

SIMULACION Y ENSAYO DE INVERNADEROS EN ZONA TEMPLADA

R. Gaspar, H. Levit, M. A. Lara y R. D. Piacentini

Grupo de Energía Solar, Instituto de Física Rosario (CONICET-UNR)
Pellegrini 250, 2000 Rosario

Resumen

En una primera etapa en la investigación sobre invernaderos, el Grupo de Energía Solar del IPFR se propuso:

1. Desarrollar un modelo matemático para simular el comportamiento de invernaderos.
2. Validar mediante ensayos en un invernadero de la zona el modelo utilizado.

Para el primer objetivo se seleccionó el modelo de Kindelan (1980), modificándolo a fin de mejorarlo, elaborando luego los programas de computación correspondientes.

Para el segundo objetivo, luego de un relevamiento, se seleccionó un invernadero característico de la zona, se realizó la instrumentación correspondiente y se ensayó durante una semana. Posteriormente se compararon los valores de temperatura y humedad del aire interior y temperatura del suelo en superficie y profundidad, medidos y calculados. El acuerdo obtenido es razonable, siendo susceptible de ser mejorado.

1. Introducción

La implantación de invernaderos en el mundo muestra actualmente una tendencia en franco crecimiento creciente, debido, entre otros factores a la aparición de plásticos cada vez más eficientes técnica y económicamente. Nuestro país, en la escala correspondiente, muestra en la última década la misma tendencia. En particular, en la zona Sur de Santa Fe existe una importante cantidad de invernaderos. Los mismos son destinados a la producción forzada de flores y hortalizas. Sin embargo, la instalación y la operación no está acompañada por un adecuado desarrollo tecnológico y, por lo tanto, se basa en conocimientos empíricos. No se cuenta, entonces, con la información necesaria de como afecta el diseño al funcionamiento, ni como mejorar orgánicamente los sistemas de producción forzados. Tratando de suplir esta carencia, el Grupo de Energía Solar del IPFR inició un conjunto de investigaciones sobre invernaderos.

En una primera etapa se propuso:

1. Disponer de un modelo matemático de invernaderos, y desarrollar el software necesario para la simulación de los mismos.
2. Realizar ensayos en un invernadero existente, a fin de obtener una validación preliminar del modelo anterior.

En el presente trabajo se describen ambas acciones.

2. Modelo de Simulación

El propósito de los invernaderos es modificar el ambiente de las plantas y facilitar así su crecimiento, aún cuando las condiciones externas sean desfavorables. Los procesos biofísicos en los vegetales son fuertemente dependientes de las variables ambientales. Por consiguiente, el conocimiento y control de las mismas resulta de gran interés. Se han realizado diversos estudios a fin de predecir y consecuentemente controlar el microclima de los invernaderos. En un principio, los modelos utilizaron el método del balance energético, despreciándose en todos ellos la capacidad de acumulación de calor del suelo. Ejemplos son los propuestos por Businger (1963), Stanhill et al (1973) y Jimenez et al (1978). En una segunda etapa, se desarrollaron métodos para determinar los estados estacionarios de los invernaderos. Dichos estados se alcanzan al cabo de 6 a 8 días en un invernadero sometido a condiciones periódicas de radiación, humedad y temperatura, como lo hace notar Kindelan (1980). Posteriormente, se reconoció que esos estados eran sólo de interés en regiones áridas, donde en general se dan esas condiciones periódicas. En regiones húmedas, en cambio, muy raramente dichas condiciones externas se repiten de un día para otro, por lo que es importante considerar todos los fenómenos transitorios. Kindelan (1980), Chandra et al (1981) y Avissar y Mahrer (1982), entre otros, estudiaron el comportamiento plenamente dinámico del sistema. Tanto en los modelos estacionarios como los no estacionarios, son más aconsejables aquellos modelos que sólo consideran condiciones primarias, es decir, cuyos datos de entrada no dependen de la existencia del invernadero, ni poseen alguna hipótesis ad hoc.

