

RELACIONES TERMICAS EN HOJAS DE CUATRO CULTIVOS DURANTE LAS HELADAS INVERNALES EN MONTECILLO, MEXICO¹

LEAF THERMAL RELATIONS OF FOUR CROPS DURING WINTER FROSTS IN MONTECILLO, MEXICO

José Alfredo Carrillo Salazar, Manuel Livera Muñoz, Joaquín Ortíz Cereceres y Leopoldo E. Mendoza Onofre²

RESUMEN

En el invierno de 88-89 se condujo una investigación en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Texcoco, Méx., con el objeto de estudiar la relación entre el enfriamiento del aire y el de las hojas durante la ocurrencia de heladas invernales en plántulas de maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), haba (*Vicia faba* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.). La siembra se efectuó el 18 de enero. Las lecturas de temperatura de la hoja y del aire se tomaron cada hora con un teletermómetro infrarrojo durante dos noches, a los 36 y 51 días después de siembra (DDS), desde las 20 h hasta las 7 h del día siguiente. La temperatura de las hojas (TH) fue de 0.5 a 2.0°C menor que la temperatura del aire (TAC). La TH de especies de hoja angosta fue 1 a 2°C superior a la TH de especies de hoja ancha, lo que muestra la alta asociación entre la temperatura foliar y las dimensiones de las hojas. La TH mínima que alcanzaron las especies a los 36 DDS varió entre -4.8 a -5.9°C y a los 51 DDS varió entre -3.8 a -5.5°C. En las heladas que se presentaron a los 36 y 51 DDS, las hojas permanecieron con una temperatura igual o inferior a los 0°C de 5 a 7 h. El maíz murió después de la primera medición a los 36 DDS. El trigo tuvo una tasa relativa de crecimiento más alta que maíz, girasol y haba debido a una mayor tasa de asimilación neta.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES

Heladas, análisis del crecimiento, temperatura de la hoja, maíz, trigo, haba, girasol.

SUMMARY

An investigation was carried out during the 1988-1989 winter in the Agriculture Experimental Station of the Colegio de Postgraduados at Montecillo, Texcoco, Méx., to study the relationship between leaf and air temperature changes during frosts, using seedlings of maize (*Zea mays* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.), long bean (*Vicia faba* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.). The experiment was planted on January 18th. Readings of leaf and air temperatures were hourly taken during two nights, with an infrared thermometer, 36 and 51 days after planting (DAP), from 20:00 h to 7:00 h of the following day. Leaf temperatures were always from 0.5 to 2.0°C lower than air temperatures. Temperatures of the narrow leaves of wheat and corn were 1 to 2°C higher than temperatures of broad leaves of *Vicia* and *Helianthus*, showing a close association between leaf temperature and leaf dimension. At 36 DAP, minimum leaf temperatures ranged from -4.8 to -5.9°C and at 51 DAP from -3.8 to -5.5°C. In these two nights, the leaves remained for 5 to 7 hours with a temperature equal to or lower than 0°C. Corn did not survive the first frost. Wheat had the highest relative growth rate due to its high net assimilation rate.

ADDITIONAL INDEX WORDS

Frosts, growth analysis, leaf temperature, corn, wheat, long bean, sunflower.

INTRODUCCION

La producción agrícola está condicionada por factores del ambiente físico, biológico y social. Entre los factores del ambiente físico destacan las temperaturas inferiores a 0°C, conocidas como heladas, por su influencia negativa principalmente en las

¹ Proyecto apoyado por CONACYT.

² Centro de Genética del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Centro de Genética. C.P. 56230. Montecillo, Texcoco, Méx.

plantas cultivadas. Entre los factores limitantes, las heladas ocupan un lugar preponderante en regiones del altiplano mexicano que abarca los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Durango y Chihuahua, entre otros.

En este sentido, es importante conocer los intercambios de energía entre la planta y el ambiente físico, así como su efecto en la fisiología de la planta y sus relaciones con otros factores microclimáticos, con objeto de precisar el ambiente más adecuado para realizar selección en los programas de mejoramiento genético, las características fenotípicas a considerar durante la selección y evaluación de genotipos, así como las posibilidades de implementar prácticas culturales que permitan enfrentar con éxito las contingencias climáticas.

