

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO¹

Placco C. y Gea M.
INENCO - Instituto UNSa - CONICET
Universidad Nacional de Salta
Av. Bolivia 5150 – (4400) Salta, República Argentina
FAX 54 387 4255489 - e-mail: cplacco@inenco.net

RESUMEN

El clima de gran parte de la región del Noroeste Argentino se caracteriza por tener períodos muy cálidos y secos. Bajo estas condiciones el método racional de refrescamiento desde el punto de vista energético es el enfriamiento evaporativo. En el presente trabajo se desarrolla un software para el prediseño de sistemas de climatización con enfriamiento evaporativo a partir de las ecuaciones de balance para estado estacionario con valores de temperatura, humedad y radiación medios diarios. Se comparan los resultados del programa con los obtenidos en el monitoreo bajo distintas condiciones de funcionamiento y se realizan los ajustes necesarios. Se procura que este programa sea una herramienta de manejo accesible para productores agropecuarios.

Palabras clave: eficiencia energética, enfriamiento evaporativo, software para diseño

INTRODUCCION

En Argentina hay muchas zonas que se caracterizan por poseer un clima con importantes períodos cálidos y secos. Tal es el caso de las regiones áridas y semiáridas como los Valles Calchaquíes, parte del Chaco Salteño, y provincias como Catamarca, La Rioja, San Juan y Mendoza.

Los sistemas productivos agropecuarios intensivos, que en los últimos años han crecido gracias a los progresos constantes en genética, nutrición y manejo de animales y plantas en salas de cría, han encontrado en las altas temperaturas del verano un factor limitante para su desarrollo en estas regiones. En un sistema convencional de ventilación, sin enfriamiento, la temperatura de entrada será similar a la temperatura de salida, pero si consideramos la ganancia por radiación solar y el calor generado por los animales de cría, la temperatura dentro del edificio llega a ser superior a la temperatura exterior.

Los sistemas de enfriamiento evaporativo directo aplicados a invernaderos pueden generar las condiciones climáticas óptimas para cría de animales o plantas. Estos equipos normalmente se instalan sin cálculos de dimensionado por lo que en muchos casos resultan ineficientes. Mediante este trabajo se estudia el intercambio energético en edificios con enfriamiento evaporativo y se elaboran modelos y herramientas de software que permiten un dimensionado racional de los componentes de estos sistemas.

En los días calurosos y soleados, el contenido de humedad en la atmósfera se mantiene aproximadamente constante durante el día, pero la humedad relativa varía y tiende a ser más baja durante la tarde en las horas que se registran las temperaturas más elevadas. A menor humedad relativa, mayor efectividad del enfriamiento evaporativo. En otras palabras, el sistema funciona mejor cuando más se lo requiere.

En trabajos anteriores (Gea, *et al.*, 2004) se construyeron y ensayaron intercambiadores para enfriamiento evaporativo utilizando nuevos materiales que no significan costos elevados. Además, desde hace tiempo, existen en el mercado comercial intercambiadores, muy utilizados en Europa y América, cuyos fabricantes proveen todas las características técnicas. Estos parámetros fueron utilizados para alimentar el programa y comprobar su efectividad.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Se realiza un dimensionado rápido del sistema de enfriamiento evaporativo a partir de datos medios de temperatura, humedad, radiación. El programa utiliza algunos cálculos del método de prediseño para acondicionamiento térmico de edificios (Saravia *et al.*, 1982) y toma como antecedente el programa PREDISE (Hernandez, 2002).

La carga térmica que resulta de la radiación solar y de la transmisión de calor, dependerá de: las dimensiones del edificio, los materiales constructivos, la aislación utilizada, la situación geográfica y el clima.

¹ Financiado por ANPCyT y CIUNSA

El primer dato a evaluar, es la pérdida de calor del edificio, por cada grado centígrado de diferencia de temperatura entre los valores medios diarios interior y exterior (ambiente). Esta cantidad recibe el nombre de Carga Térmica Unitaria (CTU). Las pérdidas diarias por paredes (Q_p), ventanas (Q_v) y techo (Q_t) son:

$$Q_p = 24 \times 3,6 \times U_p \times A_p / 1.000 \quad [MJ/C \cdot día] \quad (1)$$

$$Q_v = 24 \times 3,6 \times U_v \times A_v / 1.000 \quad [MJ/C \cdot día] \quad (2)$$

$$Q_t = 24 \times 3,6 \times U_t \times A_t / 1.000 \quad [MJ/C \cdot día] \quad (3)$$

