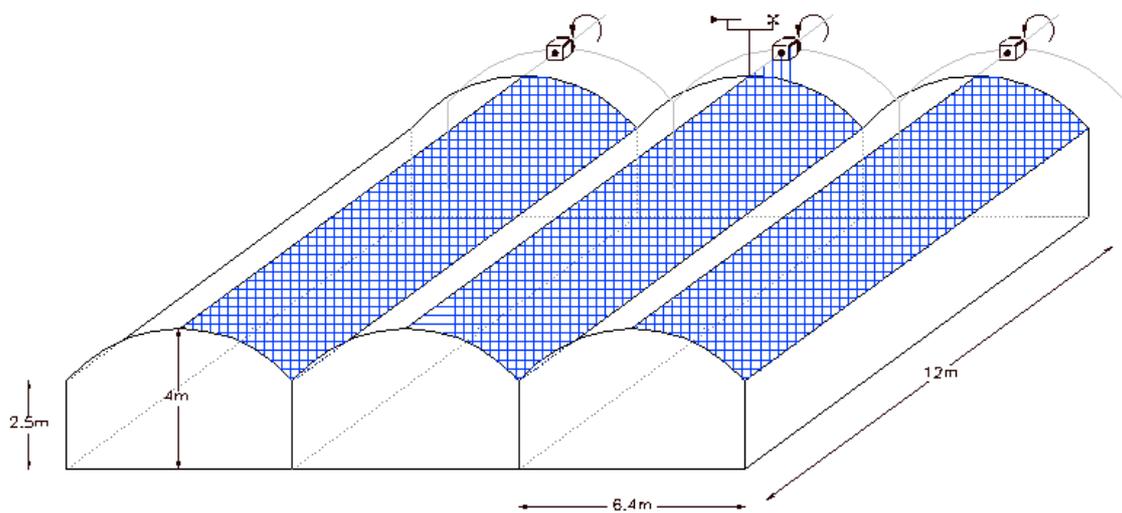
La configuración ventana intercambiable sin malla no se evaluó, tal y como se explica en el apartado 3.3.2, por limitaciones del dispositivo experimental.



**Figura 3.1. Características del invernadero experimental con ventanas cenitales rectangulares continuas y una malla incorporada en las aperturas de ventilación.**



**Figura 3.2. Detalle de una ventana cenital rectangular continua sin malla.**



**Figura 3.3. Características del invernadero experimental con ventanas cenitales intercambiables y una malla incorporada en las aperturas de ventilación.**



**Figura 3.4. Vista general de un invernadero multitúnel con el sistema de apertura de ventanas denominado intercambiable.**

#### Procedimiento experimental.

De acuerdo con lo propuesto por diversos autores (Nederhoff y col., 1983; Goedhart y col., 1984; Fernández y Bailey, 1992) se utilizó óxido nitroso ( $N_2O$ ) como gas trazador al cumplir con todas las características deseables para ser utilizado como tal.

El procedimiento utilizado en cada una de las medidas experimentales fué el siguiente: en primer lugar se distribuyó el gas en el invernadero empleando para ello tres tubos de polietileno uniformemente perforados de los habitualmente utilizados como tubos portagoteros (12 mm de diámetro). Los tubos se desplegaron uno en cada nave, con el objetivo de conseguir que la distribución del gas fuera lo más homogénea posible. Simultáneamente y para garantizar la mezcla uniforme del gas con el aire del

invernadero, durante todo el proceso de distribución se mantuvo el ventilador del sistema de calefacción en funcionamiento.

Una vez alcanzada la concentración deseada (por encima del rango de medida del analizador de gases) se espero un tiempo prudencial (10 minutos: Fernández y Bailey, 1992) y se procedió a la apertura de las ventanas hasta la altura experimental (0.6 m en el caso de las ventanas rectangulares continuas y hasta la cumbrera en el de las intercambiables). El proceso de apertura de las ventanas no supero en ningún caso el minuto de tiempo y en todos los experimento se comprobó que la concentración de gas al finalizar la apertura se mantuviera por encima del rango de medida del analizador.

Para determinar la concentración de gas trazador en el aire del invernadero se muestreó en seis puntos diferentes (dos en cada nave, localizados a 4 m de las paredes laterales y a 1.5 m de altura), el aire se bombeó desde los puntos de medida y a través de un tubo de polietileno transparente (0.5 mm de diámetro) hasta el analizador de gases por infrarrojos o IRGA (Ultramat 5M, Siemens, Alemania). que permitió determinar en cada momento la concentración de óxido nitroso (figura 3.5).



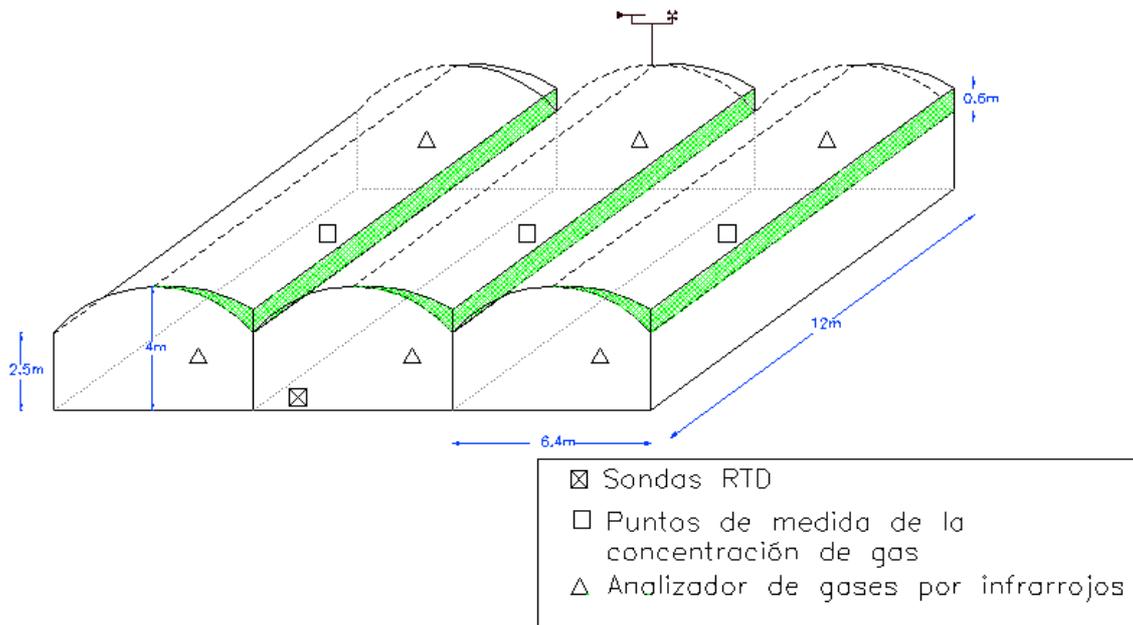
**Figura 3.5. Analizador de gases por infrarrojo (Ultramat 5M, Siemens, Alemania) utilizado en los ensayos para determinar la tasa de ventilación del invernadero.**

De forma simultánea a las medidas de variación de concentración del gas trazador se midieron los parámetros ambientales necesarios para determinar la tasa de ventilación del invernadero.

Para ello se midió la temperatura del aire interior mediante tres sondas del tipo PRT ( Termómetros de resistencia de platino en unidades ventiladas, Crison, Barcelona) colocadas en el interior de un tubo aspirado y situadas en el centro de cada nave a una altura de 1.5 m. Al mismo tiempo y con una sonda de las mismas características situada en el exterior a 5 m del invernadero y a la misma altura que las interiores (1.5 m) se determinó la temperatura del aire exterior. Una vez conocidas ambas temperaturas se determinó la diferencia de temperatura existente entre el aire interior y exterior. Análogamente se midió la velocidad y la dirección del viento por medio de un anemómetro de cazoletas (Vector A100R Anemometer, Delta T Devices, UK) y una veleta (Vector W200P Windvane, Delta T Devices, UK) respectivamente situados en la cumbrera del invernadero (figuras 3.1 y 3.3).

Los datos de concentración de  $N_2O$  así como las variables ambientales se registraron mediante un equipo de adquisición de datos (delta logger, delta T Devices, UK) tomándose lecturas cada segundo y realizándose la media cada cinco segundos.

En la figura 3.6 se presenta un esquema con la localización de cada uno de los sensores empleados en las determinaciones experimentales.



**Figura 3.6. Esquema de la disposición de los sensores en los diversos ensayos de tasa de ventilación mediante la técnica del gas trazador.**

Tratamiento de datos.

Una vez obtenidos los ficheros con los datos experimentales se utilizó una hoja de cálculo (Microsoft excel v 5.0) para su procesamiento obteniéndose en cada ensayo los valores de velocidad y dirección del viento, temperatura del aire interior y exterior y la tasa de ventilación para las condiciones del experimento. Posteriormente se estableció la regresión multilínea entre la tasa de ventilación, la velocidad del viento y la diferencia de temperatura de acuerdo con la ecuación 2.39 mediante el programa estadístico SAS/STAS (SAS Institute, 1989).

Finalmente y para evaluar la influencia o no influencia de la dirección del viento sobre la tasa de ventilación se compararon las rectas de regresión obtenidas para barlovento y sotavento de acuerdo con lo propuesto por Seber (1977) y Gomez y Gomez (1984).

La metodología para realizar este tipo de comparaciones se encuentra claramente explicada en Kleinbaum (1988) y consiste en introducir una variable ficticia Z que será 0 si el valor es de barlovento y 1 si se trata de sotavento, de acuerdo con esto los datos medidos tomarán la forma:

Barlovento:  $(X_{1b}, Y_{1b}, 0), (X_{2b}, Y_{2b}, 0), \dots, (X_{nb}, Y_{nb}, 0)$

Sotavento:  $(X_{1s}, Y_{1s}, 1), (X_{2s}, Y_{2s}, 1), \dots, (X_{ns}, Y_{ns}, 1)$

Y en consecuencia, para los datos combinados obtenemos el siguiente modelo de regresión múltiple:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Z + \beta_3 XZ$$

Obteniéndose los siguientes dos modelos para los dos valores de Z:

$$\text{Sí } Z=0: \quad Y_b = \beta_0 + \beta_1 X$$

$$\text{Sí } Z=1: \quad Y_s = (\beta_0 + \beta_2) + (\beta_1 + \beta_3) X$$

llamando:

$$p_1 = \beta_0; \quad p_2 = \beta_0 + \beta_2; \quad m_1 = \beta_1; \quad m_2 = \beta_1 + \beta_3$$

Queda:

$$y_1 = p_1 + m_1 X \quad \text{si } Z=0$$

$$y_2 = p_2 + m_2 X \quad \text{si } Z=1$$

Una vez obtenidos los modelos y, para comparar las dos rectas de regresión se realizaron dos test de hipótesis para cada par de rectas. Estos fueron:

Test de paralelismo: En el que se comparan las pendientes de las dos rectas de regresión siendo la hipótesis nula  $H_0$  la igualdad de pendientes ( $m_1 = m_2$ ) es decir  $\beta_3 = 0$  y la alternativa  $H_1$  la diferencia de estas ( $m_1 \neq m_2$ ) es decir  $\beta_3 \neq 0$ .

Test de los términos independientes: De nuevo se realiza un test de hipótesis en el que la hipótesis nula es la igualdad de puntos de intersección ( $p_1 = p_2$ ) es decir  $\beta_2 = 0$  y la alternativa la diferencia de estos ( $p_1 \neq p_2$ ) es decir  $\beta_2 \neq 0$ .

### 3.3.- Resultados.

#### 3.3.1.-Ventanas cenitales rectangulares continuas.

Los ensayos experimentales han permitido obtener la ecuación de la tasa de ventilación en función de la velocidad del viento exterior y de la diferencia de temperatura interior y exterior. En la tabla 3.2. se presentan los resultados obtenidos para el invernadero con apertura cenital rectangular continua, con y sin mallas en las ventanas.

**Tabla 3.2. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $m^3s^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ) y del gradiente de temperatura ( $\Delta T^{1/2}$ , K) de un invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla, con malla anti-pulgón y malla anti-trip. ( $\Phi=au+b\Delta T^{1/2}+c$ ).**

Configuración	n	r <sup>2</sup>	a	b	c
Sin malla	55	0.30	1.369	1.179	3.786
Malla anti-pulgón	44	0.75	1.410	0.676	-2.599
Malla anti-trip	50	0.79	0.886	0.187	-1.247

Los resultados de la tabla 3.2 muestran que el ajuste no es bueno en el caso de la ventana sin malla (coeficiente de determinación  $r^2=0.30$ ), siendo este considerablemente mejor para el caso de la malla anti-pulgón ( $r^2=0.75$ ) y anti-trip ( $r^2=0.79$ ). En los datos utilizados para la realización de estas regresiones no se ha considerado el posible efecto de la dirección del viento sobre la tasa de ventilación ya que, de acuerdo con lo indicado en los trabajos de investigación sobre ventilación natural de invernaderos multitúnel con aperturas cenitales continuas, esta no influye en la tasa de ventilación (Kittas y col., 1995; Boulard y col., 1997). No obstante, si, de acuerdo con lo expresado por de Jong (1990) y de Jong y Bot (1992<sup>a</sup>) para invernaderos del tipo Venlo con ventanas cenitales discontinuas, consideramos el efecto de la dirección del viento sobre la tasa de ventilación y diferenciamos entre la ventilación a barlovento (ángulo de incidencia del aire sobre la ventana de 0-180°) y la ventilación a sotavento (ángulo de incidencia del aire sobre la ventana entre 180-360°) se obtienen los resultados de la tabla 3.3.

**Tabla 3.3.-Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ), del gradiente de temperatura ( $\Delta T^{1/2}$ , K) y de la dirección del viento (barlovento, sotavento) de un invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla, con malla anti-pulgón y anti-trip. ( $\Phi=au+b\Delta T^{1/2}+c$ ).**

Configuración	Barlovento					Sotavento				
	n	$r^2$	$a_1$	$b_1$	$c_1$	n	$r^2$	$a_2$	$b_2$	$c_2$
Sin malla	35	0.76	3.403	0.262	3.319	20	0.82	2.306	-1.868	4.670
Malla anti-pulgón	28	0.93	1.648	0.001	-0.806	16	0.96	0.847	-0.042	-0.076
Malla anti-trip	32	0.94	1.103	-0.050	-0.803	18	0.81	0.403	-0.044	0.358

En todos los casos los resultados son considerablemente mejores, en particular y para la ventana sin malla las ecuaciones de ajuste pasa de un valor del coeficiente de determinación de 0.30 a 0.76 para barlovento y 0.82 para sotavento. Este resultado, aunque no de una forma tan pronunciada, se produce también al incorporar malla anti-pulgón (de un valor para  $r^2= 0.75$  se pasa a 0.93 para barlovento y 0.96 para sotavento) y anti-trip (pasando de 0.79 a 0.94 y 0.81 para barlovento y sotavento respectivamente).

A pesar del buen ajuste obtenido, en muchos de los casos estudiados el valor del coeficiente que pondera el efecto de la temperatura es negativo, resultado que no tiene ninguna justificación física, ya que al ser mayor la temperatura del aire interior del invernadero su efecto sobre la ventilación debería ser positivo. Si se analizan los resultados estadísticos de los estimadores de los parámetros, en todos los casos el valor absoluto de la t de Student para el estimador de la temperatura es menor de uno, lo que nos indicaría (Peña, 1992) que el error cuadrático medio es pequeño con lo que el sesgo del estimador de b es pequeño. Por este motivo se puede eliminar la variable relevante  $\Delta T$  sin que se vea afectado el otro estimador.

Este resultado coincide con lo expresado por diversos autores al analizar la ventilación de invernaderos multitúnel (Boulard y Draoui, 1995; Boulard y col., 1996, 1997). Según estos el efecto de la temperatura sobre la tasa de ventilación es poco importante (especialmente a partir de valores de velocidad del viento exterior de 1-1.5  $\text{ms}^{-1}$ ) de forma que se puede despreciar obteniéndose un modelo lineal de la tasa de ventilación en función de la velocidad del viento exterior.

Si consideramos el modelo lineal, esto es, aquel que considera a la velocidad del viento como única variable independiente en el cálculo de la tasa de ventilación. A partir de las medidas experimentales se ha podido obtener la ecuación de ajuste que nos permite determinar la tasa de ventilación en función de la dirección del viento (tabla 3.4).

**Tabla 3.4.-Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla, con malla anti-pulgón y malla anti-trip. ( $\Phi=\mu u+p$ )**

<b>Configuración</b>	<b>n</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>m</b>	<b>p</b>
<b>Sin malla</b>	55	0.28	1.44	5.98
<b>Malla anti-pulgón</b>	44	0.70	1.32	-0.50
<b>Malla anti-trip</b>	51	0.77	0.82	-0.63

De nuevo al realizar la regresión se presenta una mala ecuación de ajuste para la ventilación sin malla ( $r^2=0.28$ ) resultado muy superior en el caso de la malla anti-pulgón ( $r^2=0.70$ ) y anti-trip ( $r^2=0.77$ ). Para la ventana sin malla, en la representación gráfica de las medidas experimentales (figura 3.7) parecen intuirse dos grupos de puntos claramente diferenciados. Estos dos grupos coinciden de nuevo con la dirección del viento anteriormente mencionada. Si diferenciamos la tasa de ventilación en función de si el viento viene de cara a la ventana (barlovento) o de espaldas a esta (sotavento) de nuevo se produce una clara mejoría en el ajuste de la regresión pasándose de un valor de  $r^2=0.28$  a 0.76 en ambos casos (figura 3.8 a) y b)).

### SIN MALLA

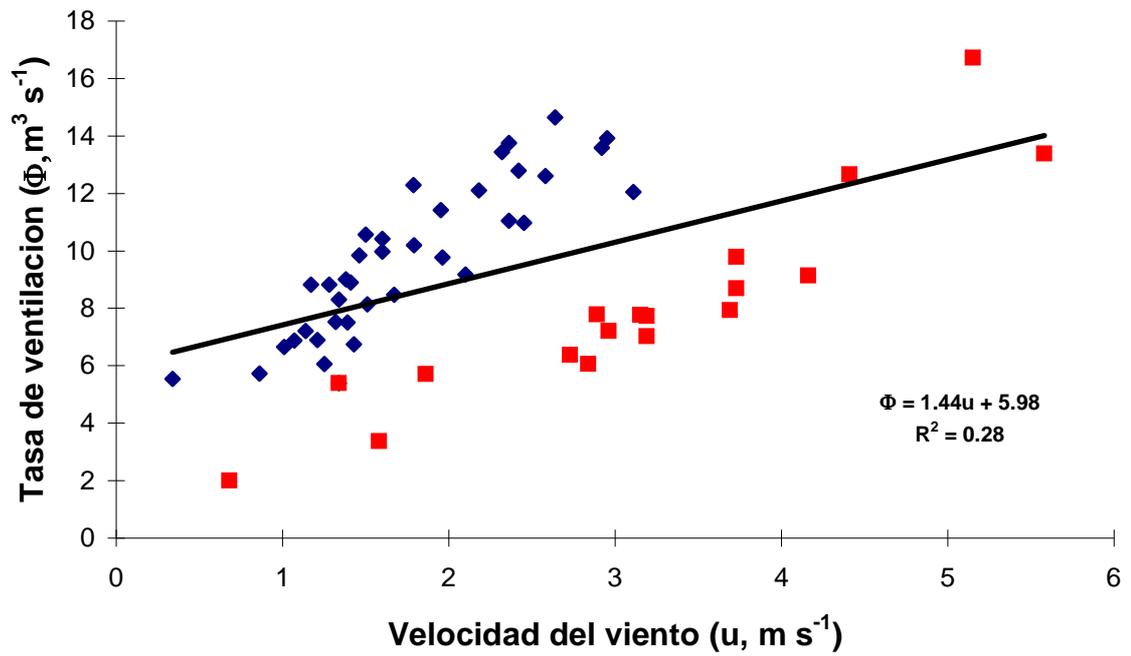
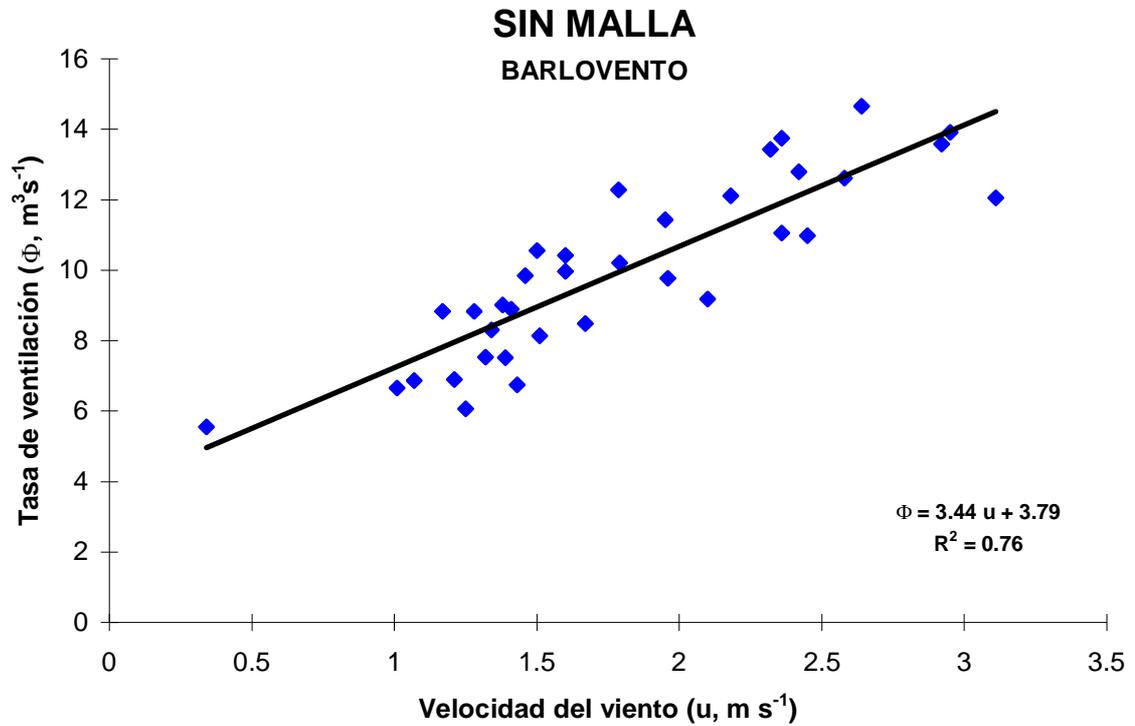
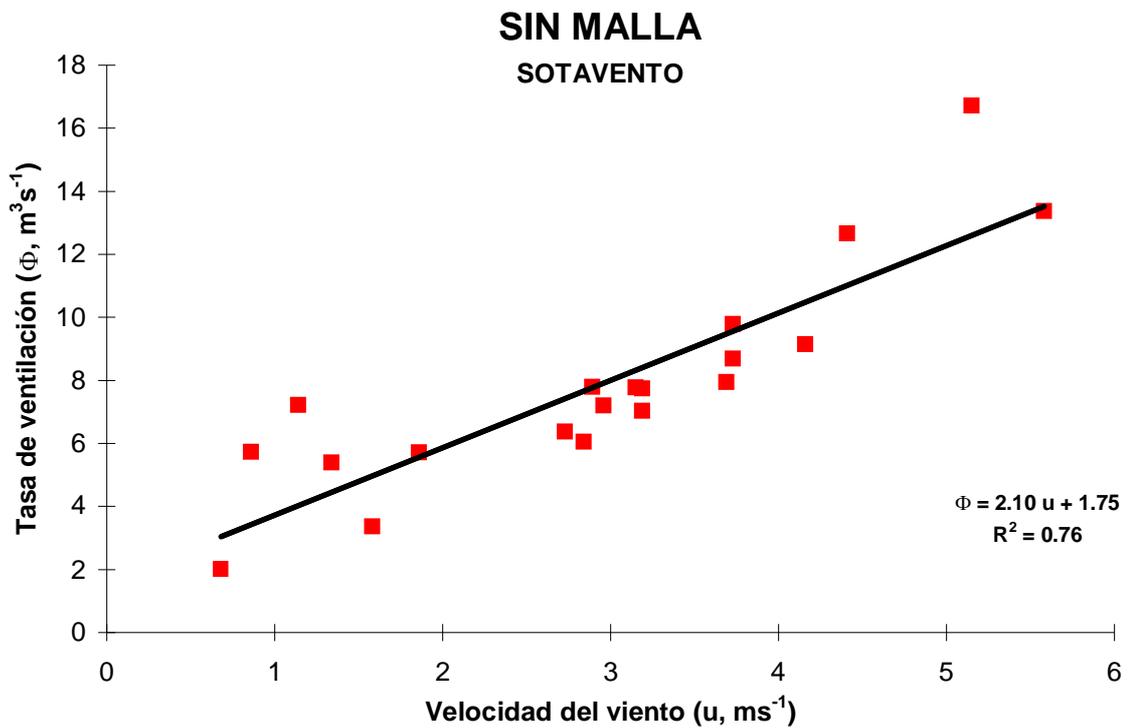


Figura 3.7. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla.



a)

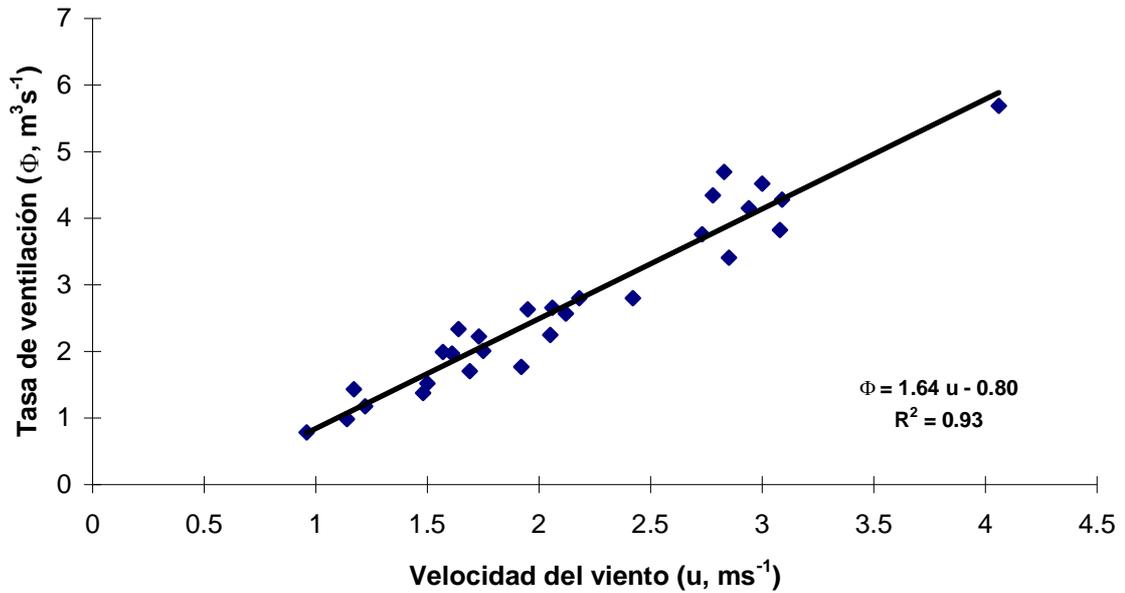


b)

Figura 3.8. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla. a) Barlovento, b) Sotavento.

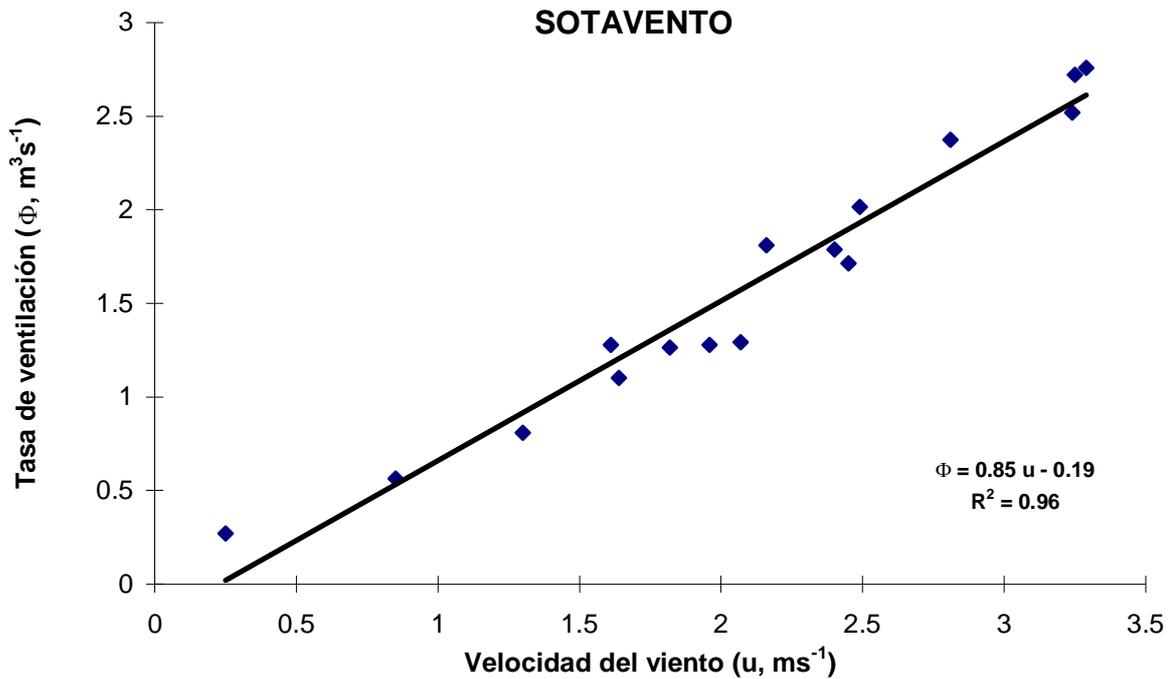
Este mismo resultado, aunque menos marcado, se presenta para el caso de la malla anti-pulgón y anti-trip. En el caso de la malla anti-pulgón, si se diferencian los puntos de medida en función de la dirección del viento, el ajuste es claramente superior ( $r^2=0.93$  para barlovento y  $0.96$  para sotavento). Para la malla anti-trip el ajuste mejora considerablemente pasando de un valor del coeficiente de determinación  $r^2=0.77$  a valores de  $0.94$  y  $0.80$  respectivamente (figuras 3.9 y 3.10 a) y b)).