En este tipo de estudios se debe considerar que el efecto de las heladas sobre los cultivos depende de la etapa fenológica en que se encuentran, del nivel de temperatura mínima que alcanzan los tejidos durante la ocurrencia de la helada, de su tasa de enfriamiento, y del período en que las plantas permanecen bajo temperaturas iguales o inferiores a los 0°C.

Con base en lo anterior y considerando la escasa información existente al respecto en México, se realizó la presente investigación, cuyo objetivo principal fue estudiar las relaciones entre el enfriamiento del aire y de los tejidos foliares así como con otros factores ambientales, durante la ocurrencia de heladas invernales en plántulas de *Z. mays* L., *T. aestivum* L., *V. faba* L. y *H. annuus* L. Como objetivos particulares se planteó conocer las temperaturas mínimas alcanzadas por las hojas de estas especies, las tasas de enfriamiento de las hojas y las diferencias de temperatura foliar entre dicotiledóneas y monocotiledóneas. También fue de interés conocer las diferencias entre la temperatura

de las hojas y su aire circundante, así como comparar la temperatura del aire, hojas y suelo, con la temperatura registrada en la estación meteorológica local.

REVISION DE LITERATURA

Las temperaturas de 0°C o menores que causan el fenómeno de las heladas son originadas por advección, radiación o evaporación. Las heladas por radiación son las más frecuentes; se originan por la pérdida de calor que los vegetales y el suelo sufren por irradiación a la atmósfera durante la noche (Mendoza, 1979).

De acuerdo a su efecto fisiológico sobre las plantas, las temperaturas bajas pueden ser clasificadas en dos tipos: las que propiamente se les puede llamar temperaturas bajas, que ocurren con temperaturas superiores al punto de congelamiento, y las heladas, con temperaturas iguales o inferiores a 0°C (Lyons *et al.*, 1979a).

A nivel microclimático, la temperatura no es uniforme dentro del sistema integrado por la planta y la atmósfera circundante inmediata al suelo (Rosenberg *et al.*, 1983); sin embargo, las plantas, y en particular las hojas, no controlan directamente su temperatura, que es más bien el resultado de la diferencia entre el ingreso o ganancia de energía y las pérdidas, es decir, del balance de energía (Campbell, 1981), ya que en el caso de hojas delgadas su capacidad de almacenamiento de energía es insignificante.

Durante la noche no hay fuente de energía de onda corta (entre 0.15 y 4 μm), pero la planta emite y recibe radiación de onda larga (entre 4 y 100 μm), que es la que irradian todos los cuerpos con temperatura absoluta mayor de 0°K (Nobel, 1988; Oke, 1978). Otra forma de pérdida o ganancia de energía es mediante el flujo de calor por convección; en este proceso, el calor que se

transmite a través de la capa de frontera es por convección libre o forzada. En particular, en la convección forzada el aire es el agente que modifica a la capa de frontera (Nobel, 1974), ya que aún con la más mínima velocidad del viento (0.1 m seg^{-1}), la convección forzada predomina sobre la libre (Campbell, 1981). El intercambio de energía por convección es grande cuando la velocidad del viento es alta y pequeño cuando ésta es baja; asimismo, es grande en hojas pequeñas y reducido en hojas grandes (Gates *et al.*, 1971). Las plantas también pierden calor latente mediante el proceso de transpiración; sin embargo, las plantas en la noche no transpiran debido a que los estomas permanecen cerrados (Nobel, 1988; Rogers, 1980).

Entre los factores microclimáticos que interactúan en la determinación de la temperatura de la hoja destacan la radiación, la temperatura del aire, el viento y la humedad del suelo y aire (Gates *et al.*, 1971).

Las especies vegetales difieren en su susceptibilidad al frío; generalmente los cultivos tropicales y subtropicales tienen poca o nula resistencia al congelamiento (Rosenberg *et al.*, 1983) y se dañan con temperaturas inferiores a 15°C (Kramer, 1983). Por el contrario, otros cultivos resisten temperaturas hasta de -6.0°C (*Helianthus annuus L.*), -8.0°C (*Pisum sativum L.*, *Hordeum vulgare L.*, *Lens esculenta Moench.*) y -10°C (*Triticum aestivum L.*) durante la germinación (Grassi, mencionado por Pájaro y Ortíz, 1988a).