Donde U_p : coeficiente global de transferencia de calor por paredes, en W/C.m²

A_p : área de transferencia de paredes, en m²

U_v : coeficiente global de transferencia de calor por ventanas, en W/C.m²

A_v : área de transferencia de ventanas, en m²

U_t : coeficiente global de transferencia de calor por el techo, en W/C.m²

A_t : área de transferencia del techo, en m²

El valor de la CTU se obtiene sumando las ecuaciones (1) a (3):

$$CTU = Q_p + Q_v + Q_t \quad (4)$$

Cuando este método de cálculo es utilizado para acondicionamiento bioclimático de edificios, al valor del CTU aquí calculado se le suman las pérdidas perimetrales y las infiltraciones que dependen del número de renovaciones horarias de aire (Saravia *et al*, 1982). En este caso se han despreciado las pérdidas en las fundaciones, y debido a que el sistema de enfriamiento evaporativo se realiza mediante convección forzada no se incluyen las pérdidas por infiltraciones.

El aporte de energía solar debido a la ganancia directa a través de áreas transparentes (Q_{solar}) se determina por:

$$Q_{solar} = C_{T_v} \times C_{T_m} \times H \times A_{tr} \quad [MJ / día] \quad (5)$$

C_{T_v} : es un coeficiente que tiene en cuenta la disminución de la radiación solar que ingresa al edificio debido a la transmitancia del material transparente.

C_{T_m} : contempla la influencia de los marcos de las ventanas (reducen la superficie transparente disponible), siendo su valor del orden de 0,8 para los casos más usuales.

H : es la suma de las irradiaciones solares diarias sobre el plano de cada área colectora en MJ/m²día.

A_{tr} : el área total transparente en m².

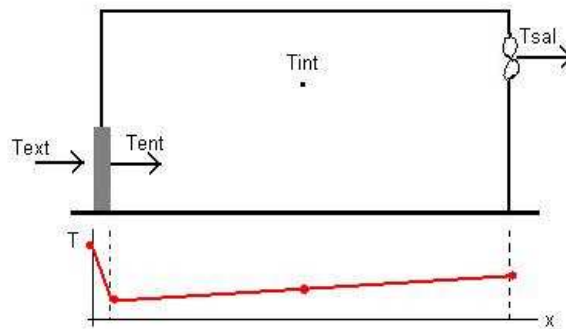
La ganancia interna de calor debido a los seres vivos que se crían en la cámara (Q_{gen}) debe ser establecida de acuerdo al tipo y cantidad de animales, pero en el caso de invernaderos para producción de plantas, verduras, etc, este valor es nulo.

Los paneles de enfriamiento se colocan en una de las paredes del invernadero de cara al viento predominante y en la pared opuesta son colocados los ventiladores de extracción de aire que, al crear una caída de presión en el interior del edificio, ocasionan la succión de aire a través del intercambiador con lo que se consigue que la temperatura de entrada del aire, disminuya desde la temperatura ambiente externa (T_{ext}) hasta la temperatura de entrada (T_{ent}), como se observa en la Figura 1.

El calor extraído del recinto por el sistema de enfriamiento evaporativo (Q_{ee}) para un flujo másico m está dado por:

$$Q_{ee} = m \times C_p \times (T_{sal} - T_{ent}) \times 3,6 \times h_{sol} / 1000 \quad [MJ/día] \quad (6)$$

Donde h_{sol} : son las horas de sol que posee el día, durante las cuáles estará encendido el hydrocooling.



Figural: Esquema del recinto y su gradiente de temperatura.

Si la temperatura media diaria del interior del recinto (T_{int}) es el promedio entre la temperatura de ingreso del aire a través del intercambiador (T_{ent}) y la temperatura del aire a la salida del extractor (T_{sal}):

$$T_{int} = (T_{ent} + T_{sal}) / 2 \quad (7)$$

Despejando, se obtiene:

$$T_{sal} = 2 \times T_{int} - T_{ent} \quad (8)$$

En (6) el valor del flujo másico, que es la cantidad de kg de aire que pasan por el intercambiador por unidad de tiempo, puede calcularse mediante:

$$m = \rho_{aire} \times v_{aire} \times A_f \quad (9)$$

Donde ρ_{aire} : densidad del aire del lugar

v_{aire} : velocidad del aire en el intercambiador

A_f : Área frontal del intercambiador de enfriamiento evaporativo

Reemplazando (8) y (9) en (6):

$$Q_{ee} = 2 \times \rho_{aire} \times v_{aire} \times A_f \times C_p \times (T_{int} - T_{ent}) \times 3,6 \times h_{sol} / 1000 \quad [MJ/día] \quad (10)$$