### MALLA ANTI-PULGON BARLOVENTO



a)

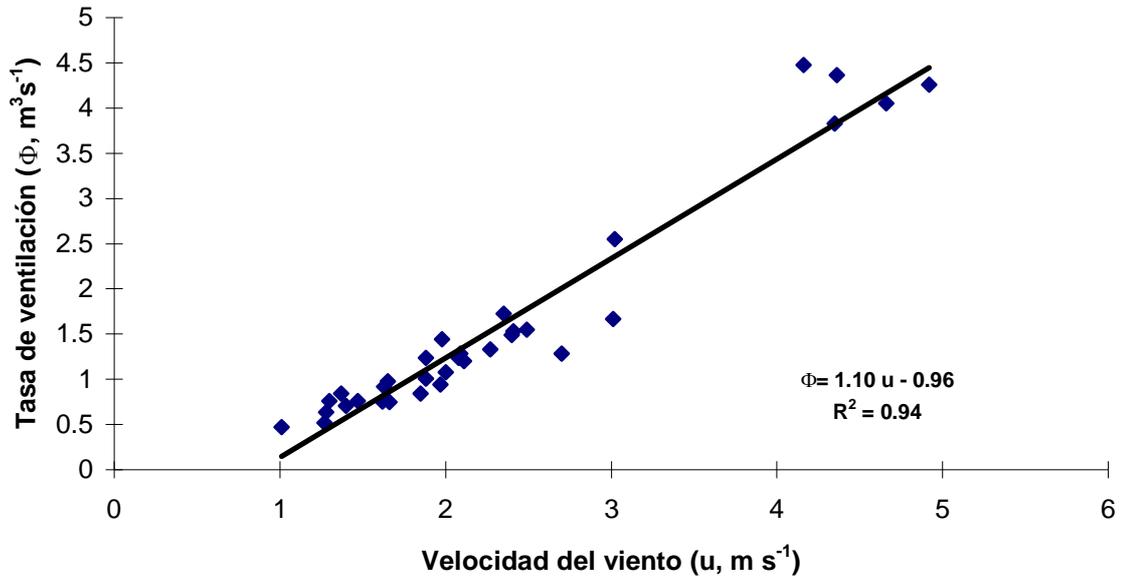
### MALLA ANTI-PULGON SOTAVENTO



b)

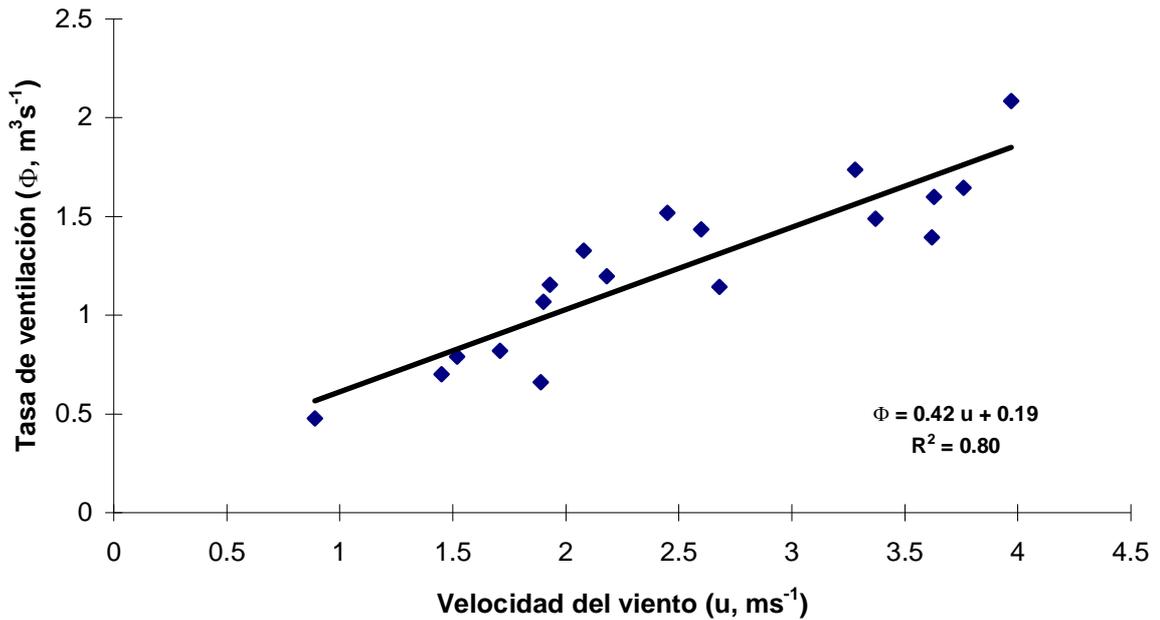
Figura 3.9. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas y malla anti-pulgón. a) Barlovento, b) Sotavento.

### MALLA ANTI-TRIP BARLOVENTO



a)

### MALLA ANTI-TRIP SOTAVENTO



b)

Figura 3.10. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $m^3\ s^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $m\ s^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas y malla anti-trip. a) Barlovento, b) Sotavento.

Los resultados de las gráficas 3.8, 3.9 y 3.10 a) y b) parecen indicar la existencia de una clara diferencia entre la ventilación a barlovento y sotavento así como un marcado descenso de la tasa de ventilación en el caso de sotavento respecto a la medida para barlovento.

Si se quiere verificar la existencia de esta diferencia en función de la dirección del viento deben contrastarse las rectas de regresión obtenidas para cada caso. De acuerdo con lo propuesto en el apartado de materiales y métodos (3.2.) debe utilizarse la metodología de contraste especificada por Kleinbaum (1988).

La aplicación de la metodología de Kleinbaum (1988) para el caso de las ventanas cenitales rectangulares continuas conduce a la obtención de los resultados de la tabla 3.5.

**Tabla 3.5.-Comparación de las rectas de regresión (barlovento-sotavento) para el invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas con y sin mallas anti-insectos.**

Configuración	Test de paralelismo			Test de términos independientes		
	n	F	P	n	F	P
Sin malla	52	9.259	<0.0037 <sup>**</sup>	52	4.006	<0.0496 <sup>*</sup>
Malla anti-pulgón	40	49.827	<0.0001 <sup>**</sup>	40	5.728	<0.0215 <sup>*</sup>
Malla anti-trip	47	63.219	<0.0001 <sup>**</sup>	47	26.466	<0.0001 <sup>**</sup>

<sup>\*\*</sup>P<0.01

<sup>\*</sup>P<0.05

El test de paralelismo es altamente significativo en los tres casos (con un nivel de significación del 1%) lo que indica que las pendientes de las rectas de regresión son diferentes para las tres combinaciones estudiadas (sin malla, malla anti-pulgón y malla anti-trip). Es decir la ventilación a barlovento es estadísticamente diferente de la ventilación a sotavento. El hecho de que el test de paralelismo muestre diferencias significativas para todos los casos evaluados indica que no es necesaria la evaluación del termino independiente (que además es significativamente diferente en todos ellos).

### 3.3.2.-Ventanas cenitales intercambiables.

A partir de los ensayos experimentales se determinaron las regresiones que permiten el cálculo de la tasa de ventilación en función de la velocidad del viento exterior y de la diferencia de temperatura existente entre el aire interior y exterior (tabla 3.6).

**Tabla 3.6. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $m^3s^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ) y del gradiente de temperatura ( $\Delta T^{1/2}$ , K) de un invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla de sombreado, anti-pulgón y anti-trip. ( $\Phi=au+b\Delta T^{1/2}+c$ ).**

Configuración	n	$r^2$	a	b	c
Malla de sombreado	67	0.37	3.013	-0.304	7.410
Malla anti-pulgón	40	0.81	3.270	-5.179	6.080
Malla anti-trip	64	0.86	1.268	-0.308	1.720

Como muestran los resultados de la tabla únicamente se determinaron las ecuaciones para el caso de las ventanas con mallas. Esto se debió a que en la configuración sin malla al llegar a la apertura final deseada para la ventana la concentración de gas trazados era prácticamente nula o muy baja (inferior a 15 ppm) lo que impidió evaluar esta configuración con el dispositivo experimental disponible. No obstante, esta observación da idea del gran valor de ventilación natural alcanzado por el invernadero con este tipo de configuración.

A pesar de lo anterior, si se observan los resultados de la tabla, se aprecia que se obtuvo una ecuación de regresión con una bondad de ajuste muy baja ( $r^2=0.37$ ) en el caso de la ventana con malla de sombreado, valor que aumenta considerablemente para la malla anti-pulgón ( $r^2=0.81$ ) y la anti-trip ( $r^2=0.86$ ).

Si se diferencia la tasa de ventilación en función de la dirección del viento (barlovento-sotavento) de forma similar a la efectuada para la ventana rectangular continua se obtienen los resultados de la tabla 3.7.

**Tabla 3.7.-Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ), del gradiente de temperatura ( $\Delta T^{1/2}$ , K) y de la dirección del viento (barlovento, sotavento) de un invernadero multitúnel con ventanas intercambiables y malla de sombreo, anti-pulgón y anti-trip. ( $\Phi=au+b\Delta T^{1/2}+c$ ).**

Configuración	Barlovento					Sotavento				
	n	r <sup>2</sup>	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	c <sub>1</sub>	n	r <sup>2</sup>	a <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>	c <sub>2</sub>
<b>Malla de sombreo</b>	50	0.76	6.192	1.626	1.272	17	0.85	2.587	-1.477	6.196
<b>Malla anti-pulgón</b>	24	0.84	5.363	-5.250	3.736	16	0.86	2.575	0.964	-1.647
<b>Malla anti-trip</b>	38	0.92	2.272	0.003	-1.050	26	0.89	1.438	0.107	-0.269

Los valores de la tabla muestran un claro aumento de la bondad de ajuste de las regresiones que, por ejemplo, en el caso de la ventana con malla de sombreo pasa de un valor de  $r^2=0.37$  a valores de 0.76 para barlovento y 0.85 para sotavento. Este mismo comportamiento, aunque no tan pronunciado, se produce en el caso de la malla anti-pulgón y anti-trip. Todos estos resultados coinciden además con los observados para la ventana cenital rectangular continua.

Las regresiones anteriores, de nuevo muestran en varios casos valores negativos para el coeficiente que pondera la temperatura. Este resultado, como ya se ha comentado, no tiene ninguna explicación desde el punto de vista físico por lo que si de nuevo se analizan los estadísticos de los estimadores de los parámetros de la regresión, para todos los casos el modulo del valor de la t de Student es inferior a uno con lo que de acuerdo con Peña (1992) se puede eliminar la variable relevante sin que se vea afectado el otro estimador.

Este resultado coincide con el observado para las ventanas rectangulares continuas y parece indicar un comportamiento para el invernadero con sistema intercambiable similar al observado para invernaderos multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas (Boulard y Draoui, 1995; Boulard y col., 1997).

De forma que se puede plantear también la utilización de un modelo lineal simple en el que la tasa de ventilación dependa únicamente de la velocidad del viento. Si, de acuerdo con este modelo, se procede al análisis de los resultados para el caso del sistema intercambiable se obtienen las regresiones de la tabla 3.8.

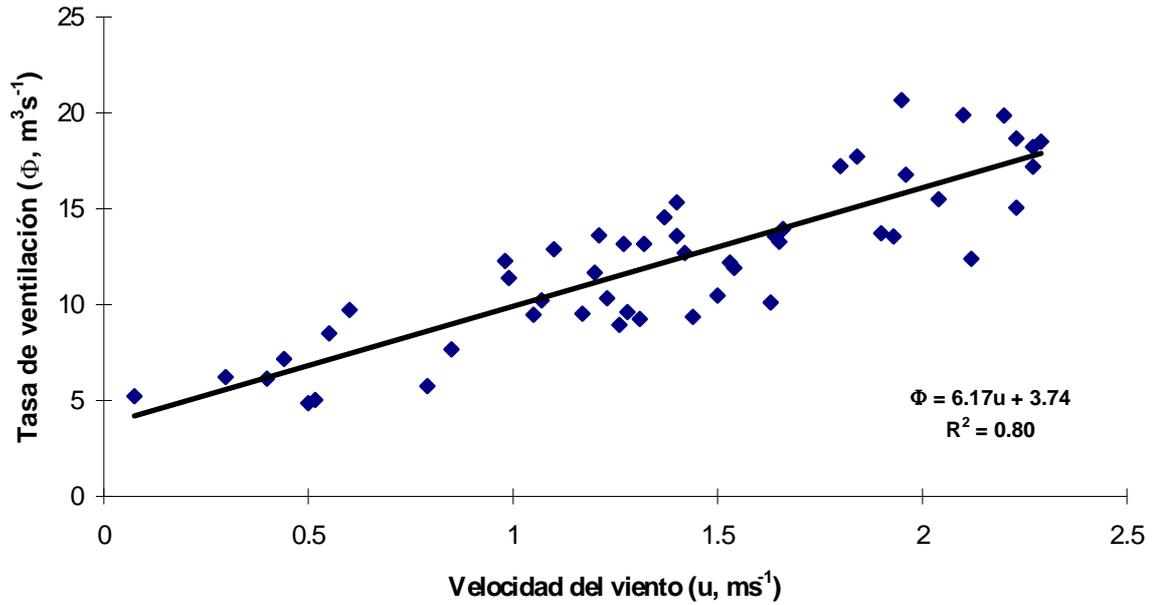
**Tabla 3.8. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla de sombreo, anti-pulgón y anti-trip. ( $\Phi=\mu u+p$ )**

<b>Configuración</b>	<b>n</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>m</b>	<b>p</b>
<b>Malla de sombreo</b>	64	0.35	2.907	7.222
<b>Malla anti-pulgón</b>	40	0.32	3.129	2.388
<b>Malla anti-trip</b>	78	0.87	1.366	0.699

Los resultados son muy similares a los de la tabla 3.7 aunque en este caso son dos las regresiones que presentan un valor del coeficiente de determinación  $r^2$  muy bajo (0.35 para la malla de sombreo y 0.32 para la anti-pulgón) resultado que mejora ostensiblemente en el caso de la malla anti-trip (0.87). Si se diferencian los resultados experimentales en función de si el aire exterior incide de cara a la ventana (barlovento) o de espaldas a esta (sotavento) se produce una clara mejoría en el caso de las regresiones para la malla de sombreo pasando de un valor de  $r^2=0.35$  en el caso de la regresión conjunta a valores de 0.80 para barlovento y 0.84 para sotavento (figuras 3.11 a) y b)).

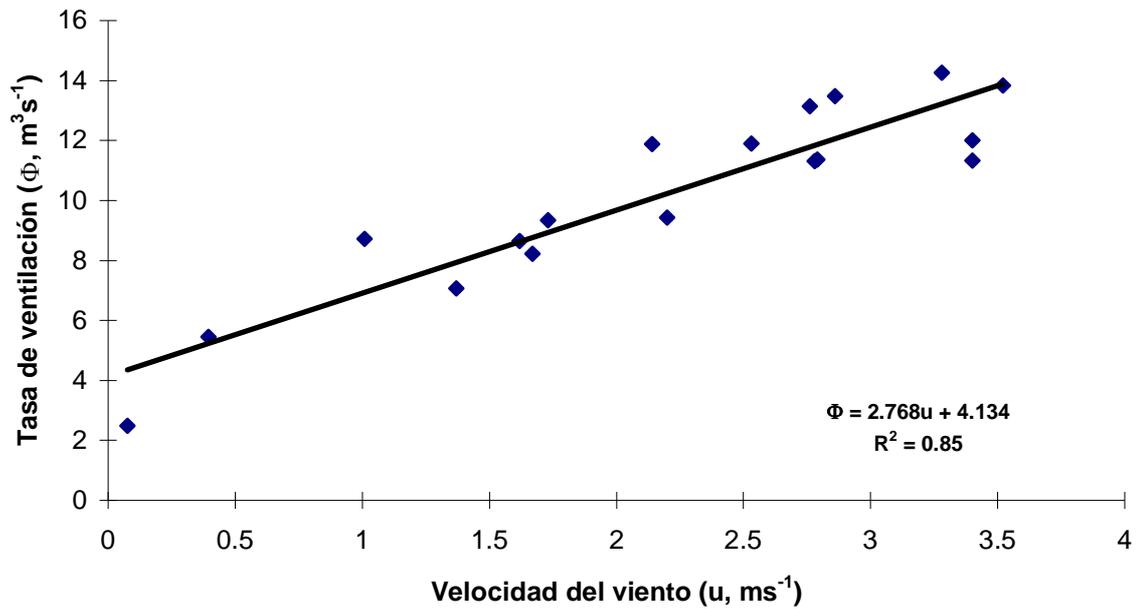
Esta misma tendencia, se presenta para el caso de las mallas anti-pulgón y anti-trip tal y como se observa ver en las figuras 3.12 a) y b) y 3.13 a) y b) que muestran la mejoría en el ajuste obtenido para la malla anti-pulgón ( $r^2=0.79$  y  $0.86$  para barlovento y sotavento) y para la anti-trip ( $r^2=0.89$  y  $0.93$ ).

### MALLA DE SOMBREO BARLOVENTO



a)

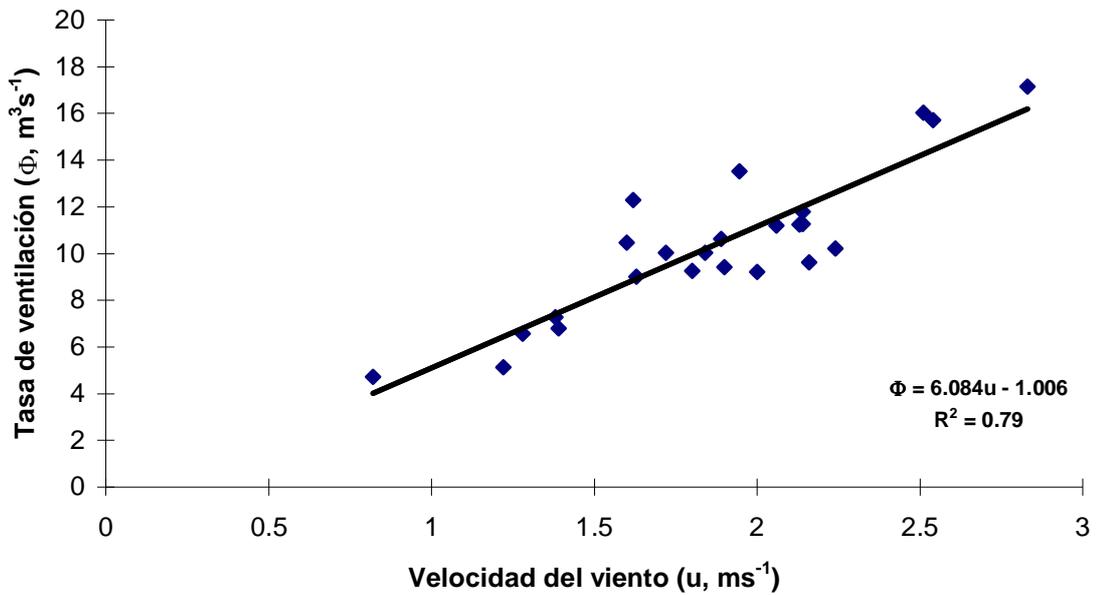
### MALLA DE SOMBREO SOTAVENTO



b)

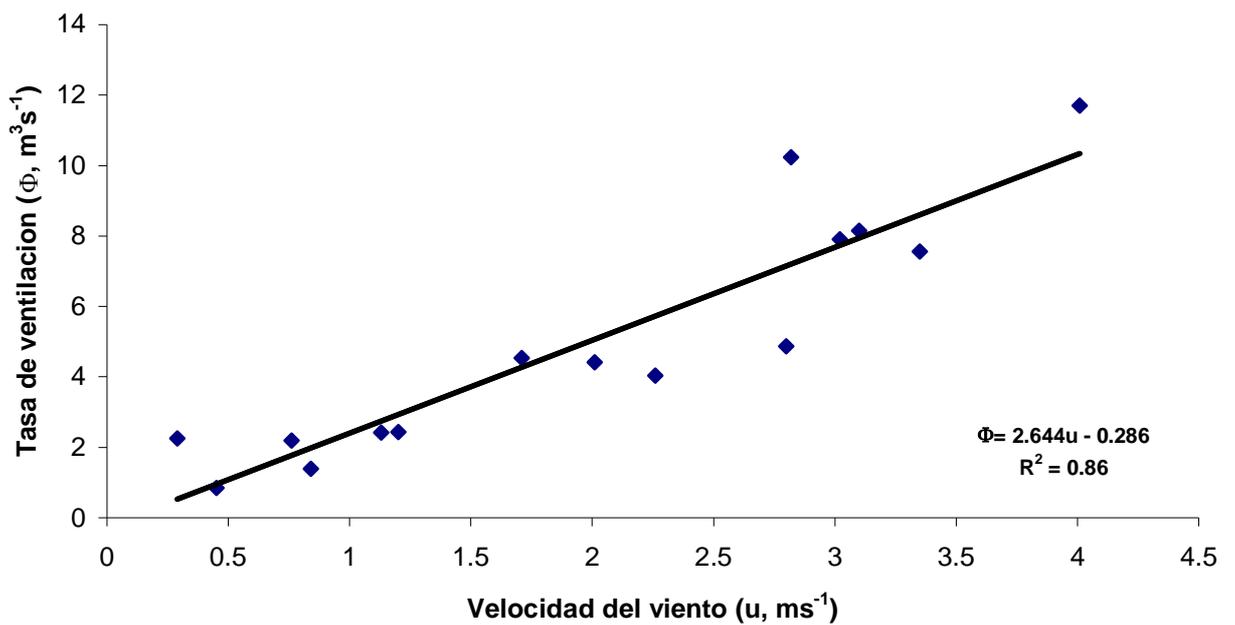
Figura 3.11. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla de sombreado. a) Barlovento, b) Sotavento.

### MALLA ANTI-PULGON BARLOVENTO



a)

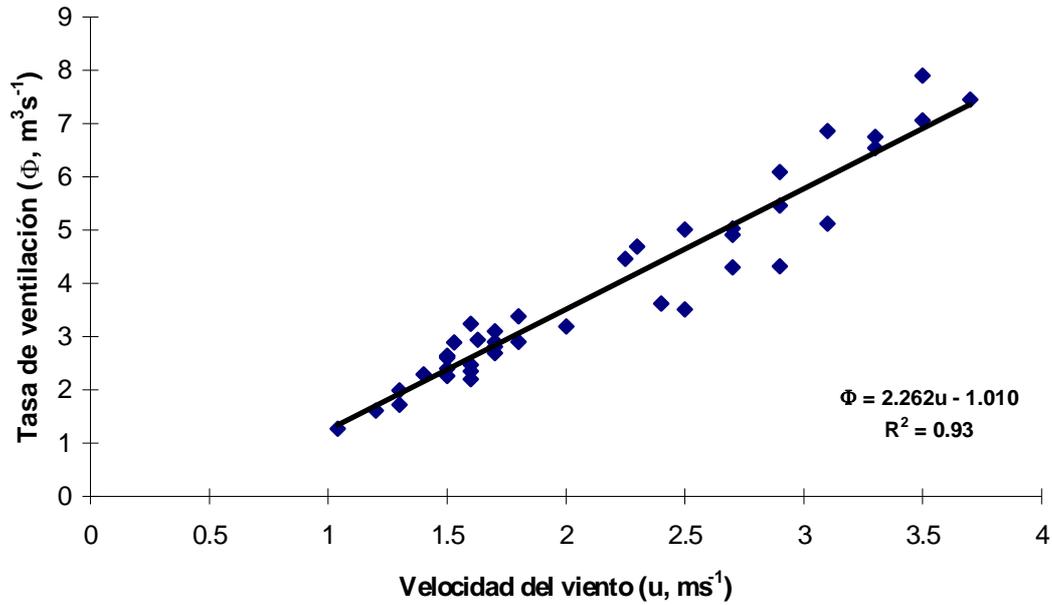
### MALLA ANTI-PULGON SOTAVENTO



b)

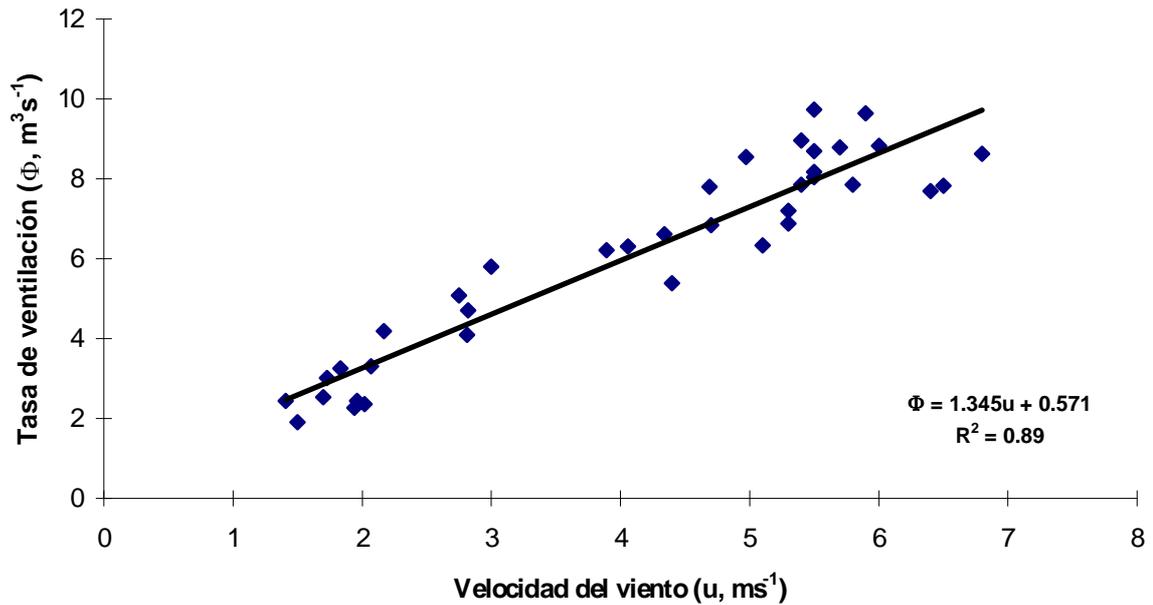
Figura 3.12. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla anti-pulgón. a) Barlovento, b) Sotavento.

### MALLA ANTI-TRIP BARLOVENTO



a)

### MALLA ANTI-TRIP SOTAVENTO



b)

Figura 3.13. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla anti-trip. a) Barlovento, b) Sotavento.

Si se quiere verificar esta clara aparente diferenciación de nuevo deben contrastarse las rectas de regresión y comprobar si son iguales o diferentes. Para ello se aplicó la metodología propuesta por Kleinbaum (1988) explicada en el apartado 3.2.2 obteniéndose los resultados de la tabla 3.9.

**Tabla 3.9. Comparación de las rectas de regresión (barlovento-sotavento) para el invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla de sombreo, anti-pulgón y anti-trip.**

Configuración	Test de paralelismo			Test de términos independientes		
	n	F	P	n	F	P
Malla de sombreo	60	36.617	<0.001**	60	0.1355	<0.7141
Malla anti-pulgón	41	8.823	<0.001**	41	0.1248	<0.7238
Malla anti-trip	74	36.818	<0.001**	74	14.216	<0.0003**

\*\*P<0.01

\*P<0.05

El test de paralelismo al contrastar las tres combinaciones de ventana intercambiable con mallas indica claramente la existencia de diferencias significativas entre las pendientes de las rectas de regresión en los tres casos. Con lo que de nuevo la ventilación a barlovento es distinta a la ventilación a sotavento en el invernadero multitúnel con ventanas intercambiables y mallas en las ventanas. Además nuevamente la ventilación a sotavento es considerablemente inferior a la de barlovento.

### 3.4.- Discusión.

Los resultados obtenidos para los dos sistemas de ventilación analizados a) Ventanas cenitales rectangulares continuas con y sin mallas, y b) Ventanas cenitales intercambiables con mallas han permitido demostrar la poca o casi nula influencia del efecto térmico sobre la ventilación natural. En todos los casos estudiados es la velocidad del viento la que determina la ventilación del invernadero.

Este hecho señalado ya por diversos autores (Papadakis y col., 1996; Boulard y Draoui, 1995) para invernaderos multitúnel (con ventanas cenitales continuas y en el caso de velocidades del viento superiores a 1-1.5 ms<sup>-1</sup>) parece confirmar los recientes resultados de Boulard y col. (1997) quienes indican que en el proceso de modelización

de la ventilación natural en túneles y multitúneles dotados únicamente de aperturas cenitales el hecho de incorporar el efecto térmico no aumenta la precisión o el poder de predicción de los modelos de ventilación empleados.

Los resultados confirman la posibilidad de la utilización del modelo lineal, en el que la tasa de ventilación del invernadero se encuentra relacionada con la velocidad media del aire exterior en un punto determinado por medio de una relación lineal. Este modelo utilizado mayoritariamente en la determinación de la ventilación natural de invernaderos túnel y multitúnel con cubierta de plástico (Boulard y col., 1996; Kittas y col., 1997) es el empleado en la presentación de los resultados obtenidos para las diferentes combinaciones tipo de ventana y tipo de malla analizadas.

Utilizando el modelo lineal en el caso del sistema de ventilación con ventanas cenitales rectangulares continuas, los resultados de la tabla 3.4 así como las figuras 3.7, 3.8 a) y b), 3.9 a) y b) y 3.10 a) y b) muestran claramente el efecto o la influencia de la dirección del viento sobre la tasa de ventilación tanto en el caso de la ventana sin malla como con malla anti-pulgón o anti-trip. Esta diferencia se confirma al comparar las diferentes rectas de regresión (tabla 3.5) y obtener para cada uno de los casos que estas son significativamente distintas, lo que permite afirmar que la ventilación a barlovento es diferente de la ventilación a sotavento.

