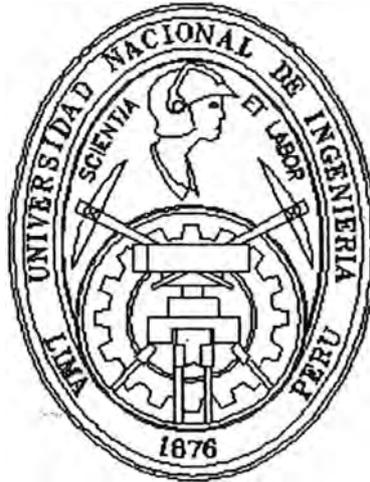


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE CIENCIAS

**SECCION DE POST-GRADO Y 2da. ESPECIALIZACIÓN
PROFESIONAL**



TRABAJO PRACTICO

SEGUNDA ESPECIALIZACIÓN PROFESIONAL

EN ENERGÍA SOLAR

**“EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN INVERNADERO
ENTERRADO PARA ÉPOCAS DE HELADA”**

PRESENTADO POR:

LIC. FELIX CCARITA CCARITA

LIMA - PERÚ

2000

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación se ha realizado en el Distrito de San Sebastián, del Departamento de Cusco a 3 335 m.s.n.m.; bajo el asesoramiento de los profesores Manfred Horn M. y Lic. Pedro Zanabria P. Por lo tanto expreso mi sincero agradecimiento por haberme confiado en la realización y conclusión del presente trabajo como su paciencia en la discusión de cada uno de los temas que lo constituyen.

De igual modo expreso mi agradecimiento a los profesores Dr. Anibal Valera P. de la facultad de Ciencias de la UNL y a mis colegas profesores del Departamento Académico de Física, principalmente al profesor Lic. Lucio Darío Miranda C. de la Facultad de Ciencias, Químicas, Físicas y Matemáticas de la UNSAAC, por haberme brindado la ayuda necesaria para llevar a cabo el presente trabajo de Tesis.

Mi más profundo agradecimiento al apoyo incondicional de mis padres y familiares quienes con su sacrificio hicieron posible dedicarme al trabajo de Tesis.

FELIX CCAR TA CCARITA

Lic. en Físico Matemáticas

Lic. en Educación

EVALUACION TERMICA DE UN INVERNADERO ENTERRADO PARA EPOCAS DE HELADA

CAPITULO I. RADIACION SOLAR	Pág.
1.1. Preliminares	11
1.2. Constitución Física del Sol	13
1.3. Radiación solar y la temperatura	16
1.4. Radiación solar en las proximidades del suelo	18
1.5. Radiación sobre campos naturales	19
1.6. Naturaleza de la radiación térmica	20
1.7. Radiación	23
1.8. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación solar en un cuerpo	28
1.9. El efecto invernadero	30
1.10. Noción del balance energético	32
1.11. Modificaciones del balance energético en el suelo	36
 CAPITULO II. ELEMENTOS CLIMÁTICOS EXTERNOS DE LOS INVERNADEROS.	
2.1. Temperatura	38
2.2. Viento	43
2.3. Humedad	47
2.4. Condensación	50
2.5. Nubes	51
2.6. Precipitación	52
 CAPITULO III. MATERIALES DE RECUBRIMIENTO.	
3.1. Fundamentos	53

3.2. Cristal	54
3.3. Materiales Plásticos	56
3.4. Polietileno	58
3.5. Polimetil Metacrilato	59
3.6. Resina Poliéster	60
3.7. Cloruro de polivinilo	60
3.8. Cloruro de polivinilo en planchas rígidas	63
3.9. Fibras de vidrio	63
3.10. Foselectividad específica de los materiales de recubrimiento	64
3.11. Transmisión de la Luz	68
3.12. Esquema de la estructura	69

CAPITULO IV. FACTORES CLIMATICOS INTERNOS DE LOS INVERNADEROS.

4.1. Fundamentos	70
4.2. Temperatura en el invernadero	71
4.3. La Luz	87
4.4. La humedad	89
4.5. El anhídrido carbónico	92
4.6. El oxígeno	93

CAPITULO V. PARTE EXPERIMENTAL.

5.1. Consideraciones para el Diseño de invernaderos	94
5.2. Construcción de dos invernaderos	97
5.3. Instrumentos y equipos utilizados	100
5.4. Evaluación experimental climatológico	104
5.4.1. Elementos climáticos externos	105
5.4.2. Elementos climáticos internos	106
5.5. Evaluación experimental de los datos obtenido	107

5.6. Cálculo de las necesidades térmicas	108
5.7. Datos y curvas de los parámetros meteorológicos de los invernaderos.	119
5.8. Interpretación de los datos experimentales	140
5.9. Resultados	143

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

6.1. Conclusiones	146
6.2. Sugerencias	148
6.3. Recomendaciones	150
Apéndice A	151
Apéndice B	154
Referencias bibliográficas	

RESUMEN

A vuestra consideración someto el presente trabajo de tesis intitulado "EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN INVERNADERO ENTERRADO PARA ÉPOCAS DE HELADA", para optar al título de ESPECIALISTA EN ENERGÍA SOLAR.

Conocer el comportamiento térmico de los invernaderos es muy importante para cultivar plantas proyectado a conseguir la precocidad de la cosecha, el aumento de la producción y la calidad del producto capaz de competir en el mercado. Para ello se considera las condiciones meteorológicas externas como internas.

El presente trabajo permite conocer la aplicación de la conversión fototérmica en los invernaderos. Para su estudio se estructura en los capítulos siguientes. Es así que en el capítulo I, se exponen conceptos básicos de la energía solar.

En el Capítulo II, se analizan los parámetros meteorológicos externos, las cuales están ligadas a las condiciones climáticas de la zona como la intensidad de la radiación solar, temperatura, humedad relativa, etc. estos factores son importantes en la climatización de los invernaderos.

En el Capítulo III, trata de los diferentes materiales de recubrimiento utilizados en los invernaderos; la característica que más nos interesa es su transparencia. Si ésta es buena se consiguen condiciones ambientales favorables para el desarrollo y producción de especies vegetales cultivadas.

Capítulo IV, se refiere a factores climáticos internos. Estos factores climáticos tienen gran importancia en el funcionamiento óptimo de los fenómenos biofisiológicos de los vegetales, que están relacionados íntimamente entre sí y actuando sobre el desarrollo vegetativo.

En el Capítulo V, se hace evaluación térmica de los invernaderos considerando el análisis de los datos meteorológicos tanto externos como internos, que influyen directamente en las necesidades térmicas y el crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas.

Finalmente el Capítulo VI, concluye y recomienda sobre el trabajo de investigación.

Como sabemos de que este pequeño aporte basado precisamente en la evaluación térmica de un invernadero enterrado para épocas de helada; consideramos que adolece de errores, los cuales son nuestras y quizá incompleta por eso de hecho es nuestra tarea permanente de proseguir analizando e investigando en este campo maravilloso de la física, para el desarrollo de la ciencia y la tecnología.

Con el eslogan ¡Energía solar sí, gracias!

Lima, Agosto del 2000.

INTRODUCCIÓN

En épocas de helada las plantas no resisten a temperaturas bajas; consecuencia de ello, productos alimenticios frescos en el mercado son costosos, por ello es necesario ver la manera de solucionar esta situación problemática. Sin embargo muchos plantean cultivos en invernaderos, sin lograr los objetivos esperados.

Los invernaderos planteados para el cultivo de productos alimenticios de primera necesidad no responden adecuadamente a las expectativas de la época, en consecuencia es necesario buscar otros modelos como los "invernaderos enterrados"

En épocas de helada se suele cultivar plantas dentro de los invernaderos como las realizadas por instituciones no gubernamentales dirigidos por profesionales de diferentes campos del saber humano, en diferentes lugares del país y del extranjero, no pudiendo lograr los objetivos esperados.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento térmico de un invernadero enterrado para épocas de helada, con el cual es posible adecuar el confort térmico para el crecimiento óptimo de las plantas.

~~El trabajo de tesis se ha diseñado, constituido y evaluado en el distrito~~

de San Sebastián, del departamento de Cusco a 3 335 m.s.n.m.

La tesis desarrollada "EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN INVERNADERO ENTERRADO PARA EPOCAS DE HELADA" pongo a disposición de los señores interesados.

CAPITULO I

RADIACION SOLAR

1.1. PRELIMINARES

El término "radiación" se aplica generalmente a todas las clases de procesos que transmiten energía por medio de ondas electromagnéticas. La energía es lo que hace que las cosas sucedan; se trata de una magnitud discreta y que permanece constante en las transformaciones de la naturaleza, (la energía es una magnitud física y también económica).

Hoy en día, como resultado del acelerado desarrollo industrial y socio económico, uno de los problemas de mayor trascendencia, y que ha afectado a las economías nacionales, es la problemática que presentan los energéticos. La limitación de los recursos petrolíferos, principal fuente de hidrocarburos y su encarecimiento, permiten prever que en países en vías de desarrollo la posibilidad de ascender a niveles de vida más altos estará cada vez más condicionada. Lamentablemente, ni siquiera la estimación más optimista de reservas adicionales de combustibles puede o debe justificar un continuado consumo acelerado.

La energía solar es segura, está libre de la contaminación, no requiere transporte, no tienen productos de desecho que deban eliminarse,

y con ella han prosperado todos los seres vivos desde su aparición en la tierra. Todos los días nuestro planeta recibe del sol un caudal de energía del que aprovechamos una fracción varios miles de veces menor que el total.

La utilización de la energía solar para diversos fines prácticos no es, por cierto, una idea reciente. El sol figuró, naturalmente, entre los primeros intentos del hombre por explorar el mundo que lo rodeaba. Era tan obvia la dependencia del hombre respecto al sol, que sus primeras religiones y culturas se formaron alrededor de este cuerpo celeste.

El sol ha sido al mismo tiempo, una bendición y un desafío para experimentar y conocer las características y propiedades de la energía solar.

A partir de 1950 cuando las aplicaciones de la energía solar comenzaron tímidamente a desarrollarse. Al mismo tiempo se realizaron investigaciones sobre el almacenamiento de la energía por las plantas. Posteriormente se realizaron conferencias, simposiums sobre la utilización de la energía solar.

La "crisis de la energía" (octubre 1973) ha relanzado numerosos trabajos de investigación en heliotécnica. Tenemos la esperanza de que entre la multitud de los ensayos realizados y de la abundancia de los estudios teóricos emprendidos surgirán algunos sistemas fiables, poco costosos y de buen rendimiento, capaces de competir económicamente con las máquinas existentes que utilizan energías clásicas. Por eso a volver a

inventar la rueda, que es un riesgo periódico al que está sometida la ciencia, y nada lo demuestra mejor que el redescubrimiento periódico del uso de la energía solar.

1.2. CONSTITUCION FÍSICA DEL SOL

El objeto es aprovechar la energía solar incidente sobre la superficie de la tierra, por lo que es necesario y conveniente examinar la naturaleza y las características de ésta energía incidente.

El sol visto desde la tierra es un disco brillante, cuya masa aproximadamente es de 334000 veces mayor que de la tierra. Para un observador desde la tierra, el sol manifiesta un giro alrededor de su eje de una vez cada cuatro semanas. Por otra parte, esta esfera de materia gaseosa inmensamente caliente, tiene 1391000 Km de diámetro cuya distancia media a la tierra es de 149450000 Km. Debido a la forma elíptica de la órbita terrestre la distancia mínima corresponde hacia el 15 de enero y la máxima a finales de junio. Las distancias en el máximo (apogeo) y en el mínimo (perigeo) discrepan 1/60 por defecto o por exceso del valor medio (órbita casi circular). El diámetro angular varía de 31' 31" a 32' 33"; este valor se acostumbra a aproximar a 32' (**). ver fig. 1.

* Peierre Baratcaval y Jean Pierre Batellier, LA ENERGÍA SOLAR EN LA EDIFICACIÓN. Edit. Tecnicos Asociados S.A., 1978, Pág.27

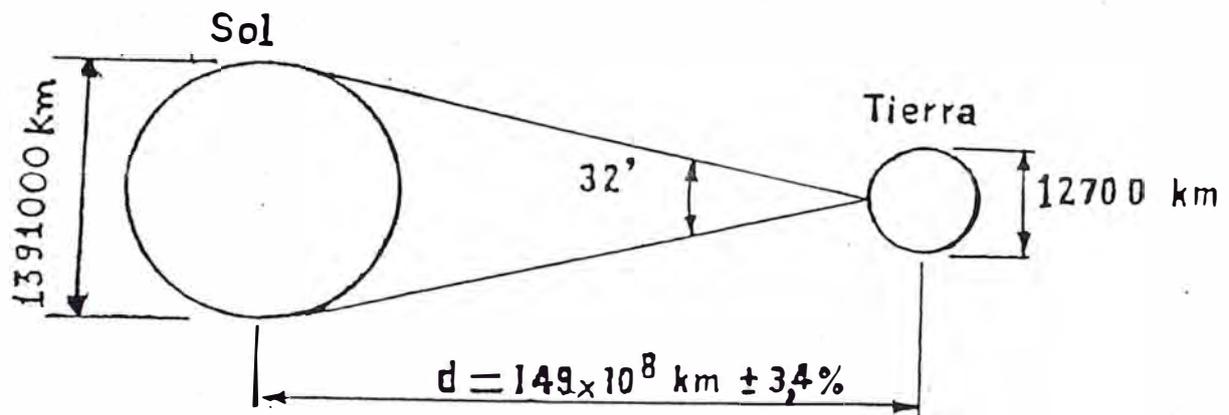


Fig.1. La distancia tierra - sol.

El sol no es una esfera homogénea; en él se pueden distinguir las siguientes regiones:

a. El interior.

Donde se genera la energía por reacciones term nucleares y que es inaccesible a las investigaciones, pues toda la radiación emitida en esta región es totalmente absorbida por las capas exteriores. La temperatura es de varios millones de grados y la presión es de un millar de atmósferas.

b. La Fotosfera.

Que es muy delgada (aproximadamente 300 km de espesor) y que es responsable de la casi totalidad de la radiación que recibimos. El orden de magnitud de la temperatura es de varios millares de grados, decreciendo muy rápidamente con el espesor de la capa hasta una temperatura llamada

"de superficie" del orden de 4500 K (el sol irradia globalmente como un cuerpo negro a 5800 K). La presión en la Fotosfera es de 1/100 atmósferas.

c. La Cromosfera y la Corona Solar.

Regiones de débil densidad donde la materia está muy diluida, hecho que explica que, aunque la temperatura allí sea muy elevada (un millón de grados Kelvin), la radiación emitida sea muy débil. La materia está muy agitada con formación de chorros en el seno de la cromosfera (espículas) o de grandes surtidores en la corona (protuberancias). La fotosfera no es perfectamente estable u homogénea, pues durante los periodos de actividad se observan regiones más frías (manchas) y regiones más calientes (fácultas) y, en buenas condiciones de observación, se comprueba que la superficie es granulosa. Los "gránulos" tienen un diámetro de 400 a 500 km y una duración de algunos minutos. En consecuencia, se puede definir un radio solar medio que conviene conocer a la vista de sus aplicaciones. En la fig 2 se distinguen las diferentes regiones que conforman la estrella solar

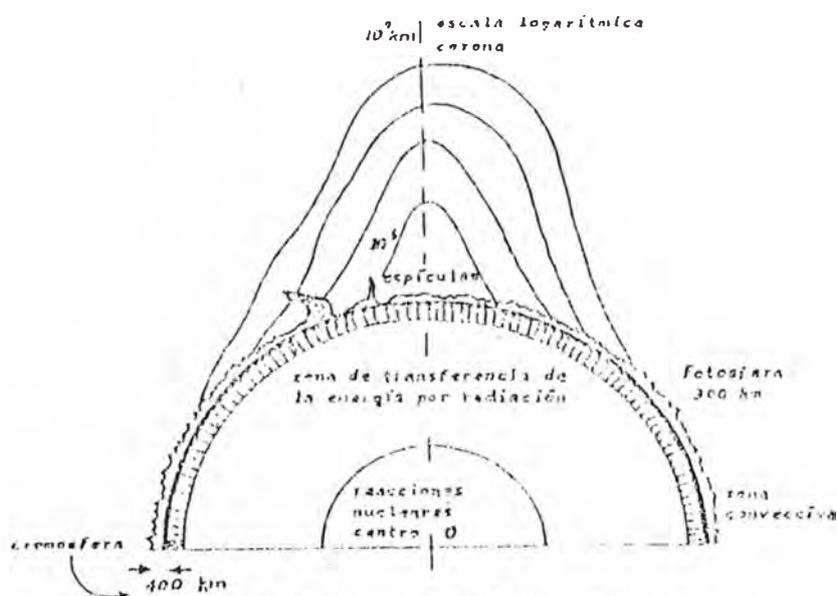
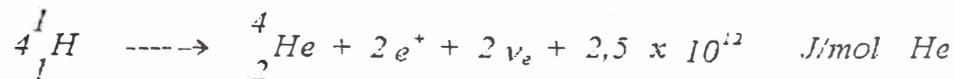


fig.2. Corte esquemático del sol.

La energía emitida por el sol procede de una serie de reacciones termonucleares y exotérmicas complicadas (llamado ciclo de Berthe) que se escribe globalmente en la forma:



A pesar de esta estructura tan compleja, será suficiente para aplicaciones experimentales, considerar que el sol se comporta como un cuerpo negro a una temperatura efectiva de 5762 K^(*).

La constante solar se define como la cantidad de energía por unidad de tiempo que recibe del sol una superficie de área unitaria perpendicular a la radiación en el espacio, y a la distancia media del sol a la tierra (que varía en 1,5 % alrededor de su valor medio). Cuyo valor medido directa e indirectamente es de 1353 W/m². Esta energía de la constante solar se encuentra distribuida en distintas longitudes de onda.

1.3. RADIACION SOLAR Y LA TEMPERATURA

La atmósfera no tiene propiedades específicas, sino las que le corresponden en razón de los elementos que la componen. Se dividen en tres capas: la troposfera, la estratosfera y la ionosfera.

* Bernard Roger y otros, RADIACION SOLAR, CONVERSION TERMICA Y APLICACIONES, Edit. Lavoisier, 1982. Pág. 17.

La troposfera comprende desde el suelo hasta una altura de 10 a 15 km. y donde la temperatura decrece regularmente en 6,5 °C por kilómetro hasta alcanzar -50 °C a -90 °C en la base de la capa inmediatamente superior que es la estratosfera, sobre la cual se encuentra la ionosfera. Hasta 80 km. la composición gaseosa permanece invariable: 78% N, 21% O₂, 0,9% Ar, 0,03% CO₂ y otros gases, como el ozono se encuentra a 18 km y el vapor de agua en las proximidades del suelo. La mitad de la masa gaseosa está comprendida entre 0 y 5 km a cuya altura la presión es la mitad de la que existe a nivel del mar y una fracción 9/10 de la atmósfera se encuentra por debajo del nivel de 15 km (100 milibares). En el seno de esta masa se encuentra polvo, aerosoles, nubes de gotitas de agua o de cristales de hielo (visibles en las fotografías tomadas por los satélites). A alturas muy elevadas se encuentran iones y moléculas dispersas, así como átomos de helio y de hidrógeno.

La radiación solar llega a la superficie terrestre después de haber sido difundida, difractada, absorbida refractada por gases de temperatura y densidad crecientes.

Por otra parte es necesario analizar el caso del ozono y el vapor de agua. El ozono se origina de las reacciones $O_2 \xrightarrow{\text{radiación}} O + O$ y $O + O_2 \xrightarrow{\text{radiación}} O_3$, que se producen bajo la acción de las radiaciones ultravioletas en el rango del espectro lejano y medio ^(*), de descargas.

* Bernard Roger y otros, LA RADIACION SOLAR, CONVERSION TERMICA Y APLICACIONES, Edit. Lavoisier, 1982 Pág. 42

eléctricas y de radiactividad. Una propiedad importante del ozono es que absorbe casi totalmente las radiaciones ultravioletas y se comporta así como una pantalla filtrante dejando pasar aquellas radiaciones solares necesarias para perpetuar la vida deteniendo las que ejercen una acción nociva sobre los microorganismos y los vegetales. Su concentración máxima se sitúa hacia los 20 km de altura.

El vapor de agua absorbe fuertemente la radiación solar en las bandas infrarrojas, y se encuentra concentrada especialmente en la proximidad del suelo. La capa 0 - 5 km contiene el 95% del vapor que existe en toda la atmósfera y en la capa 0 - 2 km contienen ya el 50%. Por encima de los 20 km el contenido del vapor de agua en el aire es extremadamente mínima, aunque todavía existen nubes, pudiéndose admitir que su desaparición es total por encima de los 70 km.

1.4. RADIACIÓN SOLAR EN LAS PROXIMIDADES DEL SUELO

La radiación solar que llega al suelo está formada por radiación directa y radiación difusa, cuyo conjunto forma la radiación global.

La radiación solar difusa procede de toda la bóveda celeste y no tiene ninguna orientación privilegiada.

La radiación solar que incide en el suelo no es enteramente absorbida; porque dependen del color y la estructura del material. La fracción

de la radiación absorbida varia con la longitud de onda.

Así en una pradera esta fracción es de un 94% si la longitud de onda es mayor que 0,55 mm. y 78% si la longitud de onda es menor que 0,55 mm.; al ser más absorbida el rojo que el azul o el amarillo, aparece con color verde.

En el espectro solar se encuentran radiaciones visibles particularmente importantes para la actividad de los hombres. El ojo humano percibe las radiaciones de diferentes colores según su longitud de onda mientras se encuentra en el visible.

La radiación reflejada, difundida es devuelta a la atmósfera donde se difunde de nuevo parcialmente hacia el suelo.

1.5. RADIACIÓN SOBRE CAMPOS NATURALES

El cuerpo negro es aquel que absorbe perfectamente todas las radiaciones cualquiera que sea su longitud de onda y emite la mayor cantidad de energía mientras que otros materiales pueden reflejar todo el flujo incidente sin emitir energía. Una imagen aproximada del cuerpo negro es la de un recinto esférico hueco, provisto de un pequeño orificio, capaz de absorber toda la radiación que en él penetra. El cuerpo negro, al ser perfectamente absorbente es totalmente emisor. Su emitancia energética (flujo de energía por unidad de superficie para el conjunto de espectro) es

han utilizado los resultados obtenidos con la teoría electromagnética para predecir las propiedades radiantes de la materia, en tanto que se han utilizado los resultados de la teoría cuántica para predecir la cantidad de energía radiante emitida por un cuerpo debido a su temperatura. La fig. 3 ilustra el espectro electromagnético y las subdivisiones típicas en diferentes tipos de radiación. Aunque teóricamente el rango de la radiación térmica se extiende desde longitudes de onda cero hasta infinito, en la práctica la mayor porción de la energía de la radiación térmica cubre el rango de 0,1 a 100 μm .

Puede darse una explicación cualitativa del mecanismo por el que se transmite la energía radiante, en términos de la teoría ondulatoria. En el proceso de emisión de radiación un cuerpo convierte una parte de su energía interna en ondas electromagnéticas, que constituyen una forma de energía. Estas ondas se mueven a través del espacio hasta que chocan con otro cuerpo, donde una parte de su energía es absorbida y convertida en energía interna. La emisión de radiación ocasiona un decremento en la energía interna del cuerpo emisor, y a menos que el calor se genere dentro del cuerpo, como por ejemplo, en el sol o que lo reciba de otra fuente, su temperatura decrecerá. Su temperatura permanecerá constante únicamente cuando la razón con que genere o reciba calor sea igual a la razón con que se emite energía.

Todos los cuerpos emiten radiación continuamente a la que estamos expuestos en todo momento. Sin embargo, nuestros sentidos registran la

radiación únicamente si sus longitudes de onda están dentro de la región del espectro entre 0,1 y 100 μm . La radiación con la longitud de onda en este dominio ocasiona calentamiento apreciable del cuerpo receptor, y dentro de la angosta banda de 0,38 a 0,78 μm . También afecta al nervio óptico con la luz.

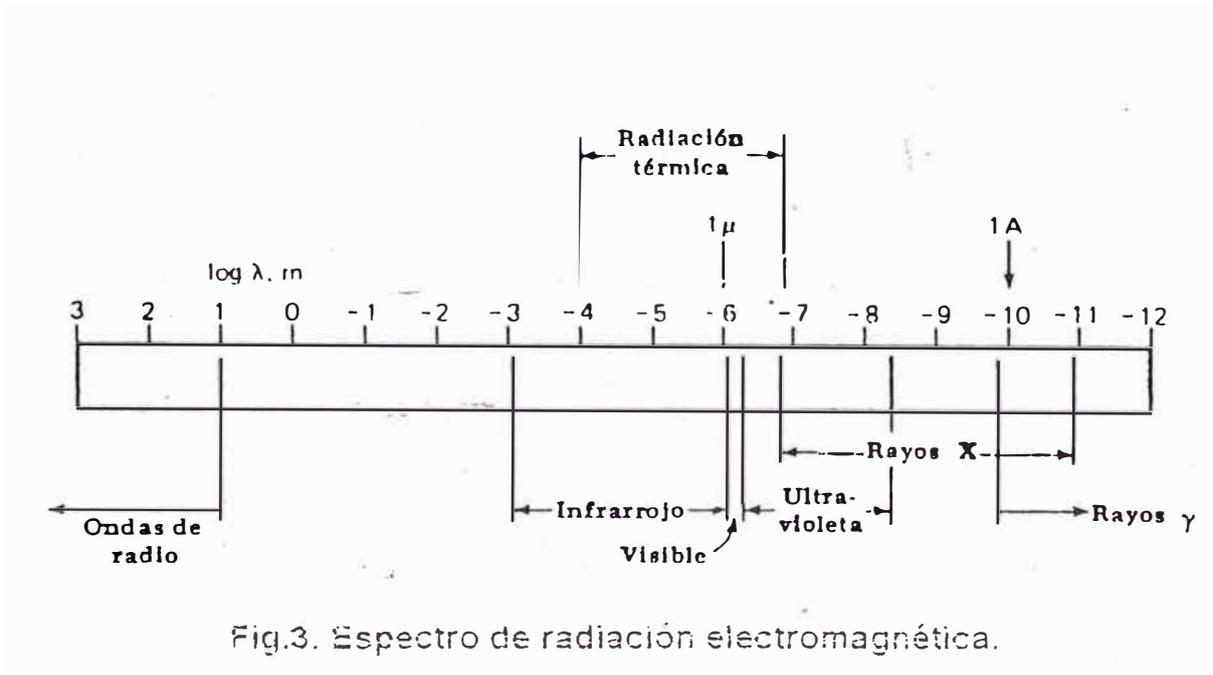


Fig.3. Espectro de radiación electromagnética.

Como se ha dicho, la radiación térmica, es, la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Para propósitos prácticos, esta radiación es de importancia en los cálculos de transferencia de calor que está limitada a longitudes de onda entre 0,1 y 100 μm . La cantidad total de radiación emitida por un cuerpo por unidad de área y de tiempo, se llama poder de emisión total, que depende de la temperatura y de las características de la superficie del cuerpo. Para cualquier temperatura particular la cantidad de radiación emitida por unidad de longitud de onda es diferente en las distintas longitudes de onda.

1.7. RADIACION ELECTROMAGNÉTICA

La radiación electromagnética que nos llega del sol, emanada principalmente de la fotosfera, cuyas características están determinadas por las propiedades ópticas y térmicas de la superficie solar. Esta superficie es mantenida aproximadamente a una temperatura de 6000 K. Debido a esta alta temperatura la superficie del sol resplandece hacia el espacio la radiación electromagnética.

Esta radiación electromagnética está compuesta de ondas de vectores de campo eléctrico y magnético ambas oscilantes y transversales a la dirección de propagación de la onda; con una amplia banda de frecuencia que abarca desde 1 hasta 10^{35} Hz.

Para todos los tipos de radiaciones electromagnéticas, la velocidad de propagación de las ondas en el vacío es la misma y se toma igual a 3×10^8 m/s; este valor es de la luz. Lo que las diferencia una de otra es su longitud de onda (o su frecuencia).

La longitud de onda y su frecuencia están relacionadas por la ecuación

$$\lambda \nu = c$$

donde: -

λ = longitud de onda.

ν = frecuencia

c = velocidad de la luz

La energía de una onda electromagnética es proporcional a su frecuencia, es decir

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

donde:

E = energía de la onda electromagnética

ν = frecuencia

h = constante de Planck.

Analizando la ecuación de la energía de una onda electromagnética se observa que cuanto mayor es la frecuencia o menor su longitud de onda, mayor es su energía. La distribución de ondas electromagnéticas según su frecuencia o longitud de onda se denomina el "espectro electromagnético".

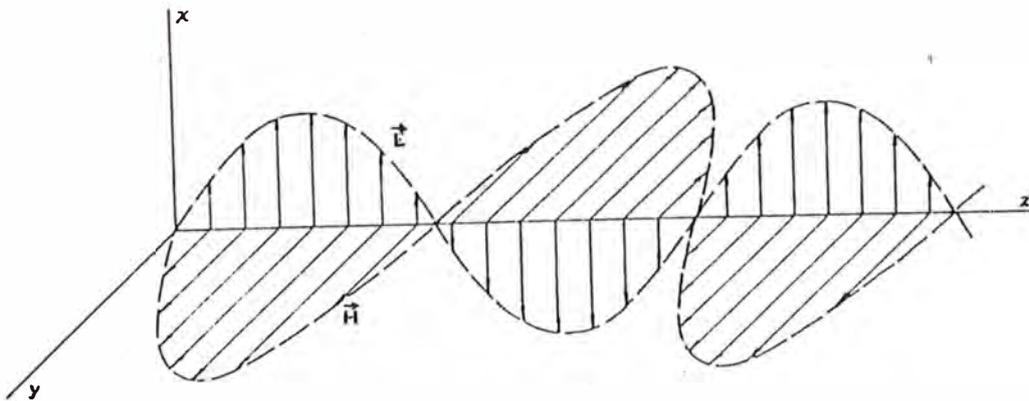


Fig.4. Onda electromagnética; \vec{E} es el vector de Campo Eléctrico paralelo al plano XZ; \vec{H} es el vector del Campo Magnético paralelo al plano YZ; y Z es la dirección de propagación. λ es la longitud de onda.

El espectro de las oscilaciones electromagnéticas es un conjunto de espectros de diferentes longitudes de onda; tales como las radiaciones cósmicas, gama, X, ultravioleta, visible, infrarroja y de ondas radioeléctricas.

Del espectro total de las oscilaciones electromagnéticas se destaca el óptico al que pertenecen oscilaciones con longitudes de onda de 0,001 a 26000 ηm .

En el CUADRO 1 se muestra la disposición de la banda óptica en el espectro total de las oscilaciones electromagnéticas, que está representada por los sectores de los rayos X y las radiaciones ultravioleta, visible e infrarroja.

Las oscilaciones electromagnéticas emitidas por cualquier cuerpo físico en la banda indicada de longitud de onda constituyen la radiación óptica, o bien, la luz.

CUADRO No.1 (*) ESPECTRO DE RADIACION ELECTROMAGNÉTICA.

<u>LONGITUD DE ONDA (nm)</u>	<u>RADIACION</u>	
0,00005	Cósmica	
0,001 - 0,14	Gama (Uranio-Radio)	} Optica
1 - 15	X	
15 - 280	Ultravioleta corta	
280 - 315	Ultravioleta media	
315 - 380	Ultravioleta larga	
380 - 440	Violeta	
440 - 490	Azul	
450 - 565	Verde	
565 - 595	Amarillo	
595 - 620	Anaranjado	
620 - 700	Roja corta	
700 - 760	Roja larga	
760 - 1000	Infrarroja corta	
1000 - 2000	Infrarroja media	
2000 - 26000	Infrarroja larga	
26000 - 100000	Onda radio y electricidad	

* Marafiana Gonzales Antonio, LOS INVERNADEROS Y LA CRISIS ENERGETICA, Edit. Madrid, 1980, Pág. 39

Se debe señalar que los límites de la radiación óptica son convencionales. La radiación ultravioleta se sobrecubre por la de los rayos X, la infrarroja por la radiación de ondas de radio. Algunos osciladores aseguran tanto la radiación infrarroja, como la radioeléctrica.

Si la radiación se produce sólo con una frecuencia (de la misma longitud de onda), ésta se llama radiación monocromática.

La fuente de radiación en la banda óptica se producen en los cuerpos calentados y gases o vapores de los metales, al pasar por ellos la corriente eléctrica, y máseres ópticos (láseres).

El espectro de radiación, o, como suelen denominarlo, la composición espectral de la radiación es la distribución de la potencia de radiación por las frecuencias de las oscilaciones o por las longitudes de onda. Esta distribución en cierto intervalo de longitud de onda puede ser continua o de rayas.

Las fuentes del espectro continuo se realizan generalmente en los sólidos y líquidos calentados; del espectro de rayas, los gases o vapores incandescentes, así como los láseres.

Para la banda visible de la radiación óptica, que se caracteriza por

longitudes de onda de 380 a 760 $\mu\text{m.}$, el físico alemán Fraunhofer (1787 - 1826), investigando la radiación del sol, realizó la medición de las longitudes de onda, relacionadas con ciertas líneas del espectro solar. Estas líneas se reproducen por espectros de algunos elementos químicos que en forma de gas o vapor rellenan las ampollas de las lámparas de descarga en arco, de alta frecuencia o luminiscente.

1.8. ABSORCIÓN, REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN UN CUERPO

Cuando la radiación incide sobre un cuerpo, es parcialmente absorbida, parcialmente reflejada y parcialmente transmitida, como se muestra en la Fig. 5.

Según la figura, parte de la radiación incidente, G , es reflejada, G_p ; parte es absorbida, G_a y parte es transmitida, G_t . Se define la reflectividad por la siguiente relación $\rho = G_p/G$, la absorptividad por $\alpha = G_a/G$ y la transmisividad por $\tau = G_t/G$, siendo la radiación incidente igual a:

$$G = \rho G + \tau G + \alpha G$$

entonces se obtiene la siguiente relación

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (*)$$

donde:

α : absorptividad, esto es, la fracción de la radiación incidente absorbida por el cuerpo.

ρ : reflexividad, esto es, la fracción de la radiación incidente reflejada por la superficie del cuerpo.

: transmisividad, esto es, la fracción de la radiación incidente transmitida a través del cuerpo.