La formación de una fase de transición en la membrana celular, pasando de una estructura flexible líquido-cristalina a una estructura en estado de gel, se ha mencionado como la primera causa probable de daños por temperaturas bajas (Lyons y Raison, citado por Miedema, 1982). Sin embargo,

esta hipótesis ha sido ampliamente criticada (Lyons *et al.*, 1979b). Otra hipótesis afirma que el calcio estimula la producción de enzimas degradadoras de lípidos, causando la pérdida de la integridad de la membrana (Minorsky, 1985).

A temperaturas de 0°C o inferiores el daño se produce en la membrana celular, debido al congelamiento intracelular o extracelular (Lyons *et al.*, 1979a).

En maíz, en condiciones de campo, se ha encontrado que la temperatura foliar en la noche es inferior a la temperatura del aire (Rahn y Brown, mencionados por Miedema, 1982); también en trigo en condiciones de cámara de crecimiento, la temperatura de las espigas es menor que la del aire (Marcellos y Single, 1984). En general, si la radiación absorbida por una hoja grande es muy pequeña, entonces la temperatura de la hoja será varios grados menor que la temperatura del aire (Gates *et al.*, 1971).

Como se puede notar, al evaluar la susceptibilidad o tolerancia de las especies a las heladas o bajas temperaturas, es importante estudiar el medio energético de la planta, por lo menos de sus hojas, pues su nivel de tolerancia depende de factores físicos y/o biológicos. Ello hace necesario analizar sus interrelaciones a nivel microclimático.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados de Montecillo, Méx., que tiene una altura de 2240 msnm, con un tipo climático $C(w_0)(w)b(i')g$, el cual es un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, un promedio de precipitación total anual de 625 mm, un porcentaje de lluvias invernales menor al 5% de ésta última, un verano fresco y largo (García, 1981), y un período

probable de heladas y temperaturas bajas del 6 de octubre al 18 de mayo (Pájaro y Ortíz, 1988b).

El experimento se sembró en un suelo migajón limoso el 18 de enero de 1989, bajo condiciones de riego. Las especies y cultivares estudiados fueron: maíz (híbrido H-30), trigo (línea experimental del CP), haba (cultivares Criolla y Aguadulce) y girasol (cultivar Peredovik), los cuales se establecieron bajo un diseño experimental en bloques al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental fue de tres surcos de 0.90 m de ancho y 5 m de largo. Excepto el trigo, todos los materiales fueron sembrados en el fondo del surco; el trigo se sembró tanto en el fondo como en la costilla del surco. Salvo las noches en que se hicieron las mediciones, el maíz fue protegido con túneles de polietileno.

Las noches del 23-24/feb y del 10-11/mar cada hora, desde las 20 h hasta las 7 h del día siguiente, se registraron las temperaturas del aire y de las hojas (6 plantas), y de la superficie del suelo en el fondo del surco (6 mediciones) usando un teletermómetro infrarrojo (Everest Interscience); así mismo cada hora se obtuvo la temperatura del fondo del surco a 5 cm de profundidad, con geotermómetros de bayoneta "Weston" (2 mediciones por hora). En todos los casos se calcularon los promedios por hora. También se registró la temperatura del aire a la intemperie a 1.5 m de altura (TAS), cada dos y cinco minutos, con un termistor interfaseado a una estación meteorológica automática Omnidata (Logan, Utah).

El teletermómetro infrarrojo y el termistor interfaseado a la estación micrometeorológica tienen una precisión en décimas de grado y registran temperaturas similares bajo condiciones análogas. Los ángulos de medición de temperatura de las hojas con el teletermómetro infrarrojo fueron de 90° y se midieron en hojas paralelas a la horizontal.

En particular durante la noche se considera que no se cometieron errores en las mediciones de las hojas debido a que el teletermómetro presenta un haz luminoso que es proyectado al área de medición. El teletermómetro tiene una banda de respuesta de 8-14 μm , la distancia de operación es de 2 cm al infinito, con un tiempo de respuesta menor al medio segundo. Su precisión es de $\pm 0.5^\circ\text{C}$, con una resolución de $\pm 0.1^\circ\text{C}$. En el caso de los termómetros Weston, que tienen una precisión de medio grado, se requirió hacer un ajuste a la temperatura que indicaban.