Este resultado es contrario al obtenido por Boulard y col. (1997) para un invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla, ya que según estos trabajos la dirección del viento no presenta ningún tipo de influencia sobre la tasa de ventilación. Por el contrario coincide con lo observado por de Jong y Bot (1992<sup>a</sup>) para un invernadero tipo Venlo con aperturas cenitales discontinuas y por Montero y col. (1996) para el mismo invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas.

La contradicción existente al analizar la posible influencia de la dirección del viento puede deberse a que las experiencias sobre ventilación natural en invernaderos multitúnel son escasas, y generalmente se han realizado en condiciones muy concretas. Si se analizan los trabajos existentes para estas configuraciones se observa que Boulard y Baille (1995), Papadakis y col. (1996) y Boulard y col. (1996) estudian la ventilación de invernaderos multitúnel con vientos característicos de la zona del valle del Ródano (Francia) paralelos a la ventana, mientras que Kittas y col. (1996) en un invernadero túnel presentan resultados obtenidos únicamente para el caso de barlovento, siendo

únicamente los trabajos ya mencionados de Kittas y col. (1995) y el reciente de Boulard y col. (1997) los que señalan la independencia de la dirección del viento.

Análogamente y en el caso del sistema de apertura intercambiable, el efecto de la dirección del viento sobre la tasa de ventilación es igualmente claro (tabla 3.8, figuras 3.11, 3.12 y 3.13 a) y b)) tanto para el caso que se incorpore una malla de sombreado como anti-insectos. De nuevo al realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos esta diferenciación apreciable a partir de los valores del coeficiente de determinación  $r^2$  se demuestra que es estadísticamente significativa (tabla 3.9) lo que permite afirmar que en el caso de un invernadero multitúnel con el sistema de ventilación intercambiable la ventilación depende no sólo de la velocidad sino también de la dirección del viento, y más concretamente de si éste viene de cara a la ventana (barlovento) o de espaldas a ésta (sotavento).

No solo la ventilación de barlovento y sotavento son diferentes sino que además la de sotavento es claramente menor en todas las combinaciones analizadas. Si se evalúa el caso del invernadero con aperturas cenitales rectangulares continuas sin malla (figura 3.6 a) y b)) y, para ello se comparan las pendientes de las rectas de regresión, se observa que la ventilación a sotavento es un 39% inferior con respecto a la de barlovento, resultado que se eleva al 48 y 51% en los casos de las ventanas con mallas anti-pulgón y anti-trip respectivamente. Estos resultados con porcentajes muy similares se repiten también para las ventanas enrollables con malla.

Todos estos datos muestran que como mínimo se produce una variación de un 40% de la tasa de ventilación en función de la orientación de las ventanas respecto al viento hecho de fundamental importancia en el caso de los invernaderos mediterráneos en los que se presentan problemas de elevadas temperaturas interiores. De este resultado se deriva una clara recomendación para los invernaderos localizados en zonas cálidas, que consiste en orientar las ventanas de cara a los vientos dominantes de la zona. Recomendación que confirma la práctica tradicionalmente extendida en las zonas costeras mediterráneas en las que se encaran las ventanas en dirección al mar (dirección de los vientos dominantes de la zona).

Otro aspecto destacable a comentar a partir de los datos experimentales es el efecto de la incorporación de mallas en las aperturas de ventilación. Si se analizan los resultados en el caso de apertura cenital rectangular continua (figuras 3.8, 3.9 y 3.10 a) y b) ) en el caso de la ventilación a barlovento puede verse que la incorporación de mallas representa un severo descenso en la tasa de ventilación del invernadero. Así la

incorporación de malla anti-pulgón produce un descenso del 50% de la tasa de ventilación respecto a la ventana sin malla. Este descenso es todavía mas acusado en el caso de incorporar una malla anti-trip elevándose hasta el 70% del valor de la tasa de ventilación sin mallas.

En la ventilación a sotavento el efecto observado es el mismo registrándose un descenso del 60% al incorporar malla anti-pulgón y prácticamente del 80% si lo que se incorpora es una malla anti-trip. Este descenso en la tasa de ventilación es mucho mayor que el obtenido por Bot y Van Horslsteijn (1990) que en invernaderos del tipo Venlo con ventanas discontinuas e incorporando mallas de características similares reportan descensos del 20% y del 49% para las mallas denominadas por ellos anti-pulgón y anti-trip.

El sistema de ventilación intercambiable presenta un comportamiento similar al observado en el caso de las ventanas cenitales continuas (figuras 3.11, 3.12 y 3.13 a) y b)) si bien en este caso la tasa de ventilación de la ventana sin malla no se ha podido determinar mediante la técnica del gas trazador. Si se toma como referencia la ventana con malla de sombreo, en la ventilación a barlovento se puede observar un ligero descenso en la tasa de ventilación al incorporar la malla anti-pulgón (2%) descenso que todavía es mas severo si se incorpora una malla anti-trip (63.3%). Este mismo comportamiento se repite en el caso de la ventilación a sotavento.

De acuerdo con la Asociación Americana de Ingenieros Agrónomos (ASAE) el ratio mínimo de ventilación recomendado para un invernadero oscila entre 0.75-1 renovaciones por minuto (ASAE, 1991). En el caso de las ventanas rectangulares continuas sin mallas son necesarias velocidades de viento superiores a  $1.8 \text{ ms}^{-1}$  para alcanzar este valor mínimo. Este requisito se dispara al incorporar mallas en la ventana y así, con malla anti-pulgón se necesitan velocidades de viento superiores a  $6.7 \text{ ms}^{-1}$  para alcanzar las 0.75 renovaciones por minuto. Finalmente con la malla anti-trip el efecto es claramente superior siendo necesarios valores de más de  $10 \text{ ms}^{-1}$  de velocidad de viento para garantizar una ventilación mínima. Todos estos resultados son todavía mucho mayores en el caso de la ventilación a sotavento (menor) obteniéndose valores de velocidad del viento superiores a 4, 12.2 y  $23.8 \text{ ms}^{-1}$  (sin malla, anti-pulgón y anti-trip respectivamente) para conseguir el mínimo valor recomendable de ventilación.

Por el contrario en el caso del sistema de ventilación intercambiable si se considera el mismo valor de 0.75-1 renovaciones por minuto (ASAE, 1991), para la ventilación de barlovento y la ventana con malla de sombreo únicamente son necesarios

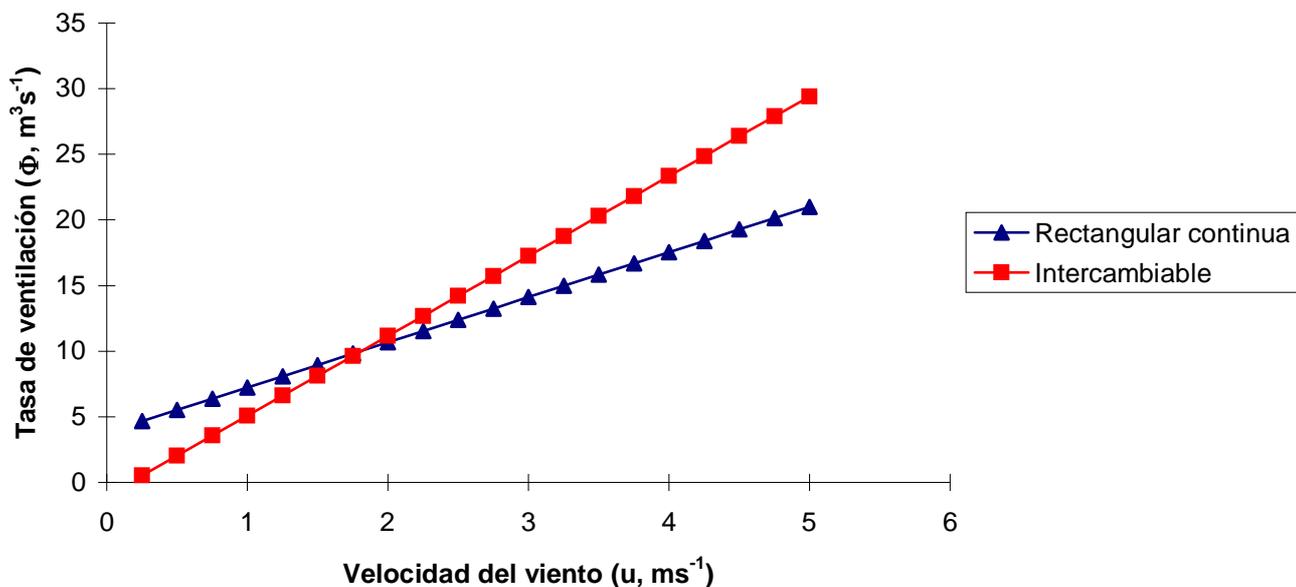
valores de  $1 \text{ ms}^{-1}$  para alcanzar el ratio mínimo de ventilación, valor que aumenta a  $1.84 \text{ ms}^{-1}$  para la malla anti-pulgón, y a  $4.95 \text{ ms}^{-1}$  para la anti-trip. La ventilación a sotavento al ser menor requiere valores superiores de velocidad del viento pasando estos a ser de  $2.2$ ,  $4.14$  y  $7.2 \text{ ms}^{-1}$  para la malla de sombreo, anti-pulgón y anti-trip respectivamente.

Por tanto, para el sistema de ventilación con ventanas cenitales continuas de cremalleras al incorporar mallas en las aperturas de ventilación en la mayoría de las situaciones la ventilación será insuficiente para garantizar un buen control de la temperatura y composición del aire interior, sólo en el caso de la ventana sin mallas la ventilación es suficiente (aunque con la posibilidad de que se presenten pequeños problemas a sotavento). De acuerdo con esto las posibles mejoras o ventajas de la incorporación de mallas en las ventanas (reducción del número de tratamientos químicos para el control de plagas y enfermedades y, por tanto de los posibles residuos) desaparecen al no poder garantizar una ventilación natural correcta.

En el sistema intercambiable esta situación no se presenta ya que la ventana con malla de sombreo tiene una tasa de ventilación superior a la del sistema de ventilación “clásico” sin malla. La ventana con malla anti-pulgón presenta valores muy similares e incluso superiores a los de la ventana rectangular continua sin malla. Si se comparan los resultados obtenidos en el caso de la ventilación a barlovento (figura 3.14 a)) se observa que la intercambiable presenta valores ligeramente inferiores a la de cremalleras para velocidades de viento muy bajas, a partir de  $2 \text{ ms}^{-1}$  las tasas de ventilación se igualan siendo a continuación la de la ventana intercambiable con malla anti-pulgón claramente superior. Para la ventilación a sotavento (figura 3.14 b)) los resultados son muy similares siendo la tasa de ventilación ligeramente inferior para la ventana intercambiable hasta velocidades de  $3-3.5 \text{ ms}^{-1}$  pasando luego a ser ligeramente superior. En resumen, al mismo tiempo que se garantizan unos valores adecuados de ventilación natural se aprovechan las ventajas del uso de mallas.

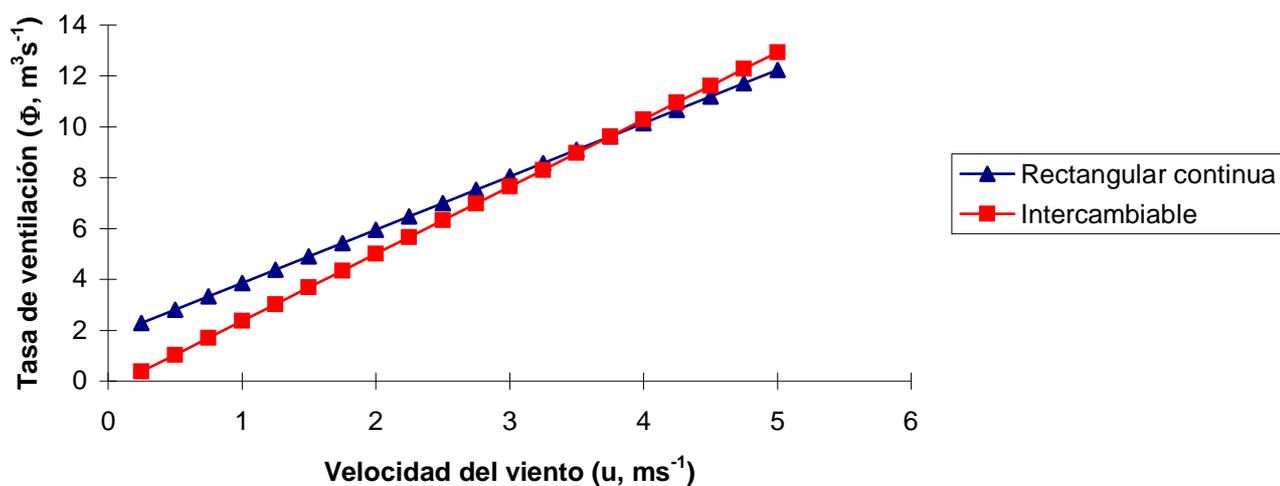
Finalmente, y en el caso de la malla anti-trip la tasa de ventilación con este sistema es insuficiente tanto para la ventilación a barlovento como para la ventilación a sotavento.

## BARLOVENTO



a)

## SOTAVENTO



b)

Figura 3.14. Tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en función de la velocidad del viento ( $u$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) del invernadero multitúnel con ventanas cenitales rectangulares continuas sin malla e intercambiables con malla anti-pulgón. a) Barlovento, b) Sotavento.

### **3.5.- Conclusiones.**

La técnica del gas trazador ha demostrado ser una técnica válida para la medida de la tasa de ventilación de los invernaderos multitúneles. Gracias a este método se ha podido determinar la ventilación natural de un invernadero multitúnel con dos sistemas de aperturas de ventanas (rectangulares continuas e intercambiables) con y sin mallas.

La tasa de ventilación de los invernaderos multitúnel con aperturas de ventilación cenitales puede cuantificarse mediante una expresión lineal en función de la velocidad del viento exterior, siendo el efecto térmico despreciable para los dos sistemas de apertura analizados

Los resultados han señalado la clara influencia de la dirección del viento sobre la renovación de aire del invernadero evidenciando la necesidad de orientar las ventanas en la dirección de los vientos dominantes. Además han permitido cuantificar el importante descenso de ventilación que implica la instalación de mallas en las ventanas hasta el punto de no alcanzarse los requisitos mínimos recomendados internacionalmente.

Finalmente y comparando los resultados para ambos sistemas de apertura, el sistema de techo intercambiable se ha mostrado claramente superior al de ventanas rectangulares continuas.

## **4.-BALANCE DE ENERGÍA.**

### **4.1.-Introducción.**

En el presente capítulo se aborda uno de los objetivos planteados al inicio del trabajo de investigación, éste es la determinación de la tasa de ventilación de un invernadero multitúnel a partir de un método de aplicación general como el del balance de energía. Para ello en el segundo capítulo se explica de forma detallada el fundamento teórico que permite el cálculo y cuantificación de la tasa de ventilación.

Análogamente, y de forma simultánea se pretende determinar la tasa de ventilación del mismo invernadero utilizando la técnica del gas trazador comentada ampliamente en el capítulo anterior.

La obtención de ambos resultados permitirá confirmar la utilidad práctica del método del balance de energía al poder comparar las medidas con las resultantes a partir de la técnica del gas trazador que, tal y como se ha comprobado en el capítulo anterior, cuantifica con gran precisión la tasa de ventilación del invernadero.

### **4.2.-Material y métodos.**

#### **4.2.1.-Cálculo de la tasa de ventilación mediante el método del balance de energía.**

##### 4.2.1.1.-Fundamento teórico.

Como ya se explicó en el apartado 2.2.1 del segundo capítulo mediante este método se pretende determinar la tasa de ventilación del invernadero a partir del balance de energía de este. Con este objetivo se utilizó el modelo simplificado propuesto por Boulard y Baille (1994) que permite el cálculo de la tasa de ventilación a partir de la ecuación del balance de energía aplicando la ecuación 2.1:

$$\boxed{E_s - E_c - E_{st} - E_v = 0} \quad (4.1)$$

donde  $E_s$  es la energía solar captada por el invernadero,  $E_c$  las pérdidas energéticas a través de la cubierta,  $E_{st}$  la energía almacenada en el invernadero y  $E_v$  la energía perdida por ventilación.

De acuerdo con Bailey y Cotton (1980) el valor del coeficiente de transmisión de calor de la cubierta se puede determinar según la ecuación:

$$\boxed{K_c = A + Bu} \quad (4.2)$$

donde  $u$  es la velocidad del viento exterior en la altura de referencia,  $A$  y  $B$  son constantes que en el caso de un invernadero multitúnel con cubierta de plástico toman los valores  $A=6$  y  $B=0.5$  (Baille y col., 1983).

Si se desprecia la evaporación del suelo (cultivo sin suelo) y la condensación (prácticamente nula en el periodo estival y durante el día) el balance de calor latente puede escribirse de acuerdo con la ecuación (Boulard y Baille, 1994):

$$\boxed{\lambda E_t - K_l(w_i - w_0) = 0} \quad (4.3)$$

donde  $E_t$  es la transpiración de la cubierta vegetal,  $\lambda$  el calor latente de vaporización y  $K_l$  el coeficiente de intercambio de calor latente por ventilación.

Por otra parte el balance de calor sensible lo podemos determinar utilizando la ecuación 2.3:

$$\boxed{E_{sen} = \frac{\Phi}{S_g} \rho C_p (T_i - T_0)} \quad (4.4)$$

donde  $\Phi$  es la tasa de ventilación del invernadero.

Con lo que si nuevamente se plantea el balance de energía del invernadero (ecuación 4.1) considerando  $E_{st}=0$  (Boulard y Baille, 1994) y las ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4 se obtiene:

$$\boxed{(S_i - S_r) - K_c (T_i - T_0) - \lambda E_t - \frac{\Phi}{S_g} \rho C_p (T_i - T_0) = 0} \quad (4.5)$$

donde  $S_g$  es la superficie del suelo del invernadero,  $K_c$  el coeficiente de transmisión de calor de la cubierta,  $(S_i - S_r)$  es la diferencia entre la radiación interior menos la reflejada por el cultivo,  $(T_i - T_0)$  la diferencia de temperatura entre el aire

interior y el exterior,  $\rho$  la densidad del aire,  $\lambda$  el calor latente de vaporización del agua y  $C_p$  el calor específico del aire.

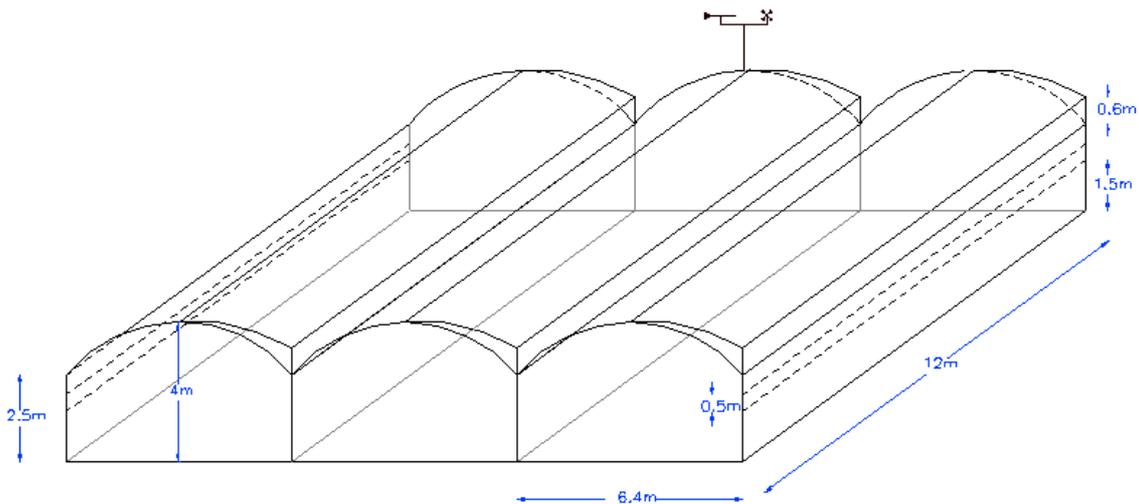
y operando:

$$\Phi = \frac{S_g}{\rho C_p (T_i - T_0)} [(S_i - S_r) - K_c (T_i - T_0) - \lambda E_t] \quad (4.6)$$

Que será la ecuación utilizada en este ensayo para determinar la tasa de ventilación del invernadero multitúnel.

#### 4.2.1.2.-Dispositivo experimental.

Los ensayos encaminados a la determinación de la tasa de ventilación mediante el método del balance de energía se llevaron a cabo en un invernadero multitúnel de tres naves y 230 m<sup>2</sup> de superficie localizado en el IRTA-Centre de Cabrils (Barcelona). En este tipo de invernadero se instalaron aperturas de ventilación cenitales (ventanas rectangulares continuas con una apertura máxima de 0.6 m) y laterales (ventanas rectangulares continuas localizadas a 1.5 m de altura y con una apertura máxima de 0.5 m) tal y como se observa en la figura 4.1.



**Figura 4.1. Características del invernadero experimental con aperturas de ventilación laterales y cenitales rectangulares continuas sin malla.**

Para la realización del experimento se transplantó *Pelargonium zonale* var. Isabelle el 3 de junio de 1997 en tiestos de 16 cm de diámetro. La densidad de cultivo fue de 7.7 plantas m<sup>-2</sup> manteniéndose hasta el 30 de Junio cuando alcanzó el desarrollo suficiente para su comercialización.

### Procedimiento experimental.

El procedimiento experimental utilizado para la cuantificación de la tasa de ventilación fué el siguiente:

Para determinar la transpiración del cultivo se midió el peso de forma continua de 8 plantas de *Pelargonium* situadas en el centro de una banqueta de 5.2 m<sup>2</sup> que contenía 40 plantas, con una balanza electrónica (150 kg ± 1 g Mettler, Alemania). La balanza se conectó a un ordenador portátil (Compaq 386, USA) tomándose lecturas cada cinco segundos y realizándose la media cada minuto.

Simultáneamente se determinaron el resto de parámetros físicos necesarios para el cálculo de la tasa de ventilación midiéndose la velocidad y dirección del aire exterior por medio de un anemómetro de cazoletas ( Vector A100R, Anemometer, Delta T Devices, UK) y una veleta (Vector W200P Windvane, Delta T Devices, UK) situados en la cumbrera de la nave central del invernadero.

La radiación solar se midió mediante dos piranómetros (Kipp and Zonen, modelo CM6, Holanda) y la neta mediante dos radiómetros netos (Thies sensor, Alemania) localizados en las dos banquetas centrales del invernadero. Finalmente también se determinó la temperatura húmeda y seca del aire interior mediante cuatro sensores del tipo PTR (Termómetro de resistencia de platino en unidades ventiladas, Crison, Barcelona) localizados en las dos banquetas centrales del invernadero, y la temperatura húmeda y seca del aire exterior mediante dos sensores del tipo PTR (Termómetro de resistencia de platino en unidades ventiladas, Crison, Barcelona) localizadas a cinco metros del invernadero y a la misma altura que las interiores (1.5 m).

Todos los sensores para la medida de los parámetros físicos se conectaron a un sistema de adquisición de datos (delta logger, Delta T Devices, UK) tomándose lecturas cada cinco segundos y realizándose la media cada minuto

### Tratamiento de datos.

Una vez obtenidos los ficheros con los datos experimentales se empleó una hoja de cálculo (Microsoft Excel v 5.0) para su procesamiento obteniéndose en cada ensayo la velocidad y dirección del viento, la temperatura y humedad del aire interior y exterior así como la radiación solar en el interior y la radiación reflejada. También se obtuvo la pérdida de peso de las plantas para cada ensayo y, en consecuencia, la transpiración del cultivo.

#### **4.2.2.-Cálculo de la tasa de ventilación mediante la técnica del gas trazador.**

En el capítulo anterior se explicó el fundamento teórico de la técnica del gas trazador y concretamente del método del descenso de la concentración (Decay Rate Method) en los ensayos del presente capítulo se utilizó la misma técnica y método empleando la ecuación 3.5 que permite determinar la tasa de ventilación del invernadero:

$$\ln\left(\frac{c(t)}{c_0}\right) = -\Phi(t) \quad (4.7)$$

donde  $c(t)$  es la concentración de gas trazador en el tiempo  $t$ ,  $c_0$  es la concentración inicial de gas trazador y  $\Phi(t)$  la tasa de ventilación en el tiempo  $t$ .

##### 4.2.2.1.-Dispositivo experimental.

La totalidad de los ensayos se realizaron en el mismo invernadero multitúnel de tres naves en el que se evaluó la tasa de ventilación mediante el método del balance de energía (figura 4.1). Estos se llevaron a cabo con los dos tipos de aperturas de ventilación: laterales (localizadas a 1.5 m de altura y con una apertura de 0.5 m) y cenitales (rectangulares continuas con una apertura máxima de 0.6 m).

### Procedimiento experimental.

El procedimiento experimental empleado fué idéntico al comentado en el capítulo anterior para determinar la tasa de ventilación de un invernadero multitúnel con aperturas cenitales. El gas utilizado en los ensayos experimentales fué también el óxido nitroso ( $N_2O$ ) que se distribuyó de forma uniforme por el invernadero mediante los tubos portagotos empleados en las determinaciones anteriores.

De nuevo, durante la distribución del gas trazador el invernadero se mantuvo cerrado y el ventilador del sistema de calefacción en funcionamiento para garantizar la mezcla uniforme del gas trazador con el aire del invernadero. Transcurridos 10 minutos se procedió a la apertura de las ventanas hasta la altura experimental registrándose de forma continua el descenso de la concentración de  $N_2O$ . El aire del invernadero se muestreó también en seis puntos, dos en cada nave, situados a 1.5 m de altura y se bombeó hasta el analizador de gases por infrarrojos (IRGA, Ultramat 5M, Siemens, Alemania).

Nuevamente y de acuerdo con lo explicado en el capítulo 3 se determinaron las variables ambientales relevantes midiéndose la velocidad y dirección del viento por medio de un anemómetro de cazoletas ( Vector A100R, Anemometer, Delta T Devices, UK) y una veleta (Vector W200P Windvane, Delta T Devices, UK) así como la temperatura del aire interior y exterior por medio de sondas del tipo PTR (Termómetro de resistencia de platino en unidades ventiladas, Crison , Barcelona).

Tanto los datos de concentración de  $N_2O$  como las variables ambientales se registraron mediante un equipo de adquisición de datos (delta logger, Delta T Devices, UK) tomándose medidas cada segundo y realizándose la media cada cinco segundos.

### Tratamiento de datos.

Las medidas experimentales permitieron obtener los ficheros de datos que se procesaron por medio de una hoja de cálculo (Microsoft Excel v 5.0) determinándose en cada ensayo experimental los valores de la tasa de ventilación, dirección y velocidad del viento así como la temperatura del aire interior y exterior. Una vez obtenidos los resultados se estableció la regresión multilínea entre la tasa de ventilación y la diferencia de temperatura mediante el programa estadístico SAS/STAT (SAS Institute, 1989).

De forma idéntica al capítulo anterior se realizó la comparación entre las rectas de regresión empleando el método expuesto por Kleinbaum (1988) utilizando variables ficticias.

### 4.3.-Resultados.

Los ensayos experimentales mediante la técnica del gas trazador permitieron obtener la ecuación de cálculo de la tasa de ventilación en función de la velocidad del viento exterior y la diferencia de temperatura existente entre el aire interior y exterior de acuerdo con lo propuesto por Papadakis y col. (1996) obteniéndose la expresión:

$$\Phi = 5.779 u + 1.769 (\Delta T)^{1/2} \quad r^2 = 0.95 \quad (4.8)$$

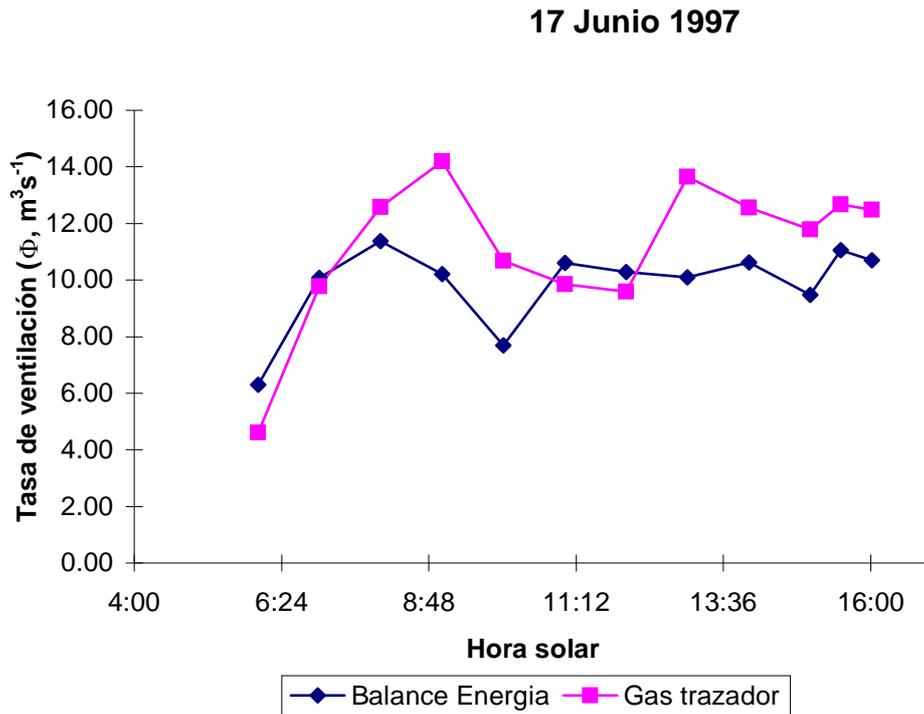
donde  $\Phi$  es la tasa de ventilación del invernadero,  $u$  la velocidad del viento exterior en el plano de referencia y  $\Delta T$  la diferencia de temperatura existente entre el aire interior y exterior.