La mayoría de los materiales sólidos que se encuentran en la práctica, absorben prácticamente toda la radiación en una capa superficial muy delgada, menor de $1,0 \times 10^{-3}$ m de profundidad.

Los cuerpos que no transmiten radiación en un rango de longitud de onda, se llaman cuerpos opacos y para éstos la ecuación (*) se reduce a:

$$\alpha + \rho = 1$$

La reflexión de la radiación puede ser regular o difusa. Si una superficie está altamente pulida y lisa, la reflexión de la radiación será semejante a la de un haz de luz, es decir, el ángulo de incidencia será igual al ángulo de reflexión, A ésta se le llama reflexión regular. Muchos materiales usados en la práctica industrial son "rugosos", debido a que sus superficies tienen asperezas que son grandes comparadas con una longitud de onda. La reflexión de la radiación a partir de una superficie rugosa, ocurre prácticamente en todas direcciones y se llama reflexión difusa. Una superficie de reflexión difusa puede definirse como aquella que refleja con la misma distribución espacial de energía que un cuerpo negro. Para muchas

situaciones prácticas la reflexión puede tratarse como si fuera completamente difusa.

Las magnitudes relativas α , ρ y τ dependen no únicamente del material, su espesor y el acabado de su superficie, sino también de la longitud de onda de la radiación.

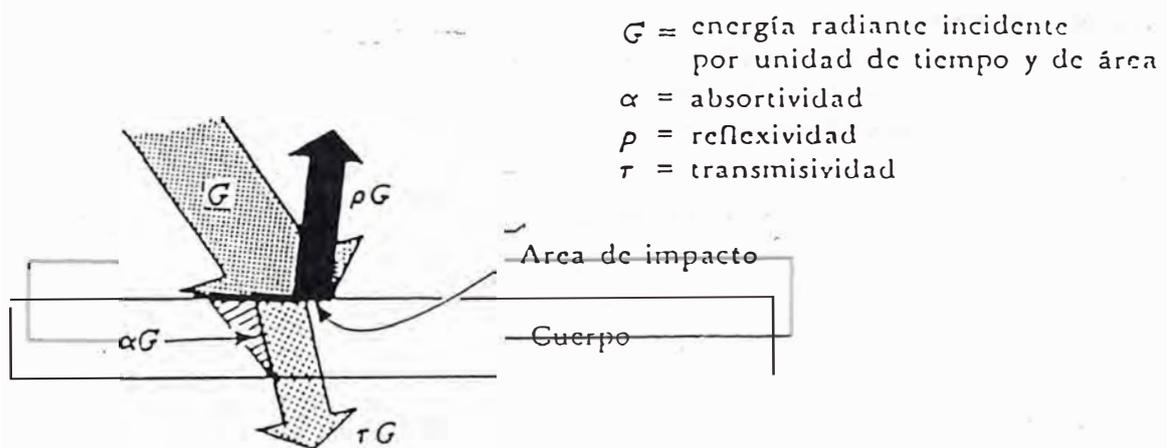


Fig. 5. Energía radiante que choca sobre una superficie.

1.9. EL EFECTO INVERNADERO

Es un efecto físico conocido también como "trampa de calor" que se produce después que un flujo radiante de onda corta (la radiación solar por

ejemplo) atravesó una placa transparente (vidrio, plástico) para incidir sobre otra superficie que lo absorbe y transforma en energía térmica producto de lo cual se genera otro flujo radiante emitido por este segundo cuerpo, en dirección contraria al primero. Esta emisión es del tipo de "luz infrarroja invisible", por tanto es de onda larga y por esta razón no podrá atravesar la placa transparente o lo hará una pequeña fracción de ella. De esta manera es "atrapada" y rereflejada hacia el cuerpo absorbente que la absorberá y transformará en energía térmica aprovechándose así una fracción de energía que, de otra forma, se perdería al espacio.

El clima de la tierra es generada por muchos factores. La fuerza fundamental es la energía radiante del sol y la reflexión o absorción y reirradiación por las moléculas de la atmósfera, las nubes y la superficie de la tierra misma. Una porción de esta energía reirradiada abandona la atmósfera. Después de un largo término el equilibrio se establece entre la energía solar que entra a la atmósfera y la energía que la abandona. El resultado de este proceso natural es el "efecto invernadero", un calentamiento de la atmósfera y de la superficie terrestre.

El vapor de agua en forma de nubes y el dióxido de carbono son los mayores causantes de este efecto, siendo más pequeñas, pero significativas, las contribuciones del metano (CH_4), del óxido nitroso (NO_2) y del ozono

Las actividades humanas durante la última centuria han provocado un significativo aumento en la concentración de CO_2 , CH_4 y NO_2 , así como la introducción de clorofluorocarbonos (CFCI). A medida que la concentración aumenta, más radiación será atrapada, para luego calentar más la superficie y la atmósfera de la tierra. Esto conduce a una intensificación del efecto invernadero y a un clima más cálido.^(*)

También, es muy importante la investigación sobre las implicaciones ambientales del efecto invernadero. Se requiere identificar las formas de cambio ambiental y las posibles áreas vulnerables. Deben desarrollarse políticas para combatir estos peligros y para llevar al mínimo la emisión de los gases provenientes del invernadero sin comprometer el suministro de energía.

1.10. NOCIÓN DEL BALANCE ENERGÉTICO

En las secciones anteriores hemos intentado clasificar los diferentes intercambios de energía que se producen entre el suelo, la atmósfera y la exósfera. Los diferentes mecanismos se han estudiado por separado, para un análisis más cómodo, pero es evidente que estos mecanismos se combinan entre sí para formar los elementos de un balance variable en el tiempo y en el espacio.

* Seminario, ENERGIAS NO CONVENCIONALES EN EL MEDIO RURAL, Lima, 1992. Pag. 61

En el transcurso del día la radiación solar directa se suma a la difusa y a la radiación propia de la atmósfera para constituir la parte positiva del balance variable en el tiempo y en el espacio. Por el contrario, la energía que se refleja en el suelo y en las nubes, así como las pérdidas por radiación terrestre o telúrica son los elementos negativos. El balance radiativo que es la suma algebraica de estas diferentes magnitudes es positivo hasta el comienzo de la tarde y el suelo se calienta. La temperatura del aire próximo al suelo continúa elevándose un poco después, la que a la radiación solar se suma el efecto (ahora positivo) de la radiación terrestre. Durante la noche la pérdida de calor debido a la radiación terrestre no puede compensarse totalmente con la radiación de retrodifusión atmosférica. El saldo del balance será negativo y el enfriamiento será tanto más marcado, cuanto más seca sea la atmósfera. En efecto, las nubes disminuyen la pérdida al aportar su propia radiación (de ahí la idea de nieblas artificiales para combatir las heladas). Además, en medio húmedo la evaporación es más débil que en medio seco, por tanto, se reduce la transferencia de energía entre el suelo y la atmósfera. Este balance es muy imperfecto y demasiado global. Las capas bajas de la atmósfera que contiene la casi totalidad del vapor de agua son relativamente opacas a las radiaciones infrarrojas emitidas por la tierra; lo mismo ocurre con el gas carbónico. Así resulta, como ya hemos indicado, que la atmósfera juega el papel de un regulador térmico. Este efecto de regulación no es más que el efecto invernadero y sin el cual la temperatura del suelo sería muy inferior a 0 °C. El balance varía considerablemente según la latitud y la época. También es preciso tener en cuenta los

intercambios de energía por conducción y convección, así como el ciclo de condensación - evaporación del vapor de agua. La fig. 6 representa los intercambios radiactivos entre el suelo y la atmósfera.

Si se admite que en el límite de la atmósfera la tierra recibe del sol 8,6 kWh/m² día representados por 100%, el suelo recibe 47% de los cuales 31% han atravesado directamente la atmósfera y 16% han sido difundidos por ésta hacia abajo.

La reflexión sobre las diferentes capas atmosféricas elimina un 23%, la reflexión en el suelo es 7%, la difusión por los aerosoles es 6%, lo que significa una pérdida de $23 + 7 + 6 = 36\%$; la absorción por el aire representa 17 ($47 + 36 + 17 = 100\%$). La retrodifusión de la atmósfera hacia el suelo representa 78 y, por tanto, la tierra gana $47 + 78 = 125\%$; por otra parte, pierde 98 por radiación infrarroja, 27 en el ciclo de agua y 5 por conducción y convección de aire, o sea, $98 + 22 + 5 = 125\%$. Igualmente, se puede establecer el balance de la atmósfera; ésta absorbe 91. Procedente de la radiación terrestre; 17 por sus bandas de absorción propias, 22 por el ciclo de agua y 5 por convección ($17 + 91 + 22 + 5 = 135\%$). La atmósfera pierde 78 que devuelve a la tierra y 57 por radiación al espacio, o sea $78 + 57 = 135\%$ (ver fig. 6) (*).

* Bernard Roger y otros, LA RADIACION SOLAR, CO. VERSIÓN TERMICA Y APLICACIONES, Edit. Lavoisier, 1982, Pág. 59.

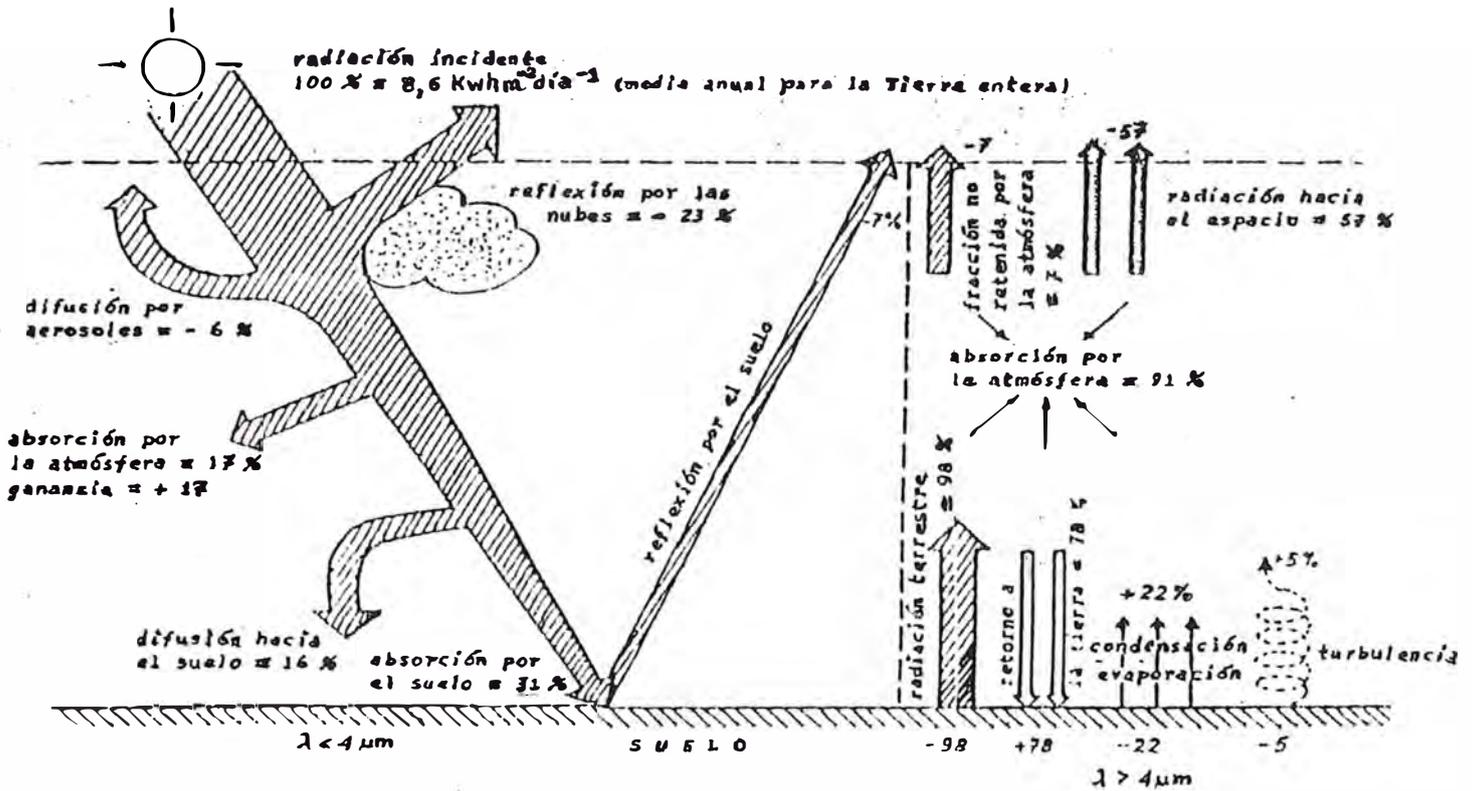


Fig. 6 Balances de radiación solar y terrestre.

Anteriormente hemos indicado cual era la variación diurna del balance radiactivo cuando el cielo está claro. En tiempo nuboso este balance se atenúa gradualmente; hay menos superavit durante el día y menos déficit durante la noche. Por otra parte el valor del balance radiactivo está ligado a las propiedades físicas de la superficie terrestre (albedo, emisividad, estado higrométrico, conductividad térmica) y a las variaciones estacionales.

El balance radiactivo global del sistema tierra-atmósfera:

- Energía solar absorbida,
- Radiación infrarroja emitida por este sistema hacia el espacio.
- Balance radiactivo.

En conclusión, puede decirse que el establecimiento de un balance térmico completo es muy difícil de realizar; sin embargo, sería de la mayor importancia para una buena comprensión de ciertos mecanismos meteorológicos.

1.11 MODIFICACION DEL BALANCE ENERGÉTICO EN EL SUELO

Esta modificación es esencialmente posible por efecto de invernadero o mediante la utilización de estructuras antirradiativas.

Una vidriera sólo disminuye débilmente la radiación incidente, 10% en valor medio hasta 60° de incidencia, pero permanece totalmente opaca a la radiación terrestre; absorbe íntegramente la emisión propia del receptor y remite la mitad hacia la atmósfera y la otra mitad hacia el suelo.

La temperatura de equilibrio de una superficie negra expuesta a una radiación de 900 W/m^2 es del orden de 80 °C si la convección es débil. La instalación de un vidrio reduce la potencia inicial a 800 W/m^2 y la temperatura de equilibrio es de 135 °C , con dos vidrios se pueden alcanzar los 160 °C (vidrio superior 60 °C , vidrio inferior 120 °C , separación óptima $2,5 \text{ cm.}$) (*).

* Bernard Roger y otros, LA RADIACION SOLAR, CO. VERSION TERMICA Y APLICACIONES, Edit. Lavoisier, 1982, Pág.60

El efecto invernadero cuyo principio se ha expuesto anteriormente, permite reducir las pérdidas energéticas nocturnas en horticultura.

CAPITULO II

ELEMENTOS CLIMÁTICOS EXTERNOS DE LOS INVERNADEROS

2.1. TEMPERATURA

La radiación solar que llega a la superficie de la tierra se transformá en calor. El calor es un estado latente de la energía de un cuerpo, que se manifiesta por un movimiento vibratorio molecular que se acelera cuando aumenta la temperatura y se desacelera cuando ésta disminuye.

El valor o índice de ese estado latente se llama temperatura, o sea el factor numérico que sirve para especificar la cantidad de calor o energía radiante de un cuerpo sólido, líquido o gaseoso.

Las variaciones diurnas de temperatura dependen del estado del cielo puesto que en días despejados gran cantidad de radiación penetra a la atmósfera. Produciéndose una enorme variación en la curva de temperaturas diaria lo que no pasa en días nublados. También, lo mismo se presenta durante las estaciones; los días despejados del verano son más calientes porque se recibe más energía solar y un día despejado en el invierno es mas fresco que un día nublado pues durante los períodos nocturnos más largos, se escapa la radiación con mayor facilidad a través de una atmósfera despejada.

Conocer los datos meteorológicos locales, sobre todo la temperatura, es de necesidad urgente para el diseño y construcción de invernaderos que se adecuen para cada especie de plantas. Si se presentan los riesgos de helada con mayor o menor frecuencia de intensidades; que están unidas a los altibajos bruscos de temperatura (en invierno y primavera) juntamente con el resto de los factores climáticos, determinan los cultivos a realizar así como los cultivares adecuados, el tipo de abrigos a utilizar, las fechas de siembra, plantación y la protección sanitaria más eficaz. Para lo cual se consideran:

a. **Variación de la temperatura**, la temperatura es uno de los elementos más importantes del tiempo, que ejerce gran influencia en la vida humana así como en los animales y plantas. Es pues, un elemento determinante de las condiciones de vida y productividad en las diversas regiones de la tierra. Asimismo, el conocimiento exacto de las variaciones de temperatura es fundamental para valorizar un clima desde el punto de vista agrícola, ganadero, etc.

b. **La variación diaria de la temperatura**, está representada por la curva que la temperatura traza en el curso de las 24 horas, y que oscila entre los puntos de máxima y mínima. En promedio, la temperatura más alta del día ocurre hacia las 13 horas o poco después. La mayor cantidad de energía se recibe cuando el sol está en el cenit, pero en una porción de la tarde, la tierra

y la capa de aire adyacente continúan recibiendo más energía radiante que la que pierden por irradiación y, por tanto, la temperatura continúa elevándose hasta que se establece un equilibrio entre la energía que se gana y la que se pierde lográndose así, en ese instante, la máxima temperatura. A partir de este momento la temperatura empieza a disminuir, primero, paulatinamente hasta que el sol desaparece bajo el horizonte y, luego rápidamente hasta las 20 ó 22 horas, para continuar disminuyendo otra vez, suavemente hasta el momento en que sale el sol, instante en que generalmente se produce la mínima temperatura y, luego comienza a calentar, reiniciándose el proceso. Todo esto en condiciones normales; sin embargo, pueden ocurrir fluctuaciones irregulares que alteren la marcha normal de la temperatura en su curso diario. La diferencia entre los valores máximo y mínimo de un mismo día, se define como amplitud térmica diaria.

La variación diaria de la temperatura depende del balance o equilibrio entre la radiación solar y la irradiación terrestre y de la presencia de algunos otros elementos o fenómenos meteorológicos, como la nubosidad, precipitación, evaporación, condensación, etc.

La cobertura vegetativa de la tierra afecta el valor de la amplitud de la temperatura atenuándola especialmente cuando ésta es más abundante como en los bosques y las selvas. En las costas de los continentes y durante el día debido a la presencia de la brisa marina, los valores máximos de temperatura se atenúan considerablemente mientras que de noche el

enfriamiento de la tierra sigue el mismo proceso con el que se presenta en el interior de los continentes.

Por otro lado la amplitud diaria de la temperatura varía con la altura. Aproximadamente a 300 m de altura, la amplitud es la mitad de la que prevalece en el suelo y a 1000 m apenas llega a 1 °C, cuyo efecto climatológico es, de poca consideración.

c.- Distribución de la temperatura, las áreas terrestres se calientan y se enfrían más rápidamente que las masas de agua, con el resultado de que las amplitudes anuales de temperatura son mayores en tierra que en el mar. Hay tres razones fundamentales para este contraste de temperatura.

1. El agua tiene movimientos horizontales y verticales con los cuales distribuye la energía absorbida por su masa, mientras que en tierra la energía es transmitida más lentamente hacia abajo por conducción. Una corriente oceánica que se mueve hacia los polos calentará el aire que se desplaza sobre ella, de tal manera que la temperatura será más alta que las normales en dichas latitudes. Por el contrario si una corriente se mueve hacia el Ecuador producirá temperatura de aire más bajas. Un ejemplo típico es la corriente peruana que en su desplazamiento hacia el norte a lo largo de las costas occidentales de América del sur produce, debido al fenómeno de afloramiento, temperaturas más bajas que aquellas que le corresponden por su latitud.

2. El agua es transparente y deja penetrar la energía radiante a profundidades mucho mayores que la tierra que es opaca.

3. El calor específico del agua es mayor que el de la tierra por tanto una masa dada de agua requiere más energía para elevar un grado de temperatura que una masa igual de tierra seca. Consecuentemente, la misma cantidad de insolación producirá una temperatura mas alta en tierra que en el mar; o, inversamente al enfriarse el agua perderá una mayor cantidad de energía que la tierra para producir la misma disminución de temperatura.

El efecto general del contraste en el calentamiento de la tierra y del agua es producir inviernos más fríos y veranos más cálidos en el interior de los continentes que a lo largo de las costas y sobre los océanos.

El promedio de descenso de la temperatura es alrededor de 1 °C por cada 100 m de altura y se le llama "gradiente vertical de temperatura".

Este valor varía mucho de un día a otro según la región y el estado propio de la atmósfera, la época del año y la posición del sol. Cuando las observaciones demuestran que no hay cambio con la altura se dice que el gradiente es isotérmico.

Bajo ciertas condiciones la temperatura del aire aumenta en vez de disminuir con la altura. A este proceso se le llama inversión de temperatura.

Las inversiones pueden producirse de las maneras siguientes:

a. La irradiación de calor desde la superficie del suelo en noches despejadas y serenas originan un enfriamiento del suelo y de la capa de aire más baja. Este tipo de inversión por irradiación se desarrolla mucho mejor en superficies cubiertas de nieve.

b. El aire frío de las cimas de las montañas y laderas tiende a desplazarse hacia las partes más bajas de los valles, a causa de su mayor densidad, cuando un gradiente térmico invertido en las capas adyacentes.

c. Cuando se juntan dos masas de aire con diferentes características de temperatura el aire frío, como es más denso, tiende a incrustarse como una cuña debajo del aire cálido. La zona de contacto a lo largo de estas masas de aire, se llama frente y el gradiente invertido que resulta es una inversión frontal.

2.2. VIENTO

Se llama viento al movimiento aproximado horizontal del aire, motivado por la diferencia de presión atmosférica entre dos lugares. el viento se dirige del lugar de mayor presión hacia el de menor presión con variable intermitencia, es decir que no fluye con intensidad regular sino que lo hace

en ráfagas, de tal manera que su velocidad en un momento crece en tanto disminuye en otros.

Para describir el viento hay que determinar su dirección y su velocidad.

a. La dirección del viento se indica en el punto del horizonte de donde procede. Un viento que sopla de norte a sur es un viento norte. Generalmente, la dirección se expresa ya sea en términos de los puntos de la "rosa de los vientos" o en grados azimutales medidas desde el norte (0°), a través del Este (90°), Sur (180°) y Oeste (270°). El Norte está representado por 0° y 360° .

La dirección de donde viene el viento se determina por medio de veletas, grandes "mangas" y, que usualmente se instalan en postes a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo. También puede determinarse la dirección del viento observando el humo de las chimeneas o lanzando hacia arriba un puñado de paja o de polvo.

Asimismo, recordando la influencia del viento sobre la evaporación, si mojamos un dedo y lo colocamos verticalmente podremos notar con cierta aproximación la dirección del viento por la correspondiente sensación de enfriamiento.^(*)

* Palomares Casado Manuel, AGUA Y ATMOSFERA, Edit. Santillana S.A., 1969, Pág. 59

b. La velocidad del viento se suele determinar a través de la fuerza o presión que ejerce sobre los obstáculos que encuentra en su camino. Este es el fundamento de los anemómetros más simples, que miden los giros de unas cazoletas y placas metálicas orientadas perpendicularmente al viento.

Pero muchas veces es suficiente observar ciertos efectos corrientes de los vientos para poderlos definir con nombres bastante característicos y establecer sus órdenes aproximados de velocidades, como calma, ventolina, brisa, borrasca, huracán, etc.

En el caso que no se disponga de instrumentos para medir la velocidad del viento la observación se puede realizar estimando el efecto del viento sobre determinados objetos.

La velocidad del viento se expresa, frecuentemente, en m/s, km/h, millas/h o nudos.

c. Al estudiar la variación del viento hay que examinar tanto la variación diaria como la variación anual:

1. La velocidad del viento es comúnmente mayor en el día que en la noche. La máxima velocidad ocurre en las primeras horas de la tarde, y la mínima en las primeras horas de la mañana antes de la

salida del sol. Estas variaciones se deben a que durante el día la convección originada por el calentamiento del aire produce un intercambio de aire entre los niveles mas bajos y los más altos y una distribución vertical casi uniforme de la velocidad del viento. Durante la noche, el aire junto al suelo se enfría y siendo más pesado, trata de permanecer en los niveles más bajos, donde a causa del mayor efecto de fricción o rozamiento, resiste a ser desplazado por el aire superior en movimiento. En las regiones costeras, debido a la diferencia de temperatura y presión entre el mar y la tierra, se produce un cambio diario en la dirección del viento, es decir, da origen a las brisas marinas y terrestres.

2. Las observaciones de los vientos demuestran que el curso anual de la velocidad del viento es de otro génesis que el curso diario, por que no es un efecto de la influencia directa de la radiación solar sino del intercambio en gran escala de la circulación general. La velocidad promedio es mayor en verano que en invierno. La razón de ello radica en la presencia de un gran contraste de temperatura y presión entre bajas y altas latitudes. La dirección predominante del viento cambia frecuentemente con las estaciones del año, que modifican la temperatura y presión entre los océanos y los continentes.

2.3. HUMEDAD

El vapor de agua es uno de los componentes más importantes de la atmósfera. A pesar de que participa con una cantidad variable, por sus cualidades ocupa una posición muy especial ya que proporciona las condiciones características del estado del tiempo. Esto es una parte esencial del clima porque sin vapor de agua no existirían nubes ni se producirían precipitaciones.

El vapor de agua que contiene el aire varía constantemente y proviene de la continua evaporación que se produce en los mares, lagos, ríos, y aun en la misma Tierra cuando está húmeda. La evaporación es, pues, el proceso que transforma el agua en vapor. Este proceso requiere gran cantidad de energía, la que posteriormente, como calor latente, es transferida desde la superficie terrestre a la atmósfera, dependiendo de tres factores fundamentales: presión del vapor, temperatura y movimiento del aire.

La evaporación se incrementa cuando la presión del vapor saturado en la superficie del agua es mayor que la presión existente en el aire adyacente. Por tanto, la evaporación es más rápida en aire seco que en el aire con cierto contenido de humedad. Asimismo, la evaporación se intensifica cuando se eleva la temperatura del agua y el viento sopla con cierta velocidad en su superficie. El calor utilizado en el proceso de la evaporación es retenido por el vapor de agua como "calor latente de

vaporización". Aproximadamente se requieren 590 calorías - gramo para transformar un gramo de agua del estado líquido al gaseoso.

El vapor de agua actúa como un gas independiente contribuyendo a la presión atmosférica con una cantidad que se llama "presión parcial del vapor de agua" o "tensión del vapor", que se expresa en milibares o milímetros de Mercurio. La presión del vapor puede alcanzar un valor máximo que depende de la temperatura. La presión máxima, llamada "presión de saturación" o saturaste, se da cuando el aire no puede retener más vapor de agua a una temperatura dada.

Para cada temperatura dada, hay pues un límite de cantidad de vapor de agua, pasado el cual se dice que el aire está saturado y si se aumenta esa cantidad de vapor, el sobrante se condensa en forma ya visible (nube, niebla). Por el contrario, si siendo fija la humedad contenida en el aire y, a presión constante, se le hace bajar la temperatura hasta llegar a un valor determinado (punto de rocío) se logra la saturación y condensación del vapor.

Si el aire está saturado, se habla de "humedad específica saturante". Si un kilogramo (1000 gramos) de aire contiene 12 gramos de vapor de agua se dice que tiene una humedad de 12 g por kilogramo. Un término muy relacionado es la "razón de mezcla" que se define como el peso de vapor de agua por unidad de peso de aire completamente seco; o también, como la

relación de la masa de vapor de agua a la masa de aire seco, con lo cual el vapor de agua se halla asociado. Un valor de 12 gramos por kilogramo daría un total de 1012 gramos para mezcla. En toda condición, la humedad específica y la razón de mezcla difieren insignificadamente una de otra.

La "humedad absoluta" se define como el peso expresado en gramos de vapor de agua que se encuentra contenido en un metro cúbico de aire en un instante determinado.

La "humedad relativa" que se define como la relación (expresada en porcentaje) entre la cantidad de vapor de agua que tiene el aire y la que tendría si estuviera saturado. Dicho en otras palabras, la humedad relativa es la relación de la tensión del vapor existente con la tensión máxima multiplicado por 100, para expresarla en porcentaje.

Una humedad relativa de 50%, quiere decir que el aire tiene la mitad de vapor de agua del que sería necesario para que estuviera saturado. Naturalmente, esa cantidad depende de la temperatura a la que se encuentra el aire. Cuando la temperatura aumenta entonces el aire tiene mayor capacidad de retención de humedad. Si no se añadiera más cantidad de vapor de agua el resultado sería una disminución de la humedad relativa. Recíprocamente, cuando disminuye la temperatura del aire su capacidad de retención también disminuye y su humedad relativa aumenta. El "déficit de saturación", es la cantidad de vapor de agua que un volumen determinado

de aire necesita para llegar al estado de saturación. El déficit de saturación es mayor mientras mayor es la diferencia entre la temperatura actual y el punto de rocío. El punto de rocío indica la temperatura en la que la tensión del vapor existente y la tensión máxima del vapor son iguales, es decir, la humedad relativa es igual a 100%.

2.4 CONDENSACION

El vapor de agua que existe en la atmósfera, aunque invisible bajo determinadas condiciones físicas, pasa al estado líquido y visible como las nubes, nieblas, lluvias, etc. Este proceso de transformación del vapor de agua a su estado líquido recibe el nombre de "condensación", o la transformación del vapor de agua a la fase sólida se denomina fenómenos de "sublimación"; esto ocurre cuando la temperatura sea sensiblemente inferior o cero grados centígrados.

Si en las primeras horas de una mañana miramos el suelo de un campo o jardín, veremos que está mojado, aunque no haya llovido ni se haya regado. Observando veremos muchas gotitas de agua, procedentes de la condensación del vapor atmosférico debido al enfriamiento nocturno del suelo, que constituyen el "rocío".

Si hacemos las mismas observaciones en una mañana veremos una capa blanquecina sobre el suelo, aunque no haya nevado; distinguiendo una multitud de cristallitos de hielo procedentes de la sublimación del vapor de

aire por las temperaturas inferiores a cero grados durante la noche. Estos cristallitos forman la escarcha.

Notaremos además que las proporciones de rocío o de escarcha son, en general, superiores en las partes con vegetación que en los paseos o caminos desprovistos de ella. Esto se debe a las mayores proporciones de humedad que exhala la vegetación.

Las nieblas son gotitas de agua minúsculas, suspendidas en el aire cerca del suelo, debidas a la condensación del vapor por enfriamiento de las capas bajas atmosféricas. Si este enfriamiento es lo bastante intenso, por debajo de cero grados, se produce la sublimación del vapor directamente en forma de cristallitos de hielo.

Cuando el agua está más caliente que el aire se evapora incluso después de que la atmósfera está saturado de vapor. Entonces el exceso de éste en el ambiente obliga a que se condense rápidamente en forma de pequeñas gotitas mantenidas en suspensión más o menos tiempo.^(*)

2.5 NUBES

La nube es físicamente un aerosol, esto es, un conjunto visible de gotitas de agua o diminutos cristales de hielo que están en suspensión en la atmósfera en la forma de coloide.

* Palomares Casado Manuel, AGUA Y ATMOSFERA, Edit. Santillana S.A., 1969, Pág. 61

Las nubes, por su constitución misma, están transformándose continuamente; por lo que se presentan bajo una enorme variedad de formas. El aspecto de las nubes depende de su naturaleza, de sus dimensiones y de la distribución en el espacio de las gotas o cristales que las constituyen. Los principales factores que intervienen en la descripción de la nube son la constitución, la forma, la altura, el origen y las propiedades.

2.6 PRECIPITACION

La precipitación se define como el fenómeno de la caída del agua de las nubes en forma líquida o sólida; la cual es precedida por el proceso de condensación o sublimación o de ambos y está asociada, primariamente, con las corrientes convectivas de aire (*).

* Barry R. G. y otros, ATMOSFERA, TIEMPO Y CLIMA, Edit Omega S.A., 1972, Pág. 86.

CAPITULO III.

MATERIALES DE RECUBRIMIENTO

3.1. FUNDAMENTOS

Los materiales de recubrimiento utilizados en los invernaderos se caracterizan por su transparencia. Solamente si ésta es buena se consiguen unas condiciones ambientales favorables para el desarrollo de las especies cultivadas.

Las propiedades óptimas que deben tener los materiales de recubrimiento de un invernadero en lo que a transparencia a las radiaciones electromagnéticas (300 – 3500 μm) se refieren; son las siguientes:

a. Reducir lo menos posible la cantidad de la luz incidente (radiación visible).

Ya se sabe que la intensidad de la luz solar que llega hasta el suelo en los meses de invierno es inferior a la cantidad necesaria para la fotosíntesis.

b. No alterar, desfavorablemente, el espectro de emisión del sol.

Recordemos a este punto que la utilidad del ultravioleta, es decir, su valor fisiológico, es bastante discutido; de todos modos podemos asegurar que los materiales de recubrimiento, exceptualmente tan sólo unos pocos, tienen una buena transparencia en relación con esta radiación, por lo menos es lo que

se refiere a las longitudes de onda que nos interesa (300 – 380 μm).

Por lo que se refiere a la parte visible del espectro solar, recordemos por ahora que la fotosíntesis depende de él.

Por lo que concierne a la banda de los infrarrojos, el material deberá permitir en grado máximo el "efecto invernadero".

Diremos que preferimos los materiales que ofrecen un espectro que se acerque lo más posible a la transmisión total, en las radiaciones de longitud de onda inferiores a 2000 μm , y que no dejen pasar las radiaciones de longitud de onda superior.

3.2 CRISTAL

El cristal es un excelente material de recubrimiento ^(*). Es fácil de demostrar que por mucho tiempo éste ha sido el único material disponible y que, por lo tanto, no había donde escoger, pero, de todos modos hoy día el cristal sigue siendo un material excelente por sus propiedades físicas.

Se comprende fácilmente que su propiedad más importante es su capacidad de dejarse atravesar por la luz natural; cuando mayor es la radiación solar que penetra a través de un material, mayor será su idoneidad para ser usado como recubrimiento.

* El recubrimiento de cristal, algunos lo conocen como el recubrimiento de vidrio

además puede ser utilizado en planchas de un tamaño mayor que las del cristal sencillo translúcido (Scartone).