De esta última expresión aún no se conoce el valor de la temperatura de ingreso del aire a través del intercambiador (T_{ent}), pero ésta será calculada usando la definición de Eficiencia (η) de un intercambiador de enfriamiento evaporativo:

$$\eta = (T_{ext} - T_{ent}) / (T_{ext} - T_{bh}) \quad (11)$$

Donde T_{bh} : temperatura de bulbo húmedo

T_{ext} : temperatura media diaria externa durante el día que se calcula mediante: $T_{ext} = (T_{max} + T_{med}) / 2$

T_{max} : temperatura máxima promedio diario mensual

T_{med} : temperatura media diaria mensual

Despejando:

$$T_{ent} = T_{ext} - \eta \times (T_{ext} - T_{bh}) \quad (12)$$

Reemplazando (12) en (10) se llega a la expresión final para el calor absorbido por el sistema de enfriamiento evaporativo y finalmente se plantea la ecuación de balance de energía:

$$CTU \times (T_{int} - T_{ext}) = Q_{solar} + Q_{gen} - Q_{ee} \quad (13)$$

El balance se realiza sólo para las horas de sol, período durante el cuál está en funcionamiento el sistema de enfriamiento evaporativo.

Según los requerimientos del usuario, de esta última ecuación puede despejarse la temperatura media interna o el área del intercambiador de enfriamiento evaporativo, como se explicará en la siguiente sección.

PROGRAMA

Mediante unos pocos y claros cuadros de diálogo el programa guía al usuario. Primero emerge una ventana que solicita datos geográficos y meteorológicos de la ubicación del invernadero (*Figura 2*).

Con el dato relativo al día del año se calcula el número de día juliano que será necesario para obtener la radiación sobre los distintos planos inclinados. La altitud y temperatura media externa diaria se usan en el cálculo de la densidad del aire del lugar y con ésta se calcula la presión atmosférica. Con la humedad relativa, la temperatura media externa y la presión atmosférica se obtiene la temperatura de bulbo húmedo, en una subrutina iterativa. La velocidad del viento se usa para el cálculo del coeficiente convectivo externo. El dato referente al coeficiente convectivo interno se estipula empíricamente de acuerdo al ajuste de simulaciones que se presentaron en trabajos anteriores (Iriarte, *et al.* 2006). La cantidad de horas que estará en funcionamiento el sistema de enfriamiento evaporativo, serán las horas de sol que posee el día elegido para el diseño. Este dato se obtiene por medio de una función cuyos parámetros son el número de día del año y la latitud del lugar.

El programa propone dos tipos de orientaciones posibles para el edificio (*Figura 3*). De acuerdo a esta selección y con los datos de la latitud del lugar, la radiación total media diaria mensual sobre plano horizontal y el número de día del año, se

pasan los parámetros de una función que calcula la radiación total diaria sobre cada uno de los planos del local. Este cálculo se realiza siguiendo el método de Liu Jordan de “Estimación de la Radiación sobre Superficies Inclinadas” (Duffie y Beckman , 1991)

Una nueva ventana solicita las áreas de paredes opacas, su espesor y el espesor de aislamiento térmico (Figura 4a). Lado por lado se solicitan las áreas de material transparente y el porcentaje de sombra sobre cada una de estas áreas (Figura 4b). Se proponen para la elección del operador una serie de materiales comunes en la construcción de este tipo de locales (Figura 5). Los mismos datos, pero relativos a la construcción del techo, son solicitados en ventanas posteriores.