En este caso al analizar los resultados de los estimadores de los parámetros se observa que el valor del módulo de la  $t$  de Student para la diferencia de temperatura es superior a 1 (3.32) por lo que no se puede despreciar su efecto. Además, si se repite el análisis en función de la dirección del viento de acuerdo con lo propuesto por Kleinbaum (1988) no se presentan diferencias significativas entre barlovento y sotavento ( $P > 0.05$ ) Todos estos resultados coinciden con lo observado por Papadakis y col. (1996) y Boulard y col. (1997) para invernaderos multitúnel con aperturas de ventilación laterales y cenitales.

El método del balance de energía permitió también la determinación (a partir de los datos experimentales y previo procesamiento de éstos) de la tasa de ventilación del invernadero registrándose cada 30 minutos el valor de la tasa de ventilación y del resto de variables relevantes (velocidad y dirección de viento, temperatura interior y exterior, etc.).

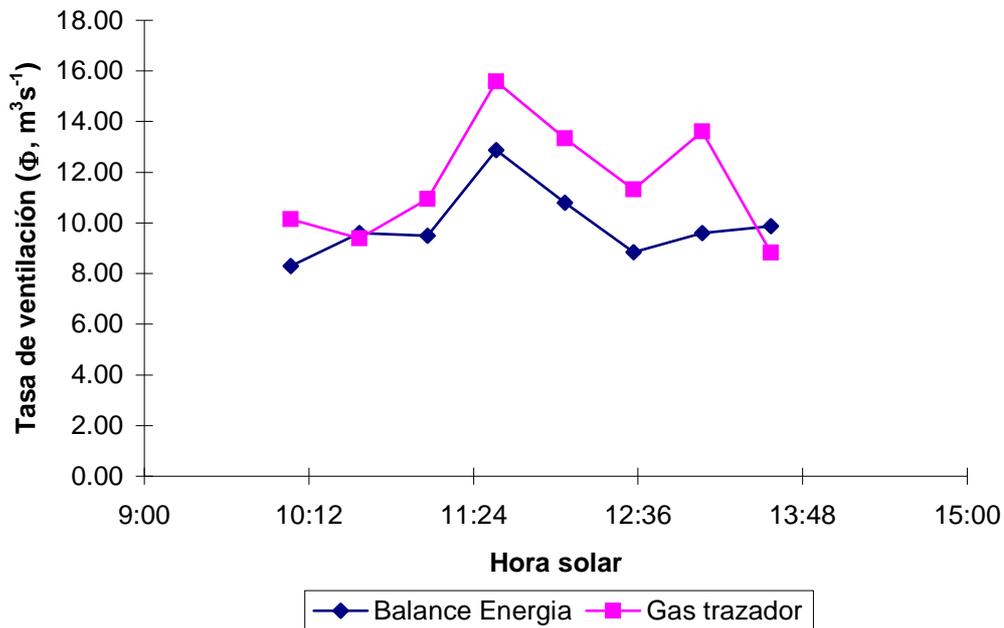
La obtención de estos valores de tasa de ventilación mediante las dos técnicas diferentes permitiría la comparación, contraste y validación de ambas.

La comparación de los resultados medidos en ambos casos se presenta en las figuras 4.2 y 4.3 que corresponden a los valores medios de la tasa de ventilación cada 30 minutos determinados mediante ambos sistemas.



**Figura 4.2** Comparación de los resultados de la tasa de ventilación ( $\Phi, m^3s^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales, obtenidos mediante la técnica de gas trazador y el método del balance de energía. (17/6/97).

18 Junio 1997

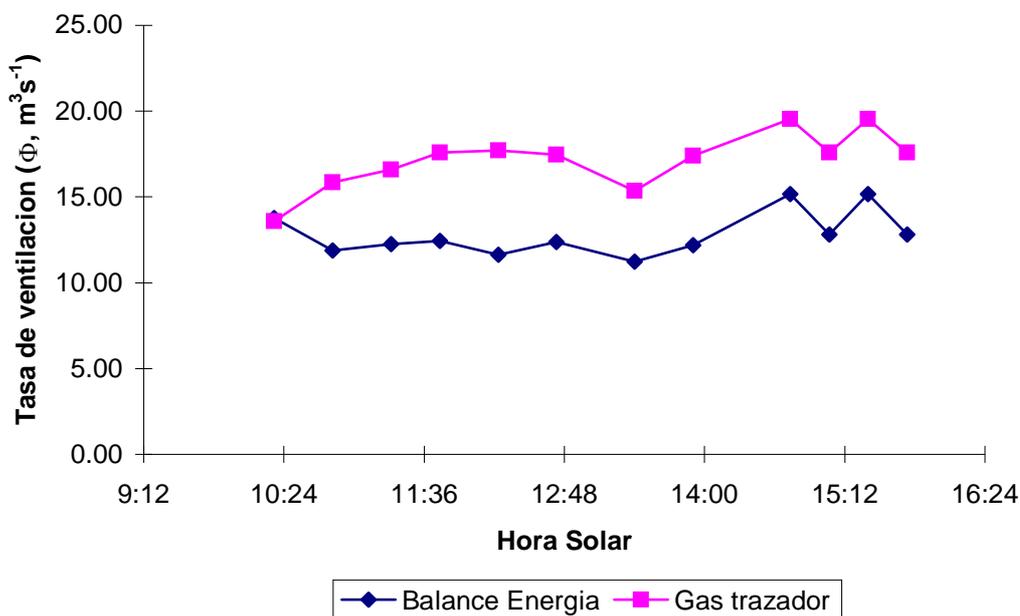


**Figura 4.3 Comparación de los resultados de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales, obtenidos mediante la técnica de gas trazador y el método del balance de energía. (18/6/97).**

Los datos de las figuras muestran que los resultados obtenidos para ambas técnicas presentan la misma tendencia. No obstante, los valores obtenidos mediante la técnica del gas trazador son, en la mayoría de los casos, superiores a los determinados mediante el balance de energía. Si se observan los valores de la figura 4.2 (día 17 de Junio) en promedio, el balance de energía subestima los valores de la tasa de ventilación en un 12%, resultado que todavía es mayor (18%) en el caso de la figura 4.3 (día 18 de Junio).

Este resultado es todavía mas claro si se comparan los días con mayor velocidad del viento como sucede en el caso de la figura 4.4 (día 19 de Junio con una velocidad del viento media  $\bar{u} = 2.34 \text{ ms}^{-1}$  frente a los 1.26 y 1.46 de los días 17 y 18 respectivamente).

19 de Junio 1997



**Figura 4.4 Comparación de los resultados de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales, obtenidos mediante la técnica de gas trazador y el método del balance de energía. (19/6/97).**

La figura 4.4 muestra en principio valores muy próximos separándose claramente a posteriori, aunque conservando un comportamiento similar. Calculando la diferencia existente entre los valores determinados mediante el balance de energía y los calculados al aplicar el gas trazador, se observa que en este caso los del gas trazador son muy superiores presentándose una subestimación de la tasa de ventilación al utilizar el balance de energía con un valor promedio superior al 30% claramente mayor a la obtenida en los casos anteriores (figuras 4.2 y 4.3) con valores medios de velocidad del viento inferiores.

Los resultados obtenidos son contrarios a los observados por Fernández y Bailey (1992) al aplicar el balance de energía al cálculo de la tasa de ventilación de un invernadero del tipo Venlo con aperturas cenitales discontinuas. Estos autores señalan que el método del balance de energía sobrestima la tasa de ventilación en comparación con el método del gas trazador, siendo el resultado obtenido por ambos métodos muy similar a medida que aumenta la apertura de las ventanas de ventilación y, en consecuencia, el flujo de aire.

#### 4.4.-Discusión.

El método del gas trazador ha permitido obtener la tasa de ventilación de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales en función de la diferencia de temperatura y de la velocidad del viento. En este caso además no se ha observado influencia de la dirección del viento (barlovento-sotavento) sobre la ventilación natural del invernadero. Estos resultados, contrarios a los obtenidos en el capítulo 3 para el caso de un invernadero multitúnel dotado únicamente de ventilación cenital, coinciden plenamente con lo observado por Papadakis y col. (1996) y Boulard y col. (1997) en el caso de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales.

La explicación sobre la influencia del efecto térmico en la ventilación natural se establece claramente en el trabajo de Boulard y col. (1997) al indicar que en el caso de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales la diferencia de altura vertical entre las ventanas laterales y cenitales maximiza las fuerzas gravitacionales y, en consecuencia, el efecto térmico que debe considerarse al calcular la tasa de ventilación incluso a velocidades del viento superiores a  $3 \text{ ms}^{-1}$ .

Respecto al efecto de la dirección del viento, el hecho de presentar aperturas laterales en ambas direcciones elimina el efecto de la dirección del viento sobre la tasa de ventilación obteniéndose en este caso una única ecuación para barlovento y sotavento de forma análoga a lo observado por Papadakis y col. (1996) para este mismo tipo de configuración.

No obstante, y a pesar de los buenos resultados obtenidos, no queda clara su aplicación de forma general, ya que en el caso de invernaderos con un número de naves mucho mayor posiblemente el efecto de las ventanas laterales sea mucho menos importante y, en consecuencia, debe tenerse, de nuevo, en cuenta la dirección del viento y descartarse el efecto de la diferencia de temperatura sobre la tasa de ventilación. Todas estas consideraciones deberían confirmarse a partir de medidas en invernaderos comerciales con mayor longitud y número de naves ya que el trabajo de Papadakis y col. (1996), único que estudia una combinación similar, se realizó para un invernadero únicamente de dos naves.

Por otro lado, el método del balance de energía ha permitido igualmente determinar la tasa de ventilación para este mismo invernadero e idéntica configuración de las aperturas de ventilación.

La comparación de los resultados obtenidos con las determinaciones a partir del método del gas trazador muestra un comportamiento variable, siendo los resultados aceptables en el caso de presentarse bajos valores de la tasa de ventilación ( $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) pero considerablemente peores a medida que aumenta la tasa de ventilación del invernadero (figura 4.4).

Parece claro que a medida que aumenta la velocidad del viento (y en consecuencia la tasa de ventilación de acuerdo con la ecuación 4.8) los resultados que se obtienen al aplicar ambos métodos son cada vez más dispares (o lo que es lo mismo la precisión del método del balance de energía empeora y, en consecuencia, no es posible su aplicación).

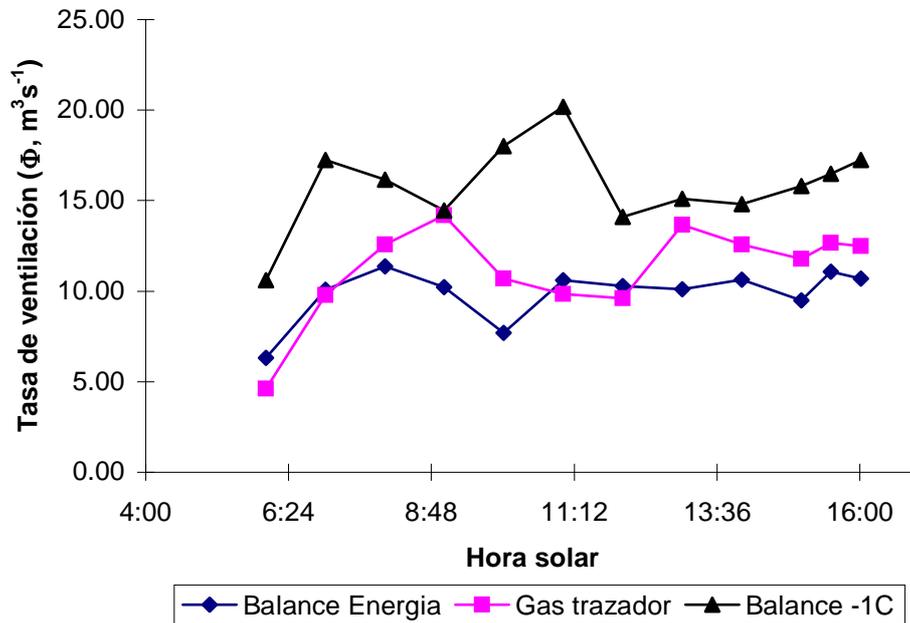
Una posible explicación vendría de la estimación de las pérdidas por convección a través de la cubierta, pues a velocidades del viento mayores puede no verificarse la ecuación 4.2 o que los parámetros A y B tomen otros valores diferentes.

Otra explicación posible es el gran peso de la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior para el cálculo de la tasa de ventilación de acuerdo con el método del balance de energía. Evidentemente la diferencia existente entre la temperatura del aire interior y exterior es función de la ventilación del invernadero, lo que no es tan claro es que esta dependencia sea inversamente proporcional como señala la ecuación 4.6.

Los resultados experimentales parecen confirmar esta hipótesis pues la diferencia entre la tasa de ventilación medida mediante el balance de energía y mediante el método del gas trazador (figuras 4.2, 4.3 y 4.4) es mayor cuanto mayor es el valor de la tasa de ventilación, lo que en principio indicaría que la relación entre la tasa de ventilación y la diferencia de temperatura no es inversamente proporcional.

Además el modelo del balance de energía es muy sensible a pequeñas variaciones de la diferencia de temperatura; así una variación de  $1^\circ\text{C}$  lleva o conduce a una gran variación en el cálculo de la tasa de ventilación. Si por ejemplo se consideran los datos de 17 del Junio (figura 4.2) y se supone una diferencia de  $1^\circ\text{C}$  en la determinación del gradiente de temperatura los resultados que se obtienen son totalmente opuestos a los que se habían determinado en los ensayos experimentales (figura 4.5) con una sobrestimación clara de la tasa de ventilación por parte del balance de energía respecto a la técnica del gas trazador.

17 Junio 1997



**Figura 4.5 Comparación de los resultados de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales obtenidos mediante la técnica de gas trazador, el método del balance de energía y el método del balance de energía considerando un error de  $-1^\circ\text{C}$  en la medida de la diferencia de temperatura.**

La figura 4.5 muestra claramente la gran sensibilidad del modelo a la diferencia de temperatura y confirma lo indicado por Fernández y Bailey (1992) que señalan que un pequeño error en tan solo un sensor influye considerablemente en el resultado final.

Esta gran dependencia de la temperatura así como la gran variación originada por pequeños errores en la medida cuestiona la utilización de este sistema para el invernadero multitúnel en condiciones de clima mediterráneo en las que en periodo estival se alcanzan en el interior del invernadero valores medios de temperatura muy elevados ( $30\text{-}35^\circ\text{C}$ , y puntualmente superiores) condiciones en las que son fácilmente asumibles errores de medida de la temperatura, especialmente en el caso de invernaderos comerciales en producción en los que la revisión, instalación y control de los sensores no es, por norma general, lo suficientemente adecuada.

Finalmente, hay que destacar la aparente contradicción obtenida entre los resultados experimentales de Fernández y Bailey (1992) y los del presente trabajo. Estos autores, en un invernadero del tipo Venlo con aperturas discontinuas obtuvieron que el

método del balance de energía sobrestimaba la tasa de ventilación en comparación con la técnica del gas trazador, y esta sobrestimación disminuye a medida que aumenta el valor de la tasa de ventilación. Este resultados parece pues totalmente contradictorio con el obtenido en los ensayos pues para bajos valores de la tasa de ventilación el balance de energía presenta resultados muy próximos a los obtenidos con el gas trazador, subestimando claramente el valor de la ventilación natural a medida que esta aumenta.

No obstante, esta aparente contradicción no es totalmente cierta ya que se están comparando valores de renovaciones por hora sin considerar la diferencia de superficie y volumen existente entre ambos invernaderos. Para comparar adecuadamente los resultados, debe considerarse el hecho de que el invernadero de Fernández y Bailey (1992) presenta un volumen de 1523 m<sup>3</sup> y una superficie de 422.4 m<sup>2</sup>, mientras que el invernadero experimental utilizado en el este trabajo presenta una superficie de 230.4 m<sup>2</sup> con un volumen de 815 m<sup>3</sup>. Una forma de comparar estos resultados es referirlos a la superficie ocupada por el invernadero tal y como señalan Kittas y col. (1997).

De acuerdo con esto, considerando el valor máximo de tasa de ventilación medido por Fernández y Bailey (1992) de 18 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y refiriéndolo a Renovaciones/hora m<sup>2</sup> suelo de invernadero, si se considera el volumen y la superficie del invernadero, se obtiene:

$$18 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \frac{1 \text{ Renov}}{1523 \text{ m}^3} \frac{1}{422.4 \text{ m}_{\text{suelo}}^2} = 0.10 \frac{\text{Renov}}{\text{h m}_{\text{suelo}}^2}$$

Análogamente en el caso de un invernadero multitúnel, si se toman dos valores de tasa de ventilación, uno bajo (6 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) y otro elevado (15 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) y, con el fin de compararlos se considera la superficie y el volumen del invernadero se obtiene:

$$6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \frac{1 \text{ Renov}}{815 \text{ m}^3} \frac{1}{230.4 \text{ m}_{\text{suelo}}^2} = 0.11 \frac{\text{Renov}}{\text{h m}_{\text{suelo}}^2}$$

$$15 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \frac{1 \text{ Renov}}{815 \text{ m}^3} \frac{1}{230.4 \text{ m}_{\text{suelo}}^2} = 0.28 \frac{\text{Renov}}{\text{h m}_{\text{suelo}}^2}$$

Comparando ambos datos, se observa que los valores altos medidos en el invernadero Venlo corresponden a las tasas bajas de ventilación medidas en el

multitúnel; de acuerdo con Fernández y Bailey (1992) para estos valores los resultados obtenidos al comparar el balance de energía y gas trazador son aceptablemente buenos (15% error), resultado que coincide mas o menos con el obtenido en el presente ensayo al medir tasa de ventilación equivalentes o incluso un poco superiores (un 18% para una tasa de ventilación media de  $0.18 \text{ Renv/h m}_{\text{suelo}}^2$ ). Por el contrario, en el caso de tasas de ventilación mayores ( $0.28 \text{ Renv/h m}_{\text{suelo}}^2$ ) el error en la determinación se dispara hasta valores superiores al 25-30%.

Este resultado parece indicar que no sólo se comenten errores para valores muy bajos de ventilación (con las ventanas prácticamente cerradas) al aplicar el balance de energía (Fernández y Bailey, 1992) sino que cuando la tasa de ventilación es muy elevada también se producen estos errores, hecho que dificulta y limita la aplicación de este método en la determinación de la tasa de ventilación de invernaderos.

No obstante, para valores intermedios ( $0.10\text{-}0.20 \text{ Renv/h m}_{\text{suelo}}^2$ ) el error cometido es menor y parece que el método sí es aplicable en este rango de ventilación.

De acuerdo con todo lo anterior, el método del balance de energía puede emplearse en la determinación de la tasa de ventilación del invernadero en el caso de tasas de ventilación moderadas, presentando grandes errores para valores de ventilación muy bajos o tasas muy elevadas. También puede emplearse, en principio, en el caso de invernaderos con mallas en las ventanas.

Para ello es necesario medir con la mayor precisión posible las variables ambientales y determinar de forma precisa los parámetros necesarios. No obstante, todas estas hipótesis necesitan de nuevos ensayos que permitan confirmar la validez de esta técnica para los casos anteriormente mencionados.

## 4.5.-Conclusiones.

Los resultados obtenidos para el caso particular estudiado (invernadero multitúnel con aperturas laterales y cenitales) han demostrado que el método del balance de energía en condiciones de viento inferior a  $2 \text{ ms}^{-1}$  y con tasas de ventilación comprendidas entre  $0.10\text{-}0.20 \text{ Renov/h m}_{\text{suelo}}^2$  cuantifica la tasa de ventilación con un error estimado de un 10% frente a la técnica del gas trazador.

Para valores de velocidad de viento superiores y tasas de ventilación mayores de  $0.2 \text{ Renov/h m}_{\text{suelo}}^2$  el error incrementa considerablemente (superior al 30%) y el método del balance de energía no es una técnica útil para cuantificar la tasa de ventilación del invernadero.

Otra conclusión importante es la extraordinaria sensibilidad del método frente a pequeñas variaciones en la diferencia de temperatura existente entre el aire interior y el exterior que parecen limitar, de momento, su posible aplicación a invernaderos comerciales.

Finalmente destacar que queda por evaluar la posible utilidad del método para cuantificar la tasa de ventilación de otras configuraciones y tipos de invernaderos como pueden ser los multitúnel con mallas en las ventanas, o los invernaderos del tipo Parral de Almería que se caracterizan por presentar bajos valores de ventilación dentro del rango en que se han obtenido resultados suficientemente precisos en los ensayos experimentales.

## **5.-CARACTERÍSTICAS DE FLUJO DE LAS VENTANAS DE INVERNADEROS MULTITÚNEL.**

### **5.1.-Introducción.**

Para diseñar un invernadero y definir algún tipo de estrategia de control del clima interior, es necesario conocer en detalle sus características de ventilación (de Jong, 1990). Esto se debe a que el flujo de aire a través de las ventanas no depende únicamente de variables físicas como la velocidad del viento o la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior, sino que también es función de otra serie de parámetros como son, el tipo y localización de las ventanas, así como la altura y anchura del invernadero (ASHRAE, 1993).

En particular, y de acuerdo con lo expresado por de Jong y Bot (1992<sup>b</sup>) si se pretende estudiar la tasa de ventilación de un invernadero es fundamental conocer las características de flujo de las ventanas, y en concreto el coeficiente de descarga. Estas relacionan el flujo de aire a través de la ventana con la diferencia de presión existente (que como se ha explicado en el capítulo 2 es la causa de la ventilación natural del invernadero).

La mayoría de los trabajos dedicados al estudio de la ventilación natural no consideran las características de flujo sino que las determinan de forma indirecta al calibrar los modelos de cálculo propuestos, considerando en todos los casos estructuras de apertura fija y un mismo valor del coeficiente de descarga para ventanas laterales y cenitales (Timmons y Baughman, 1981; Timmons, 1984; Foster y Down, 1987; Zhang y col., 1989).

Los primeros estudios en invernaderos que consideran simultáneamente las fuerzas causantes de la ventilación y las características de flujo de las ventanas se presentan en los trabajos de Bot (1983) y de Jong (1990). En ellos se determinan las características de flujo de las ventanas discontinuas de invernaderos del tipo “Venlo” al mismo tiempo que se analiza la ventilación natural. Estos estudios se llevaron a cabo tanto en modelos a escala (Bot, 1983) como en invernaderos reales (de Jong, 1990; de Jong y Bot, 1992<sup>b</sup>).

En invernaderos multitúnel, de nuevo son muy pocos los estudios en los que se consideran las características de flujo; Boulard y Baille (1995) presentan resultados

(considerando un invernadero con aperturas cenitales continuas fijas) de forma indirecta al validar con datos experimentales los modelos de cálculo propuestos. Boulard y col. (1996) consideran de forma conjunta las características de flujo y el efecto del viento y obtienen datos para invernaderos multitúnel con aperturas cenitales continuas, aunque sin poder diferenciar o caracterizar por separado ambos efectos. Montero y col. (1996) a partir de medidas en modelos a escala presentan valores para ventanas cenitales continuas de invernaderos multitúnel con diferentes grados de apertura y proponen una expresión de cálculo del coeficiente de descarga en función de la geometría de la ventana. No obstante los resultados se limitan a ventanas con una longitud máxima de 20 m.

Un aspecto muy importante y prácticamente no evaluado es el efecto de la incorporación de mallas en las aperturas de ventilación. En este caso, todavía son mas escasos los estudios realizados. No obstante Sase y Christianson (1990) presentan los primeros datos de coeficientes de descarga para diferentes tipos de mallas utilizadas en invernaderos. Estos ensayos realizados en túnel de viento indican un claro descenso del coeficiente de descarga en función del tamaño de la cuadrícula de la malla. Así el valor del coeficiente es menor cuanto menor es el tamaño de ésta. La aplicación de estos datos a un modelo de ventilación para un invernadero de vidrio tipo capilla con aperturas cenitales demuestra que el coeficiente de descarga de las mallas es el parámetro fundamental que regula la ventilación natural.

Para invernaderos del tipo “Venlo”, Miguel y col. (1997) determinan las características de flujo de pantallas térmicas (y en particular la resistencia de estas mallas porosas al flujo de aire) y obtienen un modelo físico que describe la ventilación natural de un invernadero del tipo Venlo con mallas debida al efecto térmico y eólico. No obstante todos estos resultados se refieren a pantallas térmicas con un tamaño de poro muy pequeño que dificulta notablemente la ventilación del invernadero.

En invernaderos multitúnel de nuevo la información disponible es escasa y únicamente Montero y col. (1996) presentan resultados al incorporar mallas de sombreado y anti-insectos en las ventanas. Los datos obtenidos en ensayos con modelos a escala y aperturas cenitales continuas demuestran el claro descenso del valor del coeficiente de descarga al incorporar las mallas. Este descenso se produce en el mismo sentido presentado por Sase y Christianson (1990) siendo mayor a medida que disminuye el tamaño de la cuadrícula de la malla, relacionando directamente el descenso del coeficiente de descarga con el observado en la tasa de ventilación del invernadero. Estos

resultados son incompletos ya que sólo se limitan a ventanas cenitales continuas rectangulares y con una longitud máxima de 20m.

Para invernaderos multitúnel, y de forma análoga a lo planteado por de Jong (1990) en el caso de los invernaderos del tipo Venlo, el conocimiento de las características de flujo de las ventanas con y sin mallas anti-insectos es directamente aplicable al estudio de los procesos que regulan la ventilación natural, ya que estos invernaderos presentan ventanas cenitales idénticas en cada una de las naves. Por ello, una vez determinado el coeficiente de descarga para cada tipo de configuración se puede profundizar en el estudio de cada una de las componentes ambientales que regulan la ventilación (velocidad del viento exterior y diferencia de temperatura) para, de esta forma, mejorar el conocimiento de los mecanismos que controlan el proceso.

En este capítulo se pretenden evaluar las características de flujo, y más concretamente el coeficiente de descarga, de los dos tipos de ventana utilizados (rectangulares continuas e intercambiables) con y sin mallas en las aperturas. Para ello se utilizará la metodología propuesta por Bot (1983) y de Jong y Bot (1992<sup>b</sup>) realizándose ensayos en modelos a escala del invernadero.

## **5.2.-Fundamento teórico para la determinación del factor de fricción.**

Si sobre una ventana se produce una diferencia de presión, ésta origina un flujo a través de la ventana (ver capítulo 2), la relación entre el flujo de aire que circula y la diferencia de presión se denomina “función de fuga” de la ventana (ASHRAE, 1993).

El factor de fricción o el coeficiente de descarga, son los que definen esta función de fuga pues relacionan el flujo a través de la ventana con las fuerzas causantes o responsables de ésta (Bot, 1983).

Bot (1983) en un modelo a escala del invernadero “Venlo” determinó los coeficientes de descarga de diferentes ventanas rectangulares (con el mismo factor a escala y diferentes longitudes y alturas) situadas en la cumbrera del invernadero. En estos experimentos y en los realizados con posterioridad por de Jong (1990), se generó un flujo de aire a través de la ventana desde el interior del invernadero a escala hacia el exterior (o viceversa) midiéndose en cada uno el caudal y la diferencia de presión a través de la ventana.

A partir de los datos experimentales Bot (1983) y de Jong (1990) proponen la ecuación que determina el flujo de aire a través de la ventana y que viene dado por:

$$\Phi = C_d A_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_a}} \quad (5.1)$$

donde  $\rho_a$  es la densidad del aire en la ventana,  $A_0$  la superficie de la ventana,  $\Delta P$  la diferencia de presión a ambos lados de la ventana y,  $C_d$  el coeficiente de descarga que depende de la geometría de la ventana y del número de Reynolds del flujo.

En el caso de un edificio, las aperturas que se encuentran situadas en la envoltura son mas o menos uniformes geoméricamente y el coeficiente de descarga depende únicamente de la geometría y de la diferencia de presión existente (ASHRAE, 1993). Este hecho se confirma con los resultados obtenidos por Bot (1983) y de Jong (1990). Según estos autores, y a partir de ensayos realizados en modelos a escala y en invernaderos reales, el coeficiente de descarga de las ventanas de los invernaderos depende únicamente de la geometría de la ventana, y más concretamente del coeficiente de forma de la ventana  $\lambda_0$  definido como el cociente entre la longitud ( $L_0$ ) y la altura ( $H_0$ ) de la ventana ( $\lambda_0 = L_0/H_0$ ).

**De acuerdo con estos resultados, las fuerzas de fricción no tienen ningún efecto mientras se trabaje dentro del rango de número de Reynolds que se produce en el invernadero a escala real ( $200 < Re < 60.000$ ). En ese caso la relación entre la diferencia de presión y el flujo volumétrico a través de una ventana vendrá dado por:**

$$\Delta P = F_0 \frac{1}{2} \rho_a \left( \frac{\Phi}{A_0} \right)^2 \quad (5.2)$$

y:  $F_0 = C_d^{-2}$  donde  $F_0$  es el factor de fricción de la ventana que depende del coeficiente de forma  $\lambda_0$  y en consecuencia de la geometría de la ventana.

La expresión (5.2) permite determinar el factor de fricción de la ventana ( $F_0$ ), y el coeficiente de descarga  $C_d$ , midiendo la diferencia de presión y el flujo de aire a través de la ventana, pues el resto de parámetros ( $\rho_a$  y  $A_0$ ) son conocidos.

Toda la teoría presentada hasta el momento se refiere al caso de ventanas sin mallas. Si incorporamos mallas porosas (de sombreo o anti-insecto) a las aperturas de ventilación se produce una variación en las características de flujo de las ventanas. Es pues necesario evaluar el efecto que se produce sobre el flujo de aire al incorporar una malla en las aperturas de ventilación.

Dos son las aproximaciones generalmente empleadas para evaluar las características de flujo de las mallas: a) la primera se basa en la permeabilidad de las mallas utilizando bien la ecuación de Darcy para velocidades de viento muy pequeñas o la ecuación de Forchheimer en el caso de las velocidades intermedias (Miguel y col. (1997). b) La segunda se basa en la ecuación de Bernouilli y utiliza el coeficiente de descarga para definir las características de flujo de la malla más la ventana (Sase y Christianson, 1990; Kosmos y col., 1993; Montero y col., 1996).