Existen, asimismo, otros tipos de cristal impreso, biselado, rallado; su espesor varía de 2 a 6 mm. Poseen características parecidas al del cristal -jardinería, tan sólo su aislamiento es inferior, pero de todos modos resulta ser mayor que el de los cristales de tipo translúcidos normales.

Cuando haya que escoger un cristal para el recubrimiento de los invernaderos, hay que tener en cuenta no solamente el factor económico, sino hay que pensar también en las consecuencias de carácter fisiológico que provocan estos tipos de cristales.

3.3. MATERIALES PLÁSTICOS

Si los invernaderos de cristal siguen representando hoy en día el medio agronómico más eficaz para conseguir unas producciones hortoflorícolas fuera de estación, también hay que decir que los invernaderos de plástico, si se constituye de forma racional y con idóneos materiales de recubrimiento, pueden dar unos resultados igualmente buenos, aun teniendo un costo de instalación muy inferior al de los de cristal.

Los materiales plásticos se pueden definir genéricamente como materiales poliméricos. De entre estos polímeros que se usan para recubrimiento de invernaderos, mencionaremos los más importantes.

Los materiales plásticos de que disponemos se pueden encontrar en forma de láminas flexibles (filmes) o en planchas rígidas. Las primeras tienen la ventaja de costar menos. Sin embargo, la elección de uno u otro material tiene que hacerse teniendo en cuenta muchos factores. Una importancia decisiva la constituye, por ejemplo, la estructura de sostenimiento (madera o metal). Conviene; recordar que el material más económico es el polietileno, puesto que tiene un peso específico muy bajo (0,9), pero hay que hacer notar que este material envejece (se degrada) en unos años cuando permanece expuesto a los rayos del sol en las temporadas de primavera - verano. El cloruro de polivinilo dura más, y aún más duran las planchas rígidas de este material, que no sufren modificaciones sustanciales; es más, las planchas de polimetacrilato de metilo pueden durar hasta casi veinte años.

En conclusión el campo de los materiales plásticos es inmenso, por lo que la enumeración de los plásticos de mayor uso actual puede quedar pronto "obsoleta".

Por otra parte, ningún plástico en su presentación en el mercado es un material muy definido, pues la incorporación al mismo de distintos aditivos: plastificantes, antioxidantes, colorantes, etc. le confieren propiedades muy distintas de las suyas específicas. Por todo ello cuanto se dice a continuación es con carácter genérico e informativo.

3.4. POLIETILENO

Este producto fue sintetizado hace unos treinta años; contiene a menudo aditivos que le confieren características de elasticidad, resistencia al envejecimiento, etc. Su uso en forma de láminas (filmes) para el recubrimiento de los invernaderos está muy extendido.

Su duración es de unos años, caso de que el invernadero permanezca cubierto en los meses de luz solar intensa y de mucho calor. Resiste bien efectos mecánicos del viento, granizo y de otros factores, por lo cual es difícil que se desgarre. Además de tener buena resistencia mecánica, tiene una buena inercia química, por lo cual no se deteriora por efecto de las sustancias químicas que puedan ser usadas en el interior del invernadero para tratamientos antiparasitarios, fertilizaciones, etc. Consigue un satisfactorio "efecto invernadero" no es buen conductor de calor, puesto que su conductividad térmica es inferior casi en un cuarto a la del cristal.

La transparencia es buena, si por transparencia queremos indicar la capacidad de transmitir las radiaciones ultravioletas y las radiaciones luminosas visibles. Además debido a su bajo peso específico (una lámina de 0,1 mm pesa 90 g/m²) el material plástico disponible en el mercado a más bajo costo.

3.5. POLIMETILMETACRILATO

De entre las resinas metacrílicas esta es la más importante. Entre sus cualidades específicas hay que recordar su transparencia y su alta resistencia al envejecimiento.

Sin embargo, no es muy duro y, puede ser arañado y rayado con facilidad, y esto provoca una pérdida de sus cualidades ópticas. Se usa para el recubrimiento rígido de los invernaderos.

Como ya hemos dicho, este material, además de no envejecer, tiene otra ventaja, la de su transparencia que puede incluso ser superior a la del cristal.

A veces se añaden a este producto otras sustancias y de este modo se consiguen otros materiales que pueden dar unos resultados excelentes, entre otros el conocido comercialmente como "ignilux". Posee una transparencia que se puede comparar con la del cristal normal, y además tiene un buen "efecto invernadero", y es más ligero y menos frágil que el cristal.

Los materiales rígidos tienen gradualmente un espesor que varía de 1 a 2 mm y un peso por metro cuadrado que puede variar de 1,5 a 3 kilogramos.

3.6. RESINA POLIESTER

Estas resinas pueden tener las características diferentes, según los productos de los que derivase. A menudo están reforzadas con fibras de cristal o de nylon u otros materiales, con el fin de que aumente resistencia mecánica; las resinas poseen unas características de impermeabilidad y dureza, etc., y se usan en los recubrimientos rígidos de los invernaderos.

Una de sus cualidades más peculiares es la de tener una buena capacidad de difusión de la luz. Tanto es así, que creemos que se pueda eliminar el encalado de las paredes durante el verano, necesario en los invernaderos de cristal; además, bajo el poliéster la luz se difunde en todas direcciones y de este modo se evitan las quemaduras de las plantas. La transparencia desde el ultravioleta hasta el infrarrojo es muy buena, mientras que puede considerarse nula para el infrarrojo largo. Este material puede durar unos diez años, su peso específico es inferior al del cristal y sus propiedades mecánicas (resistencia al viento, lluvia y granizo) son excelentes.

3.7. CLORURO DE POLIVINILO (PVC)

Este producto sintetizado, van adicionadas con sustancias que son capaces de conferirlos determinadas características, por ejemplo: se le adicionan estabilizadores para retrasar el proceso de degradación de la resina; a causa del calor y de la luz; los plastificantes sirven para hacer

flexible al cloruro de polivinilo, que de por sí es rígido. Para el recubrimiento de los invernaderos se usa en láminas (filmes) y también en planchas rígidas.

Las láminas de cloruro de polivinilo resultan más económicas para los recubrimientos, porque su duración puede prolongarse de dos a más años, aunque se deje bajo la acción de temperaturas elevadas y de una luz solar intensa. Tiene las mismas características que el polietileno por lo que a resistencia se refiere; es difícil de desgarrar y resiste bien a la acción de las sustancias químicas. El PVC es más permeable al vapor de agua que el polietileno.

En el interior de un invernadero cubierto por PVC las temperaturas que se deben únicamente a la acción de los rayos del sol son más altas; porque bajo este material se aprecia un "efecto invernadero" superior al del polietileno.

Además, debido a su buena transparencia, las plantas pueden beneficiarse de una mayor cantidad de luz solar. Es mal conductor de calor, aun peor que el polietileno. En cambio, su peso específico es más alto, 1,3 y tiene un costo superior, de cerca de un tercio más que el polietileno (una hoja de 1-10 mm pesa 130-135 g/m²). Cuando haya que escoger entre el PVC y el polietileno, al igual que para los demás materiales plásticos, el agricultor tendrá que tener en cuenta las características del ambiente en que

va a instalar sus invernaderos. Efectivamente, en una misma explotación pueden darse microclimas distintos y diferentes características físicas del terreno, todo ello influirá en la elección oportuna.

Las láminas de polietileno y del PVC son las que más se usan para recubrir los invernaderos, los túneles y demás ingenios para forzado o semiforzado de los cultivos.

Decíamos una cosa que sirve para todo los materiales plásticos, y es que su uso reduce el costo de las estructuras de soporte, debido a que tienen que soportar pesos inferiores; así mismo, permite eliminar muchos soportes que se ponen en caso de recubrimiento de cristal, secuela de ello habrá más luz en el interior del invernadero, sin contar que con plásticos se pueden hacer invernaderos más herméticos.

En la superficie interna de las láminas de plástico, se forma una fuerte condensación por efecto del enfriamiento nocturno; lo cual es perjudicial para las plantas, por que la atmósfera puede alcanzar un grado excesivo de humedad y por consiguiente habrá un intenso goteo. Se puede disminuir el fenómeno de la condensación colocando un capa doble de láminas de plástico y dejando entre las capas de una cámara de aire de 3 a 5 cm.

Las laminas de polietileno y el PVC que suelen usar para el recubrimiento de los invernaderos tienen un espesor aproximado de 0,15 y

0,20 mm. Para los túneles son suficientes un espesor de 0,15 para el polietileno, y de 0,10 a 0,15 para el PVC. Existen también láminas de PVC reforzadas con materiales de distinta naturaleza con el objetivo de retener los rayos infrarrojos largos emitidos por el terreno y por las plantas.

3.8. CLORURO DE POLIVINILO EN PLANCHAS RIGIDAS

En este material está formado por planchas cuyo espesor es de 7mm o más. Sus propiedades ópticas (Transparencia) son parecidas a las diversas láminas de recubrimiento. Duran aproximadamente ocho años y no requiere de cuidados especiales para su colocación^(*).

3.9. FIBRAS DE VIDRIO

En la construcción de invernaderos se utilizan amplios tableros rígidos, corrugados o planos de resina de poliéster reforzado con fibras de vidrio.

Este material es fuerte de larga duración, liviano y de fácil colocación, estando disponible en una diversidad de anchos, largos y espesores.

A continuación presentamos un gráfico sobre la transmisión de energía solar en algunos materiales de recubrimiento que hemos mencionado.

^{*} Alpi A.- F. Tognoni, CULTIVO EN INVERNADEROS, Edit. Mundi-Prensa, Madrid. 1983, Pág. 37

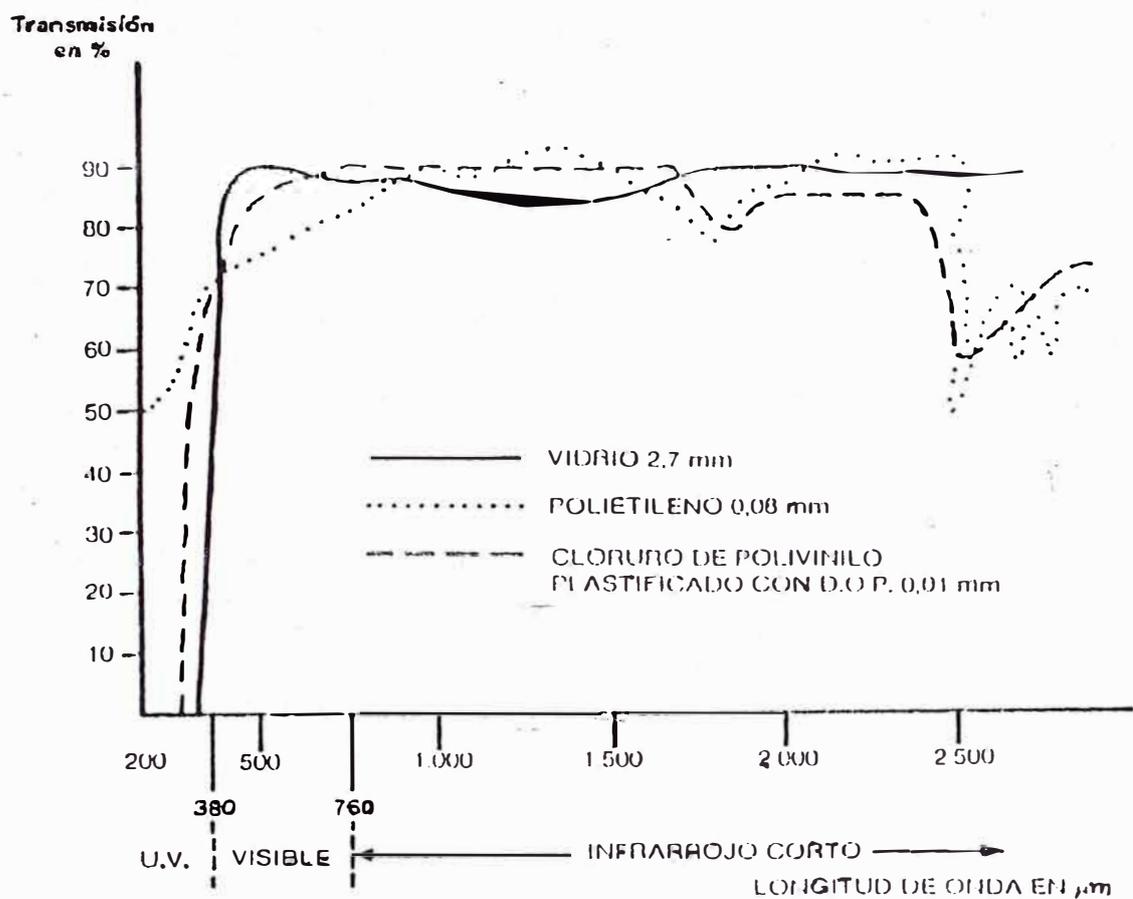


Fig.7. Transmisión de las radiaciones ultravioleta, visibles e infrarrojos para el vidrio, láminas de polietileno y cloruro de polivinilo.

3.11 FOTOSELECTIVIDAD ESPECIFICA DE LOS MATERIALES DE RECUBRIMIENTO (*)

Los parámetros ambientales en el interior del invernadero, adquieren

* Alpi A. Tojnomi, CULTIVO EN INVERNADEROS, Edit. Mundi Prensa, Madrid, 1983, Pág. 37

unos valores distintos a los que existen al aire libre; esto ocurre por el efecto de la cubierta, pero el cultivador modifica unas condiciones óptimas para las plantas que está cultivando.

Las radiaciones solares que el ojo humano percibe, sufre una alteración según el grado de transparencia del material de recubrimiento. Esta alteración del factor luz se realiza en dos categorías: **cuantitativa**, cuando se altera la intensidad luminosa, y **cualitativa** cuando concierne el espectro reduciendo o impidiendo el paso de las radiaciones de ciertas longitudes de onda. Las operaciones de acondicionamiento del clima en el interior del invernadero, es decir, la intervención del agricultor, habían consistido hasta ahora en modificar la luz en sentido cuantitativo, es decir, se habían limitado a reducir la intensidad de la luz con materiales de sombreadamiento, o a aumentarla usando luz artificial. Se puede, alterando la duración de la iluminación del día cuando sea necesario, actuar sobre el fotoperiodismo. Hasta ahora no se había tenido la posibilidad de modificar la luz también en sentido cualitativo, cosa que puede resultar de mucho interés para algunos cultivos.

Para poder comprender la importancia que tiene el control cualitativo de la luz, basta considerar que muchas actividades vitales de las plantas se ven influenciadas de distinta manera por las variaciones de las radiaciones de distinta longitud de onda: entre otras actividades recordemos la fotosíntesis de la clorofila, el crecimiento, el fototropismo, el fotoperiodismo,

la morfogénesis, la formación de pigmentos y vitaminas.

Las actividades numerosas y fundamentales de las plantas pueden estar influenciadas de distinta longitud de onda, puede pensarse en provocar artificialmente efectos beneficiosos para las plantas, modificando oportunamente las radiaciones del espectro luminoso.

Para lograr este fin, la manera sencilla es la de utilizar para el recubrimiento de los invernaderos unos materiales que tengan una buena transparencia natural. Los materiales de cristal o de plástico, modifican el espectro solar según su propia fotoselectividad específica. Esta depende de las características físicas y químicas del material, pero sobre todo del color.

Por lo tanto, se puede realizar el llamado "acondicionamiento cualitativo de la luz", usando materiales transparentes de color.

Por el principio de complementariedad de los colores, sí por medio de un filtro le quitamos a la luz blanca las radiaciones responsables de un determinado color, obtendremos una luz cuyo color será el complementario del que hemos quitado.

Si en los materiales de recubrimiento eliminamos o disminuimos algunas radiaciones del flujo luminoso, conseguiremos alterar la acción fisiológica de dichos rayos en relación con las especies cultivadas.

El actuar sobre la capacidad de selección de las radiaciones por parte de los materiales (que por razones económicas serán de plástico), resulta útil solamente si se trata de ambientes en los que no hay problemas de luz en cuanto a intensidad, puesto que todo material de color, además de modificar el espectro solar cualitativamente también su transmisibilidad.

Los materiales plásticos de color absorben una gran cantidad de radiaciones del sol complementario y una ligera reducción en la transmisibilidad de todo el espectro luminoso, mientras que en otros casos no ha hallado absorción en una banda específica y, en cambio, ha notado una fuerte disminución de la transmisibilidad de todo espectro visible.

En el infrarrojo, se producirá una disminución en la capacidad de transmisión tan sólo en el campo de las ondas más cortas. En cambio, no se eliminarán las radiaciones de infrarrojos de longitudes medias y largas.

Lo que concierne a los efectos fisiológicos que estos materiales tienen sobre las distintas especies cultivadas, parece ser que los colores más activos sobre la germinación son el azul marino y el amarillo y, en general, se puede decir que el efecto es mayor sobre el poder germinativo, más que sobre la energía de germinación. De todos modos las distintas especies de plantas reaccionan de forma muy distinta. Los efectos alcanzados en las producciones de determinadas plantas no son muy alentadores.

En experiencias, hay resultados negativos, como también los hay tendencialmente positivos, lo cual confirma la posibilidad de utilizar con provecho el "acondicionamiento cualitativo de la luz".

3.11. TRANSMISION DE LA LUZ

Los materiales que se utilizan en la cobertura de invernaderos dejan pasar en distinto porcentaje esas radiaciones según el material utilizado como cubierta.

Los materiales de cubierta serán tanto mejores cuanto más transparentes sean a las radiaciones solares que llegan a la superficie interior del invernadero.

La luz juega un papel muy importante en la vida de las plantas, tanto es así que se cree que un 1% más de luz puede proporcionar un aumento de un 1% en la producción. Es un factor que los constructores deben de tener presente y podría mejorarse la situación actual, mediante un atento examen crítico de los actuales esquemas de invernaderos. Las mejoras serán relativas.

Hay que recordar, que los soportes no son los únicos elementos causantes del sombreado del invernadero, ya que también lo es la suciedad que se depositan en las cubiertas de los invernaderos.

Para una mejor recepción de la luz la orientación Este - Oeste parece la más indicada y permite además un mejor control de la temperatura.

3.12 ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA

La armadura soporte de un invernadero debe soportar, además de su peso, otras cargas como los tutores utilizados en el cultivo de algunas plantas, colgadas de la estructura (tomate, rocoto, perejil, etc.); las sobrecargas debidas a la nieve, el empuje del viento y, los mecanismos de automatización. A este respecto hay que recordar que estos mecanismos deben estar colocados de forma que dejen libertad para trabajar en todo momento en el interior del invernadero. Es necesario aportar materiales resistentes y que ofrezcan garantías de estabilidad, pero al mismo tiempo es necesario eliminar todo aquello que pueda resultar superfluo y que sólo disminuye la iluminación y aumenta el peso que gravita sobre los soportes. Por lo tanto, puede darse el caso de que los invernaderos están contruidos con unas características que les permiten soportar sobrecargas y aguantar condiciones atmosféricas adversas que nunca se darán en el ambiente en donde están situados; por lo que es necesario y urgente establecer la construcción de invernaderos que sean aptos para el ambiente en donde se encuentran^(*).

* Aipi A. Tognori, CULTIVO EN INVERNADERO, Edit. Mundi - Prensa Madrid, 1983, Pág. 41

CAPITULO IV

FACTORES CLIMATICOS INTERNOS DE LOS INVERNADEROS

4.1 FUNDAMENTOS

El estudio climatológico de la zona determinará si es posible o no construir un determinado tipo de invernadero, su orientación, etc., pero el ambiente real que nos interesa para los fines de los cultivos es el interior, el cual deriva del exterior; que puede tener características peculiares las que definen cada ambiente particular de invernadero. El ambiente que se forma en un invernadero en el cuál no ha habido operaciones de climatización, pero que ha sufrido modificaciones sustanciales con respecto del exterior y de los parámetros determinantes: temperatura, luz, grado higrométrico y concentración atmosférica en anhídrido carbónico, y esto por el mero hecho de ser un ambiente que se desarrolla en área cubierta. Examinaremos estas variaciones.

El invernadero es un refugio creado para proteger las plantas en las épocas del año en que la temperatura es más baja y, por lo tanto, al empezar este análisis es conveniente considerar la temperatura, pues o que el balance térmico, junto con la cantidad total de energía luminosa, constituye el elemento principal para determinar la eficacia de un invernadero.

4.2. TEMPERATURA EN EL INVERNADERO

El invernadero es una construcción que siempre se ha realizado con armaduras y soportes muy diversos y con materiales de recubrimiento que dejan pasar las radiaciones solares que son indispensables para la vida de las plantas. La composición de la radiación solar incluye radiaciones visibles y radiaciones invisibles al ojo humano, ambas necesarias para un desarrollo de procesos biológicos vegetales.

La temperatura determina los límites entre los cuales una determinada especie puede sobrevivir, crecer y alcanzar la máxima producción. Este último está relacionado con la interacción de la temperatura con otros factores como la luz, el agua y los elementos nutritivos. De esta forma existen para cada especie o variedad una temperatura mínima y otra máxima por debajo o encima de las cuales la planta no puede sobrevivir. Entre estos dos límites existe una temperatura óptima para el desarrollo y el crecimiento de la planta.

Todas las radiaciones incidentes son en parte reflejadas y en parte absorbidas y transformadas en calor. Una sustancia que absorbe energía radiante aumenta su temperatura y emite a su vez energía bajo forma de radiación.

La absorción por parte de una sustancia depende de la longitud de onda del flujo incidente. Generalmente los cuerpos, con respecto de la

longitudes de onda, se comportan de manera intermedia entre los cuerpos negros y los cuerpos reflejantes. En cambio, los cuerpos reflejantes, en relación con el infrarrojo largo, se comportan como los cuerpos negros.

También la transmisión depende de la longitud de onda del flujo incidente. Todos los materiales usados en los invernaderos son transparentes para la luz visible y el infrarrojo corto, dependiendo naturalmente, según la inclinación y la orientación de las paredes.

En cambio, los materiales de recubrimiento son más o menos opacos al infrarrojo largo. El infrarrojo largo, por lo tanto, será sólo reflejado, absorbido o transformado en calor por las paredes del invernadero.

La energía de la atmósfera es transformada en calor por absorción por parte del recubrimiento y es emitida a su vez por irradiación.

Del mismo modo, casi toda la irradiación del terreno y de la vegetación es absorbida por parte de las paredes que vuelven a emitir las radiaciones.

Las radiaciones transmitidas por la cubierta actúan sobre las plantas en sentido morfogenético y fisiológico, pero lo más importante de su acción es el efecto térmico, puesto que en cuanto un cuerpo las absorbe, éste se calienta. Así es como se calientan los objetos presentes en el invernadero,

los cuales, a su vez, emitirán otras radiaciones infrarrojas con una longitud de onda más larga.

El comportamiento de las radiaciones debidas a excitación térmica. Todos los cuerpos con temperatura superior a 0 K emiten radiaciones cuya intensidad aumenta con la cuarta potencia de la temperatura absoluta y cuya longitud de onda es inversamente proporcional a la temperatura absoluta.

Las variaciones caloríficas infrarrojas, como consecuencia de su longitud de onda, pueden encontrar un obstáculo al pasar a través del material de recubrimiento, puesto que éste, en relación con sus características, contribuye a aumentar la temperatura de atmósfera de invernadero, cuanto más impermeable a estas variaciones. Este flujo de radiaciones de una longitud de onda superior a las 5 000 μm no es transmitido, sino que es absorbido casi todo por el material de recubrimiento, el cual, a su vez, emite radiaciones caloríficas tanto hacia el exterior como hacia el interior del invernadero. Las radiaciones que van hacia el interior son las que calientan la atmósfera del invernadero.

Este fenómeno es lo que se suele llamar "efecto invernadero", que permite cultivar plantas en invernaderos desprovistos de calefacción en zonas cuyas bajas temperaturas no les permitiría desarrollarse o que, por lo menos, les haría tener un ciclo vegetativo más largo.

Dada la importancia de este fenómeno, se han hecho investigaciones para averiguar la impermeabilidad de muchos materiales de recubrimiento que tienen con respecto del infrarrojo largo, por lo tanto, definir su rendimiento térmico.

La temperatura en el interior de un invernadero depende en su mayor parte del efecto invernadero que nace, por una parte, de la radiación solar y, por otra, de la impermeabilidad de los materiales de recubrimiento a las radiaciones caloríficas.

Con este fenómeno, se tiene una serie de factores que actúan sobre la temperatura del invernadero y que, además, demuestran que el clima está estrechamente relacionado con otros elementos y que, la variación que tiene el clima es causa y efecto de numerosas variaciones ambientales.

Además que por irradiación, el calor se puede transmitir también por convección y por conducción. La convección es un fenómeno que interesa a los fluidos y produce la transmisión del calor de un punto a otro de un objeto por medio de un desplazamiento de las partes del fluido a más altas temperaturas.

La intensidad de este desplazamiento depende de la capacidad calorífica de la sustancia líquida, es decir, de la cantidad de calor contenida

por unidad de masa y de la velocidad de sustitución en la masa de aire considerada.

En el aire hay gas y vapor de agua originados del agua por la acción del calor latente de vaporización. La masa de aire a una cierta temperatura posee calor total determinado; del cual un 60% es absorbido, por el vapor que así se ha formado. La cantidad de calor sustraído de un ambiente mediante un flujo de aire depende en gran parte del estado higrométrico. La velocidad de sustitución depende de la diferencia de presión que haya entre dos puntos de un volumen gaseoso. Las relaciones existentes entre temperatura, presión y viento, el cual, según las fisuras de la construcción, puede provocar una superpresión o una depresión.

Existen movimientos de aire entre el exterior y el interior del invernadero y desde éste hacia el exterior, puesto que un invernadero nunca es perfectamente hermético.

El calor de un cuerpo pasa a otro por conducción sólo por efecto de la temperatura, sin ningún desplazamiento de materia. Si la pared de un invernadero cuyas superficies tengan temperaturas distintas; entonces habrá paso del calor desde la pared más cálida a la más fría y desde ésta al aire del ambiente. A esta transmisión de aire se interpone una resistencia tanto más fuerte cuanto más débil resulta ser la turbulencia del aire. Con turbulencia queremos indicar los movimientos del aire que se originan en el

interior del invernadero por diversas causas, tanto naturales como artificiales. La cantidad de calor que pasa por conducción a través de la pared en cuestión, puede calcularse con la ecuación.

$$Q_{cc} = K S \Delta T \quad (4,1)$$

donde:

ΔT = diferencia de temperatura entre el aire del interior y el del exterior del invernadero (K);

S = superficie del material de cobertura (m^2);

K = coeficiente de la conductividad térmica (KW/m^2K).

Al calcular el coeficiente K, se debe considerar los movimientos del aire en el exterior del invernadero. La presencia de una cutícula de agua sobre la pared puede ser alterada en sus características, puesto que el calor pasa con más facilidad de un sólido a un líquido que de un sólido a un gas.

El fenómeno de transmisión del calor por irradiación, por conducción y convección, constituye la causa directa de las variaciones de la temperatura que se aprecian en el interior del invernadero. En el invernadero existe un gradiente de temperatura que varía desde un mínimo en las proximidades del terreno, hasta un máximo cerca del techo. Los valores de este sector de variabilidad están en relación directa con la altura del invernadero. Hay que hacer notar que el conjunto de los fenómenos

indicados anteriormente crea cierto dinamismo en el volumen de atmósfera que contiene el invernadero, puesto que al aumentar la temperatura el aire disminuye de peso y tiende a subir. Este desplazamiento provoca en la parte más alta del invernadero una presión superior a la del exterior y una depresión igual y contraria en la parte más baja. En un invernadero ideal, que fuera perfectamente hermético, habría justo en la mitad, entre techo y terreno, una presión igual a la del exterior que determinaría la formación de una "zona neutra". En la parte superior del invernadero, el aire tiende a salir por efecto de la presión que es mayor, mientras que en la parte baja el aire frío tiene tendencia a entrar como consecuencia de la depresión.

Este fenómeno de convección provoca un desequilibrio en las condiciones de temperatura en el interior del invernadero, produciéndose mínimas térmicas a nivel del terreno, las cuales tienden a disminuir porque el aire del interior se enfría entrando en contacto con las paredes, aumenta su densidad y provoca una corriente de aire descendiente, que también arrastra hacia abajo al aire frío que entra por las ranuras. Por todo esto, las bajas temperaturas se forman en contacto con el terreno que es precisamente donde más falta hacen las temperaturas más elevadas, como se observa en la FIG.8. Por lo tanto se producen unas dispersiones caloríficas notables en el interior del invernadero por efecto de simples fenómenos físicos, y es conveniente hablar de estas dispersiones por conducción, convección, renovación de aire, y por irradiación a través del terreno, con vistas a calcular el llamado "balance térmico".

El calor de la atmósfera en el interior aumenta en relación con el aumento de la temperatura en el exterior. Pero, puesto que el invernadero nunca está completamente presurizado, habrá un intercambio de aire en una cantidad que varía en relación con numerosos factores. Se calcula que con unas condiciones atmosféricas de ausencia de viento, la cantidad de veces que el aire se renueva cada hora, o sea, la cantidad de veces que en una hora un volumen de aire igual al invernadero que pasa, desde el interior hacia el exterior, según la calidad de la construcción. El aumento de la temperatura en un invernadero será mayor en tanto mayor sea la hermeticidad del invernadero.

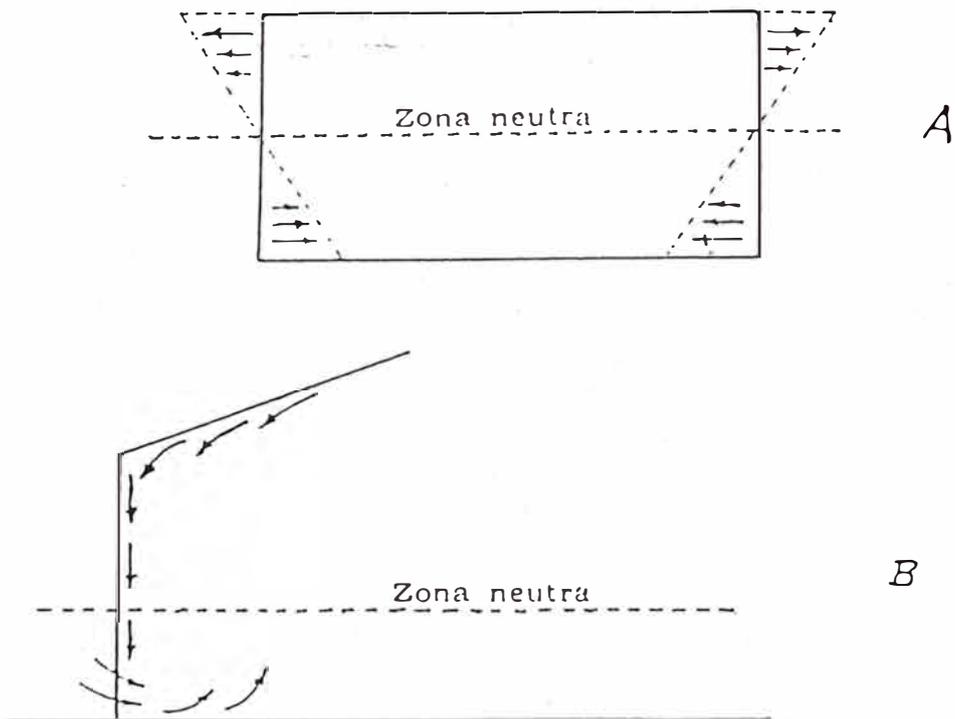


FIG.8.(A)Corte transversal de un recinto cerrado, en él la zona neutra tiene igual presión que el exterior.

(B)Corte transversal de un invernadero. Las flechas indican el flujo de aire descendente.

Una parte del calor que se produce por absorción de las radiaciones pasa por conducción al terreno que, de este modo, llega a ser un almacén de calor; pero una parte de esta energía se libera en el transcurso de la noche.

La interacción de los factores internos y externos mencionados, determinan el balance térmico del invernadero. El balance puede determinar la aportación energética necesaria para asegurar el nivel térmico a mantener bajo el invernadero de acuerdo con el cultivo establecido y con la climatología correspondiente a la ubicación de la instalación.

El balance define un estado de equilibrio entre las pérdidas energéticas y los aportes. La ecuación de partida será

$$Q^{(i)} = - (Q_{cc} + Q_{rad} + Q_s + Q_{ren}) + Q_{solar} \quad (4,2)$$

Siendo:

- Q_{cc} = pérdidas energéticas por conducción - convección;
- Q_{rad} = pérdidas energéticas por radiación térmica;
- Q_s = pérdidas energéticas por conducción a través del suelo;
- Q_{ren} = pérdidas energéticas por renovación del aire del

* Matallana Gonzales Antonio, LOS INVERNADEROS Y LA CRISIS ENERGETICA, Edit. Madrid, 1980. Pág. 6.

invernadero;

Q_{solar} = aporte energético procedente del sol.

Los términos del balance afectados del signo menos indican pérdida de energía y el término Q_{solar} indica ganancia de energía.

Con el fin de simplificar los cálculos y aplicar la ecuación (4.2) para la determinación de la potencia calorífica a instalar en el invernadero puede desarrollarse el cálculo para el periódico nocturno durante el cual Q_{solar} es cero. En este caso la ecuación (4.2) se transforma en:

$$Q = - (Q_{cc} + Q_{rad} + Q_s + Q_{ren}) \quad (4.3)$$

La ecuación (4.3) expresa el balance de pérdidas en el interior del invernadero. El mayor aporte térmico debe realizarse, durante la noche, de ahí que para dimensionar la potencia a instalar se calculen los términos del balance para las temperaturas nocturnas.

$$Sea \quad Q' = Q_{cc} + Q_{rad} + Q_s + Q_{ren} \quad (4.4)$$

Cada uno de los términos de la ecuación (4.4) se pueden describir:

a. Pérdidas energéticas por conducción - convección (Q_{cc}). Como se ha analizado anteriormente; las pérdidas energéticas por conducción -

convección son directamente proporcionales al coeficiente global de pérdida de calor por conducción - convección a través del material de cobertura (K), a la superficie del material de cobertura (S), y al salto térmico (ΔT). Cuya ecuación es:

$$Q_{cc} = K S \Delta T = K S (T_i - T_e) \quad (4.5)$$

donde:

- Q_{cc} = pérdidas por conducción - convección (W);
 K = coeficiente de pérdidas de calor por conducción convección (KW/m²K)
 ΔT = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior (K).