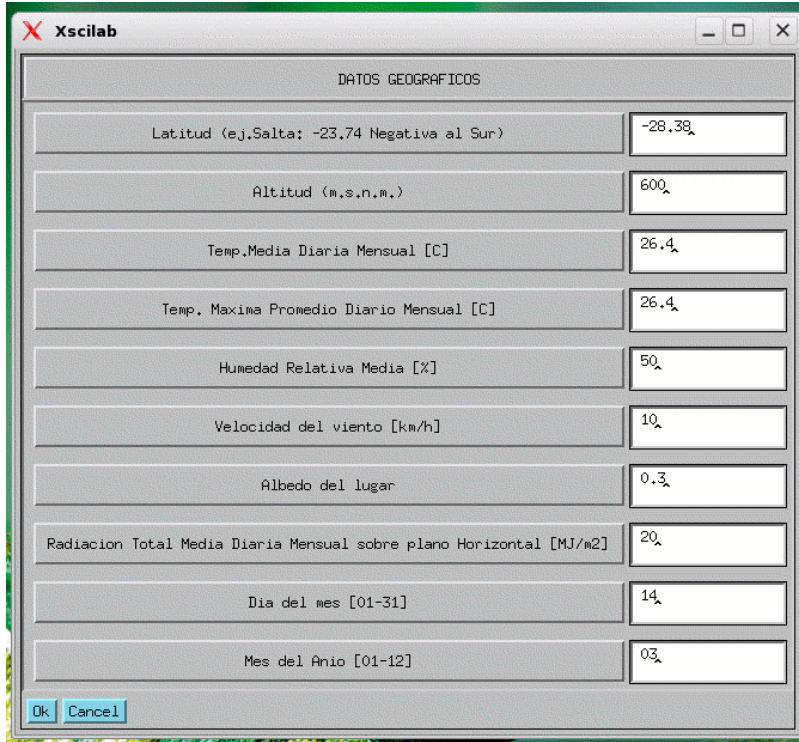


Figura 2: Pantalla de entrada de datos geográficos y meteorológicos

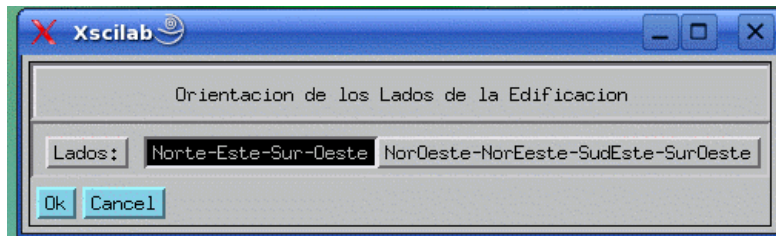


Figura3: Pantalla de elección de orientación del edificio

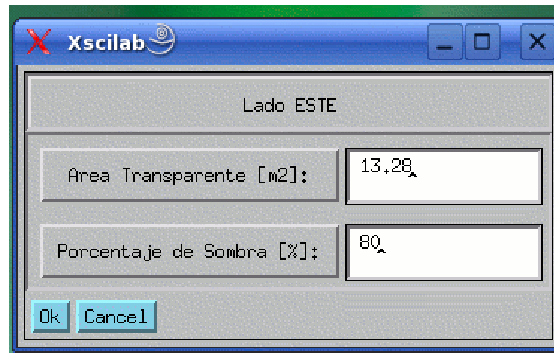
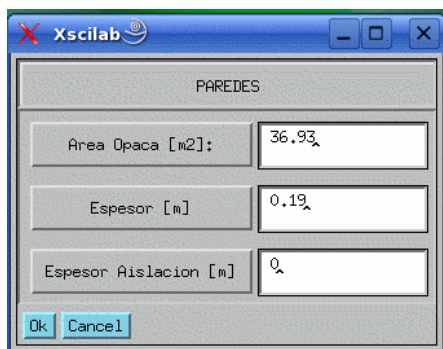


Figura 4: a) Datos Constructivos Paredes b) Áreas de ventanas en las distintas orientaciones

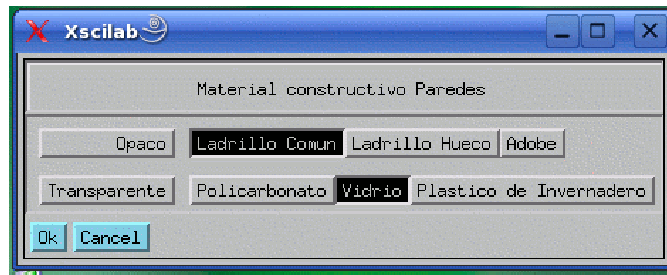


Figura 5: Elección de materiales de las paredes

De acuerdo a las elecciones realizadas el programa asigna los valores correspondientes a conductividades y trasmitancias para luego calcular los Coeficientes Globales de Transferencia y obtener la CTU; como así también realizar el cálculo correspondiente a la Ganancia Solar por áreas transparentes (Qsolar).