De acuerdo con Miguel y col. (1997) en el caso de mallas térmicas con un tamaño de cuadrícula muy pequeño (0.03mm) el número de Reynolds del flujo es menor de 150 y en ese caso sería preciso utilizar la ecuación de Forchheimer considerando la permeabilidad y la porosidad de la malla. Para el caso de velocidades muy pequeñas ( $Re < 1$ ) se utilizaría la ecuación de Darcy considerando únicamente la permeabilidad del material poroso.

En el caso de mallas anti-insecto con un tamaño de cuadrícula mayor (0.17-0.40 mm) Sase y Christianson. (1990) utilizan el concepto del coeficiente de descarga, al igual que Kosmos y col. (1993) para los que al estudiar el flujo a través de un medio poroso como una malla anti-insectos en el que el flujo a través de un poro influye al del resto, debe considerarse el coeficiente de descarga y la dependencia de éste únicamente de la forma de la ventana más malla y no del número de Reynolds, ya que debido a la dificultad de determinar la velocidad del flujo a través de la malla y las posibles variaciones de la dimensión característica, se producirían errores de medida muy elevados.

De acuerdo con esto para las mallas anti-insecto y de sombreo se usará en adelante la ecuación de Bernouilli y el concepto del coeficiente de descarga tal y como se ha explicado en el caso de la ventana sin mallas, utilizando la ecuación 5.2 y la misma metodología propuesta por Bot (1983) y de Jong (1990) con medidas en modelos a escala. Respecto al valor de la superficie de la ventana a introducir en la ecuación 5.2 y de acuerdo con lo mencionado por Kosmos y col. (1993) y Liu (1991) se utilizará el

área cubierta por la malla, es decir el área total ocupada por la malla (tanto el espacio poroso como el sólido).

### **5.3.-Materiales y Métodos.**

#### **5.3.1.-Dispositivo experimental.**

Para la determinación de los coeficientes de descarga se construyó un invernadero a escala 1:3 del invernadero real donde se realizaron las medidas de la tasa de ventilación (ver capítulo 3).

Una vez construida la estructura se procedió a la instalación del sistema de ventilación para tener una representación a escala (1:3) de los dos sistemas de ventilación analizados, es decir el sistema de ventanas cenitales rectangulares continuas y el de ventanas intercambiables.

En todo momento, al realizar el modelo a escala se procedió con el máximo rigor para evitar posibles diferencias geométricas entre el invernadero a escala y el real, ya que de existir, estas conducirían a la aparición de errores en la determinación de las características de flujo de las ventanas.

Para asegurar una correcta realización de los experimentos, de Jong y Bot (1992<sup>b</sup>) señalan que estos deben realizarse en ausencia de viento ya que se pretende determinar la diferencia de presión originada por un ventilador y si existe viento exterior, éste puede provocar también una diferencia de presión no controlable que produciría una fuerte distorsión en los ensayos y provocaría falsas determinaciones. Por ello, el modelo a escala se construyó en el interior de un invernadero multitúnel mayor (figura 5.1) y los ensayos se realizaron en todos los casos cuando la velocidad del viento exterior fue prácticamente nula ( $<0.5 \text{ ms}^{-1}$ ) para, de esta forma, asegurar la ausencia de viento en el interior del invernadero al realizar las determinaciones experimentales.

Los ensayos se realizaron para todas las combinaciones posibles de tipo de ventana y tipo de malla y para diferentes aperturas de las ventanas. En la tabla 5.1 se presentan las combinaciones tipo de malla y tipo de ventana analizadas.



**Figura 5.1 Detalle del invernadero a escala construido en el interior de un invernadero mayor con el objetivo de evitar el efecto del viento exterior.**

**Tabla 5.1.-Combinaciones tipo de ventana (rectangular continua e intercambiable) y tipo de malla (sin malla, de sombreado, anti-pulgón y anti-trip) evaluadas en los ensayos a escala del coeficiente de descarga.**

Tipo de Ventana	Tipo de malla			
	Sin malla	Malla de sombreado	Malla anti-pulgón	Malla anti-trip
Rectangular	x	x	x	x
Intercambiable	(1)	(1)	x	(1)

(1): Combinaciones no evaluadas.

En el caso de la ventana intercambiable, no se pudieron evaluar las combinaciones señaladas en la tabla a causa de las limitaciones del dispositivo experimental disponible, tal y como se explica en el apartado 5.4.2. de este mismo capítulo.

Para cada combinación se realizaron los ensayos para un amplio rango de aperturas con diferentes coeficientes de forma (relación entre la longitud y altura de la

ventana). En el caso de la ventana rectangular continua esto se consiguió variando la altura y la longitud de las ventanas, mientras que en el caso de las ventanas intercambiables la variación consistió en cambiar el porcentaje de superficie cubierta por plástico o por malla.

Los coeficientes de forma que se estudiaron varían desde 13.3 hasta 80 en el caso de la ventana rectangular continua y de 6.95 a 26.6 para la ventana intercambiable (en este caso como longitud  $L_0$  se tomó la longitud del invernadero y como altura  $H_0$  se consideró la longitud del arco hasta donde llegaba la malla).

Destacar finalmente que para el estudio de las mallas, en el caso de la malla anti-pulgón se utilizaron dos tipos de materiales: las malla anti-pulgón real (0.40x0.40mm y una porosidad del 45%) y una malla a escala (0.16x0.16 mm pero con la misma porosidad). En el caso de la malla anti-trip y la malla de sombreado se utilizaron los mismos materiales que para las medidas de ventilación a escala real.

### **5.3.2.-Procedimiento experimental.**

El procedimiento experimental en cada uno de los ensayos realizados fue el siguiente:

En primer lugar se fijó el grado de apertura de la ventana de forma que se consiguiera tener el coeficiente de forma deseado para cada ensayo. Una vez definida la ventana a estudiar se procedió a realizar las medidas.

Para ello se suministró un volumen de aire conocido desde el interior hacia el exterior del invernadero con un ventilador calibrado (Casals, HM56T4I). El aire se distribuyó por el interior del invernadero mediante un tubo de polietileno perforado, de forma que la distribución fuera lo mas uniforme posible.

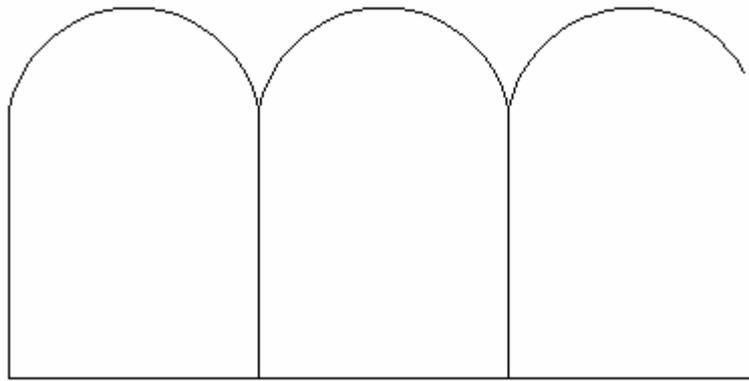
Para conocer en cada experimento el volumen de aire suministrado se utilizó el ventilador calibrado en fábrica y se midió en campo el flujo de aire de acuerdo con la metodología propuesta por la ASHRAE (1993). Con este fin se dividió el tubo de distribución de aire en cinco secciones circulares de igual superficie midiéndose mediante un tubo de Pitot (Thies, Alemania) y un micromanómetro (Thies, Alemania) la velocidad del flujo en los cuatro puntos centrales de cada sección de acuerdo con la dirección de dos diámetros perpendiculares previamente determinados. De esta forma se obtuvo el valor de la velocidad media del flujo, y, conocida la sección del tubo, el valor del caudal de aire suministrado por el ventilador. Una vez medido por este

procedimiento el caudal de aire suministrado, en cada uno de los ensayos se comprobó éste midiendo la diferencia de presión entre la aspiración y la impulsión. Se utilizó un micromanómetro (Thies, Alemania) con un rango de medida de 0-100 Pa y una precisión del 0.1% conectado a una sonda de presión estática en la aspiración (Omega, USA) y a un tubo de Pitot (Thies, Alemania) en la impulsión. De esta forma se determinó la diferencia de presión entre la impulsión y la aspiración y, a partir de la curva de calibración del ventilador, se pudo conocer en todo momento el caudal de aire suministrado.

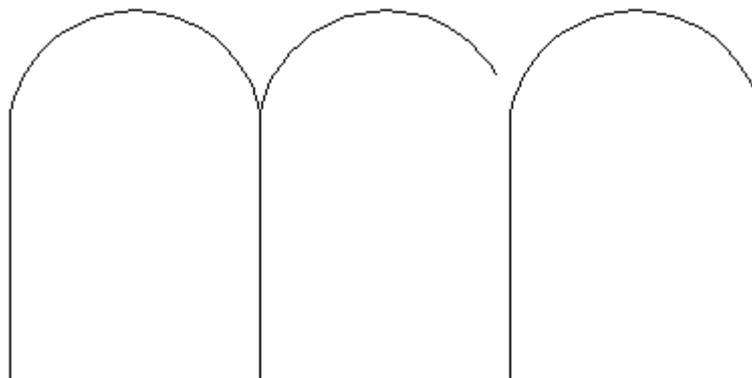
Simultáneamente se determinó la diferencia de presión entre el interior y el exterior del invernadero a escala. La diferencia de presión se midió entre dos sondas, una situada en el interior del invernadero, y la segunda situada en el exterior, realizándose dos repeticiones con un total de dos sondas interiores y dos exteriores. Estas dos sondas de presión estática (Omega, USA) se conectaron a un transductor de presión (SETRA, USA) con un rango de medida de  $\pm 62.26$  Pa y una precisión del 0.1% del fondo de escala. Los transductores se calibraron en fábrica de forma que para cada transductor se disponía de la ecuación de calibración.

Los transductores de presión se conectaron a un equipo de registro de datos (delta logger, Delta T Devices, UK) tomándose las lecturas cada segundo.

Con el fin de comparar el comportamiento de las ventanas se repitieron los ensayos para cada coeficiente de forma y tipo de ventana con y sin malla en función de la situación de las aperturas de ventilación. Para ello se diferenciaron dos posiciones en función de si la ventana se encontraba situada en una nave lateral, es decir si no se presenta ninguna nave delante de la ventana, o por el contrario ésta se encontraba en una nave interior, es decir que delante de la ventana se presenta medio arco de túnel que puede interferir en el flujo y variar el coeficiente de descarga (figura 5.2).



a)



b)

**Figura 5.2. Esquema de los dos tipos de posiciones de las ventanas evaluadas en la determinación del coeficiente de descarga. a) Ventana situada en una nave lateral y b) Ventana situadas en una nave interior.**

En la figura 5.2. se presenta el esquema de las denominadas ventanas situadas en una nave lateral y ventanas situadas en una nave interior en el caso del sistema de ventanas cenitales rectangulares continuas. Esta misma clasificación se utilizó en el caso del sistema de ventilación con ventanas intercambiables.

### **5.3.3.-Expresiones generales de cálculo.**

La determinación de los diferentes valores de los coeficientes de descarga para ventanas de invernaderos tipo Venlo permitió a Bot (1983) obtener una expresión general de cálculo del coeficiente de descarga de este tipo de ventana en función del coeficiente de forma  $\lambda_0$  de la ventana.

De acuerdo con estos trabajos, para las ventanas discontinuas de un invernadero del tipo “Venlo” el factor de fricción  $F_0$  (y en consecuencia el coeficiente de descarga de la ventana) se puede determinar a partir de la expresión:

$$\boxed{F_0 = 1.75 + 0.7 e^{-\left(\frac{L_0/H_0}{32.5}\right)}} \quad \text{para } L_0/H_0 > 1 \quad (5.3)$$

$$\boxed{F_0 = 1.75 + 0.7 e^{-\left(\frac{H_0/L_0}{32.5}\right)}} \quad \text{para } L_0/H_0 < 1 \quad (5.4)$$

Siguiendo este mismo método, a partir de las medidas experimentales del coeficiente de descarga, se pretende obtener en el presente capítulo una expresión general que permita determinar el coeficiente de descarga de las ventanas cenitales rectangulares continuas con y sin malla en las ventana, a partir de las características geométricas de ésta, es decir a partir de los valores de longitud y altura de la ventana. En el caso de la ventana intercambiable con malla anti-pulgón se buscará también una expresión general de cálculo de los valores del coeficiente de descarga.

La expresión de cálculo, en concordancia con los resultados obtenidos por Bot (1983) y de Jong (1990) es de esperar que presente forma exponencial según la ecuación:

$$\boxed{F_0 = \alpha + \beta e^{-\gamma(L_0/H_0)}} \quad (5.5)$$

donde  $\alpha, \beta$  y  $\gamma$  son los parámetros de ajuste que dependerán del tipo de ventana y del tipo de malla.

## **5.4.-Resultados.**

### **5.4.1.-Valores de los coeficientes de descarga de ventanas rectangulares continuas.**

Las medidas en el modelo a escala han permitido obtener los valores del coeficiente de descarga de las diferentes combinaciones estudiadas.

En la tabla 5.2 se presentan los resultados obtenidos en el caso de la ventana rectangular continua sin malla.

**Tabla 5.2.-Valores del coeficiente de descarga y test de separación de medias para ventanas rectangulares continuas con diferentes coeficientes de forma ( $L_0/H_0$ ) situadas en una nave lateral o interior.**

<b>Coeficiente de forma</b>	<b>Tipo de Ventana</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación típica.</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>13.3</b>	<b>Lateral</b>	8	0.681 <sup>a</sup>	0.001	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.518 <sup>b</sup>	0.010	
<b>16.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.698 <sup>a</sup>	0.004	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.551 <sup>b</sup>	0.002	
<b>20.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.780 <sup>a</sup>	0.009	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.570 <sup>b</sup>	0.011	
<b>26.6</b>	<b>Lateral</b>	8	0.815 <sup>a</sup>	0.005	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.621 <sup>b</sup>	0.013	
<b>40</b>	<b>Lateral</b>	8	0.891 <sup>a</sup>	0.005	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.667 <sup>b</sup>	0.016	
<b>60</b>	<b>Lateral</b>	8	0.900 <sup>a</sup>	0.002	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.772 <sup>b</sup>	0.009	
<b>80</b>	<b>Lateral</b>	8	0.916 <sup>a</sup>	0.014	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.826 <sup>b</sup>	0.006	

Si se observan los valores de la tabla 5.2 puede verse que claramente se presenta un aumento del coeficiente de descarga a medida que aumenta el coeficiente de forma (y en consecuencia el tamaño) de la ventana. Este resultado coincide con lo observado por Bot (1983) y de Jong (1990) para las ventanas discontinuas de los invernadero Venlo así como con lo obtenido por Montero y col. (1996) en el caso de invernaderos con ventanas cenitales rectangulares continuas.

El segundo punto a considerar es la clara diferencia de valores del coeficiente de descarga en función de la localización de las ventanas. Los valores del coeficiente de descarga de las ventanas situadas en las naves interiores son claramente inferiores a los de las ventanas situadas en una nave lateral. Esta diferencia de comportamiento es además estadísticamente significativa, pues si se realiza un test de separación de medias

los resultados obtenidos son significativamente distintos en todos los coeficientes de forma estudiados, tanto para el nivel de significación de 5% como para el del 1% ( $P < 0.01$  en todos los casos).

Los experimentos realizados con mallas se iniciaron con el estudio de la ventana cenital rectangular continua con dos tipos de malla: 1) la malla a escala real idéntica a la utilizada en las medidas de ventilación (0.40x0.40 mm y 45% de porosidad) y 2) una malla a escala (0.16x0.16 mm e idéntica porosidad). Los resultados para ambos casos se presentan en la tabla 5.3 en la que podemos ver que también se ha realizado un test de separación de medias.

**Tabla 5.3.- Coeficientes de descarga y test de separación de medias de una ventana rectangular continua con malla anti-pulgón a escala real y malla anti-pulgón a escala 1:3.**

<b>Coefficiente de forma</b>	<b>Tipo de Ventana</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación típica.</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>13.3</b>	<b>Lateral</b>	8	0.418 <sup>a</sup>	0.003	P>0.05
	<b>Interior</b>	8	0.415 <sup>a</sup>	0.001	
<b>16.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.479 <sup>a</sup>	0.003	P>0.05
	<b>Interior</b>	8	0.477 <sup>a</sup>	0.002	
<b>20.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.513 <sup>a</sup>	0.001	P>0.05
	<b>Interior</b>	8	0.515 <sup>a</sup>	0.003	
<b>26.6</b>	<b>Lateral</b>	8	0.559 <sup>a</sup>	0.007	P>0.05
	<b>Interior</b>	8	0.558 <sup>a</sup>	0.002	
<b>40</b>	<b>Lateral</b>	8	0.533 <sup>a</sup>	0.001	P>0.05
	<b>Interior</b>	8	0.541 <sup>a</sup>	0.006	

En todos los casos analizados el valor obtenido para el mismo coeficiente de forma es muy parecido. Si se hace un análisis estadístico los resultados obtenidos con la malla real y la malla a escala son estadísticamente idénticos en todos los casos y para todos los coeficientes de forma analizados.

Este resultado confirma la posibilidad de utilizar malla real en las determinaciones y, en consecuencia, la posibilidad de medir el coeficiente de descarga en el modelo a escala con las mallas de sombreo, anti-pulgón y anti-trip, utilizadas a escala real en las medidas experimentales de ventilación.

Para la malla anti-pulgón y en el caso de la ventana rectangular continua se determinó el coeficiente de descarga de la ventana con malla tanto para las ventanas situadas en una nave central, como en el caso de las ventanas de una nave lateral (tabla 5.4).

**Tabla 5.4.-Valores del coeficiente de descarga y test de separación de medias para ventanas rectangulares continuas y malla anti-pulgón con diferentes coeficientes de forma ( $L_0/H_0$ ) situadas en una nave lateral o interior.**

<b>Coefficiente de forma</b>	<b>Tipo de Ventana</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación típica.</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>13.3</b>	<b>Lateral</b>	8	0.418 <sup>a</sup>	0.003	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.319 <sup>b</sup>	0.001	
<b>16.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.479 <sup>a</sup>	0.003	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.352 <sup>b</sup>	0.004	
<b>20.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.513 <sup>a</sup>	0.001	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.372 <sup>b</sup>	0.001	
<b>26.6</b>	<b>Lateral</b>	8	0.559 <sup>a</sup>	0.007	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.419 <sup>b</sup>	0.007	
<b>40</b>	<b>Lateral</b>	8	0.533 <sup>a</sup>	0.004	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.450 <sup>b</sup>	0.005	
<b>60</b>	<b>Lateral</b>	8	----	-----	-----
	<b>Interior</b>	8	----	-----	
<b>80</b>	<b>Lateral</b>	8	0.607 <sup>a</sup>	0.002	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.582 <sup>b</sup>	0.010	

De nuevo y de acuerdo con lo visto para la ventana sin malla, se produce un importante incremento del valor del coeficiente de descarga a medida que aumenta el coeficiente de forma ( $L_0/H_0$ ) de la ventana, tanto en el caso de la ventana lateral como en la central.

Además, se presenta un comportamiento claramente diferenciado entre las ventanas laterales y las centrales, siendo los valores del coeficiente de descarga de las ventanas centrales notablemente inferiores a los de las laterales. Estas diferencias son a su vez estadísticamente demostrables, pues si para cada coeficiente de forma se realiza un test de separación de medias, las diferencias en todos los casos son altamente significativas al presentarse tanto para el nivel de significación del 5% como para el del 1% ( $P < 0.01$  en todos los casos).

Análogamente se repitieron los mismos ensayos para los casos de ventana rectangular continua con malla de sombreo y malla anti-trip obteniéndose los resultados de las tablas 5.5 y 5.6.

**Tabla 5.5.-Valores del coeficiente de descarga y test de separación de medias para ventanas rectangulares continuas y malla de sombreo con diferentes coeficientes de forma ( $L_0/H_0$ ) situadas en una nave lateral o interior.**

<b>Coeficiente de forma</b>	<b>Tipo de Ventana</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación típica.</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>13.3</b>	<b>Lateral</b>	8	0.617	0.001	----
	<b>Interior</b>	8	----	----	
<b>16.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.622 <sup>a</sup>	0.004	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.441 <sup>b</sup>	0.006	
<b>20.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.752 <sup>a</sup>	0.005	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.463 <sup>b</sup>	0.003	
<b>26.6</b>	<b>Lateral</b>	8	0.744 <sup>a</sup>	0.001	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.456 <sup>b</sup>	0.003	
<b>40</b>	<b>Lateral</b>	8	0.785 <sup>a</sup>	0.004	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.543 <sup>b</sup>	0.028	
<b>60</b>	<b>Lateral</b>	8	0.881 <sup>a</sup>	0.002	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.753 <sup>b</sup>	0.004	
<b>80</b>	<b>Lateral</b>	8	0.834 <sup>a</sup>	0.005	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.695 <sup>b</sup>	0.005	

**Tabla 5.6.-Valores del coeficiente de descarga y test de separación de medias para ventanas rectangulares continuas y malla anti-trip con diferentes coeficientes de forma ( $L_0/H_0$ ) situadas en una nave lateral o interior.**

<b>Coefficiente de forma</b>	<b>Tipo de Ventana</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación típica.</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>13.3</b>	<b>Lateral</b>	8	0.303 <sup>a</sup>	0.001	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.231 <sup>b</sup>	0.002	
<b>16.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.319 <sup>a</sup>	0.001	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.253 <sup>b</sup>	0.001	
<b>20.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.373 <sup>a</sup>	0.001	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.264 <sup>b</sup>	0.007	
<b>26.6</b>	<b>Lateral</b>	8	0.423 <sup>a</sup>	0.003	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.266 <sup>b</sup>	0.007	
<b>40</b>	<b>Lateral</b>	8	0.407 <sup>a</sup>	0.001	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.316 <sup>b</sup>	0.005	
<b>60</b>	<b>Lateral</b>	8	----	-----	----
	<b>Interior</b>	8	----	-----	
<b>80</b>	<b>Lateral</b>	8	0.487 <sup>a</sup>	0.010	P<0.05
	<b>Interior</b>	8	0.471 <sup>b</sup>	0.004	

Si se observan los resultados de las tablas 5.5 y 5.6 puede comprobarse que para la malla de sombreado y la anti-trip se repite el comportamiento presente en los dos casos anteriores, es decir, a medida que aumenta el coeficiente de forma de la ventana aumenta también simultáneamente el valor del coeficiente de descarga de la ventana.

Por otra parte, se confirma también el comportamiento diferenciado entre las ventanas localizadas en una nave central y en una nave lateral, ya que los valores del coeficiente de descarga de las naves centrales son, como en configuraciones anteriores, claramente inferiores. Además al realizar el test de separación de medias de nuevo se confirma estadísticamente esta diferencia pues para todos los coeficientes de forma evaluados los valores de las naves centrales y laterales son significativamente

diferentes, tanto para el nivel de significación del 5% como para el del 1% ( $P < 0.01$  en todos los casos, salvo para la malla anti-trip y el coeficiente de forma de 80 que únicamente se presentan para el 5%).

#### **5.4.2.-Valores de los coeficientes de descarga de ventanas intercambiables.**

En el caso de la ventana intercambiable y como consecuencia del dispositivo experimental disponible únicamente se determinó el coeficiente de descarga de la configuración con malla anti-pulgón ya que en el resto de los casos no fue posible la determinación.

Este hecho se debió a la falta de un ventilador calibrado de flujo variable ya que en el caso de la ventana sin malla o con malla de sombreo con el ventilador experimental no se consiguió crear la diferencia de presión suficiente para poderse realizar las medidas, mientras que por el contrario para la configuración con malla anti-trip la diferencia de presión originada era superior al rango de medida del transductor de presión utilizado en las medidas.

Finalmente, se realizaron las medidas del coeficiente de descarga para la ventana intercambiable con malla anti-pulgón variando el grado de apertura de la ventana y obteniéndose los valores de las ventanas centrales y laterales para cada coeficiente de forma (tabla 5.7).

**Tabla 5.7.-Valores del coeficiente de descarga y test de separación de medias para ventanas intercambiables y malla anti-pulgón con diferentes coeficientes de forma ( $L_0/H_0$ ) situadas en una nave lateral o interior.**

<b>Coeficiente de forma</b>	<b>Tipo de Ventana</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>S.D.</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>6.95</b>	<b>Lateral</b>	8	0.185 <sup>a</sup>	0.003	P<0.05
	<b>Interior</b>	8	0.182 <sup>b</sup>	0.002	
<b>12.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.334 <sup>a</sup>	0.002	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.323 <sup>b</sup>	0.001	
<b>16.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.343 <sup>a</sup>	0.001	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.307 <sup>b</sup>	0.002	
<b>20.0</b>	<b>Lateral</b>	8	0.409 <sup>a</sup>	0.001	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.392 <sup>b</sup>	0.001	
<b>26.6</b>	<b>Lateral</b>	8	0.426 <sup>a</sup>	0.004	P<0.01
	<b>Interior</b>	8	0.373 <sup>b</sup>	0.003	

Para la ventana intercambiable se produce el mismo comportamiento que en el caso de la ventana cenital rectangular continua. Es decir, de nuevo se observa un claro incremento del coeficiente de descarga a medida que aumenta el coeficiente de forma de la ventana y además existe un comportamiento diferenciado entre las ventanas laterales y las interiores. Los valores del coeficiente de descarga de las ventanas interiores son inferiores a los medidos para las ventanas laterales.

El análisis estadístico indica nuevamente que las diferencias entre ventanas centrales y laterales son significativas tanto para el nivel del 5% como para el 1% (P<0.01 salvo para el coeficiente de forma de 6.95) y, por tanto, los coeficientes de descarga de las ventanas laterales son diferentes de los de las ventanas interiores

### **5.4.3.-Expresiones generales para el cálculo del factor de fricción.**

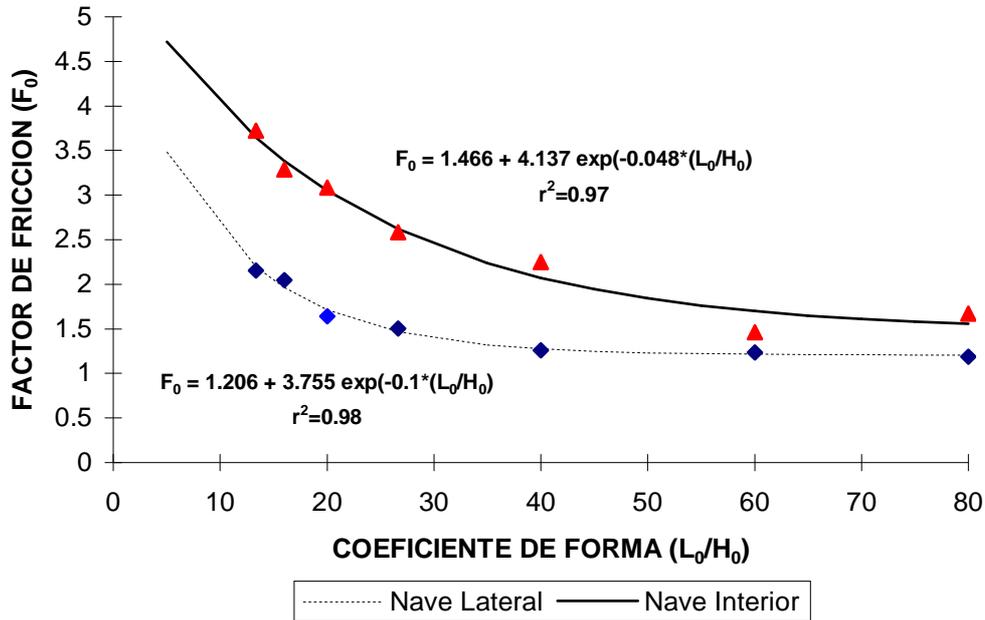
La obtención de los valores del coeficiente de descarga para las diferentes combinaciones tipo de ventana y tipo de malla y localización de la ventana para los diversos valores de los coeficientes de forma (tablas 5.2, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7), de acuerdo con lo expresado en el apartado 5.3.3 permite pensar el desarrollo de expresiones generales siguiendo la ecuación 5.5 que posibiliten el cálculo del coeficiente de descarga conociendo únicamente las características geométricas de la ventana.

De acuerdo con todos los resultados del apartado anterior, se determinaron dos expresiones para cada configuración analizada en función de la localización de la ventana, es decir se determinó para cada configuración la ecuación que permite calcular el factor de fricción (y en consecuencia el coeficiente de descarga) para las ventanas localizadas en una nave lateral, y la ecuación que posibilita el mismo cálculo en el caso de una ventana localizada en una nave interior.

#### 5.4.3.1.-Ventana rectangular continua.

En la figura 5.3 se presentan los resultados obtenidos en el caso de la ventana rectangular continua sin mallas. Como puede verse, la expresión de cálculo según el modelo propuesto por Bot(1983) y de Jong (1990) presenta un ajuste excelente tanto para las ventanas de las naves laterales ( $r^2=0.98$ ) como interiores ( $r^2=0.97$ ).

## SIN MALLA



**Figura 5.3.-Factor de fricción ( $F_0$ ) en función del coeficiente de forma ( $L_0/H_0$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas situadas en una nave interior o lateral.**

En el caso de incorporar algún tipo de malla en las ventanas, si se aplica el mismo modelo obtenemos los resultados de las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 para la malla de sombreo, anti-pulgón y anti-trip respectivamente.