El coeficiente de transferencia de calor para el material puede ser dividido en : calor transferido del aire interior del invernadero al material de cobertura h_i , calor transferido a través del material e/λ y el transferido del material al aire exterior h_e . Por lo que K puede escribirse:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e} \right)} \quad (4.6)$$

con:

e = espesor del material de cobertura medido en metros.

λ = es el coeficiente de capacidad de conducción térmica del material de cobertura.

El coeficiente de transferencia de calor h_i es una función del sistema de calefacción (circulación natural o forzada del aire del invernadero) y de la evapotranspiración de las plantas y el suelo. El valor de h_i está íntimamente ligado a los movimientos convectivos existentes en el interior del invernadero.

El coeficiente de transmisión e/λ es cualitativamente despreciable cuando se usa un único material de cubierta. Sin embargo, cuando se usan dobles cubiertas separadas por una capa de aire, el valor de e/λ puede ser importante, porque se limitan las pérdidas^(*).

El coeficiente de transferencia h_e para la superficie exterior al material de cobertura está influenciado por la velocidad del viento.

En el CUADRO 2 que presentamos a continuación algunos valores de K para los materiales que se usan en la construcción de invernaderos.

* Matallana Gonzales Antonio. LOS INVERNADEROS Y LA CRISIS ENERGETICA. Edit. Madrid, 1980, Pág. 12

CUADRO 2^(*)

MATERIAL	FACTOR K(W/m ² K)
Vidrio de 3 a 6 mm	0,761 a 0,800
Polietileno 0,08 mm	0,834 a 0,962
Piedra	1,730 a 3,978
Madera	0,170 a 0,210
Tierra	0,043
Concreto	0,810 a 1,400
Arcilla	1,279
Ladrillo seco	1,380 a 0,520
Grava	0,520
Aluminio puro	204
Hierro puro	73
Acero al carbón (C» 0,5%)	54
Acero niquelado (Ni» 10 %)	26
Acero al cromo (Cr» 1 %)	61
Cobre puro	386
Agua	0,597
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,070
Aire	0,026
Vapor de agua	0,025
Oxígeno	0,027

b. Pérdidas energéticas por radiación térmica (Q_{rad}) De acuerdo con la ecuación propuesta por J.N.Walker (1965), estas pérdidas pueden calcularse:

* Kreith Frank. PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, Edit. Herreria Hermanos, Sucasores S.A. 1970, Pág. 646.

* Martínez García Pedro - Florian, CARACTERISTICAS CLIMATICAS DE LOS INVERNADEROS DE PLASTICO, Edit. CRIDA 07 INLA, 1978, Pág. 21

$$Q_{\text{rad}} = 5,12 \times 10^{-8} S_{\text{rad}} \tau (T_i^4 - T_e^4) \quad (4.7)$$

siendo:

S_{rad} = superficie radiante (suelo del invernadero) en m^2 .

τ = coeficiente de permeabilidad a las radiaciones termicas (coeficiente de transmisión del material de cubierta). Puede presentar valores de:

τ 0,80 para el polietileno.

τ 0,64 para el polietileno de doble cubierta

τ 0,04 para el vidrio.

T_i = Temperatura interior.

T_e = Temperatura exterior.

La ecuación (4.7) permite calcular las pérdidas de energía por radiación. Pero una evaluación rigurosa requiere el conocimiento de al menos los siguientes parámetros, como la temperatura de la pared del invernadero (material de cobertura), estado del cielo (nuboso o despejado), temperatura de la cubierta vegetal, temperatura del cielo, etc.

c. Pérdidas energéticas por conducción a través del suelo (Q_s).

La dispersión de calor a través del suelo esta claramente influenciada por la naturaleza del terreno y por el grado higrométrico. Es función de la temperatura superficial y por ello del salto térmico entre el terreno y el

ambiente que está por encima de él. Su determinación constituye un problema de particular complejidad. Para cálculos; las pérdidas del suelo representan una décima parte de las pérdidas totales (10%), es decir:

$$Q_s^{(*)} = 10\%(Q_{cc} + Q_{ren}) \quad (4,8)$$

d. Pérdidas energéticas por renovación del aire (Q_{ren}) del invernadero.

Estas pérdidas pueden calcularse por:

$$Q_{ren}^{(**)} = RVP_e C_p (T_i - T_e) \quad (4,9)$$

donde:

R = número de renovaciones del aire interno en una hora. Valor 1,1/h para zonas de calmas y de 5 a 7/h para zonas ventosas;

V = volumen del invernadero en m³;

P_e = peso específico del aire (1,293 Kg/m³);

C_p = calor específico del aire a presión constante (1,0049x10³ J/KgK);

T_i = Temperatura interior (K);

T_e = Temperatura exterior (K).

Las pérdidas de calor por el tipo de material usado por los soportes (madera, plástico, hierro, etc.) son considerables y son proporcionales al calor específico del propio material.

(*) Matalla Gonzales Antonio, LOS INVERNADEROS Y LA CRISIS ENERGETICA, Edit. Madrid, 1980, Pág. 17.

(**) Matalla Gonzales Antonio, LOS INVERNADEROS Y LA CRISIS ENERGETICA, Edit. Madrid, 1980, Pág. 16.

El calor que procede de la superficie exterior se transmite sobre todo por convección, por irradiación y, en algunos casos, también por evaporación de la lluvia (debido a la nieve que se derrite).

La transmisión de calor por convección, condensación y evaporación, se limita a las capas del aire estancado que está cerca de ambas superficies del cristal, el cual es buen aislante. Es por esta razón por lo que el calor se dispersa más rápidamente y en mayor cantidad cuando el aire está en movimiento dentro y fuera del invernadero.

Las pérdidas de calor debido a irradiación no aumentan por efecto de viento; en cambio, estando el cielo despejado, las pérdidas son mucho más elevadas que cuando está cubierto de nubes.

Debido a la acción inicial de las radiaciones solares, se calientan todos los objetos que están a su alcance (plantas y terreno). Luego este calor se dispersa debido, a que el aire se calienta, y en parte a través de la evaporación del agua, en parte por irradiación y, en el caso del terreno, se dispersa por conducción en las capas superficiales.

En un invernadero en el cual se cultiven plantas con follaje poco desarrollado, la mayor parte del calor solar es absorbida por el terreno y de este modo, una parte de la energía térmica que allí se almacena puede ser

luego emitida otra vez.

Si las plantas que están en el invernadero cubren la superficie del terreno con sus hojas, para evaporar la humedad que las hojas transpiran, será necesaria casi la mitad del calor solar. Hay que considerar el hecho de que las necesidades térmicas de las plantas cultivadas están en relación directa con las mediciones de las radiaciones solares recibidas.

4.3. LA LUZ

La iluminación es fundamental para un invernadero, porque son las que determinan sus posibilidades bioagronómicas.

Hay que mirar ante todo a las variaciones de la energía, prescindiendo de ciertos factores, como son, por ejemplo. La calidad de la luz y otros de los que ya hemos indicado en el párrafo dedicado a los materiales de recubrimiento de los invernaderos.

La luz solar se relaciona con la intensidad y con la duración de la luz, puesto que éstas, junto con el fotoperíodo, son en gran parte las que determinan el resultado de los cultivos en los invernaderos. Por otro lado, estas características, pero sobre todo la intensidad de la energía solar, son las que determinan la luminosidad de un invernadero, y ésta, a su vez, dependen de los factores meteorológicos del ambiente, de las características de la construcción y sobre todo, del material de recubrimiento.

Cuando se refiere a las condiciones ambientales, está claro que la luminosidad varía según la latitud y, también, varía según la posición del sol durante el día; entonces será muy importante conocer la luminosidad media de un determinado ambiente para establecer que posibilidades existen de poder construir allí un invernadero. Dándole una orientación e inclinación de las paredes que aseguren a las plantas la mayor cantidad posible de luz.

Para maximizar la captación de la energía solar por invernaderos, los rayos solares deben incidir perpendicularmente a la cobertura transparente; pero si el ángulo de incidencia aumenta (de 90° a 180°), las pérdidas debidas al reflejo aumenten más rápidamente y llegan a ser totales si el ángulo de incidencia es de 180° . Por lo tanto, estos rayos no penetran en el invernadero, ya que pueden ser completamente reflejados por la superficie del material de recubrimiento.

Para aumentar la luminosidad en los invernaderos se puede recurrir a unos recubrimientos que tengan forma parabólica o semicilíndrica, de este modo el flujo luminoso que enviste el invernadero es casi el 90% de la luz total y, una fracción de luz de más del 75% podrá pasar a través del recubrimiento.

Al igual que para otros elementos del clima, como son la humedad y la temperatura, también en este caso hay que procurar evitar que se formen

zonas de sombra, las cuales provocan un distinto grado de desarrollo en las plantas, según donde estén colocadas y, por lo tanto, provocan una discontinuidad cualitativa y cuantitativa.

Dentro de los materiales de recubrimiento; hay que seleccionar la más incolora, puesto que los materiales de color absorben más luz que los incoloros, ya que tienen una banda de absorción proporcionada a la intensidad de su color, a nivel de su color complementario y pueden ser usados tanto como diafragma, con distintos fines, tanto como recubrimientos.

Los materiales de color pueden muy bien servir para proporcionar sombra artificialmente.

4.4. LA HUMEDAD

La humedad de la atmósfera de invernadero interviene en la transpiración, en el crecimiento de los tejidos, en la fecundación de las flores y en el desarrollo de enfermedades en las criptogámicas.

La humedad del ambiente influye bastante en el fenómeno de la transpiración, cuanto más húmedo esté el ambiente menos posibilidades hay de aumentar la evaporación, a no ser que se aumente la temperatura del ambiente.

Cuando la transpiración es intensa, consecuencia de falta de humedad en el ambiente, puede haber mas concentración de sales en las partes donde se realiza la fotosíntesis y quedar disminuida esta función.

Cuando la fotosíntesis permanece inactiva, sin luminosidad, la transpiración de las plantas es menor y no importa que exista más humedad.

Con escasez de humedad en el ambiente, la planta puede deshidratarse, paralizando su desarrollo en estas circunstancias. El exceso o defecto de humedad influye en el crecimiento de los tejidos vegetales, siendo este crecimiento menor aunque la temperatura sea óptima. La humedad del ambiente tiene gran incidencia en la fecundación de las flores, realizándose mal, si la humedad es excesiva como si es escasa.

El aire no puede contener una cantidad arbitraria de agua, ya que la cantidad máxima que puede tener depende de la temperatura del aire; esta cantidad es mayor a medida que va aumentando la temperatura hasta que llega al punto de saturación. Este punto de saturación es cuando un volumen determinado de aire, a una temperatura fija, no es capaz de absorber más agua.

Para una misma cantidad de vapor de agua en el mismo volumen, el ambiente estará más húmedo si la temperatura es menor, o menos húmedo si la temperatura es mayor.

La evaporación del agua sirve para eliminar una gran cantidad de la energía calorífica solar recibida por el vegetal. Para transformar un gramo de agua en vapor se necesitan 600 calorías^(*). Esta energía se conserva en el vapor en forma de calor latente y es liberada en la condensación.

La humedad puede controlarse en la atmósfera del invernadero. Este control puede hacerse con los procedimientos que se exponen a continuación:

a. Exceso de humedad –

Con ventilación

Aumentando la temperatura

Acolchando el suelo con plástico

Evitando el exceso de humedad en el suelo, con el control de riegos y el acolchado.

b. Defectos de humedad

Con riegos

Con bassetas de agua en el suelo del invernadero

Pulverizando agua en el ambiente

Removiendo el aire interior del invernadero.

(*) Serrano Cermeño Zoilo, CULTIVO DE HORTALIZAS EN INVERNADEROS, Edit. Aedos – Barcelona, 1979.

(*) Greulach y Adams, LAS PLANTAS, Edit. Limusa, 1990, Pág. 314.

4.5. EL ANHIDRIDO CARBONICO

Este gas de la atmósfera, que es imprescindible en la vida de los vegetales, se puede controlar en el ambiente de los invernaderos. El CO₂ disminuye en la atmósfera del invernadero como consecuencia del proceso fotosintético; este proceso puede tener limitaciones si la concentración del CO₂ en la atmósfera disminuye sensiblemente. Esta disminución de la concentración de este gas depende del número de renovaciones que se haga en la atmósfera confinada y de la actividad de la fotosíntesis.

El contenido de anhídrido carbónico varía a lo largo del día; por las noches es excesivo y no nos preocupa; en las primeras horas de luz solar es cuando hay más concentración de este gas. En las horas del mediodía y posteriores es cuando la concentración de CO₂ pasa por mínimos que pueden disminuir la síntesis de material orgánico, siendo esta deficiencia un factor limitante del cultivo.

La concentración de CO₂ puede elevarse con aporte artificial de gas, cuando los demás factores climáticos sean óptimos, si se desea el aprovechamiento máximo de la actividad fotosintética de las plantas. Las concentraciones excesivas pueden resultar tóxicas para los cultivos.

Durante el invierno, en días de cielo nublado, la concentración de CO₂ es más baja que en días de cielo despejado, puesto que en el primer caso, dadas las condiciones ambientales, los invernaderos permanecen cerrados por todo el día y el gas presente en el invernadero es absorbido por las

plantas y no puede ser devuelto a partir del exterior. Por lo tanto, entre los factores limitantes al normal desarrollo de las plantas en los meses de invierno, hay que recordar no solamente la luz, sino también la concentración de gas carbónico y hay que recordar también que el nivel de CO₂ en el interior del invernadero está relacionado sobre todo con la energía solar y con la temperatura exterior.

En los meses de verano, la alta temperatura que se llega a alcanzar en el interior del invernadero obliga a abrir las ventanas y, entonces el nivel de CO₂ que pueda haber disminuido, vuelve a su nivel normal.

Hay que poner de relieve, empero, que a menudo la concentración de CO₂ presente en un invernadero no es suficiente para las necesidades de las plantas hasta el punto que pueda llegar a ser un factor limitante, teniendo en cuenta que en un invernadero los procesos fisiológicos adquieren unos ritmos más intensos de desarrollo.

4.6. EL OXIGENO

El contenido de oxígeno no preocupa en los ambientes controlados, ya que por una parte el aire atmosférico contiene un porcentaje elevado (21%), y además durante el día las plantas producen gran cantidad de oxígeno durante el proceso de la fotosíntesis^(*).

* Alpi A. Tognoni, CULTIVO EN INVERNADERO. Edit. Mundi Prensa, 1997 – Pág. 69

CAPITULO V

PARTE EXPERIMENTAL

5.1. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE INVERNADEROS

Para aprovechar óptimamente la energía solar es necesario diseñar invernaderos de acuerdo a las necesidades fisiológicas de cada planta. Este diseño de invernadero es una instalación protegida y cubierta artificialmente con materiales transparentes para proteger las plantas de la acción de los fenómenos meteorológicos exteriores. El volumen interior del recinto permite el desarrollo de los cultivos en todo su ciclo vegetativo. Este cultivo forzado y protegido actúa en el acondicionamiento microclimático que rodea a la planta, así mismo engloba todas las técnicas, fertilización, densidad y época de siembra, sanidad vegetal, etc. que inciden en los objetivos que persigue el cultivo protegido, definidos por el incremento de la producción, la mejora de la calidad, la precocidad de la cosecha, el aumento de la producción y por último la calidad del producto final capaz de competir en el mercado. Para conseguir lo anterior; en el diseño y construcción de invernaderos se considerarán también las condiciones externas e internas del mismo. En primer lugar, se imitarán las características externas, las cuales están estrechamente ligadas a las condiciones climáticas de la zona donde se desea construir el invernadero, a las características químicas, físicas y físico-

químicas del suelo, al abastecimiento y calidad del agua con fines de riego y a otras utilidades como el suministro de energía eléctrica, red viaria y comunicaciones, etc. En relación a la ubicación del invernadero, es preciso señalar que no siempre se tiene en cuenta a valorar los microclimas más favorables ni tampoco se tiene la importancia que reviste la elección del tipo de terreno (es el caso del cultivo de plantas en maceta o contenedor). Respecto a lo que se refiere al ambiente climático, es necesario considerar los diferentes componentes que lo caracterizan, entre los que se pueden destacar: la evolución de la temperatura y humedad relativa en sus valores medios, diarios, extremos y estacional, el período libre de heladas, la insolación real y la potencial, la intensidad de la radiación solar, la duración del día, etc. También no se debe olvidar la importancia que tiene el régimen de vientos en la zona, tanto por la acción mecánica en la estructura y en la cubierta; como la influencia en el incremento de las pérdidas de calor en el invernadero. Por lo que en donde se vaya a construir el invernadero se encuentre protegida de los vientos dominantes.

La orientación de los invernaderos es otro de los aspectos a considerarse entre los condicionantes externos en el diseño y construcción de los invernaderos. La orientación está condicionada por la parcelación existente y por la dirección de los vientos dominantes. La orientación debe ser escogida de tal manera que permita la máxima captación de energía solar en el período invernal; en relación con la forma de la cubierta y la

pendiente de la misma.

Además, el cultivo forzado se orienta a la producción de plantas de origen climática distinto del ambiente natural donde se desea cultivarlas; teniendo en cuenta la eficiencia y la funcionabilidad que son características principales que deben tener los invernaderos. Por **eficiencia** se entiende las condiciones fisiológicas óptimas para el cultivo. La **funcionabilidad** es el conjunto de requisitos que permiten la mayor utilización del invernadero, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Estas dos características deben estar armonizadas para que el invernadero sea un sistema productivo capaz de lograr los objetivos trazados.

Actualmente la preocupación en el diseño y construcción de invernaderos es la de optimizar en la conversión de la luz solar en calor a través del "Efecto invernadero". El efecto invernadero ha sido posible utilizarlos para cultivar plantas en climas cálidos y fríos principalmente, a través de una mejor utilización de la luz del sol disponible. El almacenamiento de calor y unidades climáticas de control en el invernadero es muy importante en la vida biológica de las plantas. En consecuencia la atención se centrará en el análisis de los aspectos físicos y tecnológicos.

A nivel internacional el diseño y la posterior construcción de los invernaderos se ha investigado, basándose en trabajos empíricos y que en

gran medida satisface las necesidades agrícolas de latitudes diferentes; a nuestras condiciones climáticas especiales que disponemos en el Perú: Costa árida, Sierra frígida, etc. requiriéndose localmente trabajos experimentales que permita dilucidar los mejores modelos que correspondan. Por otro lado, los modelos físicos existentes no satisfacen plenamente los requerimientos de los diseñadores, necesiéndose datos más conocidos para poder establecer un modelo fenomenológico acorde con las condiciones experimentales locales.

Con los invernaderos enterrados se pretende aprovechar la radiación térmica (el calor) del suelo y el de las paredes en beneficio de la temperatura de la atmósfera interior del sistema, cuando las temperaturas exteriores son menores que la que tiene en ese momento el suelo donde está enterrado el invernadero.

El suelo y las paredes deben ser porosos para que emitan humedad la retengan, ya que las plantas que se van a cultivar en estas instalaciones requieren una humedad relativa muy elevada en el ambiente.

5.2. CONSTRUCCIÓN DE DOS INVERNADEROS

Se han diseñado y construido dos tipos de invernaderos; uno enterrado ("B") y el otro sin enterrar ("A") ambos de tipo túnel; ambos con estructuras de hierro de construcción de 1/2 pulgada, con cubiertas de plástico térmico

estabilizado de código EM 6903 manga natural 69x 0,008; de orientación Este-Oeste, ambas estructuras de tipo túnel y por ende con diferentes acumuladores de energía para cada uno de los invernaderos como se puede ver en las figuras 9, 10 y 11, y así mismo sus correspondientes fotografías 1, 2, 3 y 4 (ver apéndice B). Estos invernaderos se han construido en el distrito de San Sebastian a 14 km de la ciudad del Cusco, a 3335 m.s.n.m.

Adquiridos los materiales; puesto en el lugar de la obra y preparados bajo planificación, procedemos a construirlos de la siguiente forma:

1. Limpieza, nivelación, medición del terreno
2. En el terreno de construcción se trazan con yeso las dimensiones de los invernaderos que es de 2,50 x 4,50 m; considerando la orientación geográfica Este-Oeste.
3. Para uno de ellos, se excava el suelo con pico y se saca la tierra con pala; hasta una profundidad de 1 m. Ver figura 10 y las fotos 1 y 2 (se muestra en el apéndice B).
4. Se forran los hierros de construcción con cinta antioxidante; para evitar la oxidación del metal.

5. En los invernaderos, ubicamos ambos lados del hierro forrado en los hoyos preparados previamente con un ángulo de 45° con respecto a superficie del terreno. Debido a esta acción los hierros se curvan tomando la forma de un tunel. Se muestran en las figuras 9 y 10
6. Montamos transversalmente hierros en las superficies de los hierros curvados, haciendo amarres con alambre galvanizado N^o 18 en la superposición. Observamos en las figuras 9 y 10 y la foto 2.
7. Para mayor estabilidad de las estructuras se clavan con estacas hasta una profundidad de 60 cm en las cuatro esquinas de los invernaderos, luego haciendo amarres al hierro con alambre. Así mismo para mayor estabilidad de las estructuras se amarran con alambres en los intersticios de las estructuras; que también se aprovecha para evitar de que no se hunda la cubierta de plástico.
8. Se colocan toldos de plástico estabilizado sobre la estructura de los invernaderos. Inmediatamente colocamos bloques de piedra y cargas de tierra sobre el plástico solape de 50 cm de longitud hacia afuera de los arcos (estructura de los invernaderos) de hierro. Ver fotos 2, 3 y 4.
9. La ventana-puerta plegables(láminas de plástico se sujeta a la

estructura del invernadero) de 0,70 x 1,50 m ubicada en el centro del lado frontal.

10. Para evaluar el comportamiento térmico colocamos sensores de temperatura, tal como se muestra en la fig.11.

5.3. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS UTILIZADOS.

Los instrumentos y equipos utilizados en la medición de los datos meteorológicos dentro y fuera de los prototipos diseñados son los siguientes:

Un cautil de soldar de 50 Watt. para el sellado de plásticos estabilizados (plástico transparente).

Un cautil de soldar de 40 Watt para soldar el cable polarizado a los terminales del termistor.

- Medio kilo de estaño para soldar los terminales del termistor.

Cincuenta gramos de "grasa para soldar" los terminales del termistor con el cable polarizado.

Un multímetro digital marca HC 3500T para medir la resistencia en Ohmios en los terminales del termistor, para luego expresar en grados de temperatura.

Un termómetro marca LW de fabricación Alemana, para calibrar los termistores. Rango de -12 hasta 112 °C.

Termocuplas tipo "K"(NiCr – Ni Al), para medir la temperatura y expresarlo automáticamente en °C mediante el THERMOMETER digital

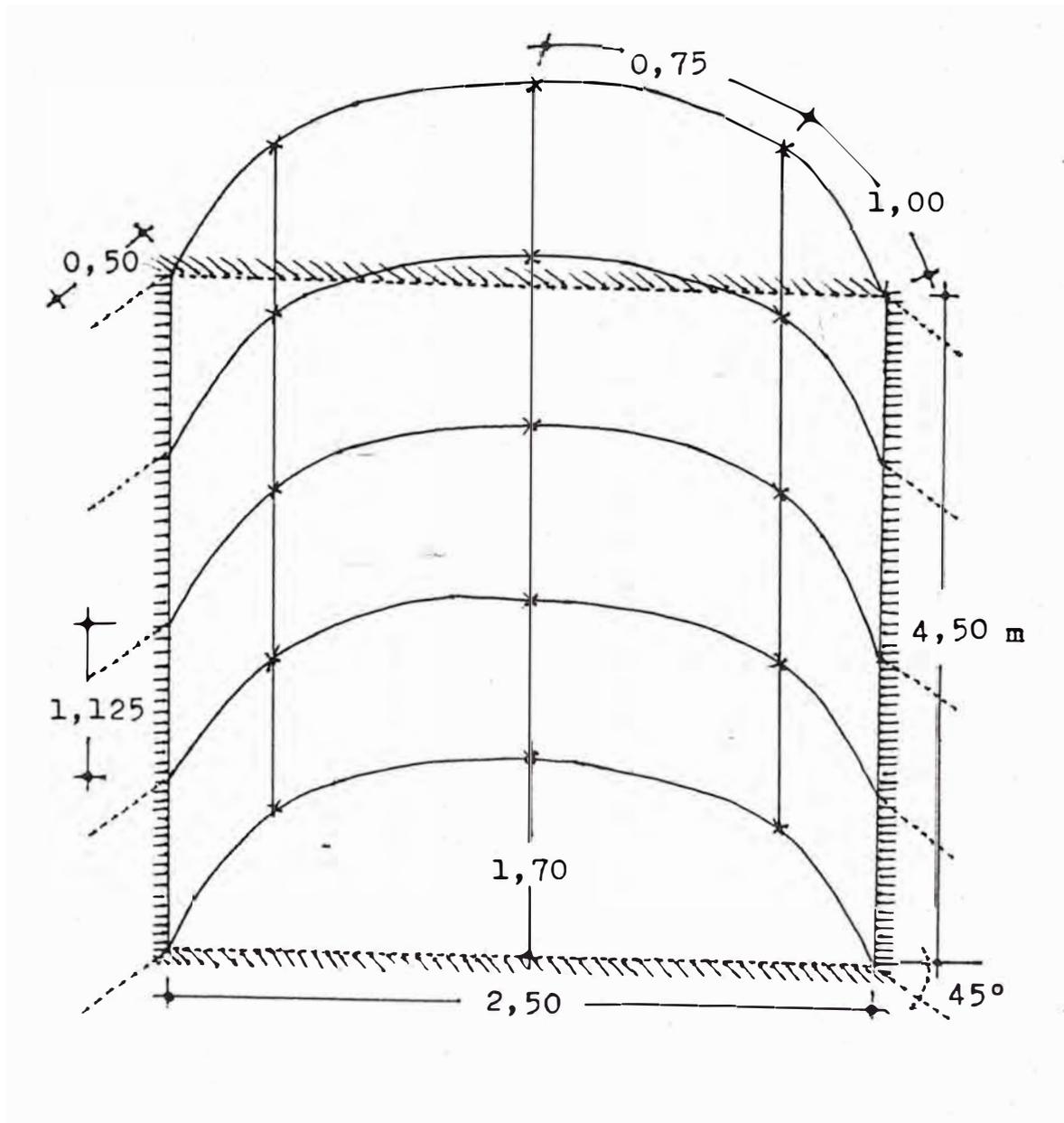


Fig. 9. FIJACION DE LAS ESTRUCTURAS DEL INVERNADERO TIPO "TUNEL".

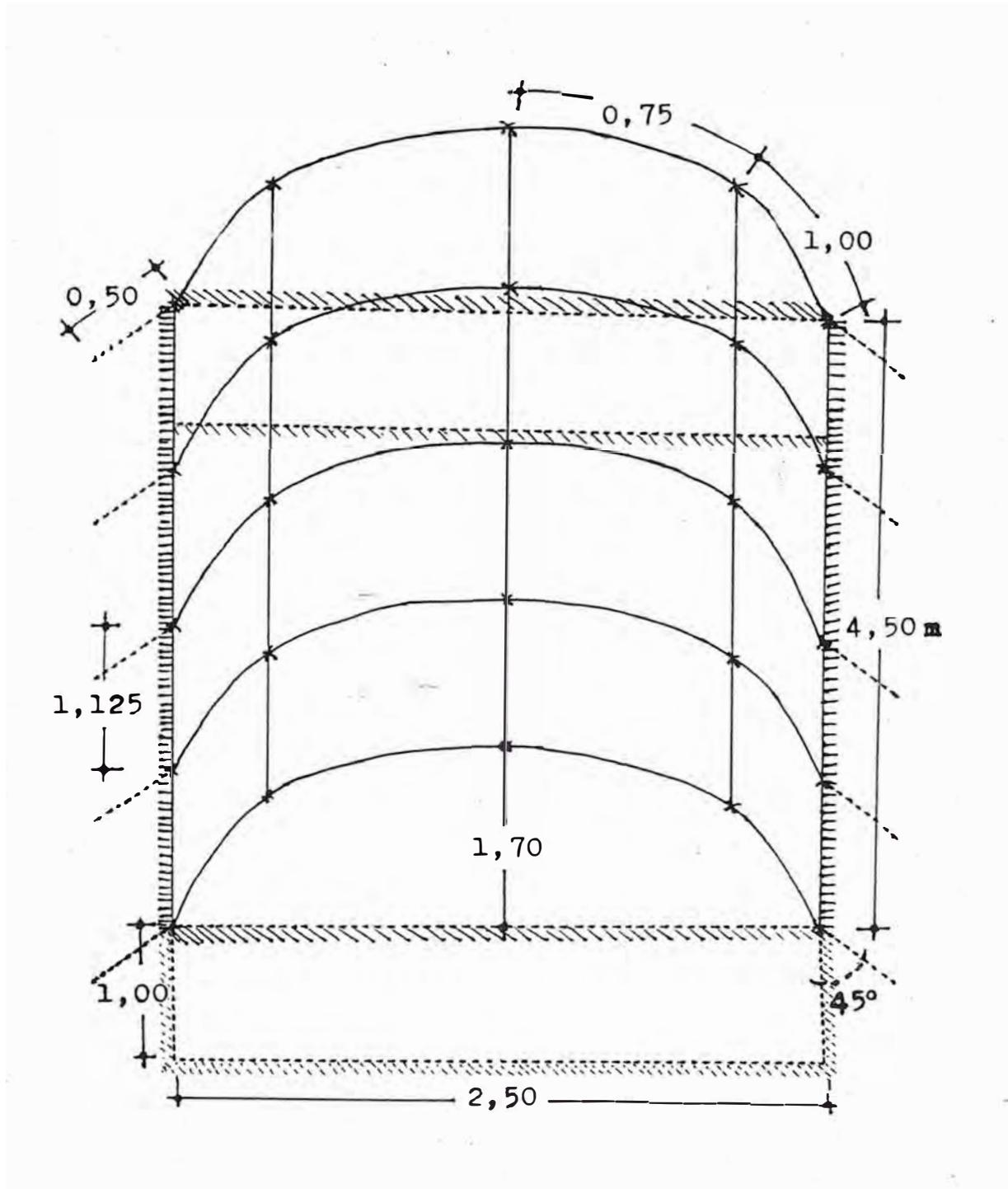


Fig. 10. ESTABILIZACION DE LAS ESTRUCTURAS DEL INVERNADERO "ENTERRADO" CON ESTRUCTURAS DE TIPO "TUNEL".

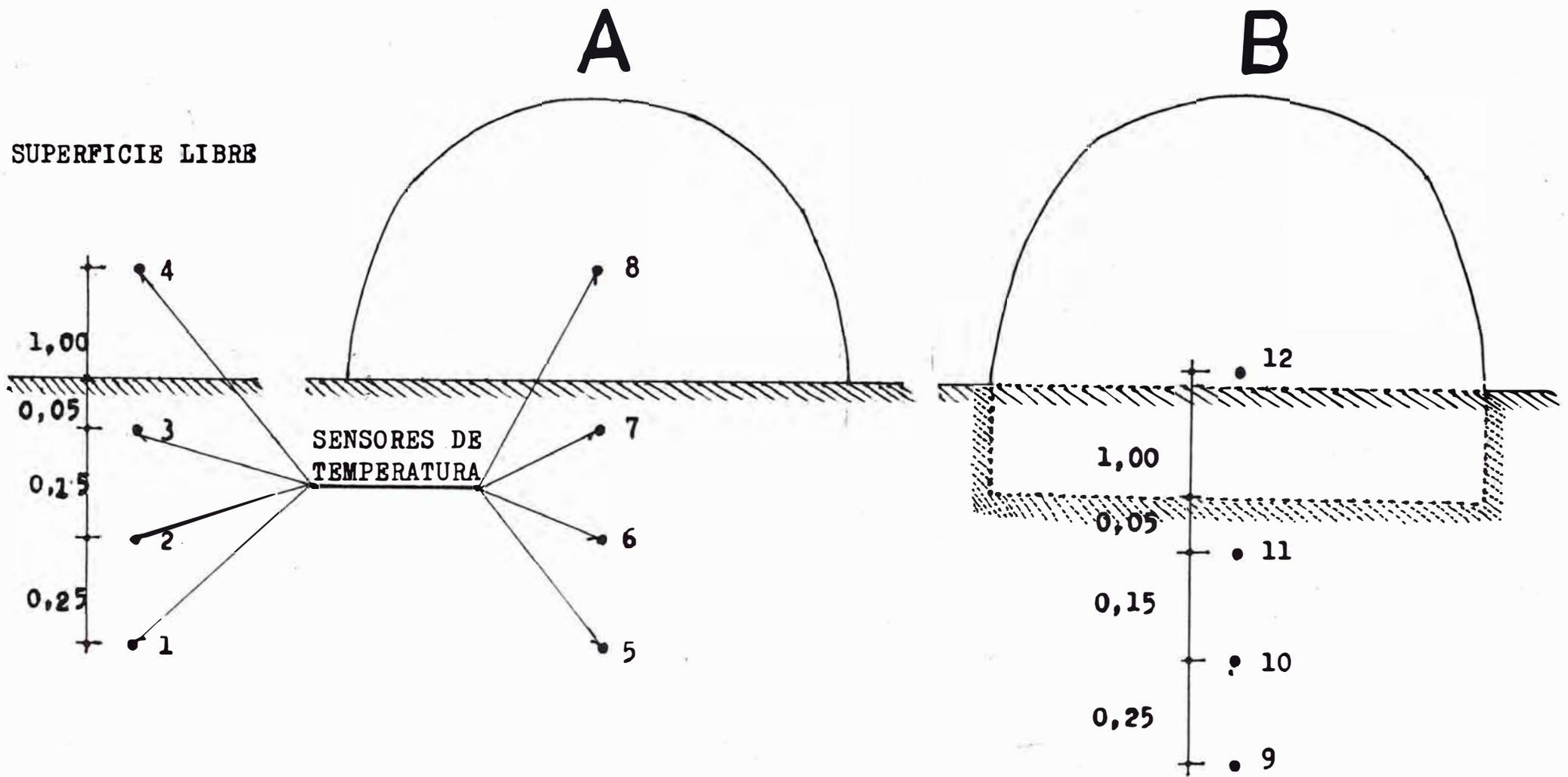


Fig. 11. UBICACION DE SENSORES DE TEMPERATURA EN: SUPERFICIE LIBRE , A (INVERNADERO TIPO "TUNEL") Y B (INVERNADERO "ENTERRADO").

marca CIE, modelo 306.