El valor de la ganancia interna de calor (Qgen), por ahora, es solicitada al usuario; aquí debe ingresarse la cantidad de calor generada en [MJ/día] teniendo en cuenta que el balance se realiza sólo para la cantidad de horas de sol, cuando el hidrocóoling está en funcionamiento. Está previsto realizar un estudio sobre el calor generado por distintas clases de animales, para que el operador sólo deba introducir el tipo y la cantidad de animales que se criarán en el recinto. (Figura 6a).

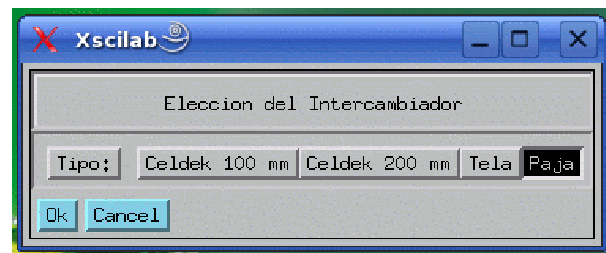
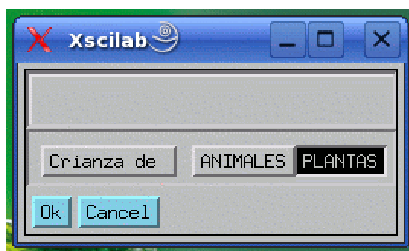


Figura 6: a) Elección de la destinación del local b) Elección del Intercambiador de Enfriamiento Evaporativo

Luego, debe seleccionarse el tipo de intercambiador a ser utilizado en el sistema de enfriamiento evaporativo, para asignar la eficiencia correspondiente, habiéndose estipulado como velocidad del aire a través del área frontal del panel el valor medio de 1 m/s (Figura 6b y 7a). Este valor es elegido debido a que a valores inferiores le corresponderán menores eficiencias y que velocidades superiores a 1.5 m/s provocan una excesiva caída de presión, disminuyendo la capacidad de los ventiladores. Además no se recomienda que animales y plantas sean expuestos a velocidades de aire demasiado elevadas (Figura 7 b).

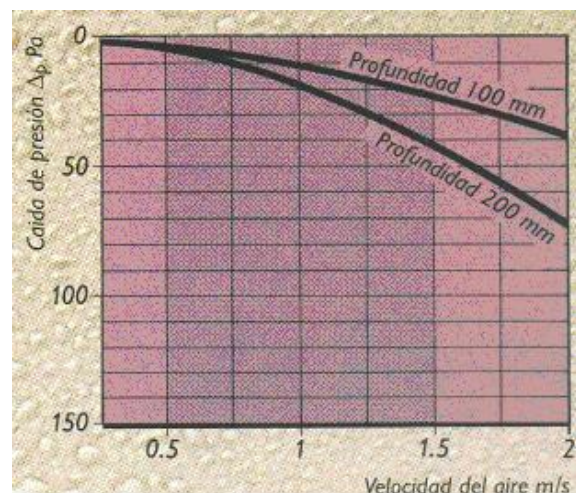
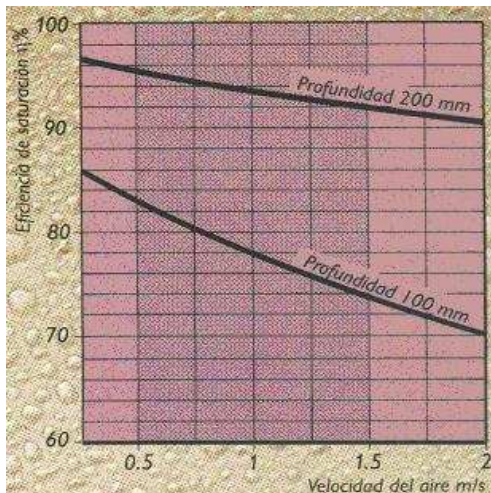


Figura 7: a) Gráfica de la Eficiencia vs. Velocidad del aire b) Gráfica Caída de Presión vs. Velocidad del aire de dos tipos de paneles comerciales utilizados en el programa (Celdek 100 mm y 200 mm)

En esta etapa se solicita al operador que opte por el cálculo que desea realizar, teniendo dos opciones:

1. Estipular la temperatura media interna (T_{int}) y que el programa proporcione la superficie frontal que debe tener el intercambiador seleccionado para cumplir con este requerimiento.