En cada unidad experimental se obtuvo, además, una muestra de cuatro plantas para determinar el peso seco de hojas (PSH), de tallos (PSTA) y el área foliar activa (AF) cada ocho días, desde los 26 a los 54 DDS; con los promedios por tratamiento se calculó la tasa de asimilación neta promedio (TAN), la razón de área foliar promedio (RAF) y la tasa relativa de crecimiento promedio (TRC). Las ecuaciones empleadas fueron las siguientes:

$$TRC = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1};$$

$$TAN = \frac{W_2 - W_1}{a_2 - a_1} \times \frac{\ln a_2 - \ln a_1}{t_2 - t_1};$$

$$RAF = \frac{\frac{a_2}{W_2} + \frac{a_1}{W_1}}{2}$$

Donde:

w_1 = Peso inicial y w_2 = Peso final
 a_1 = Area inicial y a_2 = Area final
 t_1 = Tiempo inicial y t_2 = Tiempo final

De la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Méx., situada a 100 m del experimento, se obtuvieron los datos de temperatura máxima y

mínima a la intemperie a 30 cm del suelo, la temperatura (T) y humedad relativa (HR) del higrotermógrafo a 1.5 m de altura al abrigo, y la velocidad del viento a 2 y 6 m de altura de las noches indicadas. También se obtuvieron, para los meses de febrero y marzo, los datos de la radiación global diaria (Rg), la velocidad del viento promedio diaria a 2 m de altura, la humedad relativa promedio diaria y las temperaturas máxima y mínima diaria obtenidas del higrotermógrafo. Con las temperaturas máximas y mínimas diarias se calcularon las tasas promedio de enfriamiento (TPE) del aire de las 14 h a las 7 h, entre el 1° de febrero y el 19 de marzo.

Con los datos de temperatura del aire circundante a la hoja (TAC) y temperatura de la hoja (TH) medidas con el teletermómetro infrarrojo, se determinaron las tasas promedio de enfriamiento del aire (TPEAC) y de hojas (TPEH), respectivamente. Las TPE se obtuvieron a partir de la ecuación:

$$TPE = \frac{Tf - Ti}{tf - ti}$$

Donde:

TPE: Tasa promedio de enfriamiento

Tf: Temperatura final

Ti: Temperatura inicial

tf: Tiempo final

ti: Tiempo inicial

Entre la temperatura de la hoja y la temperatura del aire circundante a la hoja, se compararon las tendencias y diferencias existentes en cada especie y cada fecha de toma de datos. Tales comparaciones se basaron en las medias y errores estándar, asumiendo una diferencia significativa cuando no había traslape entre los errores estándar de las medias de variables y especies.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 1 se observa que durante los meses de febrero y marzo se presentaron dos períodos con altas TPE del aire (23-27/feb y 7-13/mar), dentro de los cuales se encuentran las noches de registro de datos indicadas (23-24/feb/89 y 10-11/mar/89). Así mismo se nota que el promedio diario de la humedad relativa tendió a disminuir con el tiempo. En la Figura 2 se muestra que la Rg aumentó en las fechas anteriormente indicadas, coincidiendo estos aumentos con las mayores tasas de enfriamiento del aire; la presencia de heladas podría entonces explicarse considerando que en esos días en que hubo mayor Rg, y como consecuencia menor nubosidad, también se tuvo una mayor pérdida de energía del suelo y de las plantas hacia la atmósfera.

Otra causa frecuente de las bajas temperaturas invernales en el Valle de México es la invasión de masas de aire polares. La Figura 2 muestra que los promedios diarios de la velocidad del viento aumentaron poco antes de que se presentaran los períodos de más bajas temperaturas nocturnas (23-27/febrero y 7-13/marzo) y que la procedencia de los vientos fue del norte. Aunque no fueron vientos fuertes, pudieron ser portadores de aire frío y disminuir el almacenamiento de energía en el suelo.