Termistores de tipo "lenteja".

Un radiómetro de marca HAENNI SOLAR 118 para medir la intensidad de la radiación solar.

Un higrómetro de marca Hidrotes N° 6400 para tomar datos de la humedad relativa y otro higrómetro mecánico marca hygro.

Anemómetro marca Anemo Deuta, cuyo rango es de 0 a 30m/s.

Una Wincha métrica.

Otros recursos como: humanos, materiales y herramientas de construcción.

5.4. EVALUACION EXPERIMENTAL CLIMATOLOGICO.

El trabajo de investigación sobre la evaluación térmica del invernadero incrustado en el suelo para épocas de helada a 3 335 m. s. n. m ubicado en el Distrito de San Sebastián-Cusco se realiza teniendo en cuenta los diferentes parámetros meteorológicos como la variación de la intensidad de la radiación solar, que influye directamente en la variación de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, etc.

Los fenómenos meteorológicos dentro y fuera de los invernaderos son determinantes para optimizar el crecimiento y desarrollo de especies vegetales, puesto que ambas se relacionan estrechamente.

En la construcción que se ha realizado; la cubierta es transparente a las radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. Esta radiación transmitida es transformada en radiación térmica(calor) por el suelo y las paredes principalmente. Por ende ésta energía es necesaria para el cultivo de productos alimenticios de primera necesidad como: tomate, pimiento, rocoto, lechuga, acelga, perejil, etc.

Por otra parte, cabe aclarar que el suelo y las paredes deben ser porosos para retener y emitir humedad; ya que las plantas requieren una humedad relativa bastante elevada.

Es sabido, que en épocas de helada las plantas no resisten a temperaturas bajas; consecuencia de ello, productos alimenticios frescos de primera necesidad son costosos en el mercado; por lo que es necesario introducir esta técnica en los agricultores de las zonas alto andinos del Perú.

Por otra parte valga la aclaración; de que en la construcción incrustada la helada no afecta a las plantas; tampoco el viento.

5.4.1. ELEMENTOS CLIMATICOS EXTERNOS.

Los fenómenos meteorológicos dentro y fuera de los invernaderos se relacionan estrechamente. Por lo que, para una investigación adecuado del comportamiento térmico de los invernaderos se han tomado datos

experimentales de la intensidad de la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento, durante las veinticuatro horas del día; antes y durante el proceso de crecimiento de las plantas. Como veremos posteriormente los datos experimentales.

5.4.2. ELEMENTOS CLIMATICOS INTERNOS.

Los elementos climáticos internos de los invernaderos dependen de los fenómenos meteorológicos externos, creándose de ésta manera un microclima para la función vital del vegetal. Se observara la dependencia de los datos experimentales en tablas y gráficos de datos meteorológicos.

La intensidad de la radiación solar, temperatura, la humedad relativa, la ventilación dentro de los invernaderos influyen en las funciones vitales vegetales siguientes: transpiración, respiración, fotosíntesis, germinación, crecimiento, floración y fructificación.

Las temperaturas máximas y mínimas que soportan la mayoría de los vegetales están comprendidas entre 0 y 70°C, fuera de estos límites casi todos los vegetales mueren o quedan en estado de vida latente.

Las plantas, para un desarrollo correcto de su actividad vegetativa, necesitan que se den diferencias de parámetros meteorológicos entre el día y la noche.

Las plantas para su funcionamiento fisiológico normal dependen fundamentalmente de las temperaturas interiores y del subsuelo del invernadero donde se encuentran las raíces, para lo cual se toma mediciones de la temperatura en diferentes profundidades y altura. A 1,00 m por encima de la superficie de referencia, y a 0,05; 0,15 y 0,25 m debajo de la superficie de los invernaderos. Se muestra en la fig. 11.

5.5. EVALUACIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

Se ha tomado datos experimentales de: intensidad de la radiación solar, temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad del viento; y los mismos parámetros meteorológicos en cada uno de los invernaderos con y sin vegetación, durante las 24 horas del día; por varios días consecutivos con cielo nublado y cielo despejado que así se presentaba los días de dateo, también se tomó datos en diferentes épocas del año, para hacer un análisis adecuado del comportamiento de los diferentes parámetros meteorológicos. Haciendo análisis de las curvas de los parámetros meteorológicos nos indica claramente de que cada uno de los invernaderos tiene un comportamiento diferente, que varia también de día en día, de semana en semana,....Esto nos hace pensar que diseños diferentes presentan curvas que se diferencian, lo que nos sugiere que tipo de invernadero se debe construir en

un determinado medio geográfico y para que época.

Los datos experimentales obtenidos nos indican, de que los invernaderos enterrados se adecuan perfectamente a épocas de helada, porque las plantas no son afectadas por la helada. El salto térmico en el invernadero enterrado es favorable para la vida vegetativa de las plantas, principalmente en horas nocturnas.

5.6. CALCULO DE LAS NECESIDADES TERMICAS

El balance térmico define un estado de equilibrio entre las perdidas y aportes energéticos dentro de los invernaderos. El balance térmico de acuerdo a la ecuación (4,2) es:

$$Q_u = -(Q_{cc} + Q_{rad} + Q_s + Q_{ren}) + Q_{solar} ,$$

con

$$Q_{per} = (Q_{cc} + Q_{rad} + Q_s + Q_{ren})$$

Con la finalidad de simplificar los cálculos en la determinación de la potencia calorífica se desarrolla para el periodo nocturno en la que $Q_{solar} = 0$, entonces la ecuación (4,2) se transforma:

$$Q_u = -(Q_{cc} + Q_{rad} + Q_s + Q_{ren})$$

Calculando el balance térmico para el día 21 de Junio del 2000 a partir de la tabla de los datos experimentales que presentamos a continuación

TABLA DE DATOS METEOROLÓGICOS

FECHA (DIAS)	T (h)	I_e (W/m^2)	T_e ($^{\circ}C$)	I_A (w/m^2)	I_B (w/m^2)	$T_{A(8)}$ ($^{\circ}C$)	$T_{B(12)}$ ($^{\circ}C$)	OBSERVACIONES
19-06-00	05	0	03	0	0	04	08	Despejado
	12	900	28	792	706	12	26	Nubes algodonadas
20-06-00	05	0	-01	0	0	02	07	Despejado
	12	986	30	706	834	15	24	Despejado
21-06-00	05	0	-02	0	0	01	06	Despejado
	12	986	25	712	864	15	33	Despejado
22-06-00	05	0	-01	0	0	02	06	Despejado
	12	967	38	626	804	11	36	Despejado
23-06-00	05	0	01	0	0	01	05	Despejado
	12	925	21	633	834	18	28	despejado

Aclarando que :

t : Es el tiempo en horas.

I_e : Intensidad de la Rad. Solar externa del prototipo

T_e : Temperatura exterior de los invernaderos.

$I_A; I_B$: Intensidades de la Rad. Solar en el ambiente de los invernaderos.

$T_{A(8)}; T_{B(12)}$: Temperaturas internas de los prototipos.

**CALCULO DE LA ENERGÍA INSTANTÁNEA EN LOS
INVERNADEROS PARA EL DÍA 21 DE JUNIO DEL 2000 A PARTIR DE
LA TABLA ANTERIOR**

**1. Cálculo de las pérdidas energéticas para las 05 horas en los
invernaderos siguientes:**

INVERNADERO A

a. PERDIDAS ENERGETICAS POR CONDUCCION-CONVECCION (Q_{cc})

Según la ecuación

$$Q_{cc} = K S \Delta T = K S (T_i - T_e)$$

Donde:

T_e : Temp. exterior del invernadero (271 K)

T_i : Temp. interior del invernadero (274 K)

$K = 0,92 \text{ W/m}^2\text{K}$ (para polietileno 0,08 mm)

$S = 20,66 \text{ m}^2$ (3 lados de la cubierta)

$T_e = 271 \text{ K}$, $T_i = 274 \text{ K}$

$\Delta T = T_i - T_e = 3 \text{ K}$

entonces:

$$Q_{cc} = (0,92 \text{ W/m}^2 \text{ K}) (20,66 \text{ m}^2) (3 \text{ K})$$

$$Q_{cc} = 57,02 \text{ W}$$

b. PERDIDAS ENERGETICAS POR RADIACION TERMICA (Q_{rad})

$$Q_{\text{rad}} = 5,12 \times 10^{-8} S_{\text{rad}} \tau (T_i^4 - T_e^4)$$

siendo

$$S_{\text{rad}} = 2,50\text{m} \times 4,50\text{m} = 11,25 \text{ m}^2$$

$$\tau = 0,80 \text{ para el polietileno}$$

$$T_i^4 - T_e^4 = 274^4 - 271^4 = 242825294 \text{ K}^4$$

luego reemplazamos

$$Q_{\text{rad}} = 5,12 \times 10^{-8} \times 11,25 \times 0,80 \times 242825294 \text{ W}$$

$$Q_{\text{rad}} = 111,89 \text{ W}$$

c. PERDIDAS ENERGETICAS POR RENOVACION DEL AIRE (Q_{ren}).

Se calculan por la ecuación:

$$Q_{\text{ren}} = R V P_e C_p (T_i - T_e)$$

con:

$$R = 1,1 \text{ ren/h para zonas de viento en calma.}$$

$$V = 11,04 \text{ m}^3$$

$$P_e = 1,29 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_p = 991,6 \text{ J/Kg K}$$

$$T_i - T_e = 3 \text{ K}$$

De donde se obtiene

$$Q_{ren} = (1,1 \text{ ren/h})(11,04 \text{ m}^3)(1,29 \text{ Kg/m}^3)(991,6 \text{ J/Kg K})(3 \text{ K})$$

$$Q_{ren} = 46602,50 \text{ J/h}$$

$$Q_{ren} = 12,95 \text{ W}$$

d. PERDIDAS ENERGETICAS POR CONDUCCION A TRAVES DEL SUELO(Q_s)

Está dada por la ecuación

$$Q_s = 0,1 (Q_{cc} + Q_{ren})$$

$$Q_s = 0,1 (57,02 + 12,95) \text{ W}$$

$$Q_s = 6,99 \text{ W}$$

e. LAS PÉRDIDAS ENERGÉTICAS EN EL INVERNADERO A SON:

$$Q_{per} = (Q_{cc} + Q_{rad} + Q_s + Q_{ren})$$

$$Q_{per} = (57,02 + 111,89 + 6,99 + 12,95) \text{ W}$$

$$Q_{per} = 188,85 \text{ W}$$

f. CALOR GANADO POR LA RADIACIÓN SOLAR(Q_{solar})

$$Q_{solar} = I_i S = 0 \quad (I_i = 0)$$

Donde I_i : intensidad de la rad. solar interna

S : área de suelo.

g. CALOR ÚTIL DENTRO DEL INVERNADERO

$$Q_u = -Q_{per} + Q_{solar}$$

$$Q_u = -188,85 + 0 = -188,85 \text{ W.}$$

EN EL INVERNADERO B.

a. PERDIDAS ENERGETICAS POR CONDUCCIÓN-CONVECCION (Q_{cc}).

Sea la ecuación

$$Q_{cc} = K S \Delta T = K S (T_i - T_e)$$

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = \Delta T(\text{K}) \text{ en diferencia}$$

$$T_i = 6^{\circ}\text{C} = 279 \text{ K}, \quad T_e = -2^{\circ}\text{C} = 271 \text{ K}$$

$$K = 0,92 \text{ W/m}^2 \text{ k}$$

$$S = 20,66 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = 8 \text{ K}$$

$$Q_{cc} = (0,92)(20,66)(8) \text{ W}$$

$$Q_{cc} = 152,06 \text{ W}$$

b. PERDIDAS ENERGETICAS POR RADIACION TERMICA (Q_{rad})

$$Q_{rad} = 5,12 \times 10^{-8} \times S_{rad} \tau (T_i^4 - T_e^4)$$

Siendo

$$S_{\text{rad}} = 2,50\text{m} \times 4,50\text{m} = 11,25 \text{ m}^2$$

$$\tau = 0,80 \text{ para el polietileno}$$

$$(T_i^4 - T_e^4) = (279^4 - 271^4) = 665640800$$

$$Q_{\text{rad}} = 5,12 \times 10^{-8} (11,25)(0,80)(665640800)$$

$$Q_{\text{rad}} = 306,73 \text{ W}$$

c. PERDIDAS ENERGETICAS POR RENOVACION DE AIRE (Q_{ren}).

Utilizando la ecuación siguiente:

$$Q_{\text{ren}} = R V \bar{P}_e C_p (T_i - T_e)$$

Donde:

$$R = 1,1 \text{ ren/h para zonas con viento en calma}$$

$$V = 22,30 \text{ m}^3$$

$$P_e = 1,29 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 991,6 \text{ J/Kg K}$$

$$(T_i - T_e) = 8 \text{ K}$$

$$Q_{\text{ren}} = (1,1)(22,30)(1,293)(991,6)(8) \text{ J/h}$$

$$Q_{\text{ren}} = 251606,92 \text{ J/h} = 69,89 \text{ W}$$

d. PERDIDAS ENERGETICAS POR CONDUCCION A TRAVES DEL

SUELO (Q_s)

Según la siguiente ecuación tenemos:

$$Q_s = 0,1 (Q_{cc} + Q_{ren})$$

$$Q_s = 0,1 (152,06 + 69,89) \text{ W} = 22,20 \text{ W}$$

e. LAS PERDIDAS ENERGETICAS EN EL INVERNADERO III

$$Q_{per} = (Q_{cc} + Q_{rad} + Q_{ren} + Q_s)$$

$$Q_{per} = (152,06 + 306,73 + 69,89 + 22,20) \text{ W}$$

$$Q_{per} = 550,88 \text{ W}$$

$$Q_{solar} = I_i A = 0(11,25) = 0 \text{ W}$$

$$Q_u = - 550,88 \text{ W}$$

Indica que el invernadero ha perdido(- 550,05) W de energía.

2. Cálculo de las pérdidas energéticas en los invernaderos A y B a las 12 horas del día 21 de Junio del 2000.

INVERNADERO A

a. PERDIDAS ENERGETICAS POR CONDUCCION- CONVECCION(Q_{cc})

$$Q_{cc} = K S (T_i - T_e)$$

$$T_i = 288 \text{ K} \quad T_e = 298 \text{ K}$$

$$\Delta T = 288 \text{ K} - 298 \text{ K} = - 10 \text{ K}$$

$$S = 20,66 \text{ m}^2$$

$$K = 0,92 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$$

$$Q_{cc} = (0,92) (20,66) (-10) \text{ W}$$

$$Q_{cc} = -190,07 \text{ W.}$$

b. PERDIDAS DE CALOR POR RADIACION DEL SUELO(Q_{rad})

$$Q_{rad} = 5,12 \times 10^{-8} S_{rad} \tau (T_i^4 - T_e^4)$$

$$S_{rad} = 11,25 \text{ m}^2$$

$$\tau = 0,8$$

$$T_i = 15 \text{ }^\circ\text{C} = 288 \text{ K}$$

$$T_e = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$$

$$Q_{rad} = 5,12 \times 10^{-8} (11,25)(0,8)(-1,0064 \times 10^5) \text{ W}$$

$$Q_{rad} = -463,77 \text{ W}$$

c. PERDIDAS DE CALOR POR RENOVACION DEL AIRE(Q_{ren}).

$$Q_{ren} = R V \rho_e C_p \Delta T$$

$$R = 1,1 \text{ ren/h} = 3,06 \times 10^{-4} \text{ ren/s}$$

$$V = 11,04 \text{ m}^3$$

$$\rho_e = 1,29 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 991,6 \text{ J/kg K}$$

$$Q_{ren} = (1,1)(11,04)(1,29)(991,6)(-10) \text{ J/h}$$

$$Q_{ren} = -43,15 \text{ W}$$

d. PERDIDAS DEL CALOR POR CONDUCCION A TRAVES DEL SUELO (Q_s)

$$Q_s = (0,1) (Q_{cc} + Q_{ren})$$

$$Q_s = (0,1)(- 190,07 - 43,15) W = - 23,32 W$$

e. PERDIDAS TOTAL DE CALOR(Q_{per})

$$Q_{per} = Q_{cc} + Q_{rad} + Q_{ren} + Q_s$$

$$Q_{per} = (-190,07 - 463,77 - 43,15 - 23,32) W$$

$$Q_{per} = -720,31 W$$

f. CALOR GANADO POR EL SUELO (INTERIOR DEL INVERNADERO). (Q_{solar})

$$Q_{solar} = I_i S$$

Donde:

$$S = 2,50 m \times 4,50 m = 11,25 m^2 \text{ (área del suelo)}$$

$$I_i = 712 W/m^2$$

$$Q_{solar} = I_i S$$

$$Q_{solar} = (712)(11,25) W$$

$$Q_{solar} = 8010 W$$

g. BALANCE EN EL INVERNADERO:

$$Q_u = Q_{solar} - Q_{per} = (8010 - (- 720,31)) W$$

$$Q_u = 8730,31 \text{ W, calor útil}$$

INVERNADERO B

a. PERDIDAS DE CALOR POR CONDUCCION-CONVECCION

$$Q_{cc} = KS (T_i - T_e)$$

$$T_i = 33 \text{ }^{\circ}\text{C} = 306 \text{ K}, \quad T_e = 25 \text{ }^{\circ}\text{C} = 298 \text{ K}$$

$$Q_{cc} = (0,92)(20,66)(306 - 298) \text{ W}$$

$$Q_{cc} = 152,06 \text{ W}$$

b. PERDIDAS DEL CALOR POR RADIACION DEL SUELO.

$$Q_{rad} = 5,12 \times 10^{-8} S_{rad} \tau (T_i^4 - T_e^4)$$

$$Q_{rad} = 5,12 \times 10^{-8} (11,25)(0,8) (306^4 - 298^4)$$

$$= 5,12 \times 10^{-8} (11,25)(0,8)(881550081) \text{ W}$$

$$Q_{rad} = 406,22 \text{ W}$$

c. PERDIDAS DE CALOR POR RENOVACION DEL AIRE

$$Q_{ren} = R V P_e C_p \Delta T$$

$$Q_{ren} = (1,1)(22,30)(1,29)(991,60)(8)$$

$$Q_{ren} = 69,73 \text{ W}$$

d. PERDIDAS DE CALOR POR CONDUCCION A TRAVES DEL SUELO

$$Q_s = (0,1)(Q_{cc} + Q_{ren})$$

$$Q_s = (0,1)(152,06 + 69,73) \text{ W}$$

$$Q_s = 22,18 \text{ W}$$

e. PERDIDAS TOTAL DE CALOR

$$Q_{per} = Q_{cc} + Q_{rad} + Q_{ren} + Q_s$$

$$Q_{per} = (152,06 + 406,22 + 69,73 + 22,18) \text{ W}$$

$$Q_{per} = 650,19 \text{ W}$$

f. CALOR GANADO POR EL SUELO DEL INVERNADERO POR EL EFECTO DE LA RADIACION SOLAR (Q_{solar}).

$$Q_{solar} = I_j S$$

$$Q_{solar} = (864)(11,25) \text{ W}$$

$$Q_{solar} = 9720 \text{ W}$$

g. CALCULO DEL CALOR UTIL (Q_u).

$$Q_u = Q_{solar} - Q_{per}$$

$$Q_u = (9720 - 650,19) \text{ W}$$

$$Q_u = 9069,81 \text{ W}$$

5.7. DATOS Y CURVAS DE LOS PARAMETROS METEOROLOGICOS DE LOS INVERNADEROS

A continuación presentamos datos experimentales en tablas; las que generan gráficos. Las series 1, serie 2,..., serie 12, corresponden a temperaturas medidas en las posiciones 1,2,..., 12; concordante con la fig.11 (pág.103).

TABLA DE DATOS METEOROLOGICOS DEL 16 DE AGOSTO DEL 2000

Tiempo (h)	SUPERFICIE LIBRE							A					B				OBSERVACIONES		
	TEMPERATURA				Rad.sol ext. (W/m ²)	Humedad Relat.Ext. (%)	Velocidad del viento (m/s)	TEMPERATURA				Humedad Relat.int. (%)	TEMPERATURA					Rad.sol int. (W/m ²)	Humedad Relat.int. (%)
	1 (°C)	2 (°C)	3 (°C)	4 (°C)				5 (°C)	6 (°C)	7 (°C)	8 (°C)		9 (°C)	10 (°C)	11 (°C)	12 (°C)			
0	13.9	12.5	10.5	5	0	73	0	13.4	12.8	11.9	8	76	13.9	13.8	12.4	8	0	68	despejado
1	13.9	12.4	10.4	4	0	74	0	13.4	12.8	11.8	7.5	76	13.8	13.7	12.3	7	0	70	despejado
2	13.8	12.3	10.3	4	0	74	0	13.3	12.7	11.8	7.5	76	13.7	13.6	12.1	6.5	0	70	despejado
3	13.6	11.9	9.7	4	0	75	0	13.1	12.4	11.5	7	75	13.5	13.4	11.9	6.5	0	72	despejado
4	13.4	11.7	9.3	3	0	75	0	12.9	12.2	11.2	7	74	13.3	13.0	11.3	6	0	72	despejado
5	13.1	11.2	8.9	1	0	75	0	12.8	11.8	10.8	6	73	13.2	12.7	11.0	5	0	72	despejado
6	12.9	11.0	8.6	3	0	76	0	12.6	11.7	10.7	7	72	12.9	12.5	10.6	5	0	72	despejado
7	12.5	10.6	8.2	3	140	76	0	12.4	11.5	10.5	7	76	12.7	12.2	10.3	5	128	73	despejado
8	12.4	10.3	8.3	6	529	70	0	12.2	11.4	10.3	8	70	12.5	11.9	10.3	8	338	74	despejado
9	12.0	10.3	10.3	12	720	45	0	12.0	11.2	11.2	14	60	12.3	11.7	10.8	15	494	56	despejado
10	12.0	10.8	13.2	17	842	44	0	12.0	11.7	13.3	20	55	12.1	12.0	12.3	25	598	58	despejado
11	12.2	12.0	16.0	21	911	40	0	12.0	12.7	16.0	23	55	12.1	12.5	15.7	30	691	54	despejado
12	12.5	13.1	17.5	23	206	36	0	12.4	13.9	18.0	20	45	12.4	14.5	19.7	25	164	48	poco nublado
13	13.1	14.1	18.3	32	260	37	0	13.5	15.2	17.7	22	49	12.9	15.4	20.7	33	202	47	poco nublado
14	13.6	14.8	19.0	25	741	38	0	13.9	15.4	17.3	21	56	13.5	16.3	21.4	30	517	38	poco nublado
15	14.2	15.0	19.3	21	398	37	2	13.9	15.4	16.9	19	55	14.1	17.1	21.4	23	269	38	poco nublado
16	14.5	15.8	19.0	20	417	39	2	14.1	15.4	16.7	18	54	14.5	17.4	20.7	23	276	40	poco nublado
17	14.9	16.0	18.3	17	133	42	1	14.3	15.2	16.0	15	58	14.7	17.5	19.4	18	125	48	poco nublado
18	15.1	16.0	17.3	13	0	46	1	14.3	15.0	15.4	14	64	15.1	17.3	18.3	15	0	56	despejado
19	15.3	15.3	15.3	12	0	50	1	14.3	14.6	14.8	13	65	15.2	16.9	17.0	13	0	58	despejado
20	15.2	15.0	14.3	11	0	58	0	14.1	14.4	14.2	12	70	15.2	16.4	16.1	12	0	60	despejado
21	15.1	14.7	13.9	10	0	68	0	14.0	14.1	13.8	11	74	15.1	16.0	15.3	10	0	62	despejado
22	14.9	14.3	13.1	8	0	64	0	13.8	13.8	13.5	10	72	14.9	15.5	14.6	9	0	64	despejado
23	14.7	14.0	12.7	5	0	63	0	13.7	13.5	13.0	9	70	14.7	15.1	13.9	9	0	66	despejado
24	14.5	13.6	12.1	5	0	64	0	13.5	13.1	12.5	9	70	14.5	14.6	13.4	9	0	68	despejado

GRAFICO DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE LIBRE
16 DE AGOSTO DEL 2000