El presente trabajo se basa en el modelo de Kindelan (1980), al cual se le introdujeron modificaciones. Básicamente el modelo es unidimensional, constando de cuatro capas, que se admiten sucesivas: cubierta, aire, vegetación y suelo. Se consideran procesos de transferencia de calor y masa entre las ca-

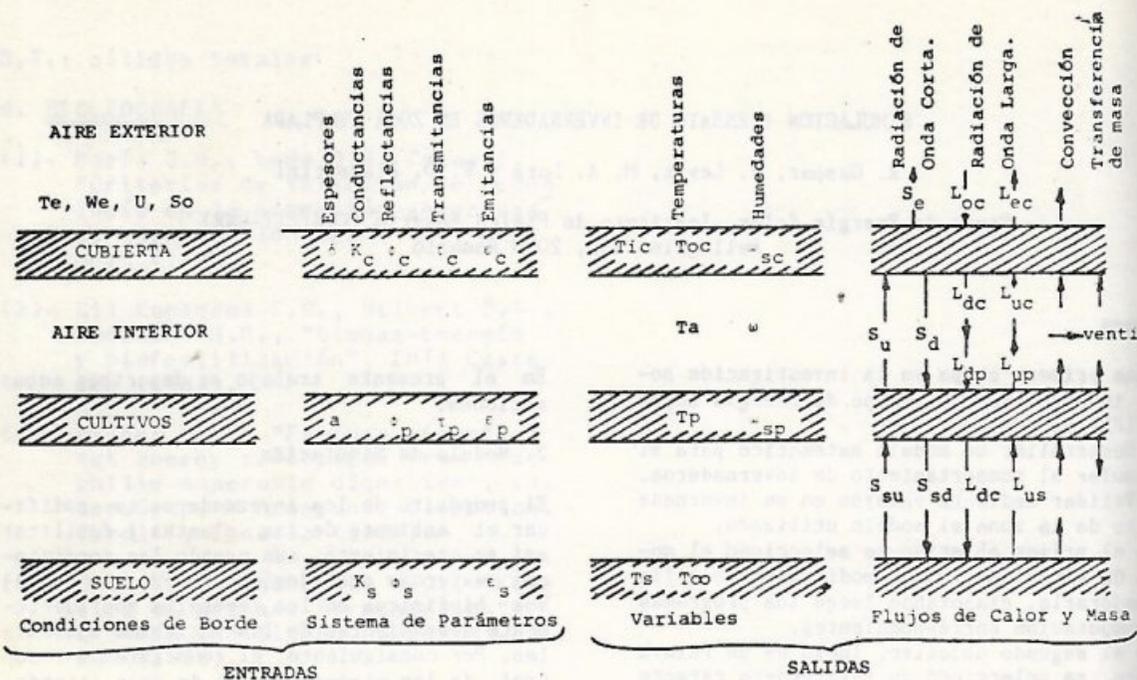


FIG: 1

pas. Se desprecia la capacidad termica de la cubierta, las plantas y el aire, pero no la del suelo. Los datos de entrada son: radiación solar incidente, temperatura y humedad externas y velocidad del viento, las propiedades de los materiales utilizados, la configuración y los aportes de todo tipo de dispositivo extra (ventiladores, calefactores, rociadores, etc.). En la Fig. 1 se indican esquemáticamente dichas entradas, con la notación dada al final del trabajo. En este modo lo el parámetro que presenta mas sensibilidad es la resistencia estomática de las plantas, que regula la transferencia de masa de las mismas. Para esta resistencia, se han propuesto valores umbrales para la radiación y la temperatura (Avisar y Mahrer, 1982). A partir de estos datos de entrada, y según el esquema de cálculo indicado en la Fig. 2 (Levit et al, 1985), se computan diversas variables de interés: radiación intercambiada en onda corta y larga entre las diversas capas, temperaturas de cada capa, humedad del aire interior, etc. Una lista de las salidas se indica también en la Fig. 1.