En la primera fecha de mediciones el viento alcanzó una velocidad de 0.5 m/s o menos a partir de las 4:00 h (Figura 3a), y en la 2ª fecha alcanzó esta velocidad a partir de las 2:00 h, aumentando a las 4:00 h y posteriormente permaneciendo en 0.5 m/s (Figura 3b). Esto indica que en ambas fechas se presentaron períodos en donde fue importante la pérdida de energía por convección forzada, y que en otros períodos (con menor velocidad del viento) fue más importante la pérdida de energía por radiación. Por lo anterior, se puede decir

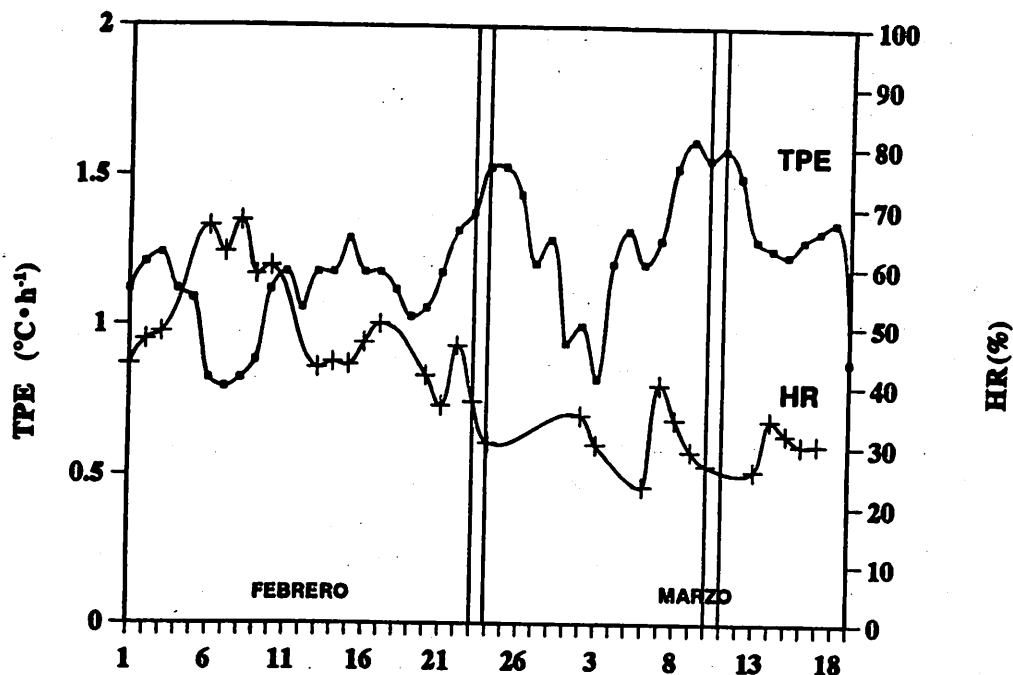


FIGURA 1. TASA PROMEDIO DE ENFRIAMIENTO (TPE) DE LAS 14:00 A LAS 7:00 h Y HUMEDAD RELATIVA (HR) PROMEDIO DIARIA.