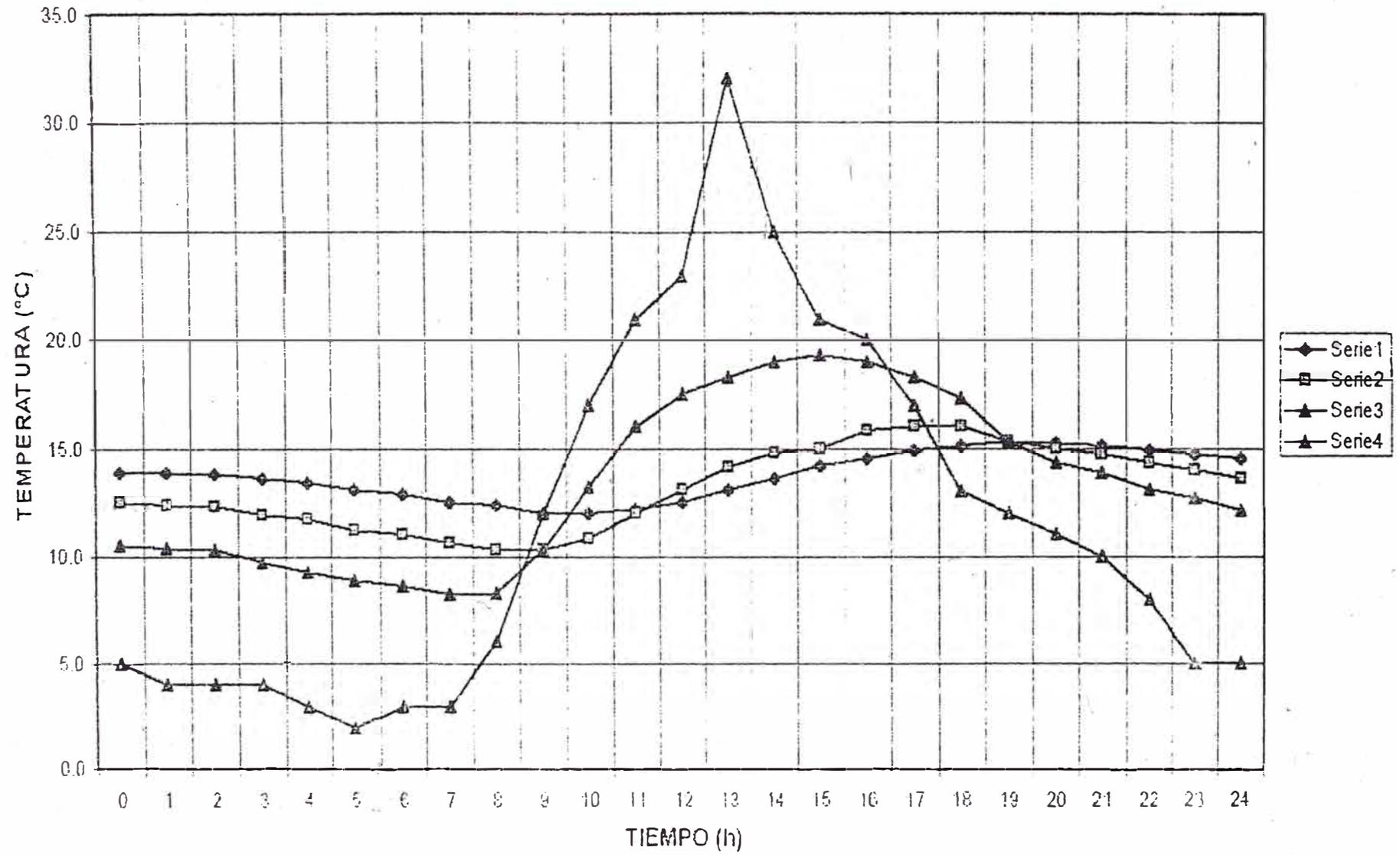


GRAFICO DE TEMPERATURAS DEL NVERNADERO "A"
16 DE AGOSTO DEL 2009

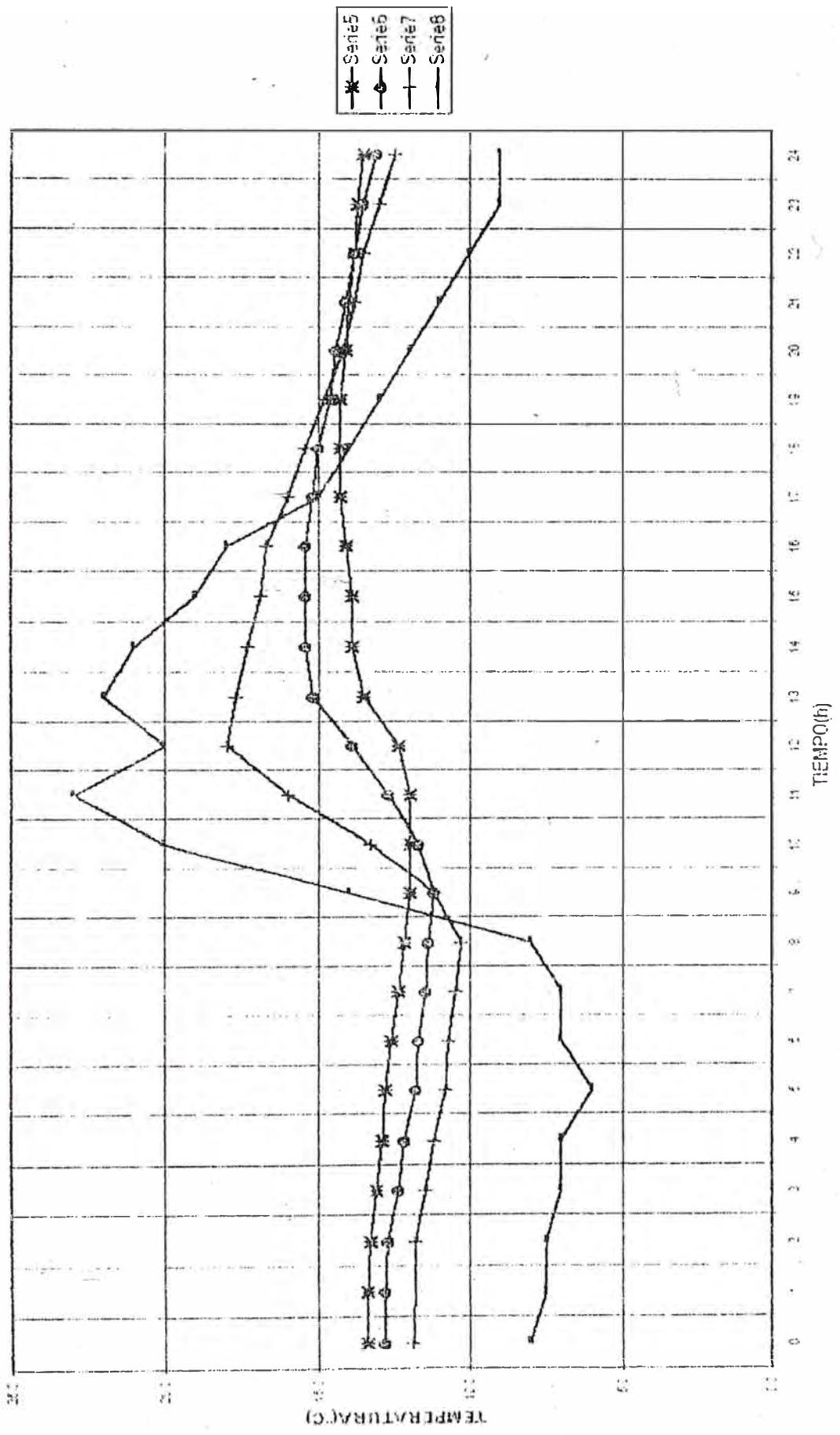


GRAFICO DE TEMPERATURAS DEL INVERNADERO "B"
16 DE AGOSTO DEL 2000

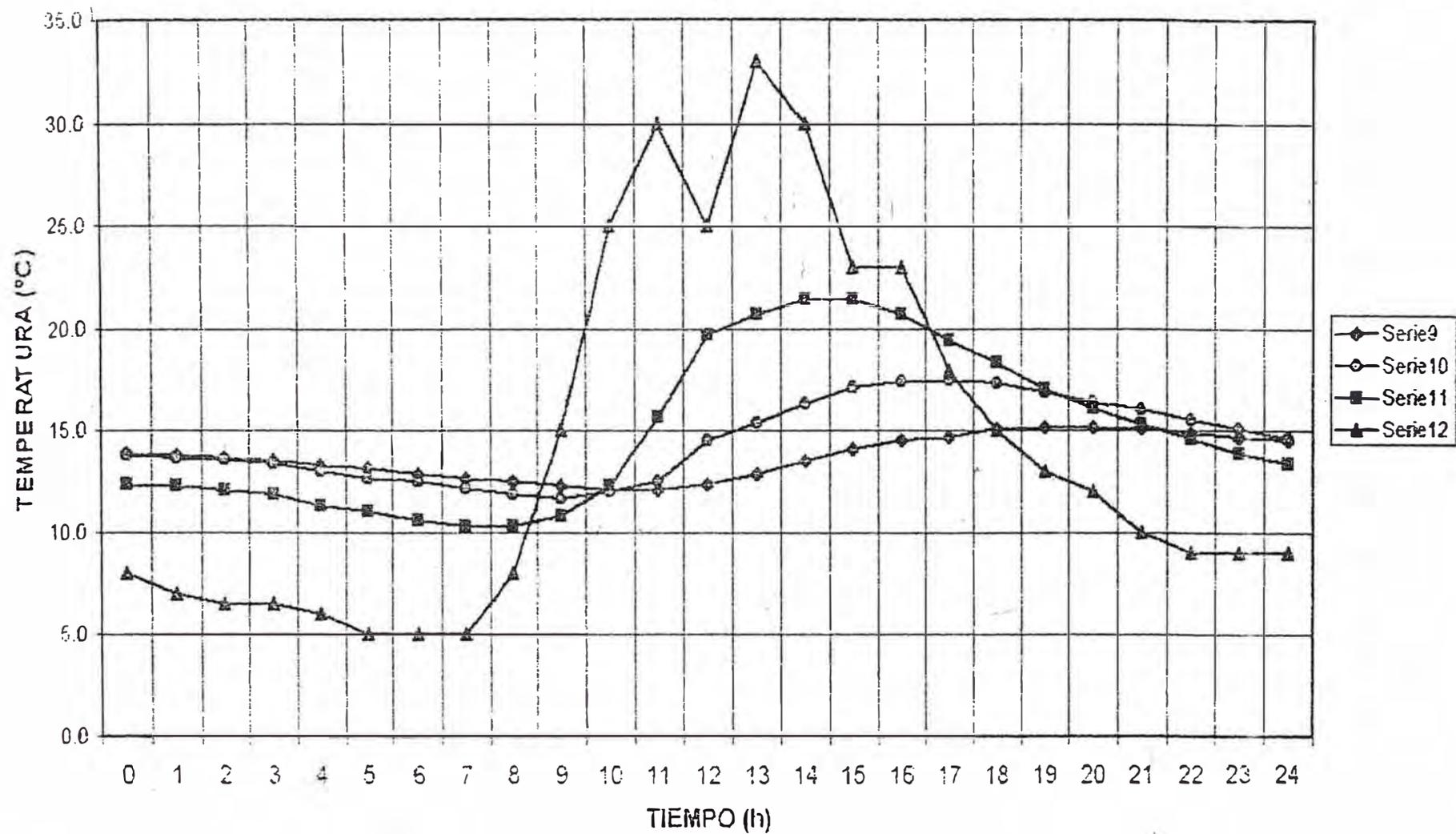


GRAFICO DE COMPARACION DE TEMPERATURAS A 26 CM DE PROFUNDIDAD
16 DE AGOSTO DEL 2000

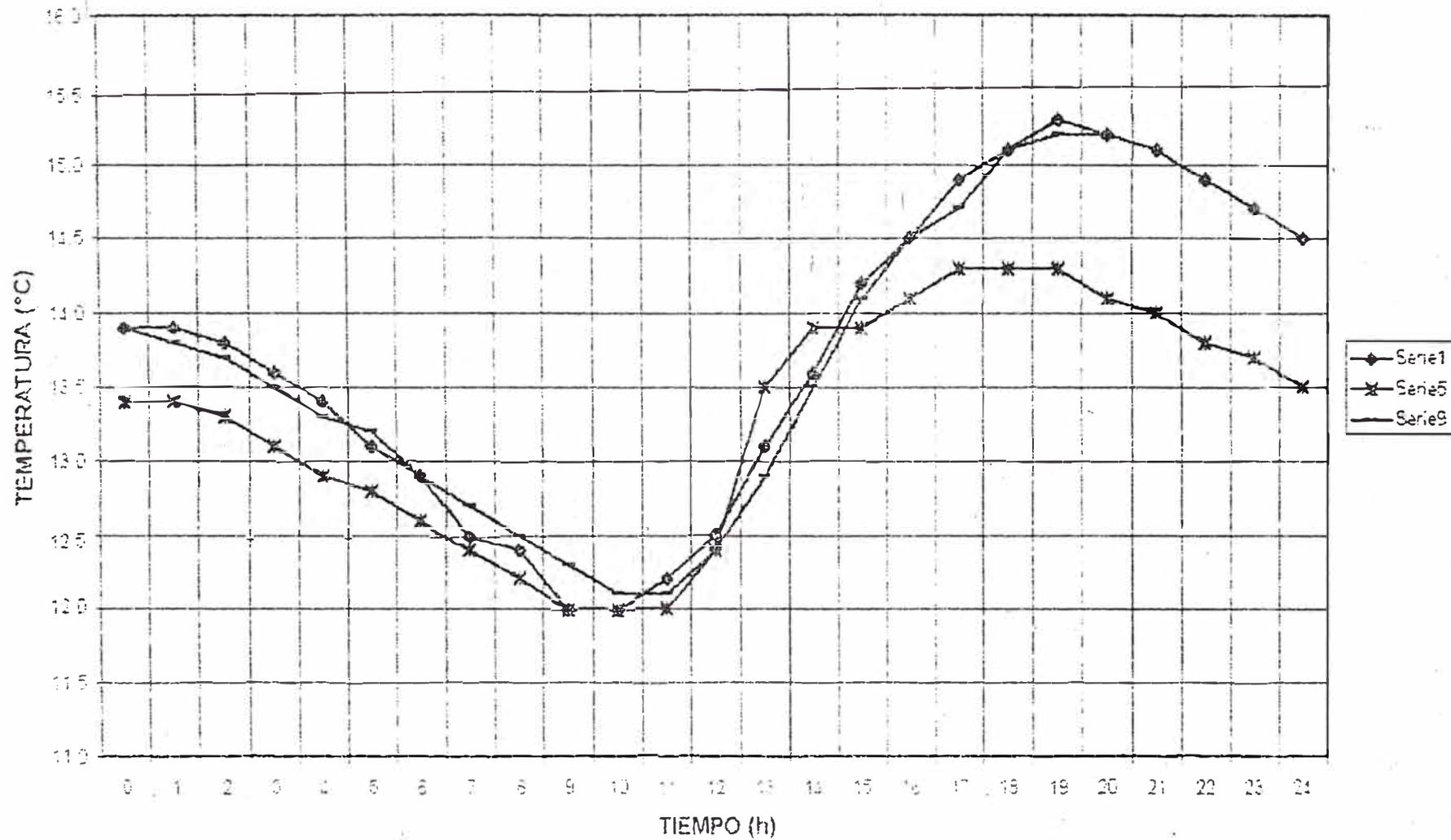


GRAFICO DE COMPARACION DE TEMPERATURAS A 15 CM DE PROFUNDIDAD
16 DE AGOSTO DEL 2000

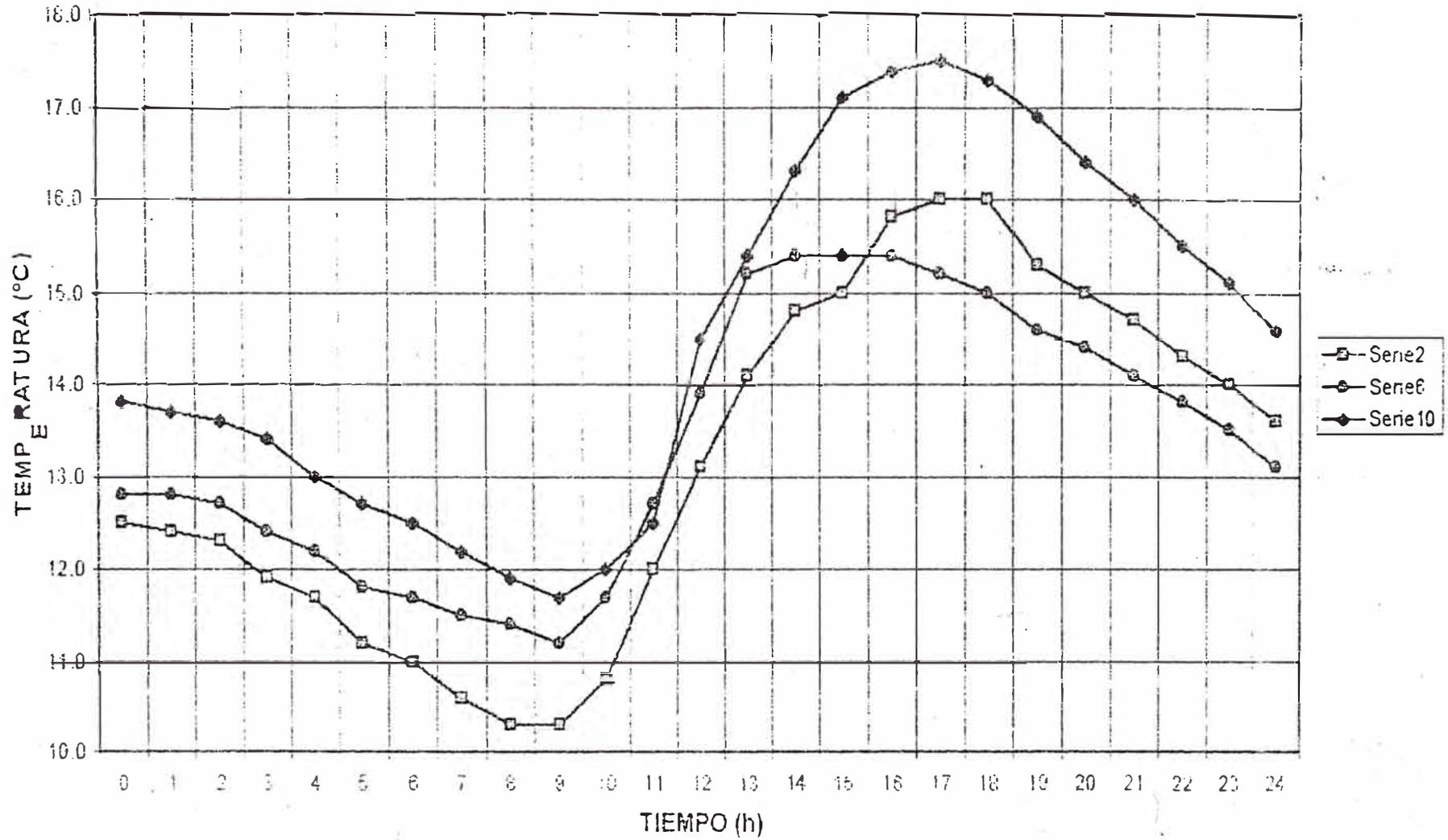


GRAFICO DE COMPARACION DE TEMPERATURAS A 5 CM DE PROFUNDIDAD
16 DE AGOSTO DEL 2000

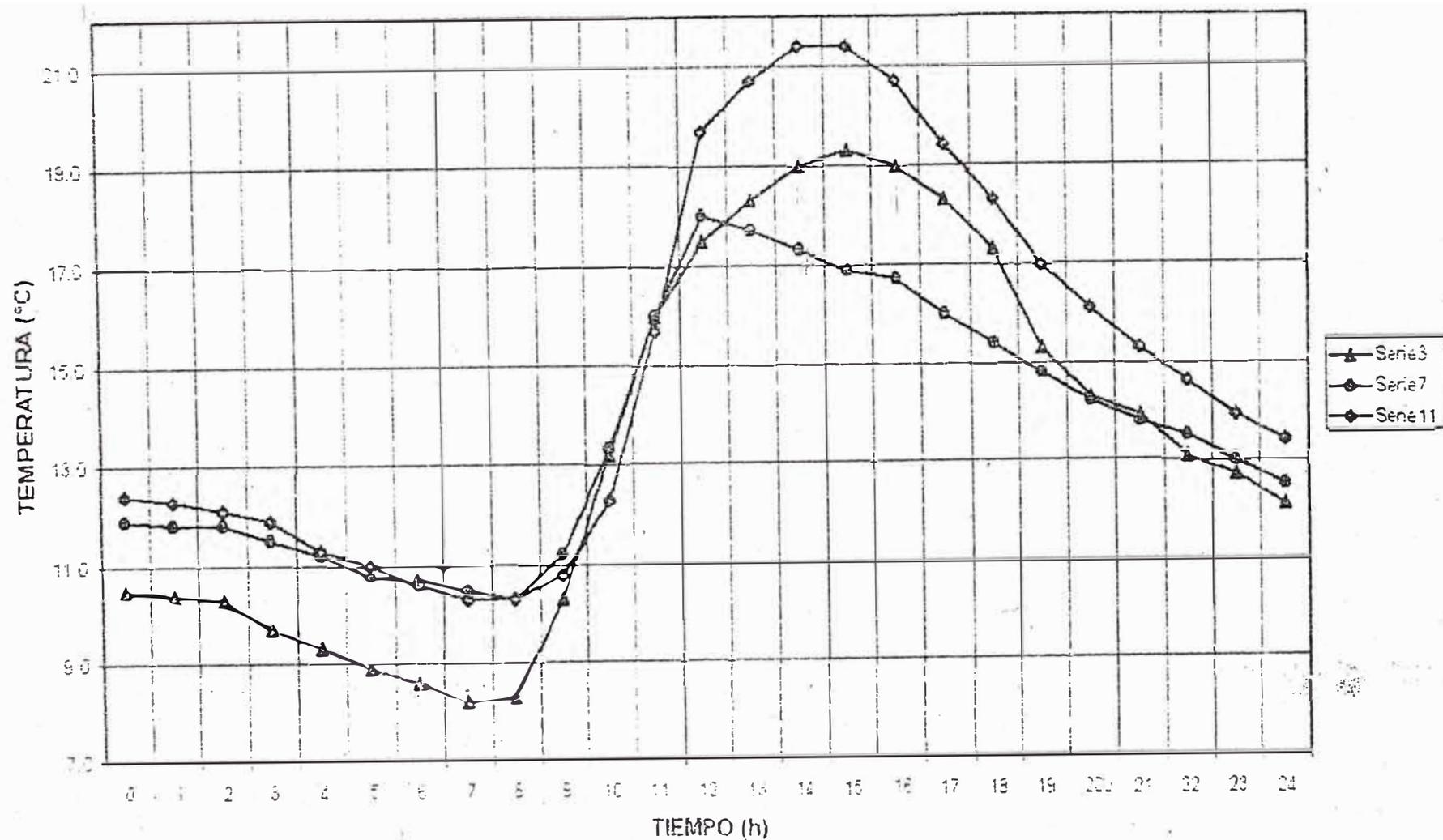


GRAFICO DE COMPARACION DE TEMPERATURAS EN EL AMBIENTE DE
LOS INVERNADEROS Y LA SUPERFICIE LIBRE
16 DE AGOSTO DEL 2000

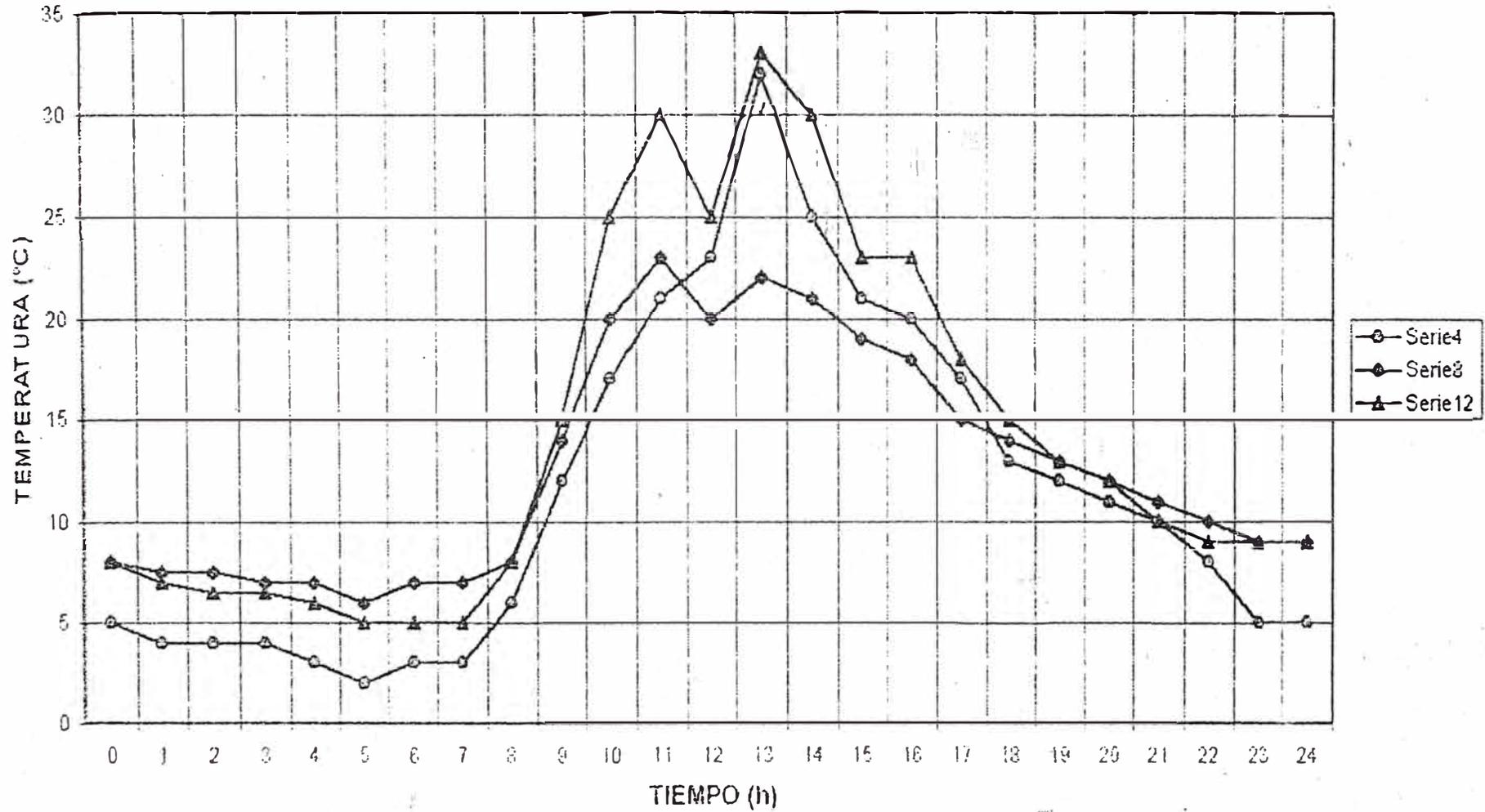


GRAFICO DE COMPARACION DE RADIACION SOLAR EXTERIOR E INTERIOR
16 DE AGOSTO DEL 2000

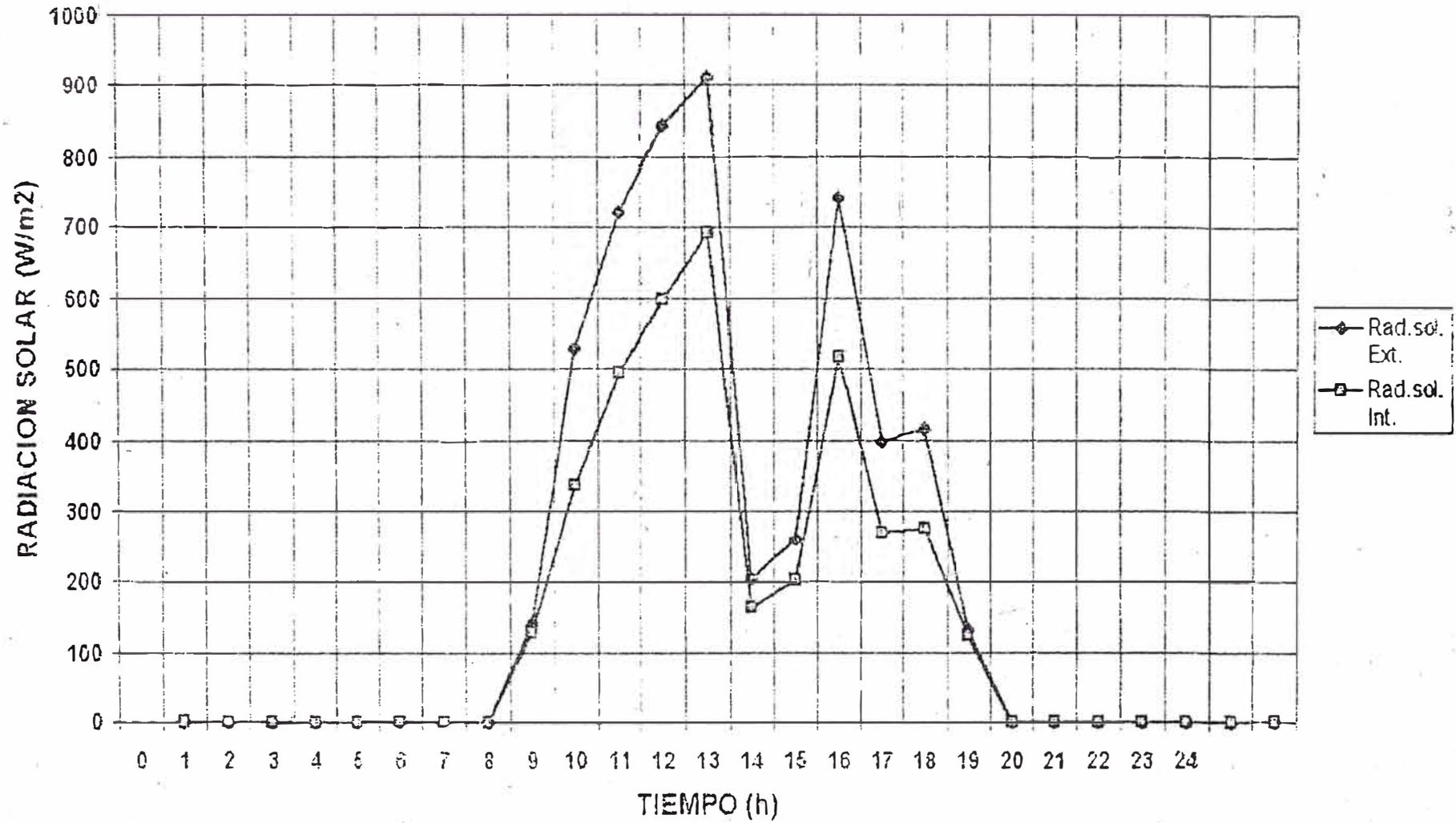
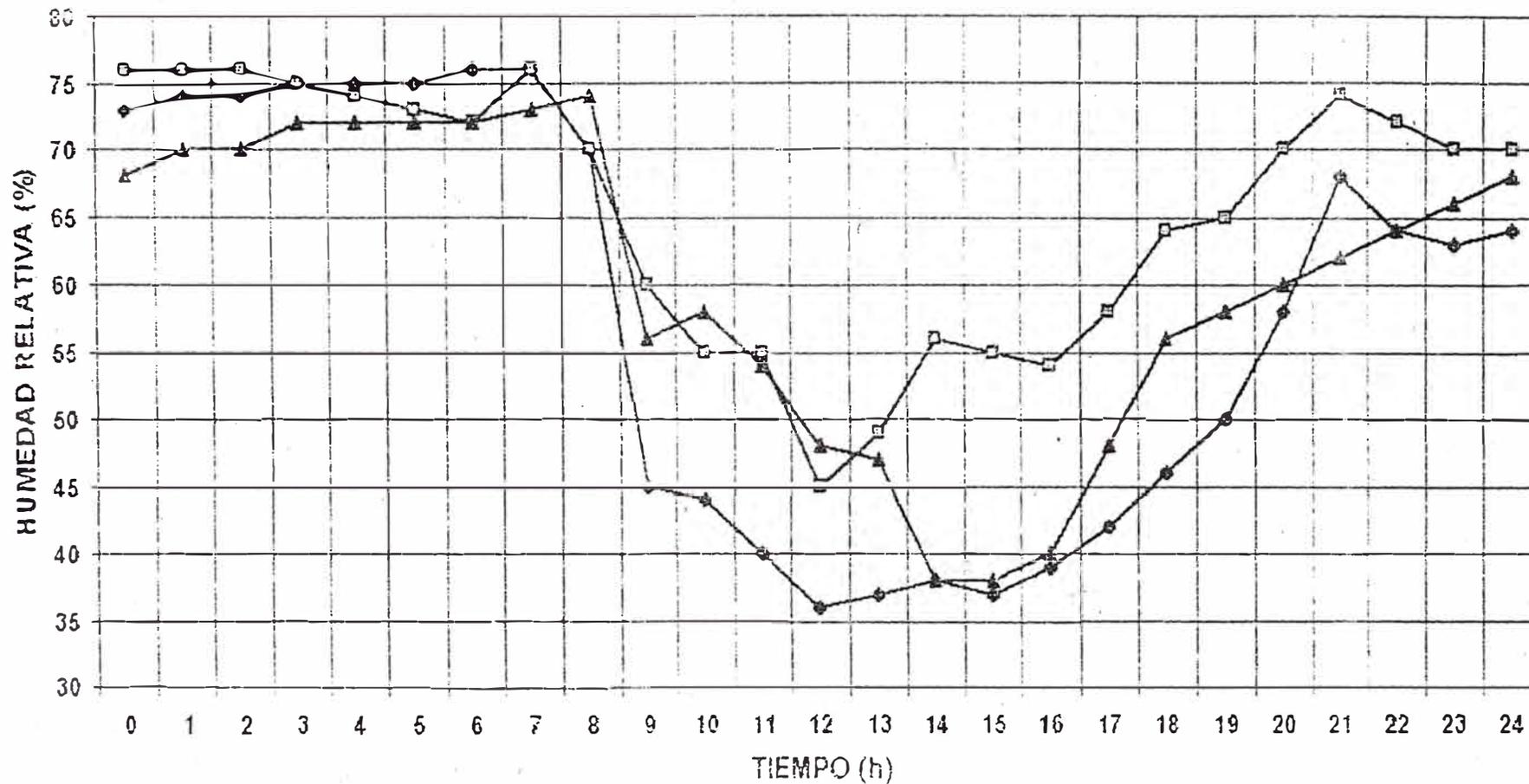


GRAFICO DE COMPARACION DE HUMEDAD RELATIVA
EXTERIOR E INTERIOR DE "A" Y "B"
16 DE AGOSTO DEL 2000



◆ Humedad Relat. Ext. (%) □ Humedad Relat. Int A (%) ▲ Humedad Relat. Int B (%)

TABLA DE DATOS METEOROLOGICOS DEL 25 DE AGOSTO DEL 2000

Tiempo (h)	SUPERFICIE LIBRE							A					B					OBSERVACIONES	
	TEMPERATURA				Rad.sol ext (W/m²)	Humedad Relat Ext (%)	Velocidad del viento (m/s)	TEMPERATURA				Humedad Relat int A (%)	TEMPERATURA				Rad.sol int (W/m²)		Humedad Relat int B (%)
	1 (°C)	2 (°C)	3 (°C)	4 (°C)				5 (°C)	6 (°C)	7 (°C)	8 (°C)		9 (°C)	10 (°C)	11 (°C)	12 (°C)			
0	14.5	13.6	11.6	5	0	72	0	13.9	13.5	12.9	5	74	15.0	15.2	14.3	10	0	75	despejado
1	14.5	13.3	11.4	5	0	72	0	13.7	13.4	12.7	5	74	15.0	15.0	13.9	9	0	74	despejado
2	14.2	12.9	10.6	4	0	72	0	13.5	13.0	12.4	4.5	74	14.7	14.7	13.6	9	0	74	despejado
3	13.8	12.4	10.2	3	0	72	0	13.3	12.8	12.0	4	73	14.5	14.4	13.0	8	0	73	despejado
4	13.6	12.0	9.6	2	0	74	0	13.1	12.5	11.7	3.5	73	14.3	14.1	12.7	7	0	73	despejado
5	13.2	11.7	9.1	2	0	74	0	12.9	12.3	11.5	3	75	14.1	13.8	12.3	7	0	72	despejado
6	13.1	11.2	8.6	2	0	74	0	12.8	12.0	11.2	3	75	13.9	13.5	12.0	7	0	72	despejado
7	12.7	10.8	8.3	4.5	208	73	0	12.8	11.8	11.0	5	74	13.6	13.2	11.6	8	143	74	nuboso
8	12.5	10.6	9.1	9	512	58	0	12.6	11.7	11.0	9.5	60	13.5	13.0	11.8	11	274	68	despejado
9	12.2	10.8	12.3	16	696	52	0.5	12.4	11.8	12.7	21	56	13.3	12.9	12.5	19	496	64	despejado
10	12.2	11.7	16.2	19.5	832	43	0	12.4	12.5	15.0	25.5	52	13.2	13.2	15.1	27	530	51	despejado
11	12.5	13.0	18.8	27	476	40	1	12.6	13.5	16.9	28.5	50	13.2	14.0	17.6	28	388	47	nuboso
12	13.1	14.4	19.6	26	408	38	0	12.9	14.6	17.8	24	42	13.5	15.2	19.4	26	289	41	nuboso
13	13.6	15.3	20.3	27	788	36	1	13.5	15.4	18.0	27	40	13.9	16.2	21.2	30	472	38	nuboso
14	14.3	16.0	20.1	20	288	36.6	4	13.9	15.7	17.8	20	47	14.5	17.1	20.9	23	208	38	nuboso
15	14.7	16.3	19.6	20	224	38	2	14.3	15.7	17.3	20	52	15.0	17.5	20.2	23	170	39	nuboso
16	15.1	16.4	18.7	18	158	43	2	14.5	15.7	16.9	17	56	15.4	17.7	19.4	19	141	46	nuboso
17	15.3	16.3	17.8	17	178	48	0	14.7	15.5	16.3	16.5	60	15.6	17.5	18.5	19.5	152	52	nuboso
18	15.3	16.0	16.8	14	0	53.7	0	14.7	15.4	15.6	11.5	65	15.7	17.3	17.8	15	0	56	nuboso
19	15.3	15.7	15.5	12.5	0	56	0	14.7	15.0	15.0	11.5	67	15.8	16.9	16.7	13	0	60	despejado
20	15.3	15.3	14.5	11	0	60.1	0	14.5	14.6	14.4	9	68	15.7	16.5	15.9	12	0	64	despejado
21	15.1	14.7	13.0	10	0	64	0	14.3	14.0	13.9	7.5	69	15.5	16.0	15.4	9	0	67	despejado
22	14.9	14.2	12.5	8	0	66	0	14.1	13.9	13.3	6	71	15.3	15.6	14.3	9	0	69	despejado
23	14.5	13.6	11.8	5	0	69	0	13.9	13.5	12.9	5	72	15.0	15.1	13.7	9	0	71	despejado
24	14.3	13.2	11.1	5	0	70.6	0	13.7	13.4	12.6	5	74	14.9	14.8	13.4	8	0	73	despejado

GRAFICO DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE LIBRE
25 DE AGOSTO DEL 2000