### MALLA DE SOMBREO

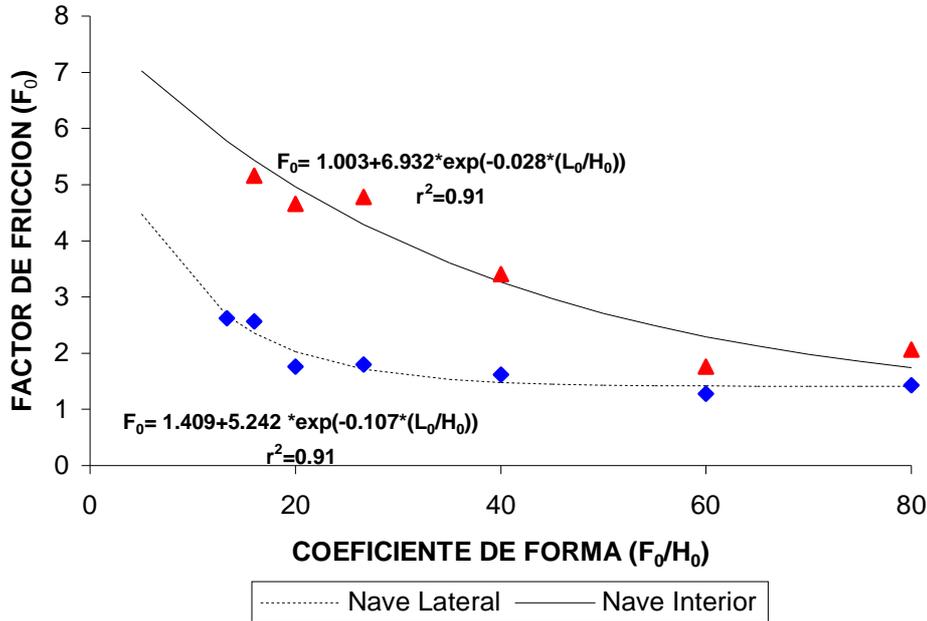


Figura 5.4.-Factor de fricción ( $F_0$ ) en función del coeficiente de forma ( $L_0/H_0$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas y malla de sombreado situadas en una nave interior o lateral.

### MALLA ANTI-PULGON

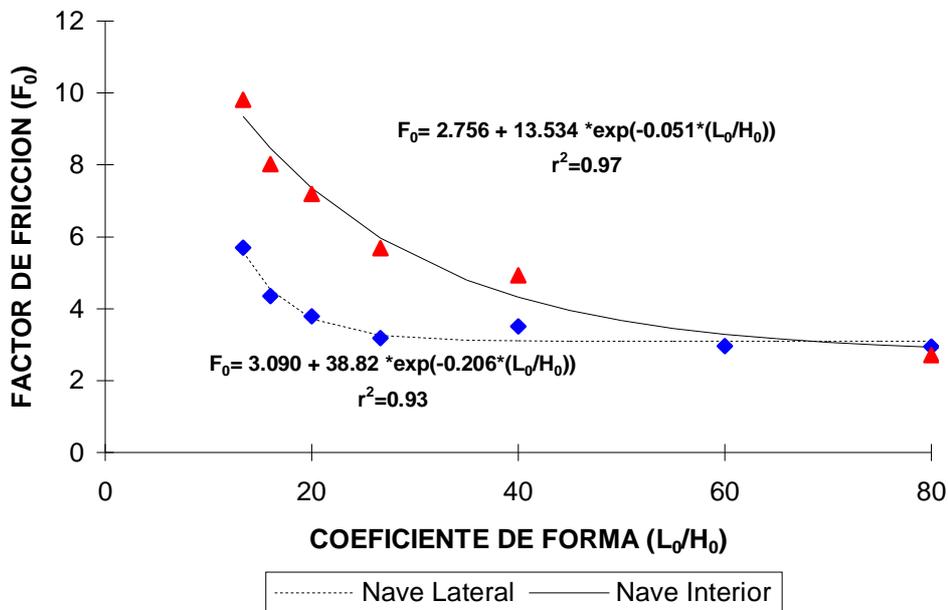
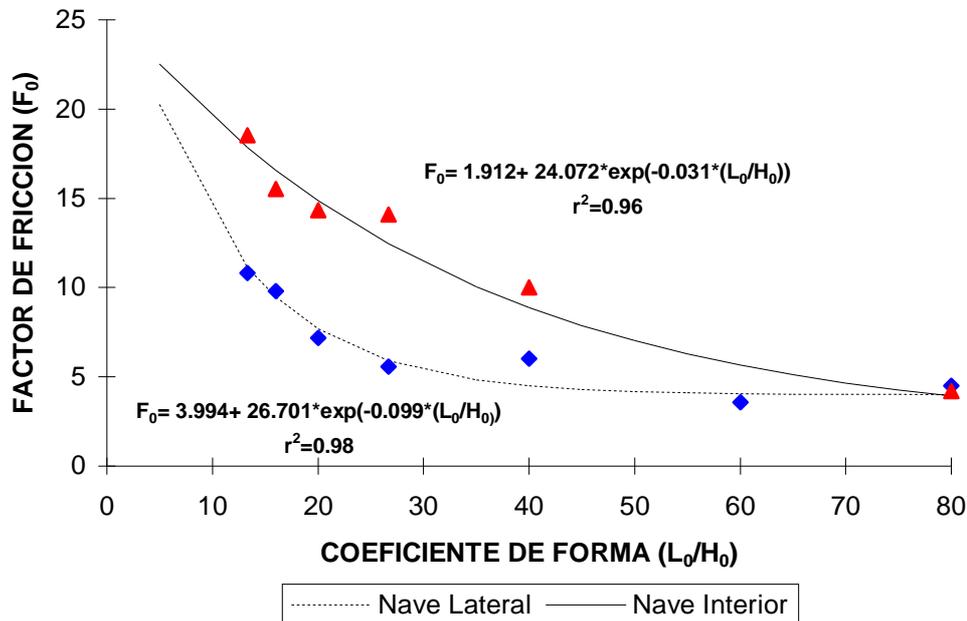


Figura 5.5.-Factor de fricción ( $F_0$ ) en función del coeficiente de forma ( $L_0/H_0$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas y malla anti-pulgón situadas en una nave interior o lateral.

## MALLA ANTI-TRIP



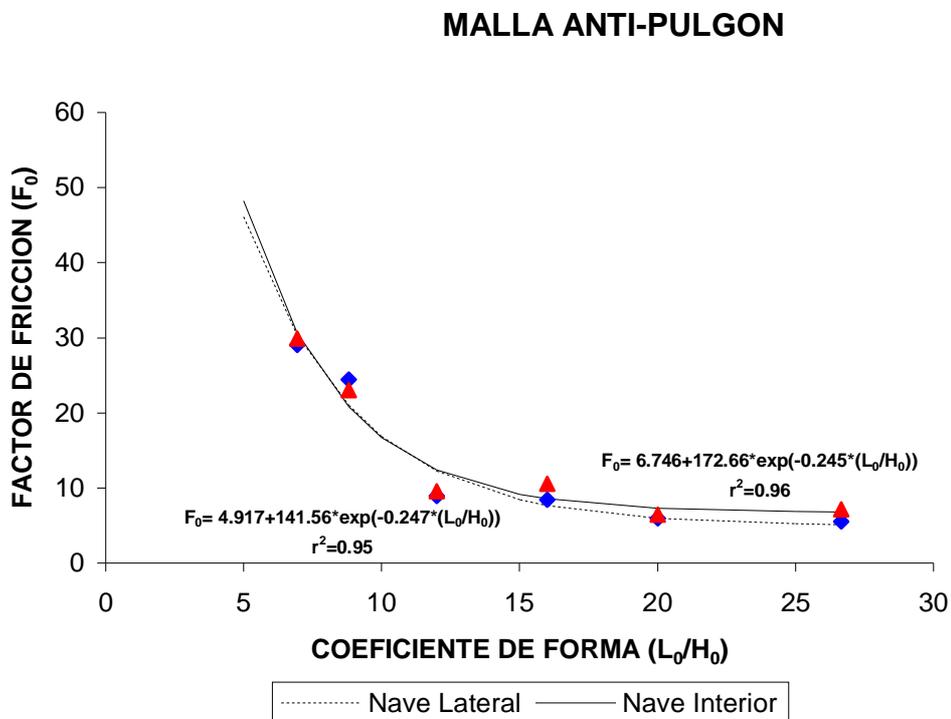
**Figura 5.6.-Factor de fricción ( $F_0$ ) en función del coeficiente de forma ( $L_0/H_0$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas y malla anti-trip situadas en una nave interior o lateral.**

Si se observan los resultados obtenidos para la expresión exponencial de cálculo del factor de fricción en el caso de ventanas rectangulares continuas con mallas, puede verse que se presenta un ajuste muy elevado con un valor del coeficiente de determinación ( $r^2$ ) superior en todos los casos a 0.9 (el más bajo de ellos es de 0.91 para la malla de sombreo tanto para la nave central como la lateral). Este hecho confirma la posibilidad de utilizar el modelo propuesto por Bot(1983) y de Jong (1990) para el cálculo del coeficiente de descarga de ventanas cenitales rectangulares continuas en las que se ha incorporado algún tipo de malla porosa.

Hay que destacar que la obtención de este tipo de expresiones, permite pues determinar los coeficientes de descarga de invernaderos multitúnel con el mismo tipo de ventana (con y sin malla) conociendo únicamente la longitud y altura (coeficiente de forma) de éstas.

### 5.4.3.2.-Ventana intercambiable.

En el caso de la ventana intercambiable, tal y como se ha comentado anteriormente únicamente se evaluó la ventana con malla anti-pulgón. No obstante, si se aplica el mismo modelo exponencial para la determinación del coeficiente de descarga en función de la geometría de la ventana (considerando el coeficiente de forma de esta como se ha definido ya en el apartado 5.3.1) se obtienen igualmente muy buenos ajustes ( $r^2=0.95$  para la nave lateral y  $r^2=0.96$  para la nave central) hecho que confirma la posibilidad de utilizar este mismo modelo para el cálculo del coeficiente de descarga a partir de la geometría de la ventana (figura 5.7).



**Figura 5.7.-Factor de fricción ( $F_0$ ) en función del coeficiente de forma ( $L_0/H_0$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla anti-pulgón situadas en una nave interior o lateral.**

A pesar de la diferencia observada estadísticamente entre los valores de la nave lateral e interior, como se refleja en la gráfica las ecuaciones generales de ajuste son muy similares y para coeficientes de forma pequeños ( $<15$ ) los datos del coeficiente de descarga muy parecidos.

## 5.5.-Discusión.

Las medidas en los modelos a escala han permitido determinar los valores del coeficiente de descarga para ventanas con y sin mallas y confirmar el claro descenso que provoca la incorporación de mallas a las aperturas de ventilación (tablas 5.2, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7).

Para la ventana cenital rectangular continua (tablas 5.2, 5.4, 5.5 y 5.6) si se observan los valores correspondientes al coeficiente de forma de 20 (que es el valor de las ventanas del invernadero real a partir del cual se ha construido el modelo a escala) para el caso de la ventana sin malla situada en una nave lateral el coeficiente de descarga toma el valor de 0.780. Si se toma ese valor como referencia y, se considera el descenso que implica la incorporación de mallas, se observa que al incorporar una malla de sombreo el coeficiente de descarga desciende hasta 0.752 (un 3.5%). Este descenso es todavía más acusado si se instala una malla anti-pulgón (0.513, 35%) y alcanza el valor máximo al instalar la malla anti-trip (0.373, 52%).

Se presentan descensos muy similares en el caso de las ventanas localizadas en una nave interior. Si de nuevo se analiza el caso del coeficiente de forma 20, el valor observado para la ventana sin malla es de 0.570, considerando este valor como el de referencia, en el caso de incorporar malla de sombreo se produce un claro descenso (0.463, 18%) que todavía es más importante en el caso de la malla anti-pulgón (0.372, 35%) o la anti-trip (0.264, 53%). Se obtienen descensos idénticos al observado en la ventana lateral para las mallas anti-pulgón y anti-trip, mientras que en el caso de la malla de sombreo es considerablemente mayor.

Este comportamiento se produce de forma idéntica con todos los coeficientes de forma analizados presentándose la misma tendencia al incorporar mallas en las ventanas cenitales rectangulares continuas.

Para las ventanas intercambiables, a pesar de que no se han podido determinar los valores del coeficiente de descarga salvo para una configuración (caso de la ventana con malla anti-pulgón, tabla 5.7), los bajos valores que se obtienen para esta configuración parecen indicar análogamente la existencia de un descenso del coeficiente de descarga al incorporar la malla similar al observado para la ventana cenital de cremalleras.

La tendencia observada para todas las configuraciones analizadas confirma lo propuesto por Sase y Christianson (1990) quienes indican una clara caída del coeficiente de descarga de las aperturas de ventilación al incorporar malla, caída claramente asociada al tamaño de la cuadrícula de la malla siendo mayor a medida que disminuye la cuadrícula.

Esto confirma lo propuesto por estos mismo autores que señalan que el coeficiente de descarga de las mallas es el parámetro fundamental en la regulación de la ventilación natural del invernadero y explicaría la fuerte reducción en la tasa de ventilación al incorporar mallas en las aperturas tal y como habían observado Bot y Van Holsteijn (1990) al introducir una malla anti-insectos (0.175x0.175 mm) en las aperturas discontinuas de ventilación en un invernadero del tipo Venlo.

Cabe destacar también la necesidad de determinar el coeficiente de descarga de invernaderos multitúnel con cubierta intercambiable en el caso de no presentar malla en las aperturas o, de estar equipados con malla de sombreado ya que, en el presente trabajo y como consecuencia del dispositivo experimental no ha sido posible la determinación de estos valores para dos combinaciones muy útiles en el caso de invernaderos localizados en condiciones mediterráneas.

Otro punto importante a considerar es la diferencia de comportamiento de las ventanas en función de su localización, es decir en función de si se trata de una ventana lateral o interior.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales con el modelo a escala tanto para las ventanas cenitales rectangulares continuas con y sin malla (tablas 5.2, 5.4, 5.5 y 5.6) como para las ventanas intercambiables con malla anti-pulgón (tabla 5.6) se observa que los coeficientes de descarga de las ventanas situadas en naves interiores son claramente inferiores a los de las mismas ventanas situadas en una nave lateral. Esta diferencia es además estadísticamente significativa tanto para el nivel de significación del 5% como para el del 1% (este último en prácticamente la totalidad de los casos).

Una explicación posible de este comportamiento diferenciado y del descenso de los valores en las naves interiores la podemos encontrar en la presencia de la media nave contigua frente a la apertura que actuaría como pantalla dificultando la salida del aire y disminuyendo el coeficiente de descarga en un efecto muy similar al observado por Baturin (1976) Warren (1977) y de Jong (1990) al incorporar a las ventanas un dispositivo (flap) de apertura regulable.

Esta disimilitud en función de la posición de la ventana, no se contempla en los estudios de ventilación previos para invernaderos multitúnel. En la mayoría de estos trabajos (Boulard y col., 1996; Papadakis y col., 1996) se determina conjuntamente el valor de  $C_d$  y del denominado coeficiente de efecto del viento  $C_w$  a partir de datos experimentales y aplicando modelos de ventilación. Boulard y Baille (1995) obtienen valores concretos del coeficiente de descarga a partir de medidas experimentales aplicando tres diferentes modelos de ventilación, y considerando un mismo coeficiente de descarga para todas las ventanas independientemente de su localización. Los resultados son muy variables en función del modelo aplicado (0.467 a 0.848) hecho que parece indicar que la variabilidad es debida más a las imprecisiones del modelo que a la variación del coeficiente de descarga.

La importancia de esta diferencia en función de la posición de la ventana queda claramente expuesta en el caso de invernaderos con más de dos naves. Boulard y Baille (1995) calculan el coeficiente de descarga de un invernadero de dos naves a partir de los datos experimentales medidos mediante la técnica del gas trazador obteniendo un valor de 0.750 que prácticamente coincide con el que se determina (0.757) al utilizar las expresiones de cálculo del apartado 5.4.3.1 para invernaderos un invernadero de las mismas características. El problema se presenta al extrapolar estos valores a invernaderos de más de una nave, ya que se está dando el mismo peso a la nave lateral e interior, cuando en realidad para el caso de más de dos naves al existir una única nave frontal, ésta tendrá una importancia mucho menor, por lo que si aplicamos el valor de ajuste experimental estaremos sobrevalorando la tasa de ventilación del invernadero.

## **5.6.-Conclusiones.**

La medida en modelos a escala ha demostrado ser un método útil para la determinación del coeficiente de descarga de las ventanas de los invernaderos con y sin mallas en las aperturas de ventilación.

La determinación y obtención de expresiones de cálculo del coeficiente de descarga de las ventanas de invernaderos multitúnel, con y sin mallas anti-insecto, es un paso fundamental en el proceso de modelización de la ventilación natural de estos invernaderos. La diferencia de comportamiento entre las ventanas interiores y laterales permitirá determinar con mayor precisión la tasa de ventilación ya sea en el caso de ventanas cenitales de rectangulares como en el de ventanas cenitales intercambiables.

El coeficiente de descarga, parámetro necesario en los modelos de ventilación, se consideraba hasta ahora como una incógnita más que se debía obtener a partir de valores determinados para otros invernaderos con diferentes geometría, tanto del invernadero como de las aperturas de ventilación, siendo totalmente desconocido el valor en el caso de presentarse mallas anti-insecto o de sombreo en las aperturas de ventilación.

Los resultados experimentales han permitido obtener unas expresiones de cálculo sencillas que pueden ser de utilidad en los tipos de ventanas analizados al permitir la determinación del valor del coeficiente de descarga a partir de las características geométricas de la ventana. Este hecho permitirá profundizar en el conocimiento de la acción de las variables ambientales sobre la tasa de ventilación para, de esta forma, incidir en el estudio de los mecanismos de actuación de éstas en el proceso de ventilación natural.

## **6.-DETERMINACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE VENTILACIÓN.**

### **6.1.-Introducción.**

El objetivo final del presente trabajo es la obtención de modelos que permitan determinar la tasa de ventilación a partir de parámetros de fácil medida, con el fin de poder introducirlos dentro de un modelo general de control del clima del invernadero.

En el capítulo 2 se presentan los modelos generalmente utilizados y aceptados para la determinación y estudio de la ventilación natural de los invernaderos. Para la verificación-comprobación de estos modelos es necesario determinar el coeficiente de descarga y el coeficiente de efecto del viento con el fin de verificar los cálculos con las medidas experimentales de la tasa de ventilación.

En el capítulo 3 se determinó experimentalmente la tasa de ventilación del invernadero multitúnel con todas las combinaciones ventana y malla evaluadas, midiéndose simultáneamente los parámetros ambientales implicados en el proceso (diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior, velocidad y dirección del viento). En el capítulo quinto, se determinó el coeficiente de descarga, parámetro independiente de las condiciones ambientales y característico de cada tipo de apertura de ventilación.

Una vez obtenidos todos estos resultados el paso siguiente es la obtención del coeficiente de efecto de viento  $C_w$ , para de esta forma y una vez conocidos todos los componentes poder desarrollar el modelo de ventilación del invernadero para cada combinación tipo de ventana y malla.

En el presente capítulo se pretende pues determinar el coeficiente de efecto de viento  $C_w$  con el fin de poder obtener los modelos y verificar su utilidad práctica contrastándolos con las medidas experimentales de la tasa de ventilación. Esto permitirá dilucidar su posible generalización y uso para invernaderos con aperturas de ventilación de características similares y un mayor número de naves o tamaño del invernadero.

## 6.2.-Material y métodos.

Como se comentó en el capítulo 2, uno de los modelos más utilizados en el estudio de la ventilación natural de invernaderos multitúnel es el presentado por Boulard y Baille (1995), Kittas y col. (1995) Boulard y col. (1996 y 1997) que determina la tasa de ventilación o el flujo de aire a través de las aperturas de ventilación a partir de las variables ambientales (velocidad del viento y diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior) utilizando la ecuación (2.40):

$$\Phi = \frac{S}{2} C_d \left[ 2g \frac{\Delta T H}{T} \frac{H}{4} \right]^{1/2} + \frac{S}{2} C_d [C_w^{1/2} u] \quad (6.1)$$

Diversos autores (Papadakis y col., 1996; Montero y col., 1996) consideran que el efecto térmico puede despreciarse en el caso de invernaderos con aperturas cenitales si la velocidad del viento es superior a 1-1.5 ms<sup>-1</sup>. Esta hipótesis se confirma a partir de la aplicación de modelos de ventilación, para diversos tipos de invernaderos, realizada por Boulard y col. (1997) así como de los resultados experimentales obtenidos en el capítulo 3 que indican claramente la escasa influencia del efecto térmico sobre el flujo de aire a través de las aperturas de ventilación natural.

De acuerdo con esto, se propone una simplificación de la ecuación anterior despreciándose la influencia del efecto térmico y se obtiene la expresión (2.41):

$$\Phi = \frac{S}{2} C_d C_w^{1/2} u \quad (6.2)$$

Que es la expresión mas ampliamente extendida para la modelización de la tasa de ventilación de invernaderos multitúnel con aperturas cenitales (Boulard y col., 1996; Montero y col., 1996) y túnel (Kittas y col., 1996).

En todos los trabajos anteriormente mencionados, salvo en el de Montero y col. (1996) el cálculo del C<sub>d</sub> se contempla como un ajuste experimental a partir de las medidas realizadas. Los resultados del capítulo 5 han permitido determinar los valores concretos de este parámetro y descubrir la diferencia de comportamiento de las ventanas en función de su localización en el invernadero (ventanas centrales y laterales).

De acuerdo con los resultados del capítulo 5 se propone una expresión de cálculo para el coeficiente de descarga en función del número de naves del invernadero y de la localización de estas. La expresión que permite el cálculo del coeficiente de descarga del invernadero viene dada por:

$$C_d = \frac{1}{n} C_{dl} + \frac{n-1}{n} C_{di} \quad (6.3)$$

donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga global del invernadero,  $n$  es el número de naves del invernadero,  $C_{dl}$  es el coeficiente de descarga de una ventana lateral, del invernadero y  $C_{di}$  es el coeficiente de descarga de una ventana interior del invernadero.

De acuerdo con la ecuación 6.3 el coeficiente de descarga global de las ventanas del invernadero viene dado por la media aritmética de los coeficientes de descarga de las ventanas laterales e interiores en función del número de naves existentes. Lógicamente en un invernadero multitúnel únicamente se presenta una nave lateral, por lo que el primer término que proporciona el valor de éste va multiplicado por el factor  $1/n$ .

La determinación de los diferentes valores de  $C_{dl}$  y  $C_{di}$  se realiza de acuerdo con las expresiones generales de cálculo del coeficiente de descarga obtenidas en el capítulo 5 (apartado 5.4.2). Para cada caso concreto de tipo de ventana y tipo de malla se aplicó la ecuación correspondiente que permite el cálculo del coeficiente de descarga en función de la geometría de la ventana.

Así por ejemplo en el caso de las ventanas cenitales de cremalleras sin malla las ecuaciones a utilizar serían:

$$F_{0l} = 1.206 + 3.755 \exp(-0.100 (L_0/H_0)) \quad (6.4)$$

$$F_{0i} = 1.466 + 4.137 \exp(-0.048 (L_0/H_0)) \quad (6.5)$$

donde  $F_{0l}$  es el factor de fricción de la ventana lateral ( $F_{0l}^{-1/2} = C_{dl}$ ) y  $F_{0i}$  es el factor de fricción de la ventana interior ( $F_{0i}^{-1/2} = C_{di}$ ).

Análogamente y para cada uno de los casos analizados para determinar el valor

del coeficiente de descarga global de las ventanas del invernadero (ecuación 6.3) se utilizarán las ecuaciones 6.4 y 6.5 para cada caso considerado en función de si se presentan ventanas rectangulares continuas con o sin mallas, o ventanas intercambiables con malla anti-pulgón (En las figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7 del capítulo anterior se presentan cada una de las ecuaciones necesarias para los diferentes casos).

Si observamos los parámetros de la ecuación 6.2, las medidas experimentales realizadas en campo permiten determinar el valor del flujo total de aire a través de las aperturas de ventilación en función de la velocidad del viento exterior tal y como se ha realizado para todas las combinaciones tipo de ventana y tipo de malla en los ensayos experimentales del invernadero a escala real presentados en el capítulo 3, obteniéndose en todos los casos muy buenos resultados ( $r^2=0.76$  en el peor de ellos) y observándose una clara diferencia entre la ventilación a barlovento y la ventilación a sotavento. Por tanto la ecuación 6.2 podemos subdividirla en dos ecuaciones que determinan la tasa de ventilación en función de la dirección del viento, estas son:

$$\Phi_{\text{barlov}} = \frac{S}{2} C_d C_{w \text{ barlov}}^{1/2} u \quad 0 < \theta < 180 \quad (6.6)$$

$$\Phi_{\text{sotav}} = \frac{S}{2} C_d C_{w \text{ sotav}}^{1/2} u \quad 180 < \theta < 360 \quad (6.7)$$

donde  $\theta$  es el ángulo que forman el eje longitudinal que pasa por el centro de la apertura de ventilación y el vector velocidad del viento. Es decir  $\theta$  determina si el aire sopla de cara a la ventana (barlovento) o de espaldas a esta (sotavento).

Para cada una de las dos direcciones del viento definidas en las ecuaciones 6.6 y 6.7 y para cada una de las configuraciones estudiadas en función del tipo de ventana (rectangular continua o intercambiable) y si de esta presenta o no malla, el valor de  $S$  (superficie total de ventilación) es conocido,  $C_d$  se puede determinar a partir de las expresiones de cálculo del capítulo 5 y utilizando la ecuación 6.3, finalmente y a partir de las determinaciones experimentales de la tasa de ventilación (capítulo 3 apartado 3.3) se puede obtener para cada configuración el valor de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ) en función de la velocidad media del viento en el plano de referencia ( $u$ ).

De acuerdo con esto, el único parámetro desconocido en las expresiones 6.6 y 6.7 es el denominado “coeficiente de efecto del viento”  $C_w$  que engloba el efecto fluctuante y permanente de la velocidad del viento (ver capítulo 2).

Los valores de este parámetro se conocen únicamente para el caso de un invernadero multitúnel de dos naves (Boulard y Baille, 1995; Boulard y col., 1996) y en condiciones de viento muy particulares (paralelo a la apertura de ventilación).

Así para cada una de las configuraciones evaluadas se determinaran los valores de  $C_w$  a partir de las medidas experimentales ya que el resto de parámetros es conocido. Como los experimentos de Boulard y Baille (1995), Boulard y col. (1996, 1997) no detectan o no contemplan la influencia de la dirección del viento sobre la tasa de ventilación (claramente demostrada en los ensayos experimentales del capítulo 3) es posible que se presenten valores diferentes de  $C_w$  para barlovento y para sotavento (ya que  $C_d$  no depende de la dirección del viento) y por tanto la determinación de  $C_w$  se realizará de forma separada en función de la dirección del viento comprobándose si verdaderamente se presentan diferencias estadísticamente significativas entre los valores de barlovento y los de sotavento.

Una vez obtenidos los diferentes parámetros del modelo presentado en las ecuaciones 6.6 y 6.7 se procedió a su validación a partir de los resultados experimentales. Para ello, se contrastaron los valores de tasa de ventilación del invernadero obtenidos en los ensayos experimentales con gas trazador del capítulo 3 y los obtenidos para las mismas condiciones ambientales (velocidad y dirección del viento) aplicando las expresiones para cada configuración de acuerdo con las ecuaciones 6.6 y 6.7.

Estos contrastes permitirán determinar la bondad de cada uno de los modelos estudiados y su posible utilidad posterior.

## 6.3.-Resultados.

### 6.3.1.-Determinación del coeficiente de efecto de viento.

#### 6.3.1.1.-Ventanas rectangulares continuas.

Las medidas experimentales del coeficiente de descarga y de la tasa de ventilación en el caso de la ventana cenital continua de cremalleras se realizaron para la ventana sin mallas y con malla anti-pulgón o anti-trip (la tasa de ventilación del invernadero con malla de sombreado no se determinó debido a la escasa utilización de este tipo de configuración).

Para el invernadero multitúnel de tres naves en el caso de aperturas cenitales rectangulares continuas sin mallas en las ventanas (coeficiente de forma  $L_0/H_0 = 20$ ) los valores del coeficiente de descarga obtenidos son (tabla 5.2 del capítulo 5):

$$C_{di} = 0.780$$

$$C_{di} = 0.570$$

con lo que si se consideran las dos naves interiores y la lateral, aplicando la ecuación 6.3 el valor del coeficiente global para esta configuración será:

$$C_d = \frac{1}{3} C_{di} + \frac{2}{3} C_{di} = \frac{1}{3} 0.780 + \frac{2}{3} 0.570 = 0.640$$

Los resultados experimentales que permiten determinar la tasa de ventilación a partir de la velocidad del viento en función de la dirección de éste, se presentan en las figuras 3.8 a) y b) del capítulo 3.

A partir de los datos obtenidos y si se considera que la superficie de ventilación total es igual a  $27.36 \text{ m}^2$  (tres naves) podemos determinar los valores de  $C_w$  para barlovento y sotavento utilizando las expresiones 6.6 y 6.7.

Para barlovento y sotavento si se substituye:

$$C_w = \frac{\Phi^2}{\left[ \frac{S}{2} C_d u \right]^2} \quad (6.8)$$

y operando:

$$C_w = \frac{\Phi^2}{76.65 u^2} \quad (6.9)$$

Los resultados del cálculo se reflejan en la tabla 6.1

**Tabla 6.1.- Valores del coeficiente de efecto de viento “C<sub>w</sub>” para un invernadero multitúnel de tres naves con aperturas cenitales rectangulares continuas en función de la velocidad (u, ms<sup>-1</sup>) y la dirección del viento (barlovento-sotavento).**

	Coeficiente de efecto de viento C <sub>w</sub>			
	0<u<2	2<u<4	4<u<6	0<u<6
<b>Barlovento</b>	0.480 <sup>**</sup> ±0.025 n=22	0.327 <sup>**a</sup> ±0.022 n=12	-----	0.430±0.022 n=34
<b>Sotavento</b>	-----	0.070 <sup>**b</sup> ±0.003 n=7	0.096 <sup>**</sup> ±0.004 n=4	0.079±0.003 n=11

Los asteriscos indican diferencias significativas entre los valores de C<sub>w</sub> en función de la intensidad del viento (\*:P<0.05; \*\*:P<0.01). Las letras indican diferencias significativas entre los valores de C<sub>w</sub> de barlovento y sotavento (P<0.01).