3. Ensayo de un Invernadero

Luego de un relevamiento, se seleccionó un invernadero de la zona, modelo de capilla, destinado al cultivo de frutillas. El mismo posee una estructura de madera y cañas, cubierta de polietileno de 50 micrones y orientación Este-Oeste. La ventilación, diurna, se realiza levantando parcialmente la pared lateral expuesta al Norte. En las franjas de cultivo se colocó una cubierta de polietileno negro, con agujeros donde se ubicaron las

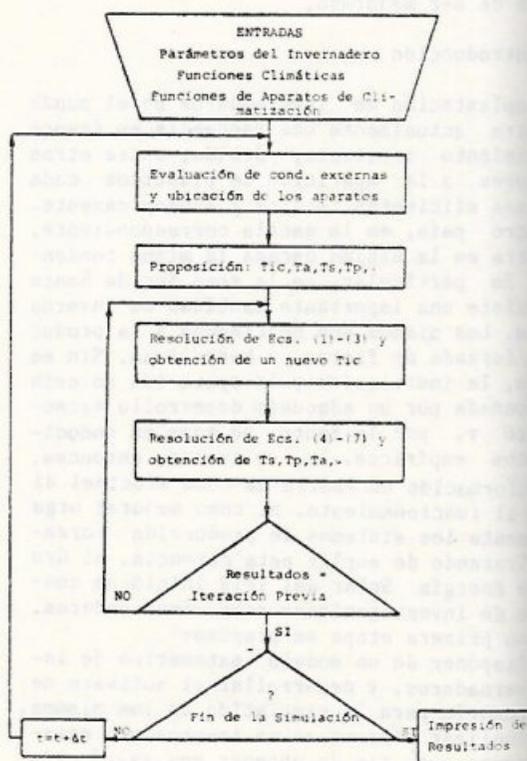
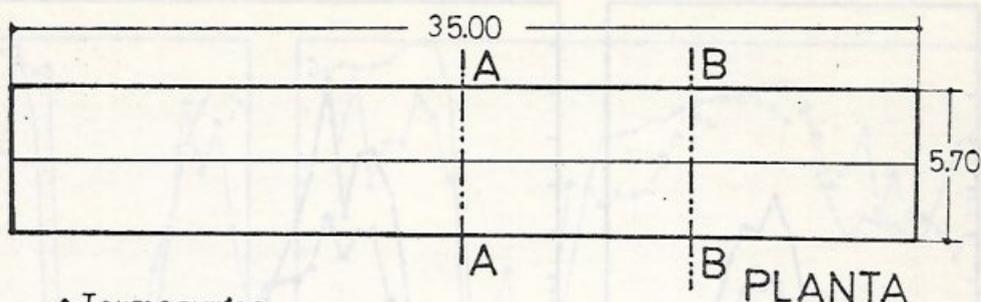


FIG: 2



- Termocuplas
- Termoc. bulbo húmedo
- △ Solarímetro
- Higrómetro

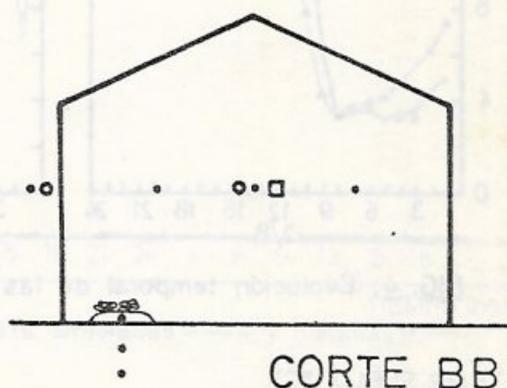
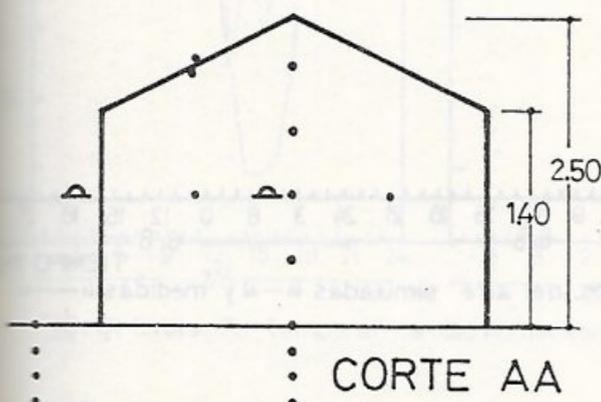