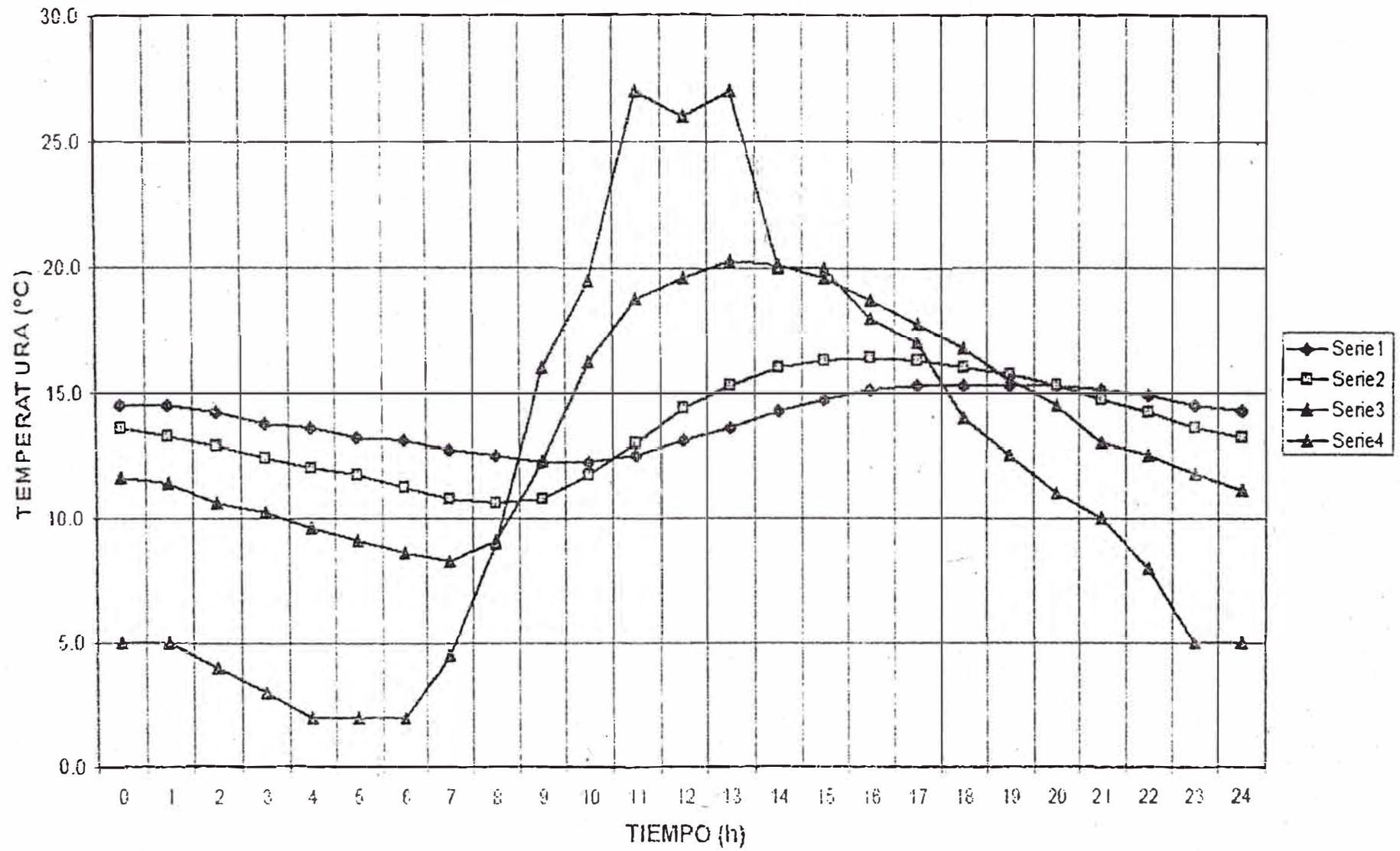


GRAFICO DE TEMPERATURAS DEL INVERNADERO "A"
25 DE AGOSTO DEL 2000

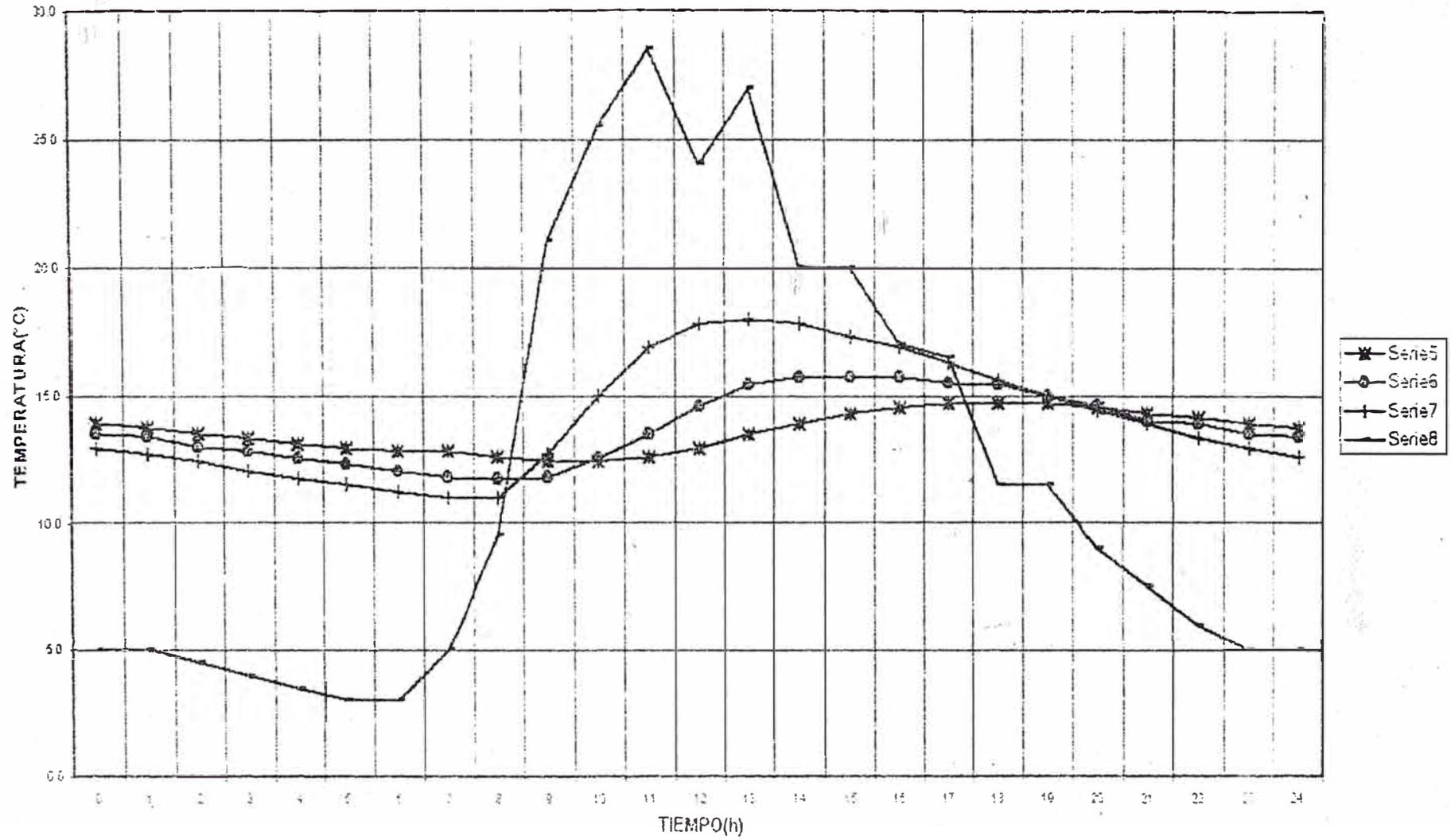


GRAFICO DE TEMPERATURAS DEL INVERNADERO "B"
25 DE AGOSTO DEL 2000

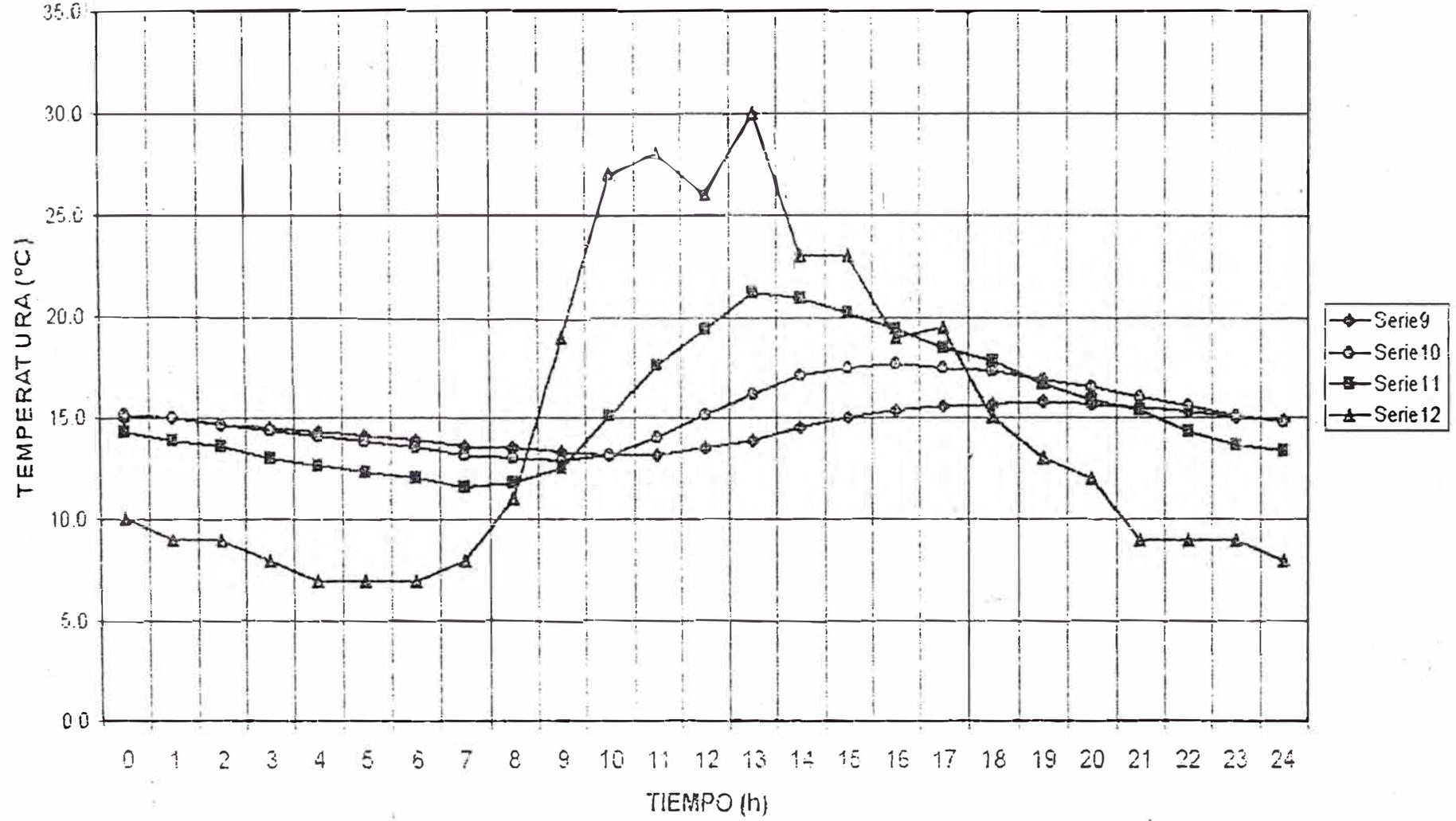


GRAFICO DE COMPARACION DE TEMPERATURAS A 25 CM DE PROFUNDIDAD
25 DE AGOSTO DEL 2000

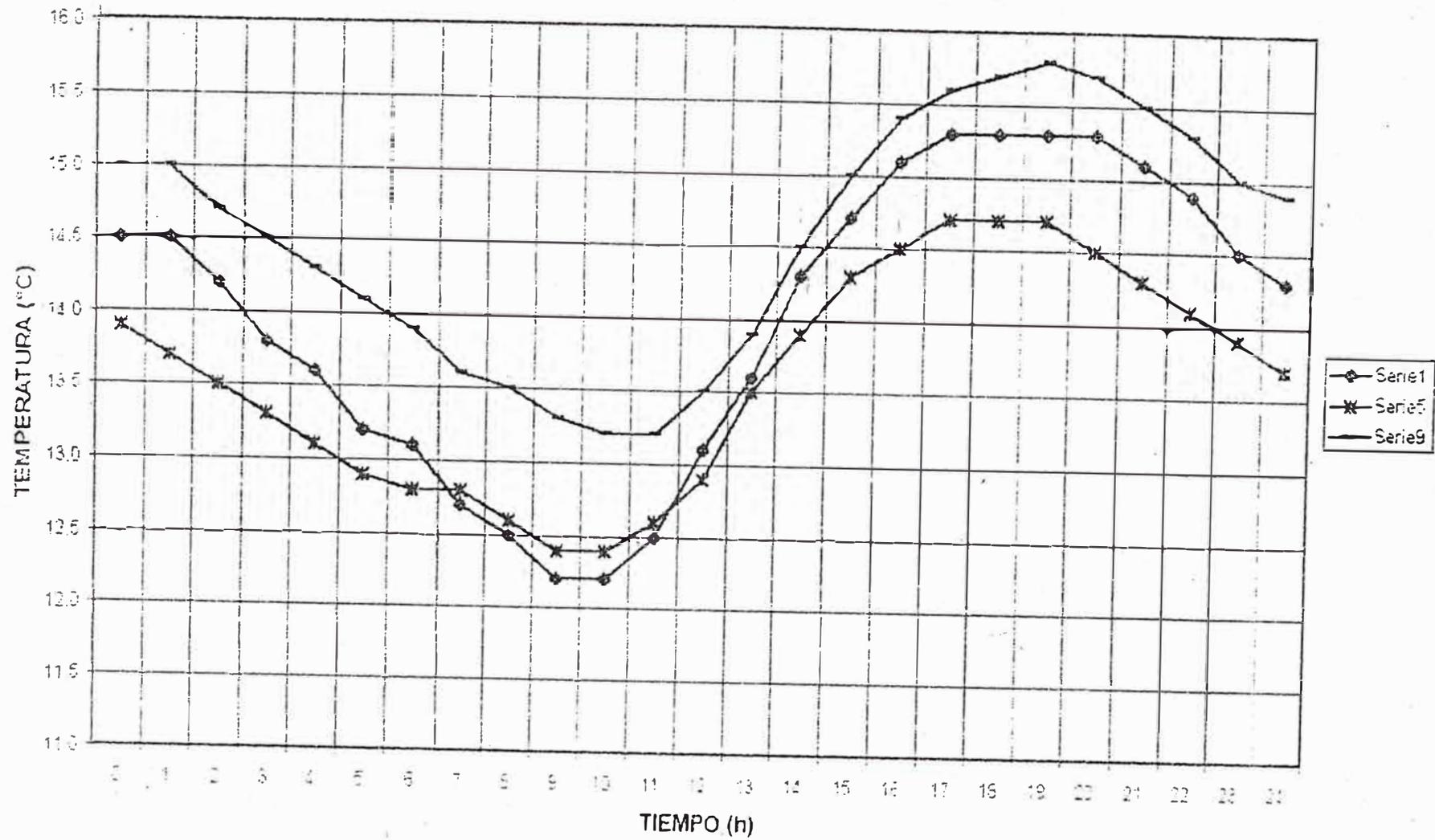


GRAFICO DE COMPARACION DE TEMPERATURAS A 15 CM DE PROFUNDIDAD
25 DE AGOSTO DEL 2000

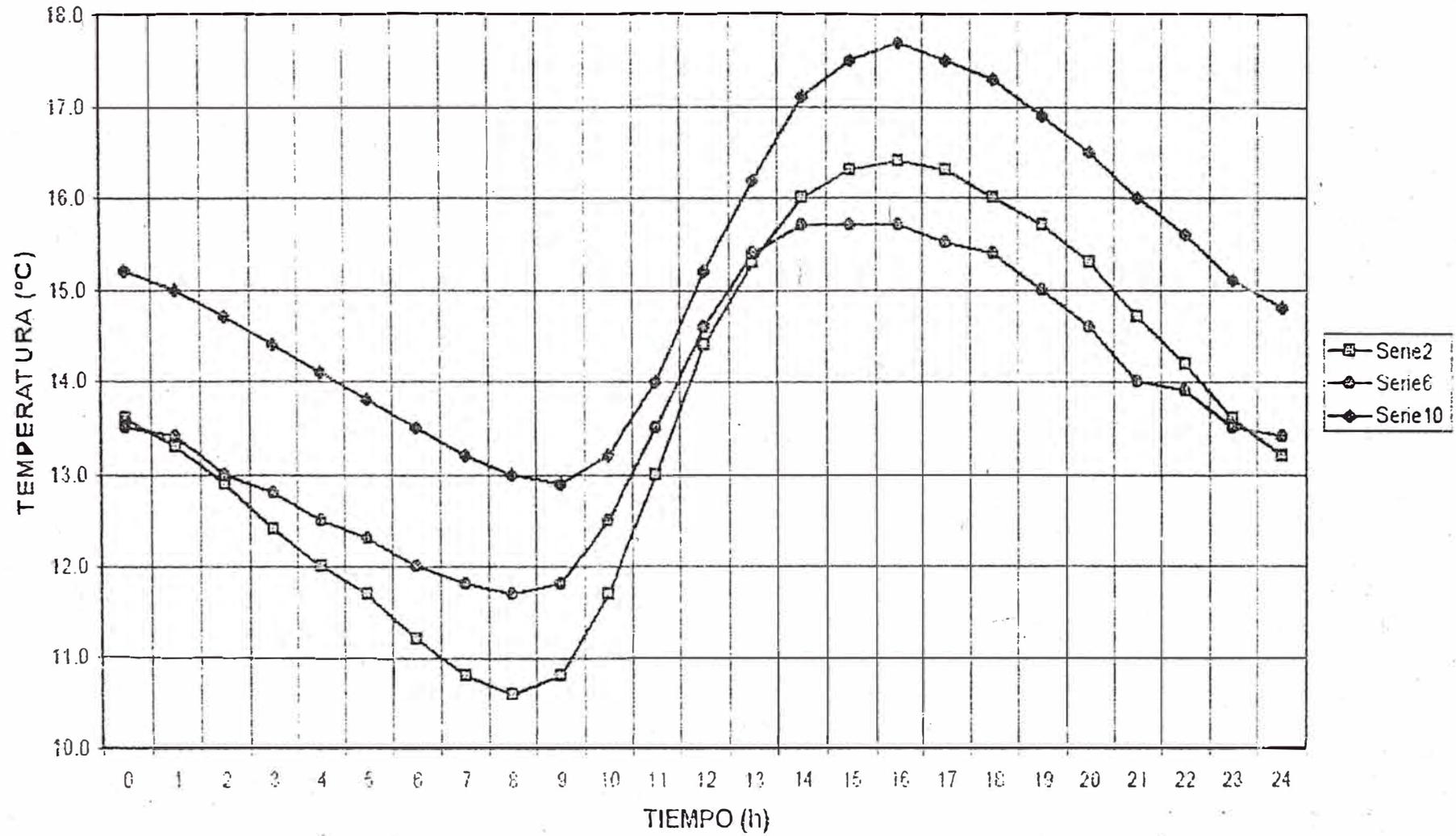


GRAFICO DE COMPARACION DE TEMPERATURAS A 5 CM DE PROFUNDIDAD
25 DE AGOSTO DEL 2000

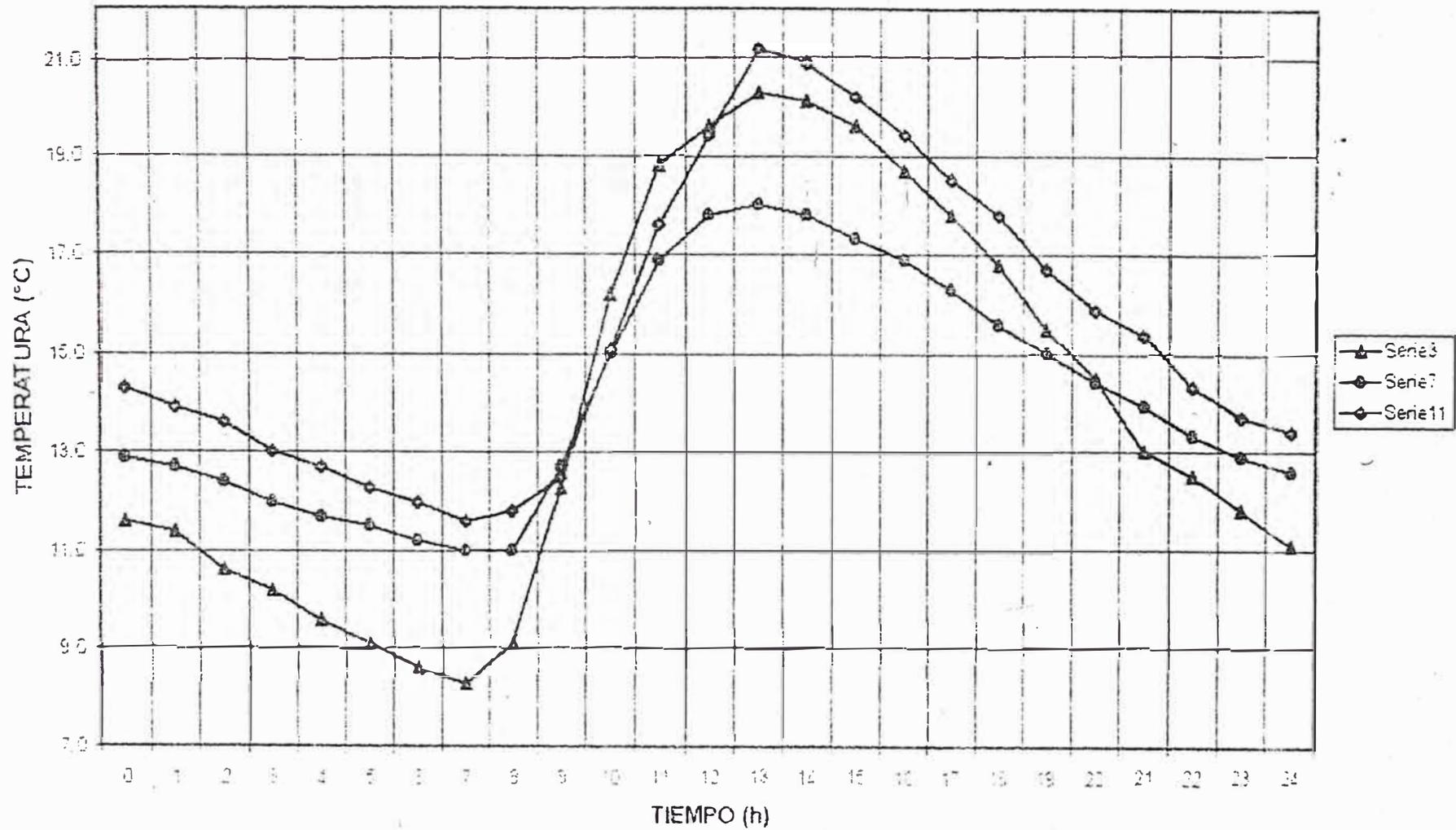


GRÁFICO DE COMPARACION DE TEMPERATURAS EN EL AMBIENTE DE
LOS INVERNADEROS Y LA SUPERFICIE LIBRE
25 DE AGOSTO DEL 2000

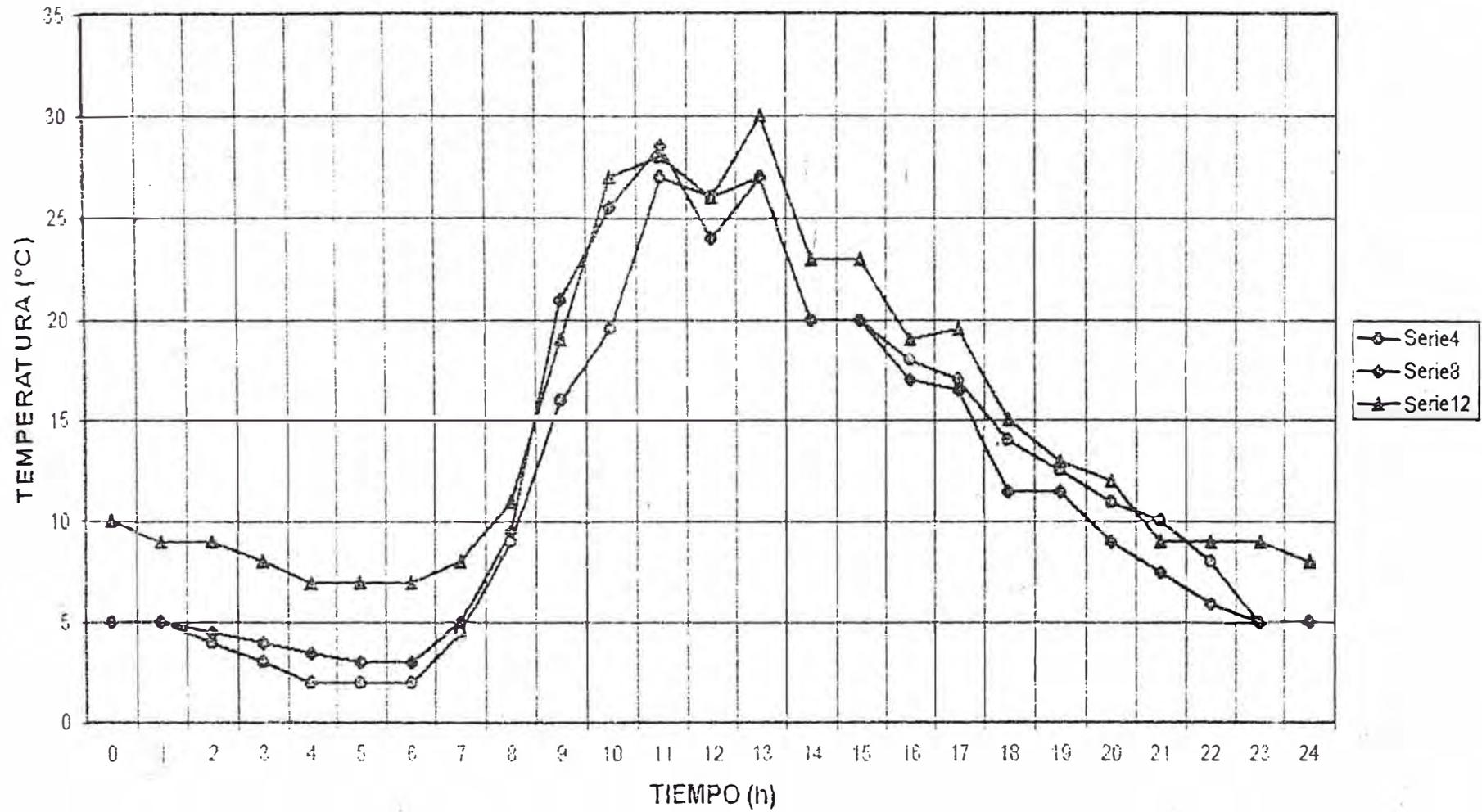


GRAFICO DE COMPARACION DE RADIACION SOLAR EXTERIOR E INTERIOR
25 DE AGOSTO DEL 2000

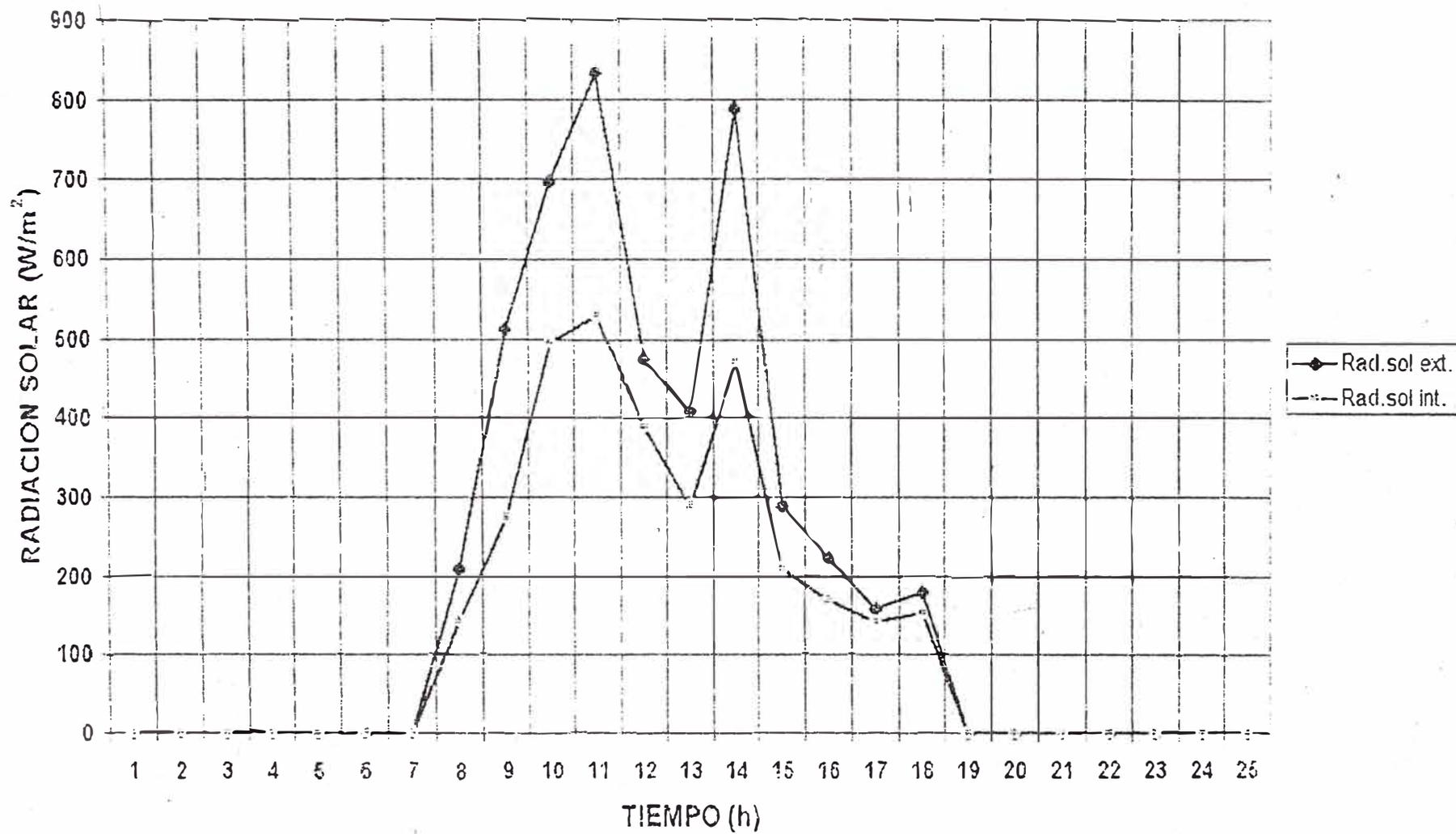
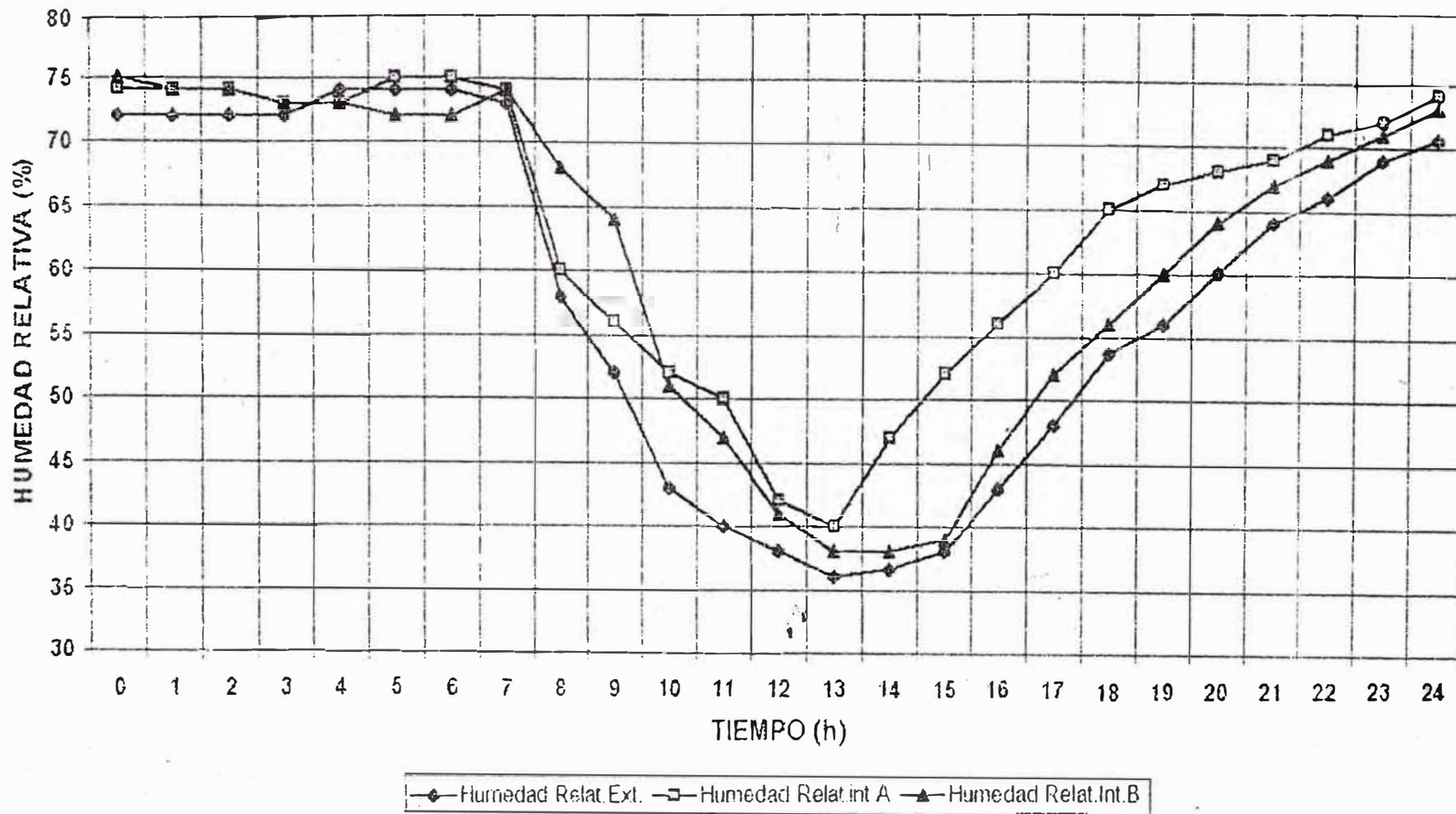


GRAFICO DE COMPARACION DE HUMEDAD RELATIVA
EXTERIOR E INTERIOR DE "A" Y "B"
25 DE AGOSTO DEL 2000



5.8. INTERPRETACION DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

a. Los datos meteorológicos externos del invernadero se interpretan:

Las curvas de la intensidad de la radiación solar externa de los sistemas son diferentes para cada día y dependiendo de las condiciones atmosféricas. En días despejados la intensidad de la radiación solar es máximo al medio día (aproximadamente 980 W/m^2) y en días nublados es de 400 W/m^2 . La intensidad de la radiación solar es cero desde la puesta hasta antes de la salida del sol.

Las curvas de temperaturas externas de los invernaderos se asemejan a la evolución de las curvas de radiación solar, notándose que las temperaturas desde las 11 hasta las 14 horas inclusive son elevadas, siendo máxima a las 13 horas ($30 \text{ }^\circ\text{C}$) y bajas a las 05 horas ($- 02 \text{ }^\circ\text{C}$). Como se muestra en la tabla de datos meteorológicos (pág. 109).

La curvas de humedad relativa disminuye cuando aumenta la temperatura y aumenta cuando baja la temperatura. Siendo máxima entre las 04 y 05 horas de 75% aproximadamente, y mínima entre las 12 a 13 horas es de 36%. Se muestra en la tabla de datos y gráficos meteorológicos del 16 de Agosto del 2000.

La velocidad del viento es prácticamente nulo en esta época, pero a excepción del mes de Agosto la velocidad del viento a las 15 horas es aproximadamente de 4 m/s (24 de Agosto del 2000).

b. Los datos meteorológicos internos del invernadero con vegetación se interpretan

Las curvas de la Intensidad de la radiación solar dentro de los invernaderos es menor respecto al exterior, debido a la cubierta. También a la capa de agua condensada dentro de la cubierta del invernadero.

En el interior de los invernaderos, la intensidad de la radiación solar; a las 12 horas entre los días despejados y nublados varía entre 800 a 160 W/m^2 . La intensidad de la radiación solar medido en el interior de los invernaderos relativamente toman el mismo valor; por que la cubierta en ambos es el mismo.

Las temperaturas de los ambientes: de la superficie libre, invernaderos "A" y "B" varían bruscamente. En la noche baja considerablemente hasta $-2\text{ }^{\circ}C$ (05 horas del 21-06-00); mientras que de día aumenta notablemente alcanzando a más de $30\text{ }^{\circ}C$ a las 13 horas. Notándose mayor temperatura en el invernadero "B".

La temperatura medida a 05 cm bajo tierra en los invernaderos se

obtienen curvas de tipo ondulatorio; siendo mínimo a las 08 horas y máximo a las 15 horas. La curva obtenida del sensor N° 11 es mayor de las otras dos; que favorece la vida óptima de los vegetales en épocas de helada.

Cuando ubicamos los sensores de temperatura a 15 cm de profundidad se deduce que la variación de la temperatura es de 10 a 18 °C. También éstas temperaturas son favorables para el confort térmico de las raíces de las plantas.

Por último los sensores de temperatura, asignadas con los N° 1, 5 y 9 que se encuentran a 25 cm de profundidad; las curva que presentan son similares; variando la temperatura entre 12 y 15 °C; que corresponde a 11 y 19 horas respectivamente; que favorece la vida de las plantas. En conclusión; los datos experimentales nos muestran de que el invernadero "B", es el más favorable para la vida óptima de las plantas por mantener una temperatura adecuada. Ver datos y curvas de los parámetros meteorológicos. También ver fotografías de las plantas en el apéndice B.

La humedad relativa en el ambiente de los invernaderos con vegetación es mayor que la humedad relativa exterior. Varía desde 35 hasta 74%.

Siendo mayor durante las noches (de 20 a 09 horas) y bajas en el intervalo de las 12 a 14 horas.

5.7 RESULTADOS

Haciendo un análisis de los parámetros meteorológicos (radiación solar, temperatura y humedad relativa y la velocidad del viento).