Los resultados se presentan por clases de velocidades (en función del valor de la velocidad del viento) ya que si se efectúa un test de separación de medias entre los valores de C<sub>w</sub> en función de la intensidad de la velocidad del viento se presentan diferencias claramente significativas. Es decir en el caso de barlovento los valores obtenidos para C<sub>w</sub> entre 0-2 ms<sup>-1</sup> y entre 2-4 ms<sup>-1</sup> son significativamente diferentes tanto para el nivel de significación del 5% como para el 1%. Análogamente y en el caso de sotavento los valores de C<sub>w</sub> para velocidades del viento entre 2-4 ms<sup>-1</sup> y entre 4-6 ms<sup>-1</sup> son también estadísticamente diferentes para los dos niveles de significación. Este resultado coincide con lo observado por Boulard y Baille (1995 y 1996) para el invernadero multitúnel de dos naves.

Los valores de la tabla muestran también claramente una clasificación en función de la dirección del viento siendo los de sotavento inferiores a los de barlovento. Si se comparan los valores obtenidos para la clase de velocidad entre 2 y 4 ms<sup>-1</sup> mediante un test de separación de medias, se obtiene que estas diferencias se muestran estadísticamente significativas tanto para el nivel del 5% como para el del 1%

Para la ventana con malla anti-pulgón si se procede de forma análoga a la utilizada para la ventana sin malla en primer lugar debe determinarse el coeficiente de descarga global a partir de los datos obtenidos en el capítulo 5 y, de acuerdo con la ecuación 6.3 el valor obtenido es de  $C_d = 0.419$ .

Considerando los resultados obtenidos en el capítulo 3 (figuras 3.9 a) y b)) y operando con las ecuaciones 6.6 y 6.7 se obtiene de nuevo la expresión que va a permitir determinar los valores de  $C_w$ :

$$C_w = \frac{\Phi^2}{32.85 u^2} \quad (6.10)$$

Procesando los datos experimentales (Figura 3.9 a) y b)) se puede determinar el valor de  $C_w$  en el caso de la ventana rectangular continua con malla anti-pulgón tanto para la dirección del viento de barlovento como para la de sotavento obteniéndose en ese caso los resultados de la tabla 6.2.

**Tabla 6.2.- Valores del coeficiente de efecto de viento “ $C_w$ ” para un invernadero multitúnel de tres naves con aperturas cenitales rectangulares continuas y malla anti-pulgón en función de la velocidad ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ) y la dirección del viento (barlovento-sotavento).**

	Coeficiente de efecto de viento $C_w$		
	$0 < u < 2$	$2 < u < 4$	$0 < u < 4$
<b>Barlovento</b>	$0.038_a^{**} \pm 0.003$ n=14	$0.055_a^{**} \pm 0.003$ n=13	$0.047 \pm 0.002$ n=27
<b>Sotavento</b>	$0.012_b^{**} \pm 0.003$ n=5	$0.018_b^{**} \pm 0.003$ n=6	$0.179 \pm 0.003$ n=11

Los asteriscos indican diferencias significativas entre los valores de  $C_w$  en función de la intensidad del viento (\*: $P < 0.05$ ; \*\*: $P < 0.01$ ). Las letras indican diferencias significativas entre los valores de  $C_w$  de barlovento y sotavento ( $P < 0.01$ ).

Nuevamente los resultados de la tabla muestran una clara clasificación en función de la intensidad de la velocidad del viento presentándose tanto para el caso de barlovento como para sotavento. Esta diferencia es además altamente significativa (para el nivel del 1%) en ambos casos, resultado que confirma lo observado para la ventana sin malla.

Destacar también que la diferenciación de valores en función de la dirección del viento vuelve a presentarse observándose al igual que en el caso anterior que los valores de barlovento son claramente superiores a los de sotavento. Esta diferencia de nuevo se demuestra que es significativa estadísticamente pues al analizar los valores obtenidos mediante un test de separación de medias se obtienen diferencias altamente significativas con un valor de la probabilidad inferior al 1%.

La última configuración evaluada en el caso de la ventana cenital de cremalleras es la que incorpora malla anti-trip en las aperturas de ventilación. Si se procede de forma idéntica a los casos anteriores y utilizando los valores obtenidos para el coeficiente de descarga de este tipo de configuración ( $C_{di} = 0.373$  y  $C_{di} = 0.264$  ver tabla 5.6) se determina aplicando la ecuación 6.3 el valor del coeficiente de descarga global  $C_d = 0.300$ . Utilizando este valor y considerando la superficie total de ventilación igual a  $27.36 \text{ m}^2$  se puede obtener la ecuación que nos permita determinar el valor del coeficiente  $C_w$  para este tipo de configuración que será:

$$C_w = \frac{\Phi^2}{16.84 u^2} \quad (6.11)$$

Operando de acuerdo con la ecuación 6.11 y utilizando los datos experimentales (figuras 3.10 a) y b)) se pueden determinar los valores de  $C_w$  tanto para barlovento como para sotavento.

**Tabla 6.3.- Valores del coeficiente de efecto de viento “ $C_w$ ” para un invernadero multitúnel de tres naves con aperturas cenitales rectangulares continuas y malla anti-trip en función de la velocidad ( $u$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ) y la dirección del viento (barlovento-sotavento).**

	Coeficiente de efecto de viento $C_w$			
	$0 < u < 2$	$2 < u < 4$	$4 < u < 6$	$0 < u < 6$
<b>Barlovento</b>	$0.017_a^{**} \pm 0.001$ n=14	$0.023_a^{**} \pm 0.002$ n=11	$0.053^{**} \pm 0.004$ n=5	$0.025 \pm 0.002$ n=30
<b>Sotavento</b>	$0.015_b \pm 0.001$ n=7	$0.015_b \pm 0.001$ n=11	-----	$0.015 \pm 0.001$ n=18

Los asteriscos indican diferencias significativas entre los valores de  $C_w$  en función de la intensidad del viento (\*: $P < 0.05$ ; \*\*: $P < 0.01$ ). Las letras indican diferencias significativas entre los valores de  $C_w$  de barlovento y sotavento ( $P < 0.01$ ).

Los resultados en este caso presentan un comportamiento diferenciado, pues tal y como se puede observar en la tabla en el caso de barlovento y de forma idéntica a las dos configuraciones anteriores se produce una clara diferencia de los valores del coeficiente  $C_w$  en función de la intensidad del viento, mientras que por el contrario para sotavento el resultado de los coeficientes es idéntico para todas las intensidades analizadas. Esta observación se confirma al realizar el test de separación de medias en el que se obtiene que para barlovento los valores del coeficiente  $C_w$  en función de la dirección del viento son diferentes mientras que para sotavento son iguales.

Puede verse también que la diferencia en función de la dirección del viento se presenta nuevamente y que los resultados obtenidos para sotavento y barlovento son significativamente distintos ( $P < 0.01$ ) en las dos clases de velocidad de viento de las que se dispone de datos (0-2 y 2-4  $\text{ms}^{-1}$ ). Además y en concordancia con lo obtenido en los casos anteriores los valores de barlovento son claramente superiores a los de sotavento.

#### 6.3.1.2.-Ventanas intercambiables.

En el caso de la ventana intercambiable solo se estudió una combinación, ya que el coeficiente de descarga para este tipo de ventana únicamente se determinó en el caso de incorporar malla anti-pulgón a la apertura de ventilación. Este hecho lleva implícito la posibilidad de contrastar o validar el modelo únicamente para este caso sin que sea posible la obtención de los mismos modelos para el resto de combinaciones en las que si se ha medido de forma experimental la tasa de ventilación (ventana enrollable con malla de sombreo o anti-trip).

Para la ventana con malla anti-pulgón se procedió con la misma metodología de cálculo utilizada para el caso de la ventana de cremalleras con y sin mallas. Es decir, en primer lugar se determinó el coeficiente de descarga global del invernadero utilizando para ello los resultados del capítulo 5 (tabla 5.7) y la ecuación 6.3. Operando a partir de los datos observados se obtiene el valor del coeficiente de descarga global  $C_d=0.121$ . Si se considera que la superficie de ventilación total del invernadero es de 128.62  $\text{m}^2$  se puede determinar la expresión que permite el cálculo del coeficiente de efecto de viento  $C_w$  a partir de las ecuaciones 6.6 y 6.7:

$$C_w = \frac{\Phi^2}{58.08 u^2} \quad (6.12)$$

Una vez obtenida la expresión se procedió a la utilización de los datos experimentales (figuras 3.12 a) y b)) para la obtención del coeficiente  $C_w$  para la ventana intercambiable con malla anti-pulgón (tabla 6.4).

**Tabla 6.4.- Valores del coeficiente de efecto de viento “ $C_w$ ” para un invernadero multitúnel de tres naves con aperturas cenitales intercambiables y malla anti-pulgón en función de la velocidad ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ) y la dirección del viento (barlovento-sotavento).**

	Coeficiente de efecto de viento $C_w$		
	$0 < u < 2$	$2 < u < 4$	$0 < u < 4$
<b>Barlovento</b>	$0.551_a^{**} \pm 0.171$ n=15	$0.570_a^{**} \pm 0.118$ n=10	$0.532 \pm 0.155$ n=25
<b>Sotavento</b>	$0.085_b^{**} \pm 0.031$ n=7	$0.111_b^{**} \pm 0.053$ n=8	$0.099 \pm 0.046$ n=15

Los asteriscos indican diferencias significativas entre los valores de  $C_w$  en función de la intensidad del viento (\*:P<0.05; \*\*:P<0.01). Las letras indican diferencias significativas entre los valores de  $C_w$  de barlovento y sotavento (P<0.01).

De forma similar al caso de la ventana de cremalleras, la ventana intercambiable presenta valores diferenciados del coeficiente de efecto de viento en función de la intensidad del viento, tanto para barlovento como para sotavento, siendo estas diferencias estadísticamente significativas para los niveles de significación del 5% y del 1%.

Además nuevamente se presentan diferencias en función de la dirección del viento siendo los valores de  $C_w$  para barlovento superiores a los obtenidos para la ventilación a sotavento. Esta clasificación se confirma si realizamos una evaluación estadística de los datos, pues al realizar un test de separación de medias entre los valores de  $C_w$  a barlovento y sotavento, se presentan diferencias significativas tanto para el nivel de significación del 5% como para el del 1%.

### 6.3.2.-Modelos de ventilación.

#### 6.3.2.1.-Ventanas rectangulares continuas.

Una vez obtenidos en el apartado anterior los valores del coeficiente de efecto de viento ( $C_w$ ) se han determinado ya todos los parámetros necesarios para obtener los modelos de ventilación para cada una de las combinaciones evaluadas.

De esta forma, y para la ventana rectangular continua sin mallas utilizando los valores ya determinados del coeficiente de descarga del invernadero considerando la localización de las ventanas ( $C_d=0.64$ ) y los valores obtenidos en el apartado anterior del coeficiente de efecto del viento en función de la intensidad y la dirección del viento (tabla 6.1) se obtienen los diferentes modelos de ventilación para las clases de viento evaluadas y para los dos tipos de ventilación considerados (barlovento-sotavento). Los resultados para cada uno de estos casos se presentan en la tabla 6.5.

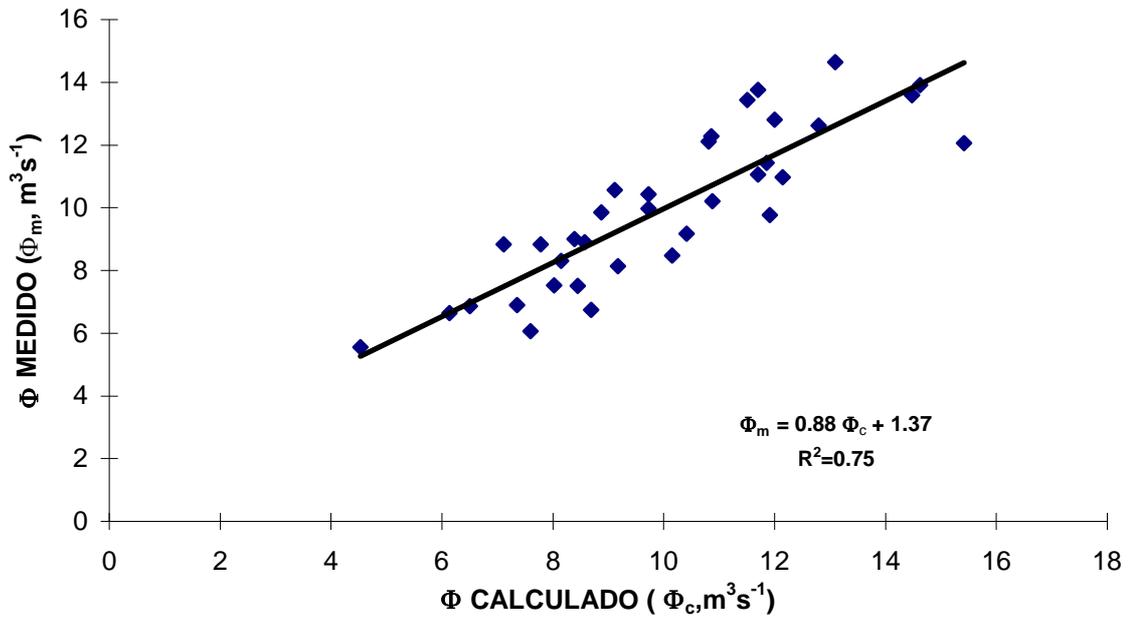
**Tabla 6.5.-Modelos de cálculo de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $m^3s^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas sin malla en función de la dirección (barlovento-sotavento) y de la intensidad del viento ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ).**

$$\Phi = \frac{S}{2} C_d C_w^{1/2} u.$$

	Intensidad del viento		
Tasa de ventilación	$0 < u < 2$	$2 < u < 4$	$4 < u < 6$
Barlovento	6.06 u	5.00 u	-----
Sotavento	-----	2.31u	2.71u

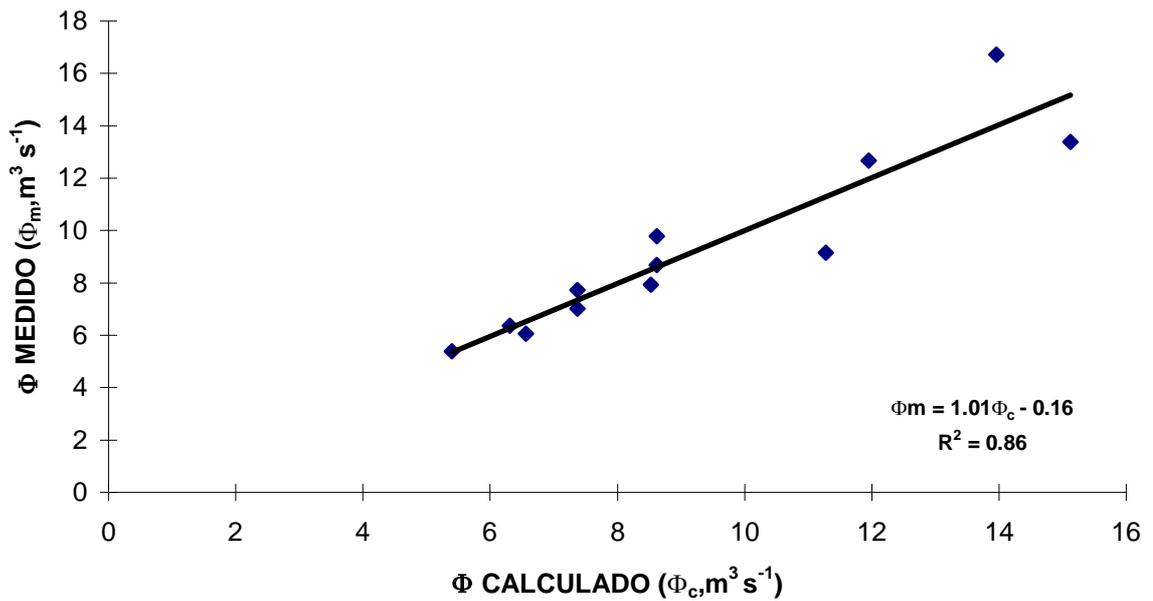
Si se compara los resultados del modelo con los determinados experimentalmente en campo mediante la técnica del gas trazador se obtienen los resultados de la figura 6.1.

## BARLOVENTO



a)

## SOTAVENTO



b)

Figura 6.1 Relación entre los valores de la tasa de ventilación calculados y medidos mediante la técnica del gas trazador para un invernadero multitúnel con aperturas cenitales rectangulares continuas sin mallas a) Barlovento, b) Sotavento.

Los resultados de las figuras muestran que el ajuste obtenido es considerablemente bueno especialmente para el caso de sotavento ( $r^2=0.86$  y una pendiente de 1.01) y para barlovento ( $r^2=0.75$  y pendiente de 0.88) lo que nos indica un buen comportamiento del modelo.

Las otras dos configuraciones evaluadas en el caso de la ventana rectangular continua, es decir para las combinaciones con malla anti-pulgón y anti-trip utilizando los valores de  $C_w$  obtenidos en el apartado anterior y los coeficientes de descarga medidos en el capítulo 5 se obtienen los modelos para las diversas clases de velocidad del viento consideradas y en los dos tipos de ventilación evaluados, es decir: barlovento y sotavento (tablas 6.6 y 6.7).

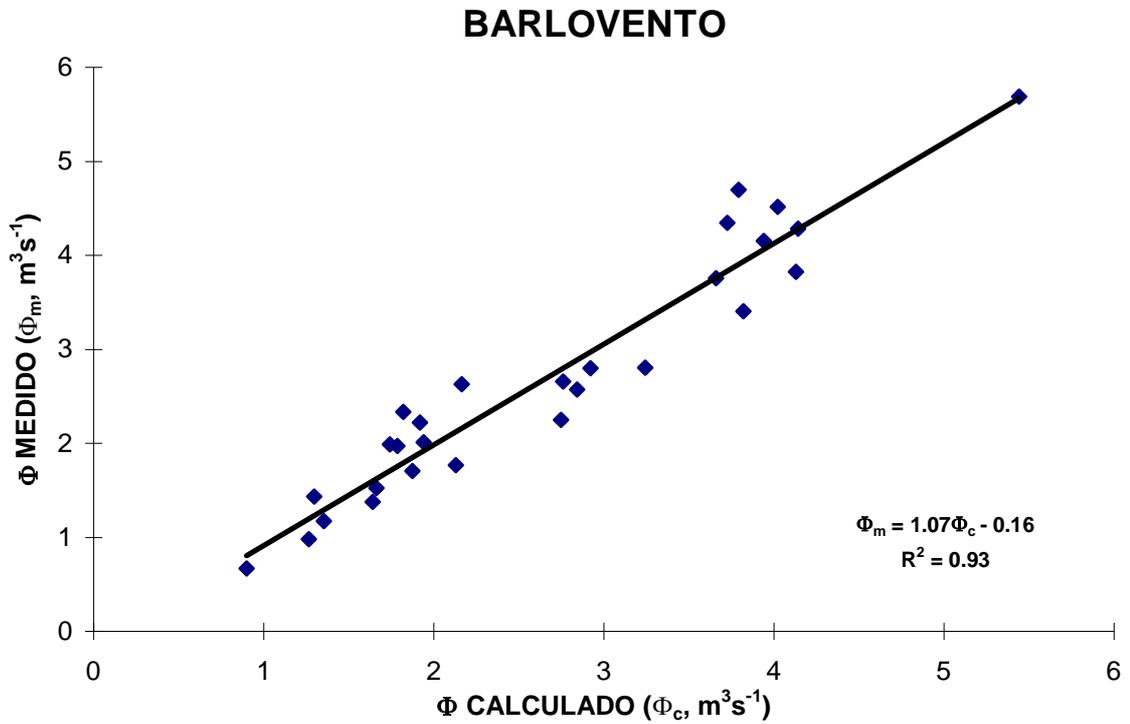
**Tabla 6.6.-Modelos de cálculo de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $m^3s^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas y malla anti-pulgón en función de la dirección (barlovento-sotavento) y de la intensidad del viento ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ).  $\Phi = \frac{S}{2} C_d C_w^{1/2} u$ .**

Tasa de ventilación	Intensidad del viento	
	$0 < u < 2$	$2 < u < 4$
Barlovento	1.118 u	1.346 u
Sotavento	0.651 u	0.777u

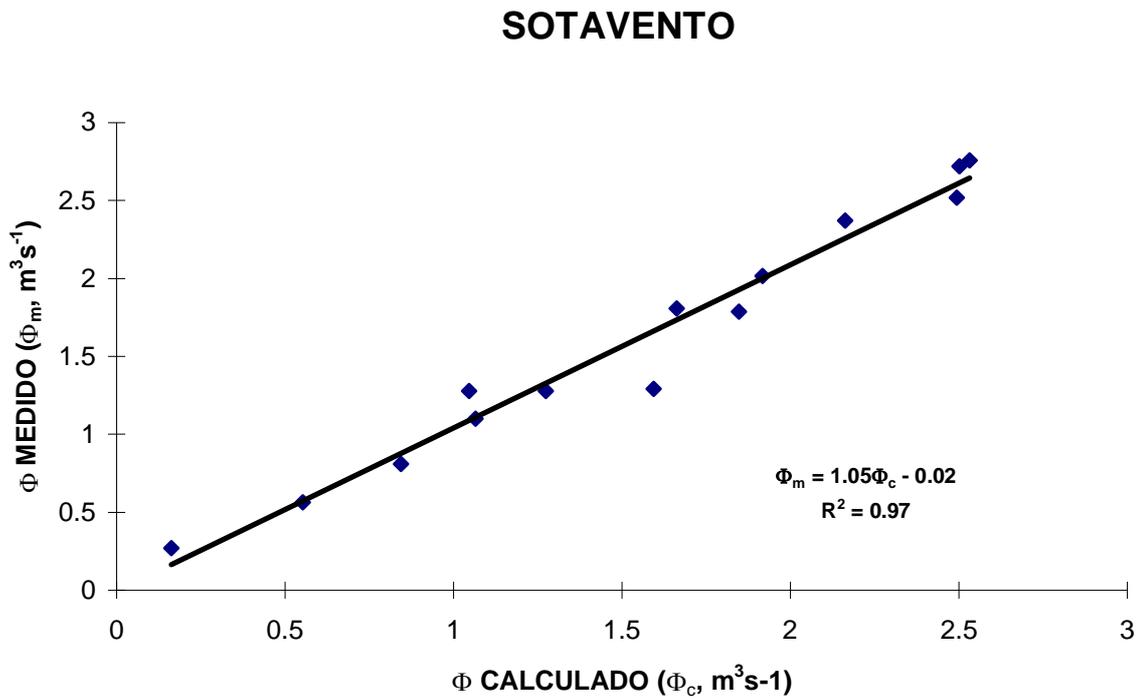
**Tabla 6.7.-Modelos de cálculo de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $m^3s^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas rectangulares continuas y malla anti-trip en función de la dirección (barlovento-sotavento) y de la intensidad del viento ( $u$ ,  $ms^{-1}$ ).  $\Phi = \frac{S}{2} C_d C_w^{1/2} u$ .**

Tasa de ventilación	Intensidad del viento		
	$0 < u < 2$	$2 < u < 4$	$4 < u < 6$
Barlovento	0.629 u	0.538 u	0.942 u
Sotavento	0.509 u	0.509 u	-----

La comparación de los resultados experimentales obtenidos mediante los ensayos con la técnica del gas trazador y los que resultan de la aplicación de los modelos anteriores permiten validar o contrastar la utilidad de estas ecuaciones de cálculo. Aplicando ambas expresiones, para barlovento y para sotavento, a las diferentes determinaciones analizadas mediante la técnica del gas trazador (figuras 3.9 y 3.10 a) y b)) se obtienen los resultados de las figuras 6.2 y 6.3 a) y b).



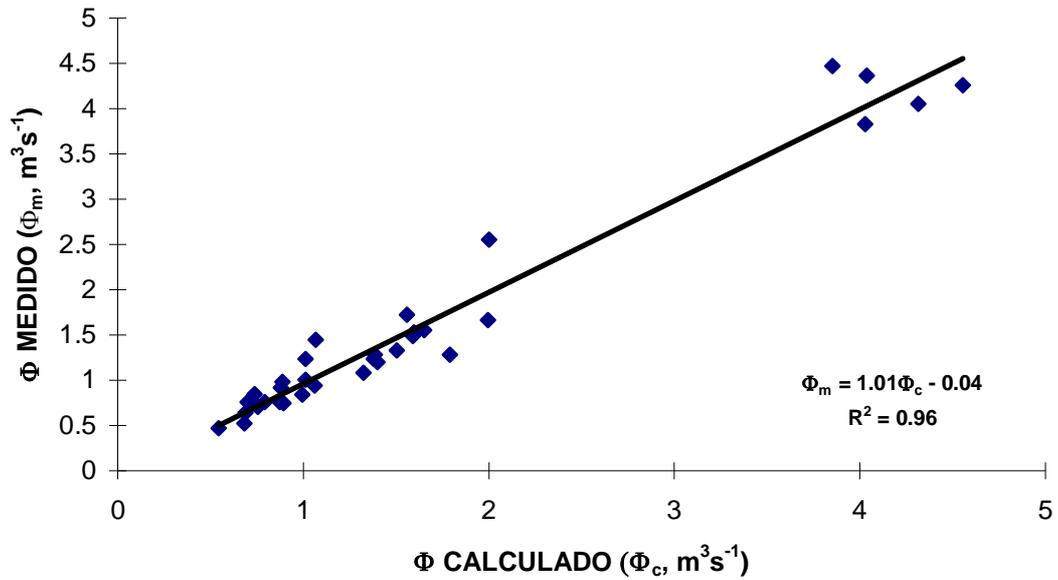
a)



b)

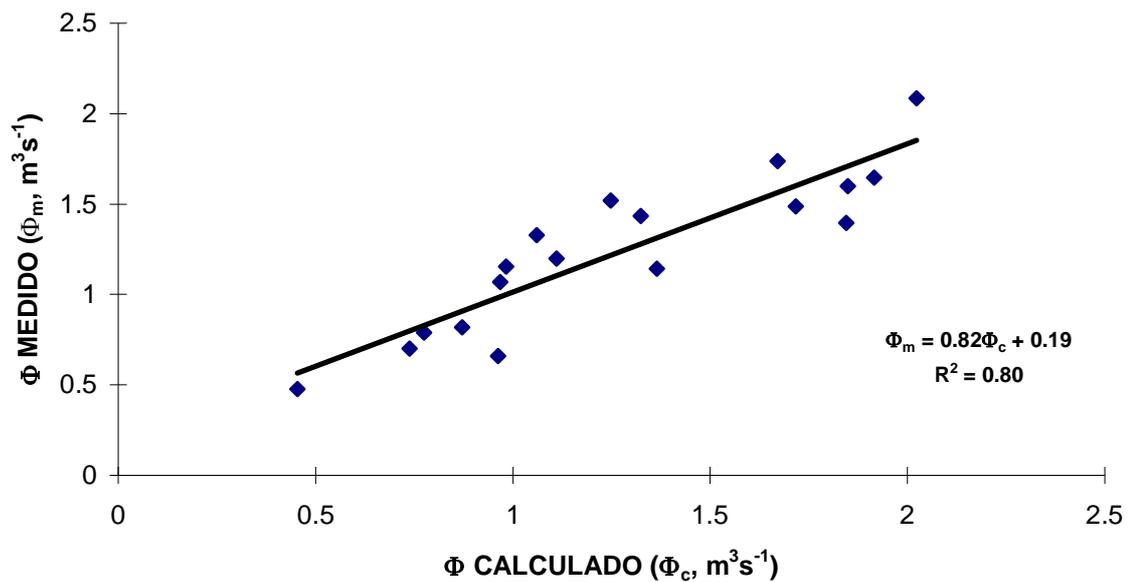
**Figura 6.2** Relación entre los valores de la tasa de ventilación calculados y medidos mediante la técnica del gas trazador para un invernadero multitúnel con aperturas cenitales rectangulares continuas y malla anti-pulgón. a) Barlovento, b) Sotavento.

## BARLOVENTO



a)

## SOTAVENTO



b)

Figura 6.3 Relación entre los valores de la tasa de ventilación calculados y medidos mediante la técnica del gas trazador para un invernadero multitúnel con aperturas cenitales rectangulares continuas y malla anti-trip. a) Barlovento, b) Sotavento.

Para la malla anti-pulgón (figura 6.2) los resultados muestran un ajuste extraordinariamente bueno para las dos direcciones de viento evaluadas (barlovento  $r^2=0.93$ ; sotavento  $r^2=0.97$ ). Además al analizar la pendiente de la ecuación de ajuste vemos que en ambos casos se encuentra próxima a uno (1.07 barlovento, 1.05 sotavento) siendo el punto de corte también muy cercano a cero para ambos casos (-0.16 barlovento, -0.02 sotavento).

La malla anti-trip proporciona resultados muy similares con ecuaciones que presentan una elevada bondad de ajuste ( $r^2=0.96$  y  $0.80$ ) y valores de las pendientes cercanos a la unidad (mucho más en el caso de barlovento: 1.10, que en el de sotavento: 0.82) y puntos de corte próximos a cero (de nuevo mucho mejor para barlovento: 0.04, que para sotavento: 0.19).

#### 6.3.2.2.-Ventanas intercambiables.

Análogamente al caso de la ventana rectangular continua, la determinación, o el cálculo, de los valores del coeficiente de efecto de viento  $C_w$  del apartado anterior posibilita la obtención del modelo de ventilación natural para este tipo de configuración.

Si se procede de acuerdo con la metodología aplicada para la ventana rectangular continua, en primer lugar debería utilizarse el valor del coeficiente de descarga en función de la localización de las ventanas ( $C_d=0.118$ ) y los valores del coeficiente de efecto de viento ya determinados (tabla 6.4). Operando con estos valores se obtienen los modelos de ventilación para ambas direcciones de viento (barlovento y sotavento) en función de la velocidad del viento exterior (tabla 6.8).