FIG 3

plantas (técnica de mulching), a los efectos de retener parcialmente la humedad, y sobre todo controlar malezas y facilitar la aplicación de agroquímicos. Se colocaron termocuplas dentro del invernadero que sensaban las siguientes temperaturas: cubierta (cara interna y externa), aire interior (en diversas posiciones), superficie del suelo (dentro y fuera de la zona de mulching) y a diferentes profundidades. También se registraron: humedad relativa ambiente y radiación solar. Exteriormente al invernadero, se midió temperatura del aire, de bulbo húmedo, radiación solar y perfil de temperaturas en el suelo. En la Fig. 3 se indican las dimensiones del sistema y el posicionamiento de los sensores. Las temperaturas se midieron con termocuplas tipo J, norma N.B.S., la humedad relativa con un humidímetro capacitivo, y la radiación solar con solarímetros a termopila. Los datos, registrados cada media hora con un sistema de adquisición de datos, fueron grabados en un archivo de acceso directo para su uso posterior, y corresponden a un período que abarca desde las 18 horas del 01/08/85 hasta las 18 horas del 06/08/85.

En la Tabla I se indican los principales parámetros del invernadero y de las plantas y en la Tabla II los correspondientes a la resistencia estomática de las plantas. Los valores leídos de temperatura externa, radiación solar incidente y humedad externa, se interpolaron por técnicas de spline para obtener, en los tiempos requeridos, los datos de entrada del modelo. El mismo procedimiento se usó para la velocidad del aire exterior. Como condiciones iniciales (perfil de temperaturas del suelo, temperatura del aire interior, humedad absoluta interna y temperatura de la cubierta) y, al solo efecto de disminuir el tiempo de cálculo, se usaron los valores medidos. A partir de estos valores, el modelo predice la evolución temporal del sistema.

Los cálculos abarcan el mismo período del ensayo, pero, a los efectos de ilustrar los resultados, se muestran dos tramos representativos: el primero, que corresponde al día 02/08/85 y el segundo, a los días 05 y 06/08/85. En las Fig. 4, 5 y 6 se muestran los valores calculados y medidos de la temperatura del aire interior, de la superficie del suelo y de la humedad relativa del aire interior. La temperatura de aire, como se observa, sigue en todo momento la tendencia de los valores experimentales. Los pequeños

TEMP. AIRE (°C)