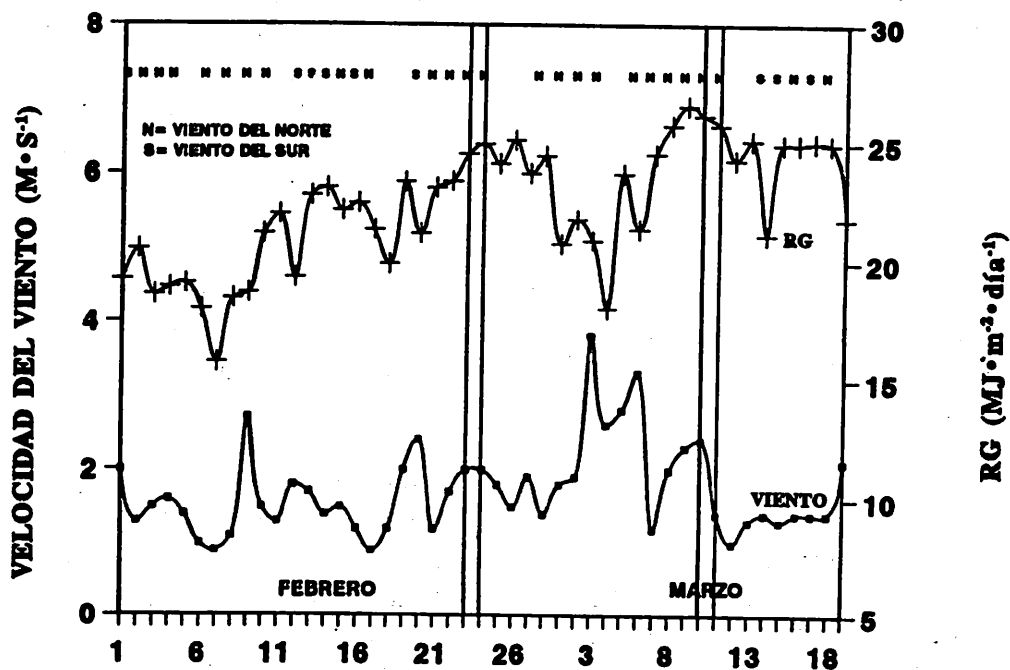
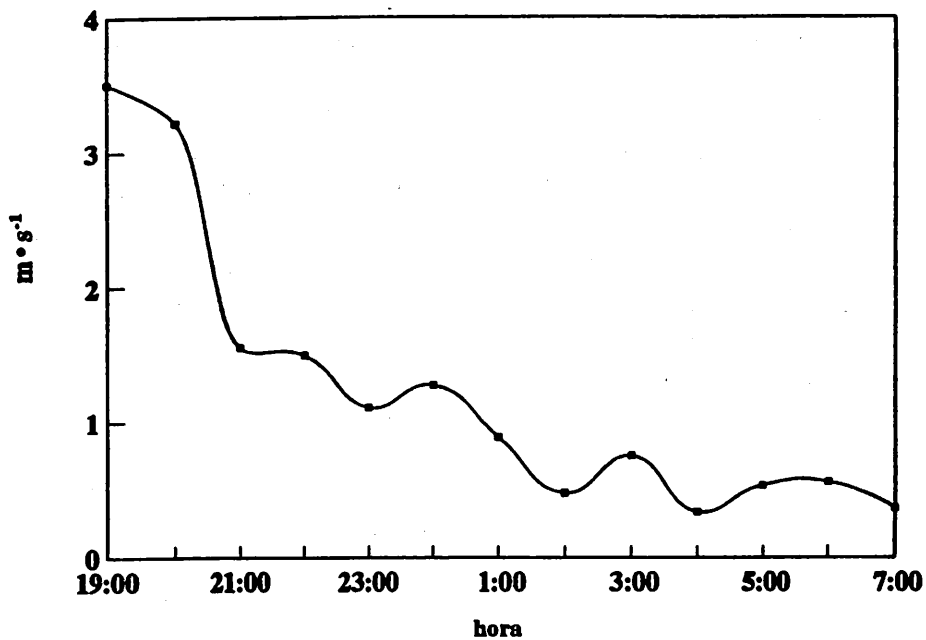


FIGURA 2. VELOCIDAD DEL VIENTO PROMEDIO DIARIA A 2 M DE ALTURA Y RADIACION GLOBAL (RG), DE LOS MESES DE FEBRERO Y MARZO DE 1989. DATOS DE LA ESTACION METEOROLOGICA DE MONTECILLO, MEX.

VELOCIDAD DEL VIENTO

a 23 Y 24/FEB/89



b 10 Y 11/MAR/89

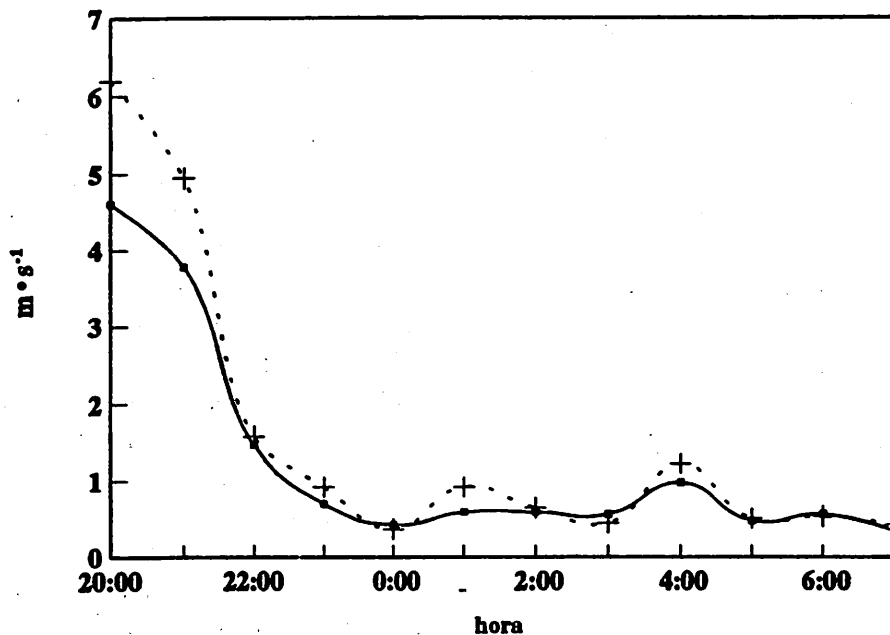


FIGURA 3. PROMEDIO POR HORA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO, A 2 (—) Y 6 M (+) DE ALTURA. REGISTROS DE LA ESTACION METEOROLOGICA DE MONTECILLO, MEXICO.