De la ecuación 13, una vez reemplazado el valor de Q_{ee} (ecuación 10) y calculado el valor de T_{ent} (ecuación 12), despejando A_f , se obtiene:

$$A_f = [Q_{solar} + Q_{gen} - CTU \times (T_{int} - T_{ext})] / [2 \times \rho_{aire} \times v_{aire} \times C_p \times (T_{int} - T_{ent}) \times 3,6 \times h_{sol} / 1000] \quad (14)$$

2. Estipular la superficie de intercambiador que se posee y que el programa proporcione la temperatura media interna que se obtendrá con este dispositivo (Figura 8).

De la ecuación 13, una vez reemplazado el valor de Q_{ee} (ecuación 10) y calculado el valor de T_{ent} (ecuación 12), despejando T_{int} , se obtiene:

$$T_{int} = (Q_{solar} + Q_{gen} + CTU \times T_{ext} + 2 \times \rho_{aire} \times v_{aire} \times A_f \times C_p \times T_{ent} \times 3,6 \times h_{sol} / 1000) / (CTU + 2 \times \rho_{aire} \times v_{aire} \times A_f \times C_p \times 3,6 \times h_{sol} / 1000) \quad (15)$$

Finalmente el programa proporciona un informe por pantalla con los datos ingresados y resultados obtenidos y un archivo de texto que puede ser impreso (Figura 9 y 10).

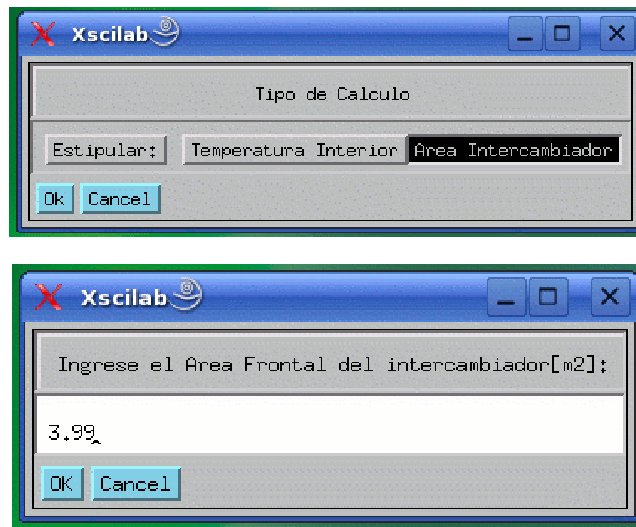


Figura 8:a) Elección del tipo de cálculo b) Ingreso del dato para el cálculo elegido