**Tabla 6.8.-Modelos de cálculo de la tasa de ventilación ( $\Phi$ ,  $m^3s^{-1}$ ) de un invernadero multitúnel con ventanas cenitales intercambiables y malla anti-pulgón en función de la dirección (barlovento-sotavento) y de la intensidad del viento ( $u$ ,**

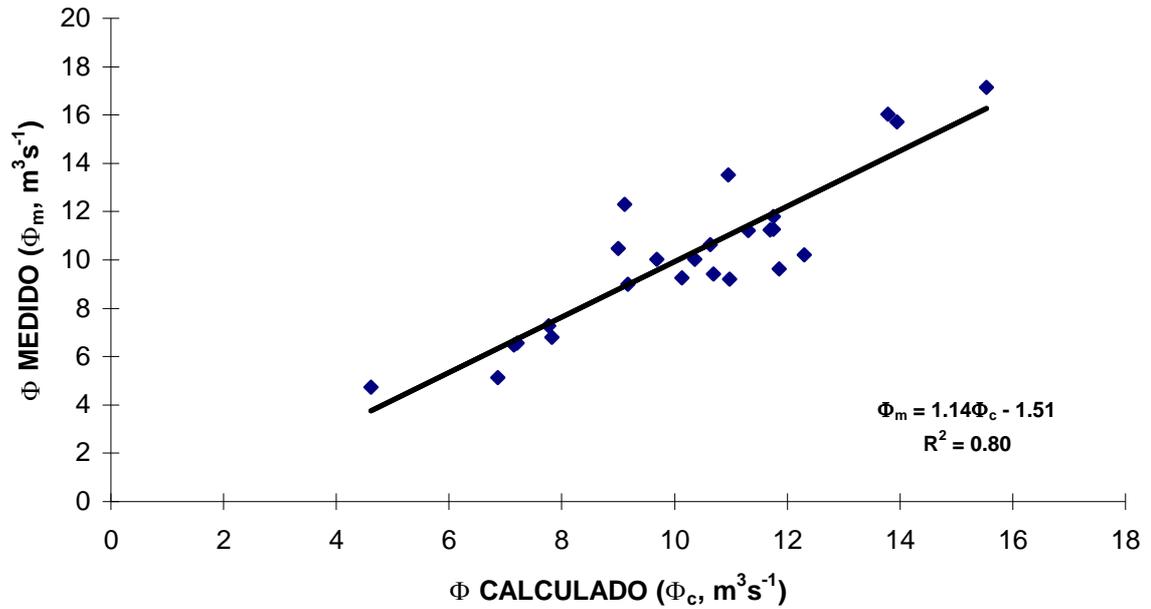
$$ms^{-1}). \Phi = \frac{S}{2} C_d C_w^{1/2} u.$$

Tasa de ventilación	Intensidad del viento	
	$0 < u < 2$	$2 < u < 4$
<b>Barlovento</b>	5.628 u	5.490 u
<b>Sotavento</b>	2.221 u	2.539u

Comparando los resultados experimentales obtenidos mediante la técnica del gas trazador con los determinados o los calculados para las mismas condiciones experimentales a partir de los modelos de la tabla 6.8 se puede evaluar la validez o la bondad de estos modelos. Si se efectúa la comparación obtenemos los resultados de la figura 6.4 para barlovento y sotavento.

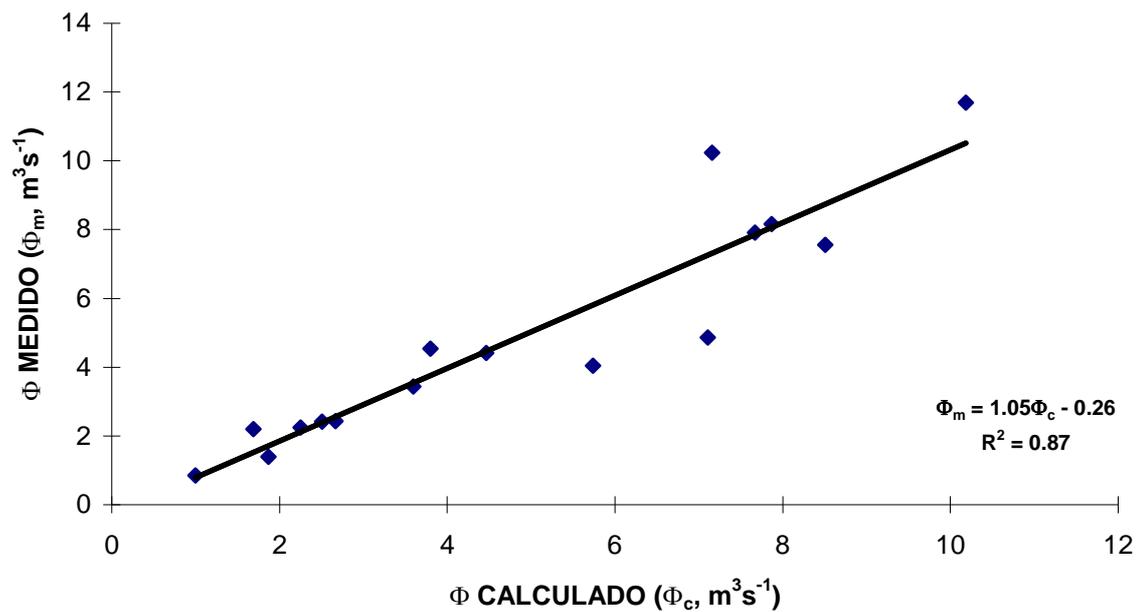
La observación de los datos de la figura nos indica que de forma análoga a lo sucedido en el caso de la ventana rectangular continua, para la malla intercambiable el modelo presenta también un buen comportamiento presentándose valores del coeficiente de determinación  $r^2=0.80$  y  $0.86$  para barlovento y sotavento respectivamente. Siendo los resultados claramente mejores para sotavento (pendiente de  $1.05$  y punto de corte  $-0.26$  muy próximo a cero) que para barlovento (pendiente  $1.14$  y punto de corte  $-1.15$ ).

## BARLOVENTO



a)

## SOTAVENTO



b)

Figura 6.4 Relación entre los valores de la tasa de ventilación calculados y medidos mediante la técnica del gas trazador para un invernadero multitúnel con aperturas cenitales intercambiables y malla anti-pulgón. a) Barlovento, b) Sotavento.

## 6.4.- Discusión.

Los valores determinados del coeficiente de efecto de viento para los dos tipos de ventana analizados (rectangular continua e intercambiable) han permitido demostrar la clara influencia de la dirección del viento sobre este parámetro, al obtenerse en todos los casos valores diferentes para barlovento y sotavento. Este resultado, no se ha contemplado, hasta el momento, en los estudios realizados en invernaderos multitúnel (Boulard y col., 1996) o túnel (Kittas y col., 1996) dotados de ventanas continuas sin mallas.

La importancia de este resultado se considera al plantearse la obtención de los modelos de ventilación, ya que debe tenerse en cuenta esta diferencia en función de la dirección del viento y, en consecuencia, deben plantearse modelos diferentes para barlovento y sotavento.

Otro resultado importante es la clara dependencia del coeficiente de efecto de viento respecto a la intensidad del viento exterior. Para todas las combinaciones evaluadas de tipo de ventana y malla (salvo para el caso de la ventana rectangular continua más malla anti-trip y en la dirección de sotavento) el valor de  $C_w$  se ha mostrado claramente dependiente de la intensidad del viento exterior, aumentando y disminuyendo su valor en función de esta.

Estos dos resultados respecto a  $C_w$ , dependencia de la dirección e intensidad del viento exterior, han permitido obtener con mucho mayor detenimiento los diferentes modelos de ventilación para cada uno de los casos analizados. De esta forma, se han obtenido los modelos de ventilación en función de la velocidad y la dirección del viento para cada una de las combinaciones evaluadas presentándose en todos los casos un ajuste muy bueno (coeficiente de determinación  $r^2=0.76$  en el peor de ellos y  $r^2=0.97$  en el mejor) de forma que a partir de medidas sencillas de velocidad y dirección del viento puede cuantificarse con suficiente precisión la tasa de ventilación de un invernadero multitúnel con ventanas cenitales continuas (rectangulares o intercambiables) equipado con mallas (anti-pulgón o anti-trip) o sin ellas.

Este resultado, es de gran importancia ya que permite cuantificar la tasa de ventilación y realizar evaluaciones sobre: el impacto de la incorporación de mallas, las necesidades de ventilación y la forma de conseguirlas, la ventilación en condiciones desfavorables, etc. Al mismo tiempo, pueden incorporarse estos modelos dentro de un

programa global de control climático de invernaderos multitúnel con el objetivo de mejorar las condiciones de explotación (automatización de riego, automatización de sistemas de apertura de ventanas, etc.).

No obstante, y a pesar de los buenos resultados se presentan ciertos interrogantes sobre la generalización y aplicación de estos modelos.

En primer lugar hay que destacar el comportamiento del coeficiente de efecto de viento  $C_w$ . Las tablas 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 muestran una clara dependencia de este parámetro respecto a la intensidad del viento exterior. Boulard y col. (1996) en un invernadero multitúnel, así como Kittas y col. (1996) en un invernadero túnel y, mas recientemente, Boulard y col. (1997) al analizar la ventilación de seis tipos diferentes de invernaderos, señalan también este hecho, al mismo tiempo que indican que no existe ningún tipo de justificación teórica que explique este comportamiento. Además, en todos los trabajos anteriormente mencionados se observa un claro descenso del coeficiente de efecto de viento a medida que aumenta la intensidad del viento exterior, resultado que no se repite en los ensayos realizados (apartado 6.3) en los que el coeficiente de efecto de viento presenta un comportamiento errático respecto a la intensidad de viento, puesto que unas veces aumenta, otras disminuye y en una ocasión permanece constante.

Todos estos resultados, en apariencia contradictorios con los de Boulard y col. (1997), no pueden compararse directamente ya que en los trabajos de Boulard y col. (1996) únicamente se evalúa un tipo de ventana sin malla y para unas condiciones de viento muy concretas (paralelo a las ventanas). La información presentada en el presente capítulo es pues, mucho mas completa al obtenerse resultados para dos tipos de ventanas (rectangular continua e intercambiable) con o sin malla y para diferentes direcciones del viento exterior (barlovento-sotavento).

De todo lo anterior se deduce que es necesario comprobar la validez de los valores determinados de  $C_w$  para invernaderos comerciales de grandes dimensiones. En este caso, el coste del proceso se dispara extraordinariamente al necesitar una cantidad de gas y un dispositivo experimental mucho mayor que garantice un proceso de medida correcto. Todo esto, limita considerablemente la posibilidad de contrastar los resultados obtenidos con medidas a escala real de forma que, hasta el momento, no existen resultados para invernaderos de gran tamaño.

En este sentido, los resultados obtenidos en esta tesis van a permitir afrontar este proceso con mayor facilidad al fijar varias cuestiones importantes. La primera de ellas es la necesidad de determinar por separado el modelo de ventilación en función de la dirección del viento (barlovento-sotavento). La segunda es el hecho de haber obtenido expresiones de cálculo del coeficiente de descarga que van a permitir un estudio con mucha mayor precisión y centrado únicamente en los coeficientes de presión, a diferencia de los realizados hasta el momento en los que únicamente se podía determinar de forma conjunta el producto del coeficiente de descarga por la raíz cuadrada del coeficiente de efecto de viento  $C_d C_w^{1/2}$  (Boulard y col., 1996; Kittas y col., 1997).

De acuerdo con todo lo anterior, los modelos presentados son un primer paso en el desarrollo de modelos de ventilación aplicables a invernaderos de características similares. Su aplicación permite obtener una primera idea de los valores de renovación de aire y de la influencia o el impacto que sobre ésta representa la incorporación de mallas anti-insectos, además presentan información mucho más detallada que la existente hasta el momento al contemplar la influencia de la dirección del viento sobre la tasa de ventilación y la diferencia de comportamiento de las ventanas en función de su situación en el invernadero. Todos estos resultados posibilitan un mejor punto de partida para el estudio y caracterización de los coeficiente de fluctuación de presión, próximo paso indispensable en el intento de obtener modelos mucho mas generales que describan y cuantifiquen la ventilación natural de los invernaderos multitúnel (Boulard y col., 1997).

## **6.5.-Conclusiones.**

El cálculo del coeficiente de descarga y los resultados experimentales mediante la técnica del gas trazador han permitido obtener los valores del coeficiente de efecto de viento tanto para la ventana rectangular continua con y sin mallas, como para la intercambiable con malla anti-pulgón.

También se han obtenido para las mismas configuraciones, modelos que permiten cuantificar con gran precisión la tasa de ventilación de un invernadero multitúnel con ambos sistemas de ventilación.

Para explicar en su totalidad los mecanismos de ventilación, es conveniente

profundizar en el estudio del coeficiente de efecto de viento separando sus componentes (permanente y fluctuante) y caracterizando ambas de forma separada.

En el proceso de modelización de la ventilación de invernaderos multitúnel queda pendiente para futuras investigaciones verificar la validez de estos resultados en invernaderos de mayores dimensiones, cosa que el dispositivo experimental no ha permitido realizar.

## **7.-CONCLUSIONES GENERALES.**

1) La técnica del gas trazador ha permitido determinar la tasa de ventilación en función de la velocidad y la dirección del viento exterior, confirmando que en el caso de invernaderos multitúnel con aperturas de ventilación cenitales continuas (rectangulares o intercambiables) el efecto sobre la ventilación debido a la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior es despreciable a partir de velocidades del viento exterior superiores a  $1 \text{ m s}^{-1}$ .

2) Se ha demostrado la clara influencia de la dirección del viento sobre la tasa de ventilación del invernadero. La ventilación a barlovento, en todos los casos, es superior a la de sotavento (entre un 39-51%). La conclusión obvia que se extrae de este dato es la necesidad de orientar las ventanas en la dirección de los vientos dominantes de la zona.

3) Las medidas experimentales han permitido cuantificar el descenso de la tasa de ventilación que se produce al incorporar mallas (anti-insecto o de sombreado) en las aperturas de ventilación del invernadero. Para las ventanas rectangulares continuas la tasa de ventilación disminuye como mínimo un 50% al incorporar mallas anti-insectos

4) El sistema de ventanas intercambiables se ha mostrado mucho más eficiente que el de ventanas rectangulares continuas. La ventana intercambiable compensa el descenso de ventilación originado por la incorporación de mallas con el aumento de la superficie de ventana de forma que, finalmente, el flujo de aire y en consecuencia la tasa de ventilación es mayor.

5) El uso de mallas anti-insectos (anti-pulgón y anti-trip) para evitar la entrada de plagas al invernadero no es aconsejable en el caso de las ventanas rectangulares continuas ya que no se alcanzan los valores de ventilación natural necesarios. Con la ventana intercambiable es posible el uso de malla anti-pulgón, pero se desaconseja el de malla anti-trip pues el invernadero no consigue el valor de ventilación recomendado.

**6)** El balance de energía permite determinar la ventilación natural del invernadero multitúnel para velocidades del viento menores de  $2 \text{ ms}^{-1}$  y tasas de ventilación inferiores a  $0.20 \text{ Renov/h m}_{\text{suelo}}^2$ . Si la velocidad del viento es mayor y, en consecuencia, también la tasa de ventilación, el error cometido desaconseja la utilización de este método. El método es, además, muy sensible al gradiente de temperatura existente entre el aire interior-exterior y a pequeños errores en los sensores de medida. Estos resultados desaconsejan su uso en invernaderos multitúnel comerciales aunque queda por verificar su posible aplicación a invernaderos con bajos valores de ventilación natural (p.e. Parral de Almería).

**7)** Las medidas en modelos a escala se han mostrado como un método eficaz para determinar el coeficiente de descarga de las ventanas de invernaderos multitúnel con y sin mallas. La localización de las ventanas en el invernadero es de fundamental importancia pues las situadas en una nave lateral presentan valores claramente superiores a los de las ventanas de las naves interiores. Esta diferencia debe considerarse al diseñar y/o modelizar la ventilación de los invernaderos.

**8)** La incorporación de mallas a las ventanas modifica considerablemente el valor del coeficiente de descarga provocando un descenso que se incrementa a medida que disminuye el tamaño de la cuadrícula de la malla (descensos respecto a la ventana sin malla de hasta un 18% para la malla de sombreado, 35% para la anti-pulgón y 53% para la anti-trip).

**9)** A partir de los valores experimentales se han obtenido, para cada configuración de malla y ventana, expresiones que permiten conocer el coeficiente de descarga en función únicamente de las características geométricas (longitud y altura) de la apertura.

**10)** Los valores obtenidos del coeficiente de efecto de viento ( $C_w$ ) han mostrado la existencia de claras diferencias entre barlovento y sotavento para todas las combinaciones tipo de ventana y malla. En todos los casos analizados el valor de  $C_w$  en barlovento ha resultado claramente superior al determinado para sotavento. Se ha comprobado también la dependencia del coeficiente  $C_w$  frente a la velocidad del viento.

**11)** Se han obtenido los modelos simplificados que permiten cuantificar la tasa de ventilación del invernadero multitúnel con aperturas cenitales (rectangulares o intercambiables) conociendo únicamente el valor de la velocidad del viento exterior y su dirección (barlovento-sotavento). El contraste de las medidas experimentales con las obtenidas mediante los modelos propuestos ha presentado en todos los casos un buen ajuste (coeficiente de determinación  $r^2=0.76$  en el peor de ellos) resultado que demuestra la viabilidad de los modelos y la posibilidad de usarlos para cuantificar la tasa de ventilación de este tipo de invernaderos.

**12)** Para la generalización de estos modelos simplificados a otros tipos de estructuras de invernadero son necesarios nuevos esfuerzos de investigación que permitan conocer con mayor detalle las componentes del coeficiente de efecto del viento  $C_w$  (especialmente la turbulenta que es la principal responsable del intercambio de aire) y obtener modelos que proporcionen información más detallada sobre los mecanismos de ventilación en casos diferentes a los estudiados.

## **8.-BIBLIOGRAFIA**

**ASAE 1991** Engineering Practice (EP 406-1) Standarts. American Society of Agricultural Engineers. Michigan, EE.UU.

**ASHRAE 1993** Infiltration and ventilation. ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating Refrigerating and Air conditioning Engineers. Atlanta GA, EE.UU.

**ASTM 1983** Test method for determining air leakage rate by tracer dilution. Standard E741. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, EE.UU.

**Bailey B J; Cotton R F 1980** Glasshouse thermal screen: influence of single and double screens on heat loss and crop environment. NJAE Departament Nota DN/G/821.

**Bailey B J 1995** Greenhouse climate control-new challenges. Acta Horticulturae, **399**: 13-24.

**Baille M; Laury J P; Baille A 1983** Influence du matériau de couverture sur les échanges énergétiques d' una serre. Agronomie, **3(3)**: 197-206.

**Baille A 1994** Tecnología de invernaderos. Un análisis de la situación actual en Francia. Hortofruticultura, **3**: 37-42.

**Basoccu L 1983** Indirizzi agronomici per il risparmio energetico in ortofloricoltura protetta. Colture Protette. Diciembre, 1983.

**Baturin V V 1976** Fundamentos de ventilación industrial. Ed. Labor S.A. Barcelona.

**Blanc D 1986** Concluding remarks on protected cultivation of solanacea in mild winter climates. Acta Horticulturae, **191**: 403-404.

**Bot G P A 1983** Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Ph.D. Dissertation, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, pp. 240.

**Bot G P A, Van Holsteijn G P A 1990** Invloed op ventilatie groot. WeekbladGroenten en Fruit, August 32-33.

**Bot G P A 1993** Physical Modelling of Greenhouse Climate. The computerized Greenhouse. Academic Press, San Diego, California, USA.

**Bot G P A; van de Braak 1995** Greenhouse Climate Control: Physics of Greenhouse Climate. Wageningen Pers. The Netherlands.

**Boulard T 1993** Etude expérimentale et modélisation de l' aération naturelle des serres. (experimental study and modelling of greenhouse natural ventilation). Récapitulation des résultats des études conduites de 1988 B 1992. Note Interne I.N.R.A. 93-1; Station de Bioclimatologie de Montfavet 84140 France.

**Boulard T, Baille A 1994** A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. Agricultural and Forest Meteorology, **79**: 61-77.

**Boulard T, Baille A 1995** Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. Journal of Agricultural Engineering Research, **65**: 145-157.

**Boulard T; Draoui B 1995** Natural ventilation of a greenhouse with Continuous roof vents: measurements and data analysis. Journal of Agricultural Engineering Research, **61**: 27-36.

**Boulard T; Meneses J F; Mermier M; Papadakis G 1996** The mechanism involved in the natural ventilation of greenhouses. Agricultural and Forest Meteorology, **79**: 61-77.

**Boulard T; Feuilloley P; Kittas C 1997** Natural Ventilation Performance of Six Greenhouse and Tunnel Types. Journal of Agricultural Engineering Research, **67**: 249-266.

**Briassoulis D; Waaijenberg D; Gratraud B; von Esler B 1997** Mechanical Properties of Covering Materials for Greenhouses: Part1, General Overview. Journal of Agricultural Engineering Research, **67**: 81-96.

**Bruce J M 1978** Natural Convection through openings and its application to cattle building ventilation. Journal of Agricultural Engineering Research, **23**: 151-167.

**Businger J A 1954** De invloed van raamstanden op de ventilatie van kassen. (The influence of windows openings on the ventilation of greenhouses.) Meded Tuinbouw (Neth.), 17: 897.

**Castilla N 1991<sup>a</sup>** El cultivo forzado en España. La Horticultura Española en la C.E. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas. Ediciones de Horticultura S.L. (Reus).

**Castilla N 1991<sup>b</sup>** Les cultures abritees en Espagne. Plasticulture, **92**: 4-10.

**Castilla N, Tognoni F, Olympos C 1992** Vegetable production under simple structures in southern Europe. Food and Fertilizer Technology Centre. Bull. n°348. Taipei. Rep. of China. 25pp.

**Castilla N 1994** Greenhouses in the Mediterranean area: Technological level and strategic management. Acta Horticulturae, **361**: 44-56.

**Comite International des Plastiques en Agriculture 1995** (French Committee for Plastics in Agriculture) 65 Rue de Prony, Paris. Information Sheet, June.

**de Jong T 1990** Natural ventilation of large multispan greenhouses. Ph.D. Dissertation, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, pp. 116

**de Jong T; Bot G P A 1992<sup>a</sup>** 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; Bot G P A 1992<sup>b</sup>** Flow characteristics of one-side mounted windows. *Energy and Buildings*, **19**: 105-112.

**Dick J B 1950** The fundamentals of natural ventilation of houses. *Journal Institute of Heat and Ventilation Engineers*. **18**: 123-134.

**Enoch H Z 1986** Climate and Protected cultivation. *Acta Horticulturae*, **176**: 11-20.

**Fereres E 1997** Los desafíos de la agricultura sostenible. *Medi Ambient. Tecnologia i Cultura* núm 18. Departament de Medi Ambient.

**Fernández J E; Bailey B J 1992** Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology*, **58**: 229-245

**Foster M P; Down M J 1987** Ventilation of livestock buildings by natural convection. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **37**: 1-13.

**Goedhart M; Nederhoff E M; Udink ten Cate A J; Bot G P A 1984** Methods and instruments for ventilation rate measurements. . *Acta Horticulturae*, **148**: 393-400.

**Gomez K A; Gomez A A 1984** Statistical procedures for agricultural research. Wiley Interscience Publication, New York. Second edition.

**González M 1995** Estudio y modelización de intercambios gaseosos (H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>) en un cultivo de rosas bajo invernadero. Tesis Doctoral. Departamento de Producción Vegetal. ETS Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Valencia.

**Hand D W 1984** Crop responses to winter and summer CO<sub>2</sub> enrichment. *Acta Horticulturae*, **162**: 45-64.

**Holder R, Cockshull K E 1990** Effects of humidity on the growth and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, **65(1)**: 31-39.

**International Energy Agency (IEA) 1992** Energy conservation in buildings and community systems programme, Annex 20: Air flow patterns within buildings. Airflow through large openings on buildings. Technical report edited by J. Van der Maas.

**Jaffrin A; Makhlonf S 1990** Mechanism of light transmission through wet polymer films. *Acta Horticulturae*, **281**: 11-24.

**Jolliet O 1991** Horticorn: An improved static model for predicting the energy consumption of greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, **55**: 265-294.

**Kittas C; Boulard T; Mermier M; Papadakis G 1995** Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **65**: 37-49.

**Kittas C; Draoui B; Boulard T 1996** Quantification du taux d'aération d'une serre à ouvrant continu en toiture. *Agricultural and Forest Meteorology*, **77**: 95-111.

**Kittas C; Boulard T; Papadakis G 1997** Natural Ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: Sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **40(2)**: 415-425.

**Kleinbaum D G 1988** Applied regression analysis and other multivariable methods. PWS Publishers, Boston, EE. UU.

**van't Klooster C E; Heitlager B P 1994** Determination of Minimum Ventilation Rate in Pig Houses with Natural Ventilation based on Carbon Dioxide Balance. . *Journal of Agricultural Engineering Research*, **57**: 279-287.

**Kosmos S R; Riskowski G L; Christianson L L 1993** Forced and Static Pressure Resulting From Airflow Through Screens. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **36(5)**: 1467-1472.

**Lane-Serff G F 1989** Heat flow and air movement in buildings. Ph.D. thesis. University of Cambridge.

**Liu H 1991** Wind Engineering: A Handbook for Structural Engineers. Englewood Cliffs, Nj: Prentice Hall.

**López J L 1994** Perspectiva global sobre la agricultura en invernadero. Tecnología de Invernaderos. Curso Superior de Especialización. Ed. Dirección General de Investigación Agraria de la Junta de Andalucía y Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería.

**Lorenzo P; Maroto C; Castilla N 1990** CO<sub>2</sub> in plastic greenhouse in Almería (Spain). Acta Horticulturae, **268**: 165-169.

**Lorenzo P 1994** Intercepción de luz, bioproductividad e intercambio gaseoso durante la ontogenia de un cultivo invernadero de *Cucumis sativus* en Almería. Tesis Doctoral. Departamento de Biología Vegetal. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona.

**Malinowski H K 1971** Wind effect on air movement inside buildings. Tokyo Conference of Wind Loads, Tokyo, Japan.

**Massons J; Ruiz X; Diaz F 1989** Image processing of the near wakes stationary and rotating cylinders. Journal of Fluid Mechanics. **204**: 167-184.

**Matallana A; Montero J I 1995** Invernaderos: Diseño, Construcción y Ambientación. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.

**Meijaard D 1995** Greenhouse Climate Control: The greenhouse industry in The Netherlands. Wageningen Pers. The Netherlands.

**Miguel A F; van de Braak N J; Bot G P A 1997** Analysis of the Airflow Characteristics of Greenhouse Screening Materials. Journal of Agricultural Engineering Research, **67**: 105-112.

**Mistriotis A; Bot GPA; Picuno P; Scarascia-Mugnozza G 1997** Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, **85**: 217-228.

**Monteiro A, Lanca C, Rosa A, Jordao A, Portas C M 1989** Evolution of and issues associated with economically useful plastic greenhouses for production in the portuguese mild winter. *Hortscience*, **23(4)**: 665-668.

**Monteiro A 1992** Energy versus vegetable quality and cost of production in Southern European greenhouses. European Seminar "Business opportunities for energy technology in the field of greenhouse horticulture in Southern Europe" E.E.C.-D.G., Bruxelles. (in press).

**Montero J I; Montero J 1992** Greenhouse with roll-up roof. European Patent number 0 524 126

**Montero J I; Anton A 1993** Tecnología del invernadero. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Buenos Aires.

**Montero J I; Muñoz P; Antón A 1996** Discharge coefficients of greenhouse windows with insect-proof screens. *Acta Horticulturae*, **443**: 71-77.

**Montero J I, 1997** Els hivernacles del Maresme: Una reflexió. *Catalunya Rural i Agrària* **39**: 36-39.

**Nederhoff E M, Vooren A; Udink ten Cate A 1983** A method to determine ventilation in greenhouses. *Acta Horticulturae*, **148**: 245-358.

**Oca J 1996** Estudi de la ventilació natural per efecte tèrmic en hivernacles, mitjançant tècniques de visualització de fluids en models a escala.. Tesi Doctoral. Escola Tècnica Superior de Enginyeria Agrària. Universitat de Lleida.

**Papadakis G, Mermier M, Meneses J F, Boulard T 1996** Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **63**: 219-228.

**Peña D 1992** Estadística Modelos y Métodos. Alianza Universidad Textos. Alianza Editorial. Madrid.

**SAS Institute 1989** SAS/STAS. User's Guide for Personal Computer. Version 6, 4 edición. Cary, N.Y. 846 pp.

**Sase S, Christianson L L 1990** Screening greenhouses- Some engineering considerations. American Society of Agricultural Engineers. Northeast Agricultural/Biological Engineering Conference, St. Joseph, MI, USA

**Seber G F A 1977** Linear regression analysis. John Wiley and Sons, New York, EE.UU.

**Stanghellini C; van Meurs W .Th M 1992** Environmental control of greenhouse crop transpiration. . *Journal of Agricultural Engineering Research*, **51**: 297-311.

**Timmons M B 1984** Use of physical models to predict the fluid motion in slot ventilated livestock structures. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **27(3)**: 502-506.

**Timmons M B, Baughman G R 1981** Similitude analysis of ventilation by the stack effect from an open ridge livestock structure. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **24(4)**: 1030-1033.

**Tognoni F G; Serra G 1989** The greenhouse in horticulture: The contribution of biological research. *Acta Horticulturae*, **245**: 46-52.

**Warren P R 1977** Ventilation through openings in one wall only. *Heat Transfer in Buildings, Proceedings of ICHMT seminar*. Hemisphere. New York, EE.UU.

**Wittle R M; Lawrence W J C 1960** The climatology of glasshouses. II Ventilation. .  
Journal of Agricultural Engineering Research, 5: 36-41.

**Wittwer S H 1981** Advances in protected environments for plants growth. Advances in  
food producingmsystems for arid and semi-arid lands,. Academic, New York.

**Wittwer S H, Castilla N 1995** Protected cultivation of horticultural crops worldwide.  
HortTech, 5(1): 6-23.

**Zhang J S, Janni K A, Jacobson L D 1989** Modelling natural ventilation induced by  
combined thermal buoyancy and wind. Transactions of the American Society of  
Agricultural Engineers, 32(6): 2165-2174.