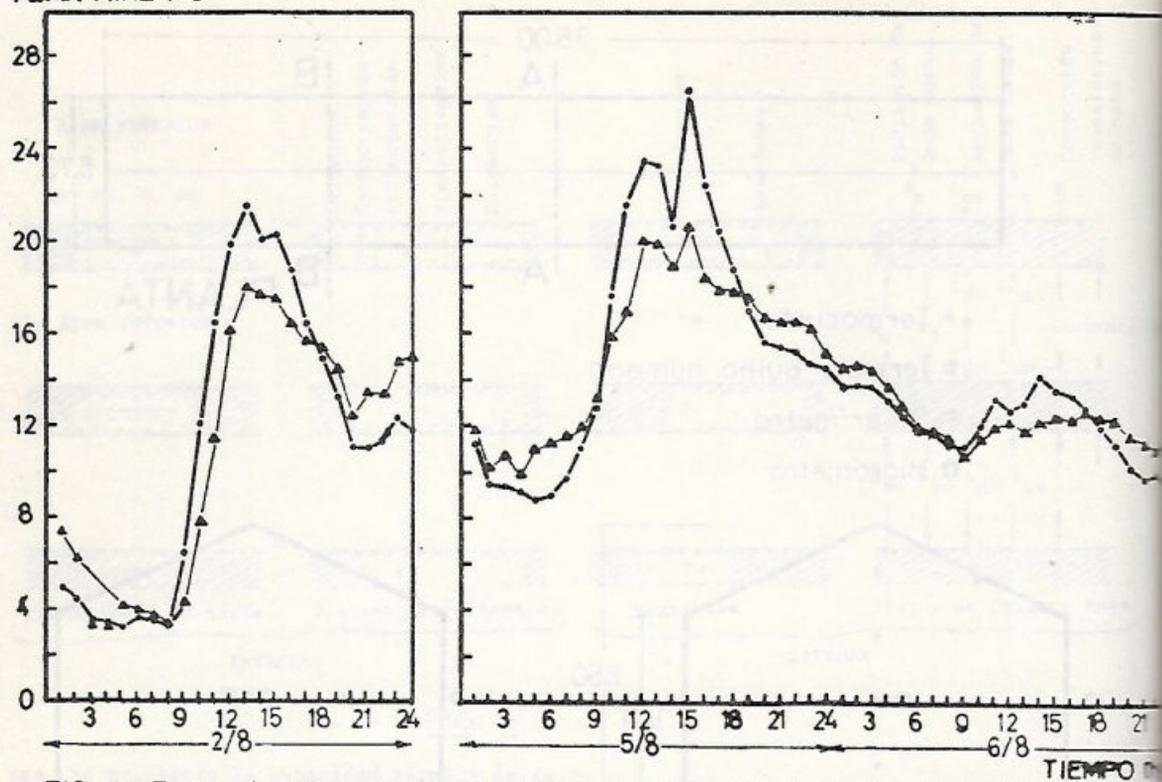


FIG. 4: Evolución temporal de las temps. del aire simuladas (▲—▲) y medidas (●—●).

TEMP. SUELO (°C)