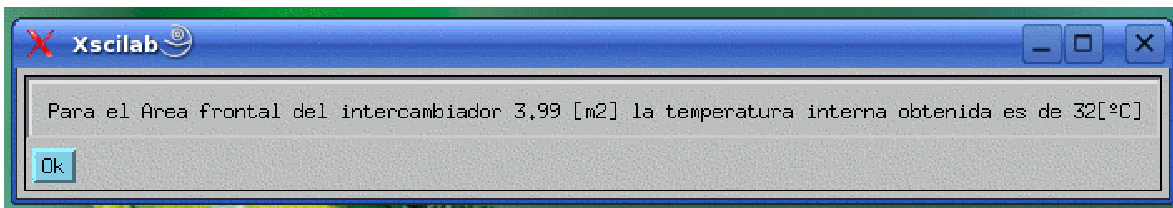


Figura 9: Resultados del cálculo realizado

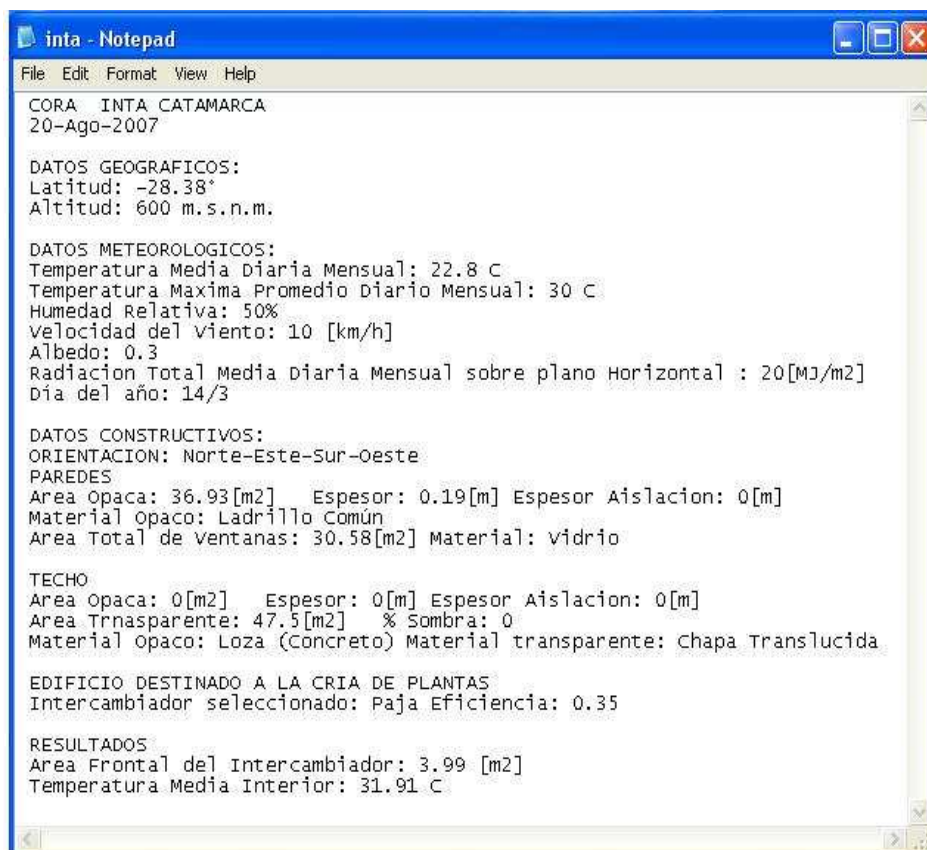
RESULTADOS

El programa se corrió con los datos constructivos pertenecientes a una cámara de microinjertación de plantas frutales ubicada en la Estación Experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de la ciudad de Catamarca. Para corroborar su buen funcionamiento se tomaron los valores experimentales obtenidos de mediciones realizadas en el año 2002 (García, *et al.* 2002) y en el año 2006 (Iriarte, *et al.* 2006).

El invernadero para la producción de plantines frutales, tiene una superficie cubierta de 46,67 m² con eje central orientado Norte - Sur. Las paredes laterales y frontal Sur están construida con mampostería de ladrillos de 0,15 m con revoque interior y exterior, asentados sobre cimiento de hormigón, mientras que el frontal Norte se compone de un panel para el sistema de refrescamiento en la parte inferior y una superficie vidriada en la parte superior. Sobre los muros laterales se ha colocado un cerramiento de carpintería metálica con portavidrios, sobre el cual se asienta la cubierta superior formada por cabreadas de perfiles metálicos que soportan el material de cobertura. Más detalles constructivos se encuentran en el trabajo de García *et al.* (2002). En la parte frontal norte se ha incorporado un panel de refrescamiento evaporativo (hydrocooling) para disminuir la temperatura de la cámara. Las dimensiones del panel son 3,80 m de ancho, 1,00 m de altura y 0,20 m de espesor, con relleno de paja. El aire circulante se mueve mediante un extractor de 1,5 kW, ubicado en el frontal opuesto (Sur).

Al comparar los resultados del programa con los datos experimentales se realizaron ajustes en el valor del coeficiente convectivo interno para el cual se tomó el valor empírico obtenido en simulaciones anteriores de la misma cámara (Iriarte, *et al.* 2006), además se incorporó al cálculo el dato del porcentaje de sombra sobre superficies transparentes para reducir la ganancia solar cuando la construcción se encuentra rodeada de obstáculos.

Los resultados (figura 9) fueron satisfactorios comparados con los promedios de las mediciones de temperatura interior realizadas en el invernadero, obteniéndose una diferencia menor a 1°C en cada una de las comprobaciones. Se supone que el origen de este error es debido a que el análisis que se está realizando es para estado estacionario, utilizando valores medios diarios de temperatura, humedad y radiación. Otro posible motivo puede ser el cálculo inexacto de los porcentajes de sombra sobre ventanas y techo del edificio, ya que este dato también debe ser promediado en el transcurso del día para ingresarlo al programa. La imprecisión en el porcentaje de sombra provoca diferencias por exceso o defecto en el cálculo de la ganancia de radiación.



```
inia - Notepad
File Edit Format View Help
CORA INTA CATAMARCA
20-Ago-2007

DATOS GEOGRAFICOS:
Latitud: -28.38°
Altitud: 600 m.s.n.m.

DATOS METEOROLOGICOS:
Temperatura Media Diaria Mensual: 22.8 C
Temperatura Maxima Promedio Diario Mensual: 30 C
Humedad Relativa: 50%
Velocidad del viento: 10 [km/h]
Albedo: 0.3
Radiacion Total Media Diaria Mensual sobre plano Horizontal : 20[MJ/m2]
Dia del año: 14/3

DATOS CONSTRUCTIVOS:
ORIENTACION: Norte-Este-Sur-Oeste
PAREDES
Area Opaca: 36.93[m2] Espesor: 0.19[m] Espesor Aislacion: 0[m]
Material Opaco: Ladrillo Común
Area Total de Ventanas: 30.58[m2] Material: vidrio

TECHO
Area Opaca: 0[m2] Espesor: 0[m] Espesor Aislacion: 0[m]
Area Trnsparente: 47.5[m2] % Sombra: 0
Material Opaco: Loza (Concreto) Material transparente: Chapa Translucida

EDIFICIO DESTINADO A LA CRIA DE PLANTAS
Intercambiador seleccionado: Paja Eficiencia: 0.35

RESULTADOS
Area Frontal del Intercambiador: 3.99 [m2]
Temperatura Media Interior: 31.91 C
```