que las heladas se presentaron debido a la pérdida de energía del suelo y de las plantas por convección y radiación, como lo ha señalado Campbell (1981).

En las dos noches estudiadas se encontraron diferencias en las temperaturas de la hoja (TH) entre las especies de hoja ancha (haba y girasol) y hoja angosta (trigo y maíz): de 1°C entre maíz y haba Aguadulce y 2°C entre trigo y haba Aguadulce; en ambos casos la TH de las especies de hoja angosta fue superior a la de las especies de hoja ancha (Figura 4). El haba criolla y el girasol presentaron comportamientos similares al haba Aguadulce.

En los Cuadros 1 y 2 los datos indican que las especies de hoja angosta alcanzaron los 0°C alrededor de las 2:10 h (23-24/ febrero para maíz) y a la 1:04 h (10-11/ marzo para trigo); y que las especies de hoja ancha (haba y girasol) alcanzaron dicha temperatura a la 1:10 h en la primera fecha y a las 12:15 h en la segunda fecha. Es decir, las especies de hoja ancha alcanzaron dicha temperatura aproximadamente una hora antes que las especies de hoja angosta. Las diferencias en la TH entre especies puede deberse a diferencias en orientación, dimensión y posición de las hojas (Landsberg, 1981; Gates *et al.*, 1971). En este trabajo se midió la temperatura de hojas paralelas a la horizontal y todas las plantas tenían alturas menores a 10 cm, por lo que la posición, orientación y altura con respecto al suelo no se consideran como causa de la variación en las TH, sino sólo la dimensión de la hoja.

Desde un enfoque energético, las causas de pérdida de energía se pueden atribuir a intercambios de energía por flujo de energía emitida, por flujo de calor sensible y por flujo de calor latente, despreciando el calor liberado y almacenado por los procesos metabólicos de la planta bajo el supuesto de que éstos no están involucrados en la regu-

lación de temperatura. Una hoja, el suelo y cualquier otro objeto pierden energía por radiación en función de su temperatura. Si existieran diferencias en altura de las hojas con respecto al suelo, se podría afirmar que las hojas más altas, durante la noche estarían más frías, debido a que el suelo también está emitiendo energía y a que su temperatura es mayor que la de las hojas. Sin embargo, la altura de medición de las plantas no fue superior a 10 cm en todos los casos.

En particular, el flujo de calor latente no fue importante durante la noche debido a que los estomas permanecen cerrados (Rogers, 1980). Pero el flujo de calor sensible, definido por la diferencia de temperatura entre el aire y las hojas y que es inversamente proporcional a la resistencia de la capa frontera, jugó un papel importante en el valor de la temperatura de las hojas de las diferentes especies. Por ejemplo, una característica de las hojas de maíz y trigo es que son alargadas y angostas, ligeramente curvadas; probablemente debido a ello su temperatura tendió a ser similar a la del aire, ya que el grosor de la capa de frontera es menor a la de una hoja ancha. Tanto las hojas anchas como las angostas pierden calor por radiación y ambos tipos de hoja tendrían la misma temperatura si perdieran calor sólo por este medio. Sin embargo, el suelo cuya temperatura superficial y a 5 cm de profundidad fue más alta que la de la hoja y su aire circundante (Figuras 4 y 5), perdió calor por radiación y convección el cual pasó al aire circundante de las hojas y debió influir en la TH. Las hojas con capa de frontera menor son más influenciadas por este flujo de calor, lo que explica el que la temperatura de hojas angostas sea superior a la de las temperatura de hojas anchas. Por ello se infiere que las especies de hoja angosta, cuya TH fue mayor y más cercana a la del aire, presentaron una menor resistencia de la capa de frontera al flujo de calor del aire circundante que las hojas anchas.