- a.** Se demuestra de que hay una variación de un día a otro y todavía es más notoria de una estación a otra debido al movimiento de rotación y traslación de la Tierra. Esta variación hace de que en un determinado lugar la construcción de los invernaderos debe diseñarse y construirse con variantes para cada época del año y para cada especie vegetal; como son los invernaderos enterrados adecuado para épocas de heladas y para épocas de viento; instalados a más de 3 000 m. s. n. m.
- b.** Después de experimentar bastante tiempo, se observa de que las plantas crecen aceleradamente debido al microclima creado en los invernaderos. Las plantas en su desarrollo se muestran frescos, verdes y frondosos. Ver fotografías en el apéndice B. (Fotos 5, 6, 7 y 8).
- c.** La temperatura medida en cada uno de los invernaderos varía notoriamente de acuerdo a los materiales acumuladores de calor proyectados en el diseño y construcción de los sistemas fototérmicos.
- d.** En los invernaderos se ha obtenido **mayor** temperatura y humedad

relativa respecto al exterior, debido a que se encuentran en recintos cerrados con cubierta de plástico térmico estabilizado, y superficies cultivables con alto grado de absorción.

- e. La radiación global en la cubierta de los invernaderos es reflejado, transmitido y absorbido. La Transmitida ocasiona el confort térmico para el crecimiento y desarrollo de las plantas dentro de los invernaderos. Las plantas en crecimiento con el mismo sustrato en los diferentes invernaderos presentan follajes frondosas y hojas verduscos; con la diferencia de que en el invernadero "A" algunos tipos de plantas (como el maíz) fueron dañados por la helada. (Ver foto 8 en el apéndice B). En el invernadero B; ninguna de las especies vegetales fueron afectadas por la helada.

- f. Las radiaciones de las longitudes de onda principalmente visible que se transmiten por la cubierta de los invernaderos fueron absorbidas por las plantas del invernadero para su normal funcionamiento fisiológico; por lo que el follaje es completamente verde, consecuentemente frutos de calidad.

Las radiaciones de otras longitudes de onda quedan reflejados, por las características del material de cubierta.

- g. La velocidad del viento afecta directamente en la disminución de la temperatura de los invernaderos.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

6.1 CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos experimentalmente se concluye que:

- a. La cubierta deja pasar las radiaciones solares en ciertas longitudes de onda (rango visible y el infrarrojo corto) que son indispensables para los procesos biológicos vegetales. La intensidad de la radiación solar que es transmitido en el interior de los invernaderos es de aproximadamente de 800 W/m^2 para la época invernal. Esta radiación proporciona calor en el ambiente de los invernaderos.

- b. El comportamiento térmico de los invernaderos varía de acuerdo con el diseño, construcción y la época. Siendo máxima a las 13 horas y mínima a las 05 horas. Esto debido a que el invernadero aumenta su temperatura, después de una hora de calentar el suelo desde las 12

horas (intensidad de radiación solar máxima) y, en la noche se agota lentamente el calor según el balance térmico siendo su punto crítico las 05 de la mañana.

- c. El funcionamiento fisiológico de las plantas es óptimo con follaje completamente verde y frondoso; consecuentemente frutos de calidad; debido a los nutrientes, confort térmico, y control fitosanitario.
- d. Se observa gotitas de agua condensada en la superficie interna de la cubierta, debido a la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior.
- e. La humedad relativa interior de los invernaderos es mayor respecto al exterior. Debido a que la temperatura interna es mayor, encargada de evaporar el agua del suelo (agua del regadío de las plantas).
- f. En el balance térmico instantáneo de los invernaderos se nota que la pérdida de calor por radiación térmica es excesivo durante las noches y el calor ganado por el suelo del invernadero por el efecto de la radiación solar es considerable durante el día. El balance térmico calculados es referencial puesto que es complejo para todo el día por la variación de la ganancia y pérdida de calor.

- g. El balance térmico instantáneo en los invernaderos es referencial. El invernadero B capta y pierde energía en mayor proporción, sin que dañe a las plantas.
- h. El viento disminuye la temperatura rápidamente en el ambiente de los invernaderos.

6.2 SUGERENCIAS

Para la evaluación térmica del invernadero enterrado para épocas de helada se sugiere:

- a. Cuando se quiere diseñar y construir invernaderos debe de pensarse en los materiales; tipo de especie vegetal y época.
- b. Para cultivar una determinada especie vegetal en invernaderos es necesario conocer sus características fisiológicas.
- c. Se sugiere tomar datos meteorológicos durante periodos prolongados para el mejor entendimiento de la evolución de las curvas meteorológicas; la que nos ayudará en el cultivo de las plantas en los invernaderos.

- d. La evaluación experimental debe de computarizarse para obtener datos más precisos, y que nos facilitará realizar análisis experimental en el menor tiempo posible.
- e. En los invernaderos construidos se sugiere que tenga una ventilación adecuada para evitar la condensación de vapor de agua en las paredes internas de la cubierta, para que facilite la transmisión de energía.
- f. Las cargas de tierra obtenidas del invernadero enterrado sirvan para aumentar las alturas de las paredes.
- g. La porción de tierra obtenidas de la excavación, contiene bastante energía (nutrientes) para la vida de los vegetales en el invernadero.
- h. Cuando se evalúen los parámetros meteorológicos durante las noches, tratar de no perder calor al ingresar por la puerta de los invernaderos.

6.3. RECOMENDACIONES

- a. Para el diseño y construcción de los invernaderos se recomienda interpretar datos meteorológicos de tiempos prolongados, conocer sobre la ciencia de los materiales, transferencia de calor, el tipo de vegetación, cultivo y la época.
- b. Cualquiera sea el tipo de invernadero, necesita una buena ventilación.
- c. Los invernaderos vienen a ser lugares propicios para que habiten insectos, moscas, larvas, etc. por lo que será necesario colocar trampas en las ventanas y puertas.

APENDICE A CALIBRACION DEL TERMISTOR.

Para medir las temperaturas en los invernaderos se ha utilizado los termistores. Estos sensores semiconductores presentan una resistencia que se altera con la temperatura.

Su relación de la resistencia a la temperatura es de la forma:

$$R = R_0 e^{\frac{B}{T}}$$

Donde R, R₀: Resistencia.

B: Una constante característica del material.

T: La temperatura.

Para calibrar los termistores procedamos de la siguiente manera.

1. Mezclamos hielo chancado con agua en un termo, obteniendo una temperatura de 273 K (0 °C) medido con el termómetro de precisión. En seguida introducimos todos los termistores para medir sus resistencias con un ohmímetro. Ver tabla A₁.
2. En el mismo termo se vierte agua caliente, obteniendo una temperatura de 358 K (85 °C), así mismo se mide la resistencia de los termistores. Los datos se muestran en la tabla A₁.

3. A partir de la ecuación del termistor; calculamos las constantes características **A** y **B** de cada uno de los termistores.

$$R = R_0 e^{\frac{B}{T}}$$

Logaritmando la ecuación tenemos:

$$\ln R = \ln R_0 + B/T$$

hagamos $A = \ln R_0$, entonces:

$$\ln R = A + \frac{B}{T}$$

al reemplazar los valores correspondientes de la resistencia **R** y de la temperatura **T** del termistor, tanto de la mezcla de hielo chancado como del agua caliente, en la ecuación anterior nos permite determinar las constantes **A** y **B** para cada uno de los termistores. Los datos se muestran en la Tabla

4. Conociendo el valor de las constantes **A** y **B**, se puede determinar el valor de la temperatura **T**, reemplazando el valor correspondiente de la resistencia **R** del termistor.

TABLA A₁: MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE LOS TERMISTORES

TERMISTORES	RESISTENCIA A 273 K	RESISTENCIA A 320 K
	(Ω)	(Ω)
01	474	34.8
02	477	35.9
03	311	18
04	325	13
05	229	15
06	247	16
07	233	15
08	453	17
09	1457	69
10	232	67
11	325	16
12	225	65

TABLA A₂: DETERMINACION DE LAS CONSTANTES A y B DE LOS TERMISTORES

TERMISTORES	CONSTANTES CARACTERISTICAS DE LOS TERMISTORES	
	A	B
01	-5.039	3057.722
02	-4.927	3028.665
03	9.176	4319.776
04	-8.521	4312.221
05	-8.861	3902.394
06	-8.819	3911.529
07	-8.942	3929.373
08	-8.900	2021.256
09	-8.151	4213.759
10	-5.200	4321.123
11	-6.231	3928.356
12	-8.923	4320.356

APENDICE B. FOTOGRAFÍAS DE LAS EXPERIENCIAS REALIZADAS

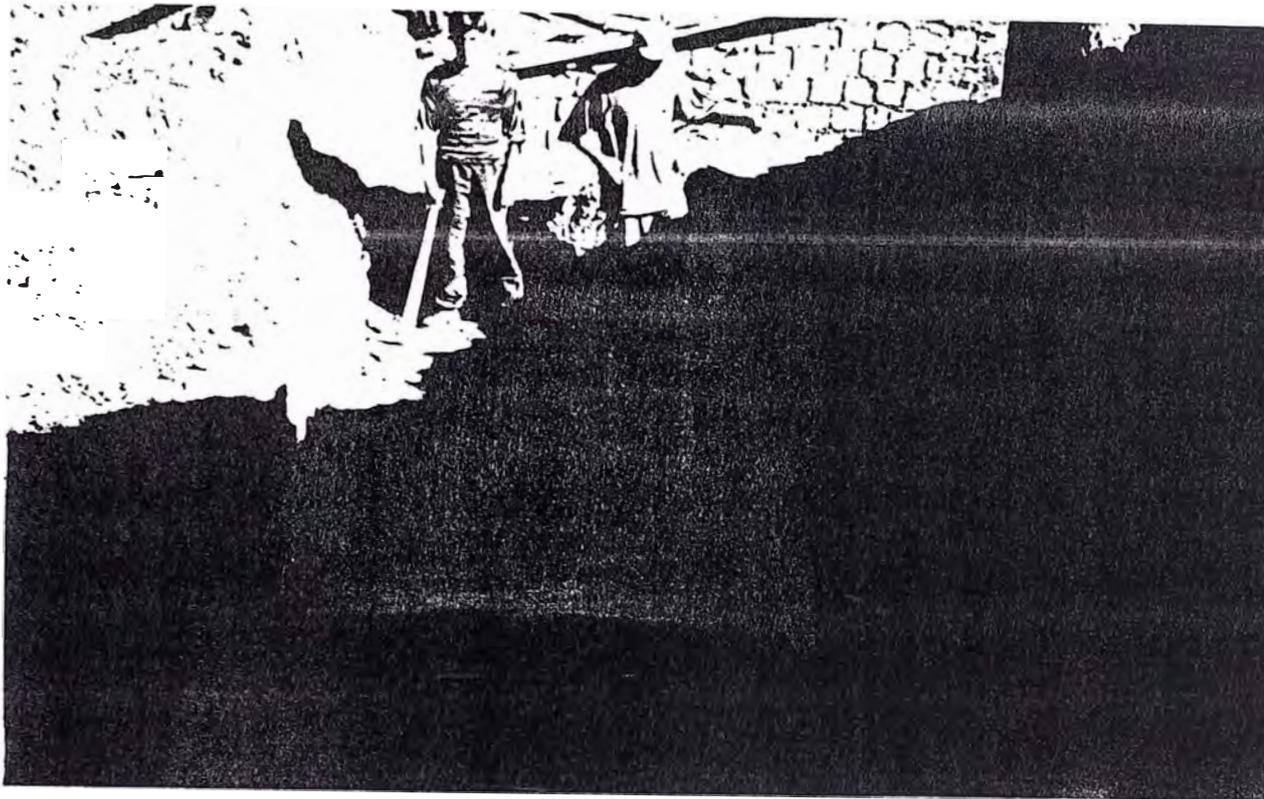


Foto 1. Excavación del suelo

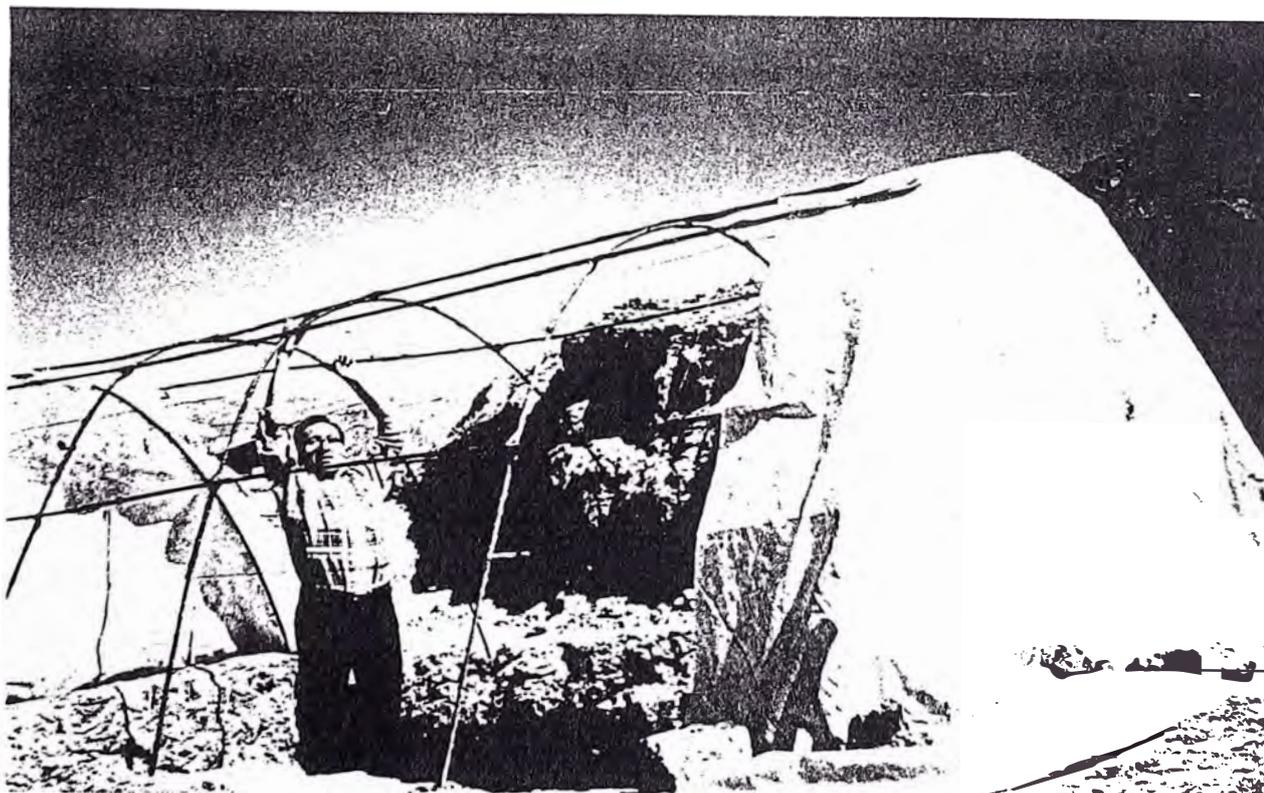


Foto 2. Proceso de construcción del invernadero enterrado

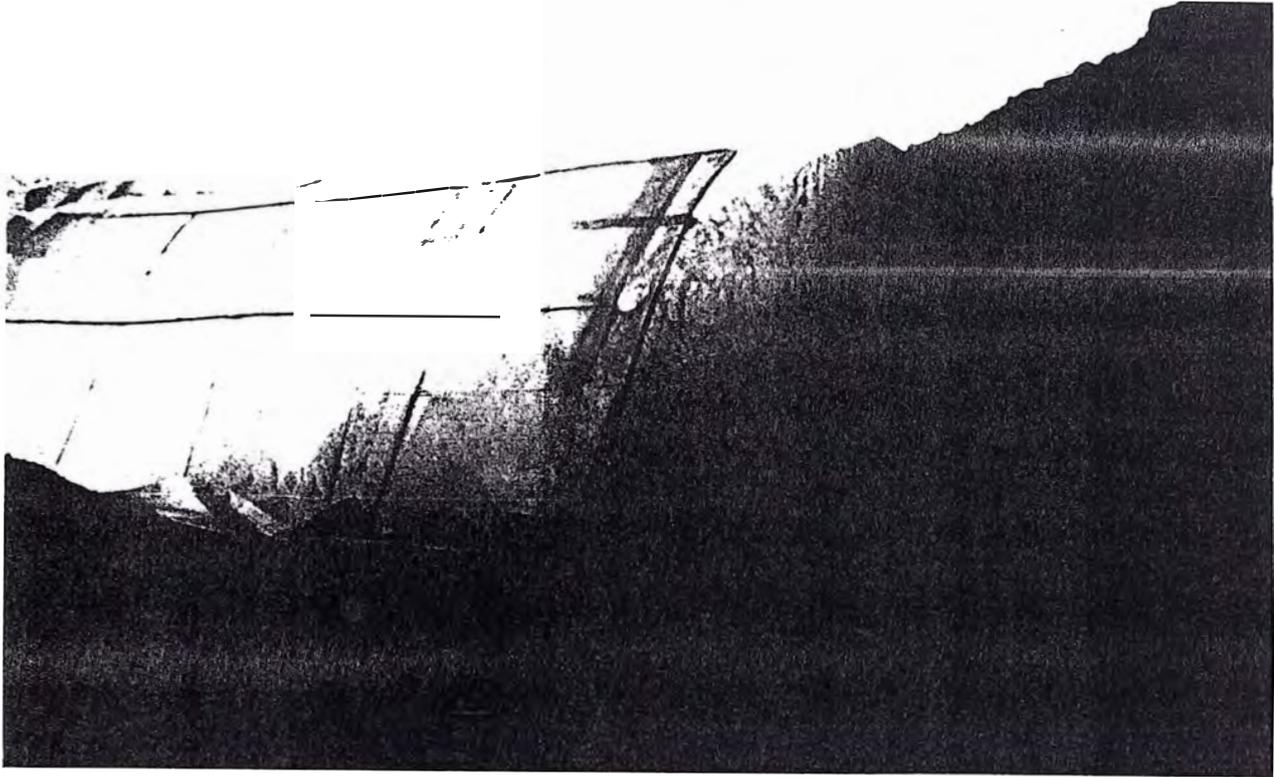


Foto 3. Invernadero enterrado; faltando cargar con tierra sobre el plástico solape.

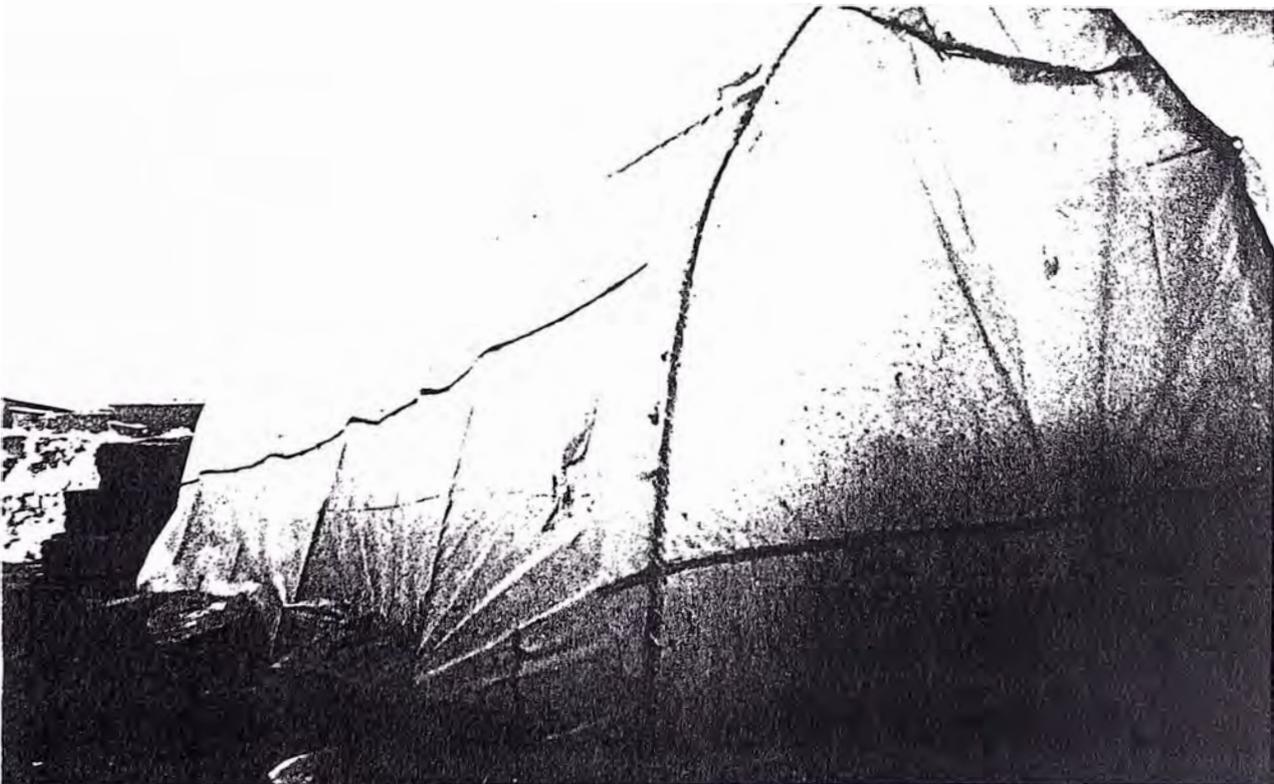


Foto 4. Invernadero construido sin enterrar(invernadero tipo "tunnel")



Foto 5. Plantación de rocoto en el invernadero "B"

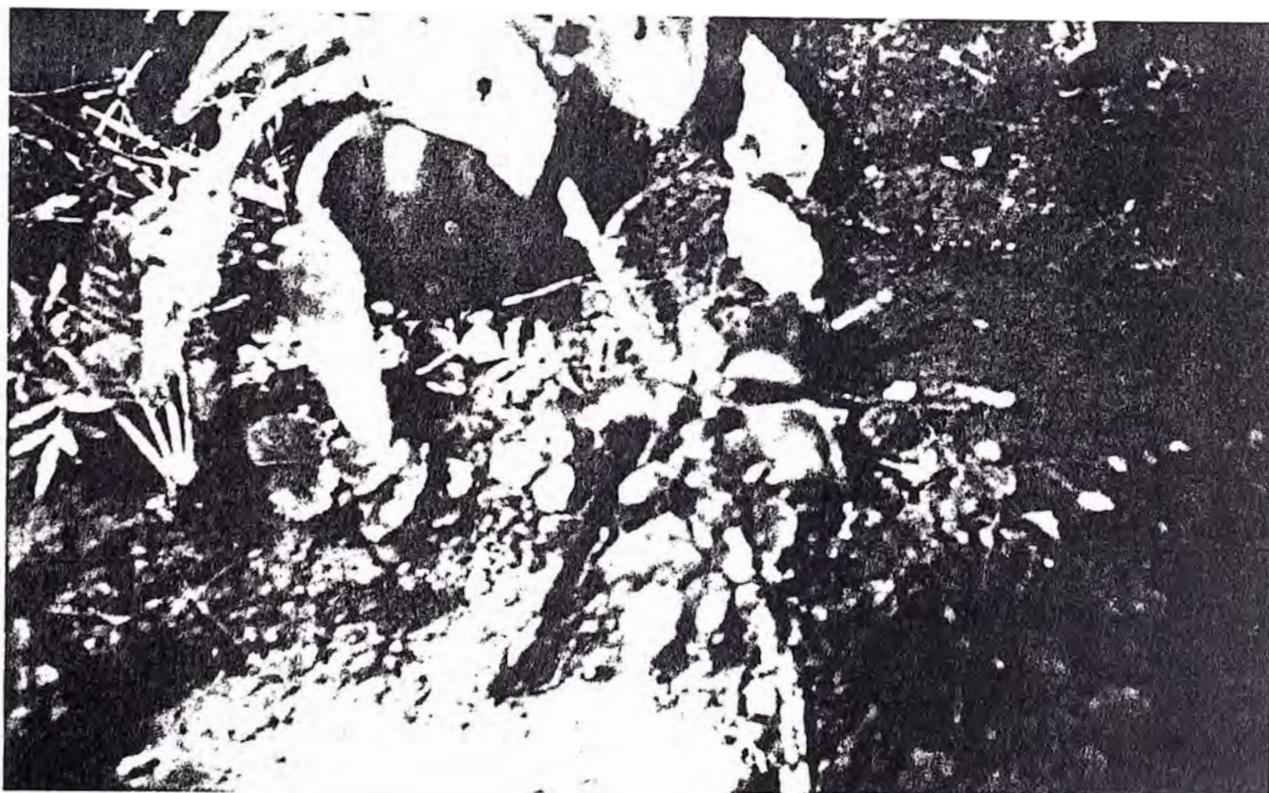


Foto 6. Pimiento en el invernadero "B"

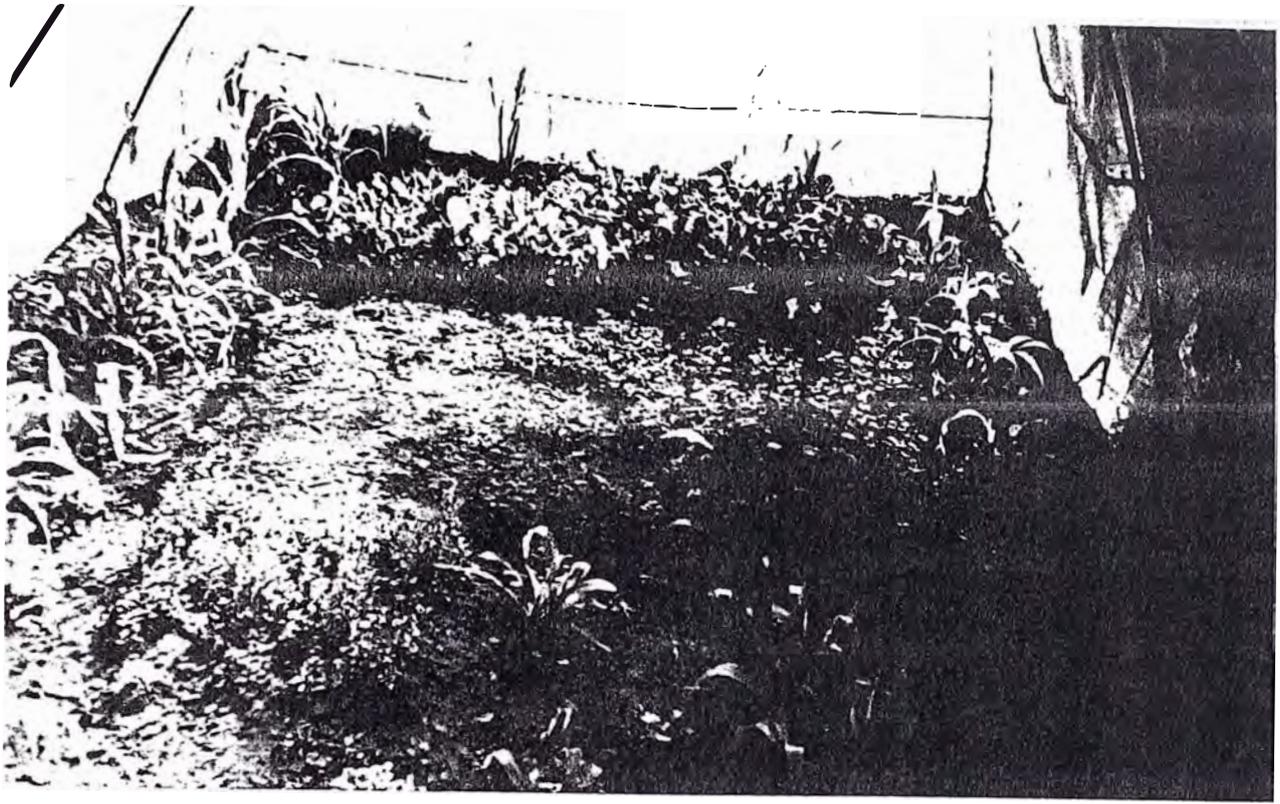
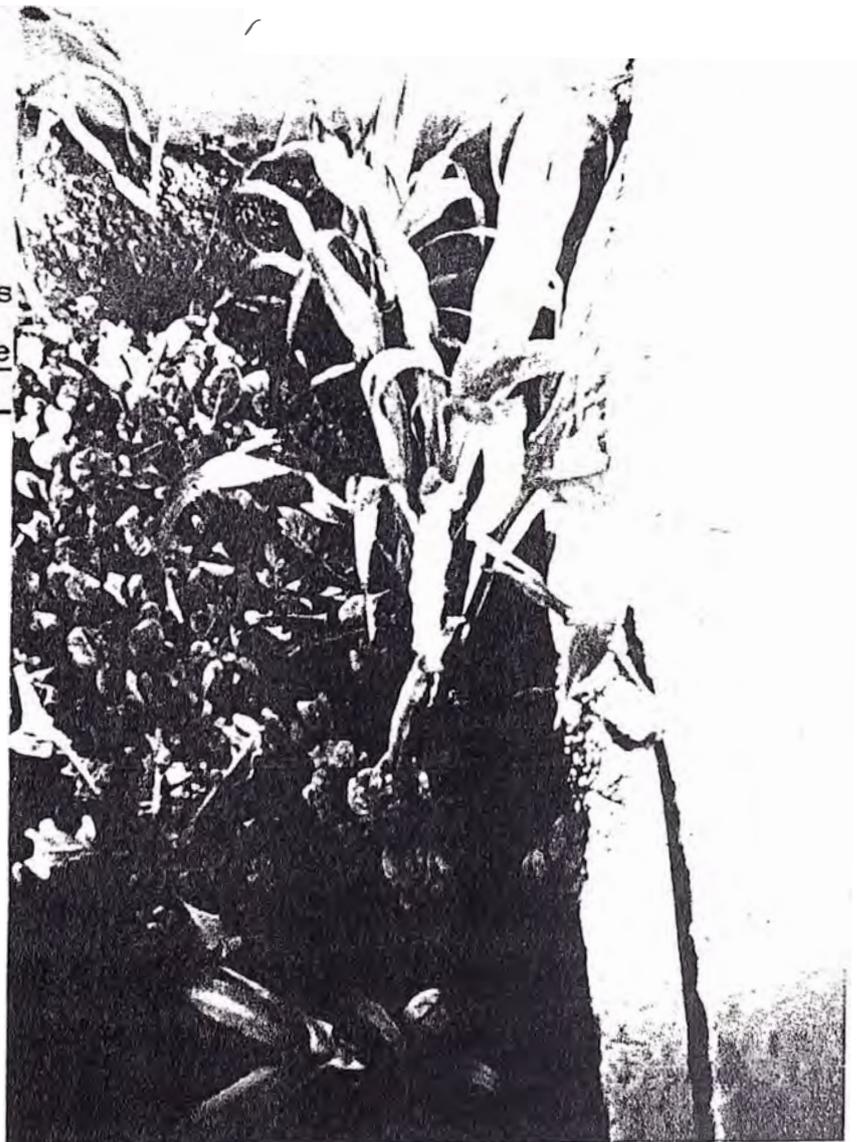


Foto 7. Vegetación en el invernadero "A"

Foto 8. Maíz con hojas
dañadas por he-
lada en el in-
vernadero "A"



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Alpi A. Tognoni F., CULTIVO EN INVERNADEROS, Edit. Mundi Prensa, Madrid, 1983.
2. Bernard Roger y otros, LA RADIACION SOLAR, CONVERSION TERMICA Y APLICACIONES, Edit Laboisier, 1982.
3. Chaliaguet Charles y otros, LA ENERGIA SOLAR EN LA EDIFICACION, Edit. Editores Técnicos Asociados, S.A., 1978.
4. Barry R. G. y otros ATMOSFERA, TIEMPO Y CLIMA, Edit. Ediciones Omega, S.A., 1972.
5. Duffie John A. y otros, SOLAR ENERGY THERMAL PROCESSES, Edit. John Wiley & Sons, 1974.
6. Eisberg Robert y otros, FISICA CUANTICA, Edit. Limusa, 1991.
7. Greulach y Adams, LAS PLANTAS, Edit. Limusa, 1990.
8. Grigera J. Raúl, ELEMENTOS DE BIOFISICA, Edit. Hemisferio Sur S.A., 1980.
9. Hugles William L., ENERGY FOR RURAL DEVELOPMENT, Edit. National Academy of Sciences, 1977.
10. Izar Jean Louis, ARQUITECTURA BIOCLIMATICA, Edit. Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1980.
11. Kreith Frank, PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, Edit. Herrero Hermanos, Sucesores, S.A. 1970.
12. Landsberg G.S. OPTICA, Edit. Mir-Moscú, 1984.
Tomo II.

13. Martinez García Pedro y otros, CARACTERISTICAS CLIMATICAS DE LOS INVERNADEROS DE PLASTICO, Edit. Madrid, 1978.
14. Martinez García Pedro y otros, LA FRUCTIFICACION DEL TOMATE EN INVERNADEROS, Edit. Madrid, 1979.
15. Martinez García Pedro y otros, MEJORA DE LAS TECNICAS DE CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO, Edit. Madrid, 1978.
16. Manrique José A., ENERGIA SOLAR, Edit. Harla S.A.
17. Matallana Gonzales Antonio, LOS INVERNADEROS Y LA CRISIS ENERGETICA, Edit. Madrid, 1980.
18. Necati Ozisik M., TRANSFERENCIA DE CALOR, Edit. Fondo Educativo, 1980.
19. B. V. Karlekar y otros, TRANSFERENCIA DE CALOR, Edit. Mc Graw Hill, 1995.
20. Palomares Casado Manuel, AGUA Y ATMOSFERA, Edit. Santillana S. A., 1969.
21. Palz Wolfgang, ELECTRICIDAD SOLAR, Edit. Blume, 1980.
22. Pitts Donald. y otros, TEORIA Y PROBLEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, Edit. Mc Graw Hill Latinoamericana, S.A., 1979.
23. Pierre Baratcaval y Jean Pierre Batellier, LA ENERGIA SOLAR EN LA EDIFICACION, Edit. Técnicos Asociados S. A. 1978.
24. Serrano Cermeño Zoilo, CULTIVO DE HORTALIZAS EN INVERNADEROS, Edit. Aedos - Barcelona, 1979.

25. Seminario Internacional, LAS ENERGIAS RENOVABLES Y EL DESARROLLO DE REGIONES RURALES, Cusco, UNSAAC, 1990.
26. Seminario, ENERGIAS NO CONVENCIONALES EN EL MEDIO RURAL, Lima, 1992.
26. Zanabria P. Pedro, INVERNADEROS SOLARES, Urubamba - Cusco, UNSAAC, 1990.
27. Zanabria P. Pedro, INVERNADEROS SEMILLERO, Cusco UNSAAC, 1990.