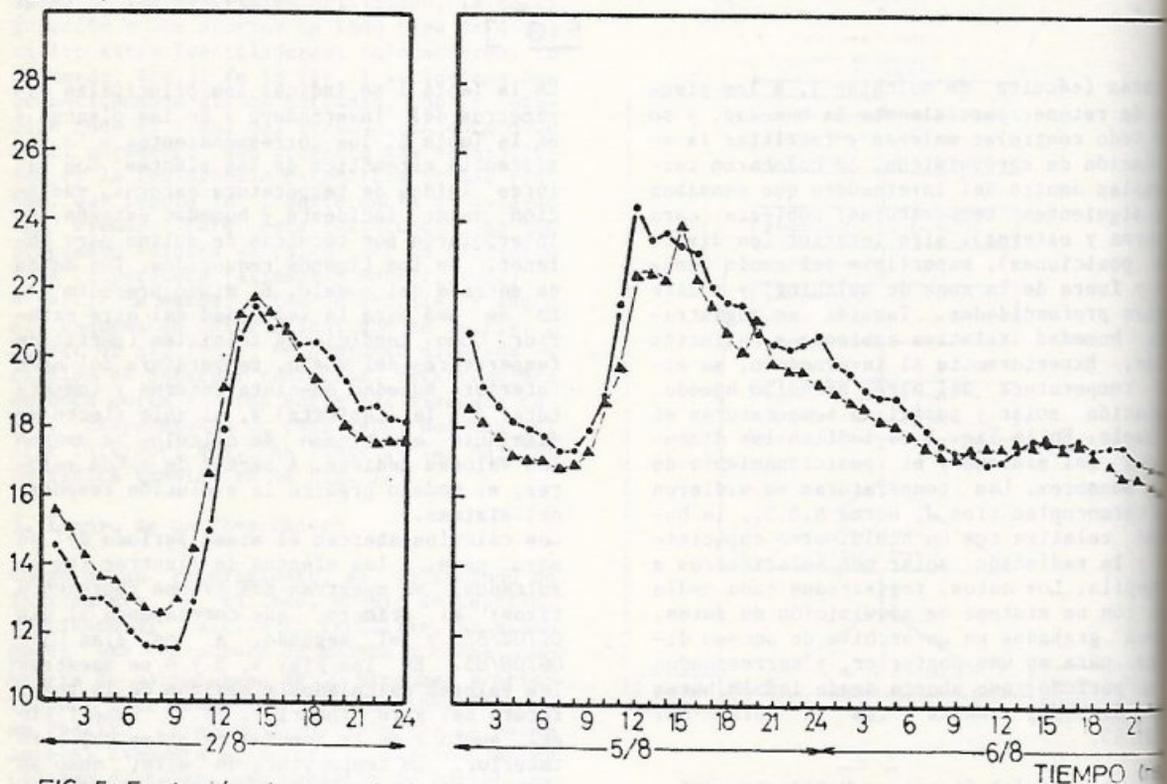


FIG. 5: Evolución temporal de las temps. del suelo simuladas (▲—▲) y medidas (●—●).

HR(%)

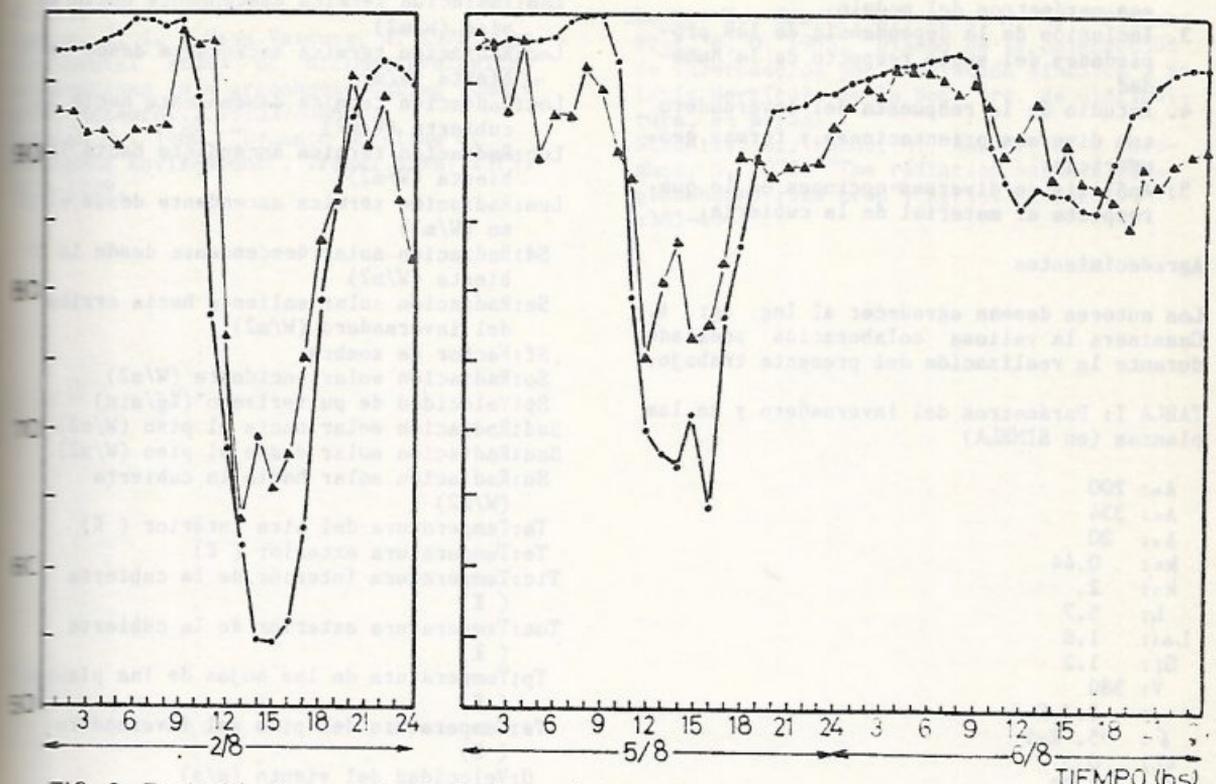


FIG. 6: Evolución temporal de las humedades relats. simuladas (▲—▲) y medidas (●—●)