Figura 10 : Archivo de texto creado por el programa con datos de diseño y resultados

CONCLUSIONES

Se desarrolló un software para el prediseño de sistemas de climatización con enfriamiento evaporativo a partir de modelos teóricos ajustados con resultados experimentales.

El programa está desarrollado con una aplicación de Software libre que corre bajo plataformas Linux, Unix y Windows.

Los datos necesarios que deben ser ingresados al programa (geográficos, meteorológicos y constructivos) pueden ser conseguidos sin inconvenientes y la utilización de ventanas de diálogo hace que la aplicación resulte amigable para el usuario.

Su fácil utilización permite que el programa sea corrido varias veces para analizar los resultados que se obtendrían con distintos tipos de intercambiadores a fin de poder tomar una decisión en el tipo de sistema de enfriamiento evaporativo a instalar en el invernadero o cámara de cría.

En lo sucesivo, el programa deberá pasar por múltiples etapas de validación. A corto plazo, los resultados serán comparados con nuevos datos experimentales que se obtendrán utilizando otro intercambiador que fue instalado en la cámara de injertos del INTA, anteriormente mencionada.

En versiones posteriores se prevé optimizar el programa con tablas que puedan ser actualizadas por el operador, referidas a materiales constructivos, datos geográficos y meteorológicos, nuevos tipos de intercambiadores, etc. También se incorporará un nuevo módulo que calcule la pérdida de carga (caída de presión) según la elección del intercambiador y de acuerdo a este resultado se propondrá la potencia óptima para el extractor de aire a ser instalado en el invernadero.

REFERENCIAS

- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª edición, pág. 94 - 101. Wiley Interscience, New York.
- García V., Iriarte A. y Flores S. (2002). Simulación del comportamiento térmico de una casa de vegetación para la producción de plantas frutales. *Revista Avances en energías renovables y medio ambiente*, Vol. 6, N° 2, pág. 08.139 - 08.143.
- Gea M., Sánchez B., Placco C., Iriarte A. y Lesino G. (2004). Estudio y comparación de distintos tipos de intercambiadores para enfriamiento evaporativo. *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 8, N° 1, pág. 02.38 – 02.42.
- Hernández, Alejandro L. (2002). PREDISE – Un novedoso y práctico programa de evaluación térmica de edificios. *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 6, N° 2, pág. 08.61 – 08.66.
- Iriarte A., Gea M., García V. y Placco C. (2006). Simulación numérica de una cámara bioclimática para microinjección de plantines de nogal. *Revista Avances en energías renovables y medio ambiente*. Vol. 10, pág. 08.31 - 08.38.
- Saravia L., Lesino G., Chiarito G., (1982), Pautas de diseño. Acondicionamiento térmico de edificios mediante sistemas pasivos e híbridos, Apuntes para el Curso de Postgrado auspiciado por SECYT sobre Energía Solar, INENCO, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta.

ABSTRACT

The climate of great part of our region is characterized to have very warm and dry periods. Under these conditions the rational cooling method from the power point of view is the evaporative cooling. In the present work a software for the predesign of systems of air conditioning with evaporative cooling, is developed from the equations of balance for stationary state with average values of temperature daily, humidity and radiation. The results of the program are compared with the measured under different conditions of operation and the necessary adjustments are made. It is intended that this program is an easy to use tool for farmers.

Keywords: development of software, evaporative cooling, heat exchangers, power efficiency