apartamientos entre los valores medidos y calculados pueden sin duda atribuirse a que los datos de velocidad del viento fueron tomados no en el lugar sino de una estación meteorológica cercana, y además a una deficiente información sobre la hora exacta de apertura y cierre del invernadero, ya que este dato fue aportado por el encargado de la instalación.

La temperatura de superficie simulada, también describe correctamente los valores medidos. Los apartamientos en este caso se deben a que en la simulación se han supuesto constantes las propiedades térmicas del suelo, siendo que éstas varían según su contenido de humedad (Avisar y Mahrer, 1982). En una etapa posterior se tendrá en cuenta este hecho.

También se comparó la temperatura del suelo a una profundidad de 0,45 m, comprobándose que las diferencias no superan los 0,5 C. En lo que respecta a la humedad relativa interior (Fig. 6), si bien aparentemente el ajuste no es tan bueno, debe tenerse en cuenta que influye en ella no sólo la humedad absoluta, sino también la temperatura, por depender de ambos factores. Por otro lado, como se mencionó antes, la resistencia estomática de las plantas es uno de los parámetros de mayor sensibilidad del modelo, por lo que se puede esperar que la respuesta no sea tan buena como la de las temperaturas.

Se concluye, preliminarmente, que el modelo

es satisfactorio, y puede ser utilizado como herramienta de predicción.

5. Simulación Dinámica de un Sistema de Calefacción

A pedido de una firma productora, se utilizó para el cálculo del consumo energético de un invernadero destinado al cultivo forzado de frutillas (Levit et al, 1985). Se admitió un sistema de calefacción controlado por termostato. Dadas las temperaturas mínimas admisibles para el cultivo, se calculó, mes por mes, la potencia de calefacción necesaria. Se obtuvo así la máxima requerida, y luego, en función de ella, se determinó, para cada mes, las horas de uso del calefactor. Se tiene previsto, en una segunda etapa, analizar el reemplazo de la calefacción por quemador por otra con tubería de agua o vapor.

6. Conclusiones y Perspectivas.

Se consideran cumplidas ya satisfactoriamente las primeras etapas de la investigación, disponiéndose de una buena herramienta teórica y de datos experimentales confiables. Como próximas etapas se plantean:

1. Determinación de la respuesta del invernadero a diversas configuraciones (modelo de capilla, túnel, triangular) y diferentes dimensiones.
2. Estudio de la sensibilidad de los diver-

Los parámetros del modelo.

3. Inclusión de la dependencia de las propiedades del suelo respecto de la humedad.
4. Estudio de la respuesta del invernadero con diversas orientaciones y formas geométricas.
5. Análisis de diversas opciones en lo que respecta al material de la cubierta.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Ing. Agr. A. Cassinera la valiosa colaboración prestada durante la realización del presente trabajo.

TABLA I: Parámetros del invernadero y de las plantas (en SIMELA)

Ab:	200
Ac:	334
Av:	20
kc:	0.44
ks:	2.
L:	5.7
Lai:	1.8
Sf:	1.2
V:	389
α :	5.7 E-7
δ :	5. E-5
ϵ_c :	0.3
ϵ_p :	0.98
ϵ_s :	0.9
τ_c :	0.6
τ_p :	0.2
ϕ_c :	0.2
ϕ_p :	0.15
ϕ_s :	0.5

TABLA II: Resistencia estomática de las plantas (valores en SIMELA)

Valor mínimo:	500
Valor máximo:	5000
Valor umbral de radiación:	100
Valor umbral de temperatura:	283

Lista de símbolos

Ab:	Área del piso del invernadero (m ²)
Ac:	Área de la cubierta (m ²)
Av:	Área del suelo cubierto por vegetación (m ²)
kc:	Conductividad térmica de la cubierta (W/m ² *K)
ks:	Conductividad térmica del piso (W/m ² *K)
L:	Longitud característica del invernadero (m)
Lai:	Índice de área foliar, área foliar por unidad de área del piso
Ldc:	Radiación térmica descendente desde la cubierta (W/m ²)
Ldp:	Radiación térmica descendente hacia las plantas (W/m ²)

Lds:	Radiación térmica descendente hacia el piso (W/m ²)
Lec:	Radiación térmica ascendente desde la cubierta (W/m ²)
Loc:	Radiación térmica descendente hacia la cubierta (W/m ²)
Luc:	Radiación térmica ascendente hacia la cubierta (W/m ²)
Lus:	Radiación térmica ascendente desde el piso (W/m ²)
Sd:	Radiación solar descendente desde la cubierta (W/m ²)
Se:	Radiación solar saliente hacia arriba del invernadero (W/m ²)
Sf:	Factor de sombra
So:	Radiación solar incidente (W/m ²)
Sp:	Velocidad de pulverizado (Kg/min)
Ssd:	Radiación solar hacia el piso (W/m ²)
Ssu:	Radiación solar desde el piso (W/m ²)
Su:	Radiación solar hacia la cubierta (W/m ²)
Ta:	Temperatura del aire interior (K)
Te:	Temperatura exterior (K)
Tic:	Temperatura interior de la cubierta (K)
Toc:	Temperatura exterior de la cubierta (K)
Tp:	Temperatura de las hojas de las plantas (K)
Ts:	Temperatura del piso del invernadero (K)
U:	Velocidad del viento (m/s)
V:	Volumen del invernadero (m ³)
α :	Difusividad térmica del suelo (m ² /s)
δ :	Espesor de la cubierta (m)
ϵ_c :	Emisividad de la cubierta
ϵ_p :	Emisividad de las hojas
ϵ_s :	Emisividad del piso
τ_c :	Transmitancia de la radiación solar de la cubierta
τ_p :	Transmitancia de la radiación solar de los cultivos
ϕ_c :	Reflectancia a la radiación solar de la cubierta
ϕ_p :	Reflectancia a la radiación solar de las plantas
ϕ_s :	Reflectancia a la radiación solar del piso
ω :	Humedad específica del aire interior
ω_e :	Humedad específica del aire exterior
ω_{∞} :	Humedad específica de saturación a la temperatura Tic
ω_{sp} :	Humedad específica de saturación a la temperatura Tp

Referencias

- Avissar, R. y Mahrer, Y. 1982. "Verification study of a numerical greenhouse microclimate model". Trans ASAE, 25(6):1711-1720.
- Businger, J. A. 1963. En "The greenhouse climate". W. R. Van Wijk, Ed. Physics of Plant Environment. Amsterdam, Holanda, págs. 67-74.
- Chandra, P., Albright, L. D. y Scott, N. R. 1981. "A time dependent analysis of greenhouse thermal environment". Trans ASAE, 24(2):171-176.

449.
 ...ez, J. I. y Casa Vazquez, J. 1978. "An experimental study of micrometeorological fluctuations in a greenhouse during summer" *Agric. Meteorol.*, 19:337-348.
 ...lan M.. 1980. "Dynamic Modeling of Greenhouse Environment". *Trans. ASAE*, 23(5) 1232-1239.

Levit, H., Gaspar, R., Lara, M. A. y Piacentini, R. D. 1985. "Diseño de la calefacción de invernaderos por simulación dinámica". *Boletín Hortícola de la Soc. Arg. de Olericultura*, en prensa.
 Stanhill, G., Fuchs, M., Bakker, J. y Moreshet, S. 1973. "The radiation balance of a glasshouse rose crop". *Agric. Meteorol.*, 11:385-404.

L.F. Amor
 Facultad Profesional Ciencias