Cuadro 1. Temperatura máxima (T_{máx}), temperatura mínima (T_{mín}), hora en que se alcanzaron los 0°C (TC) y tiempo de permanencia con temperaturas iguales o inferiores a 0°C hasta la última medición (TP) de las hojas en la noche del 23-24/feb/89 a las horas indicadas. (ee = error estándar).

Cultivo	h	T _{máx}	ee	h	T _{mín}	ee	TC	TP
Maíz	20:13	7.2	0.32	7:07	-4.8	0.63	2:10	4h 57min
Haba C.	20:13	6.0	0.61	7:07	-5.9	0.53	1:10	5h 57min
Haba A.	20:13	5.8	0.63	7:07	-5.6	0.32	1:10	5h 57min

Cuadro 2. Temperatura máxima (T_{máx}), temperatura mínima (T_{mín}), hora en que se alcanzaron los 0°C (TC) y tiempo de permanencia con temperaturas iguales o inferiores a 0°C hasta la última medición (TP) de las hojas en la noche del 10-11/mar/89 a las horas indicadas. (ee = error estándar).

Cultivo	h	T _{máx}	ee	h	T _{mín}	ee	TC	TP
Trigo	22:10	3.7	0.28	7:01	-3.8	0.26	1:04	5h 57min
Haba C.	22:10	1.4	0.66	7:01	-5.5	0.25	00:15	6h 46min
Haba C.	22:10	1.1	0.91	7:01	-5.3	0.14	00:15	6h 46min
Girasol	22:10	2.0	0.53	7:01	-5.0	0.50	00:15	6h 46min

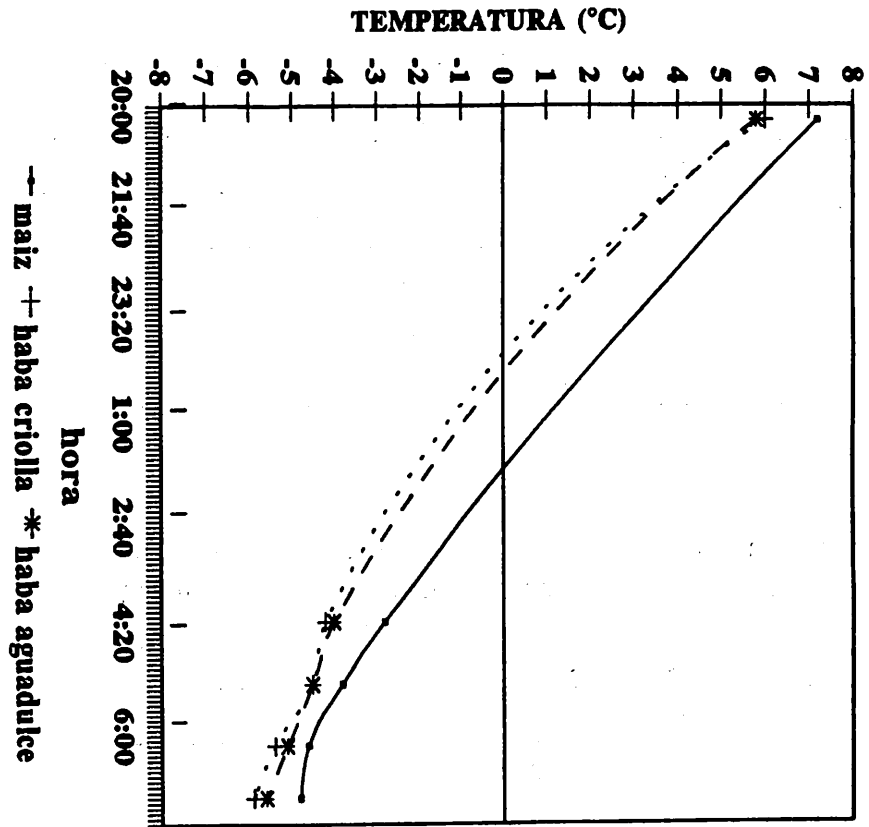
En las especies de hoja angosta (trigo, maíz), las diferencias promedio entre TH y TAC fue de 0.5°C; en cambio, en especies de hoja ancha (haba y girasol) la diferencia fue de 1.0 a 2.0°C. Lo anterior muestra que las hojas angostas tendieron a presentar temperaturas similares a la del aire (Cuadros 3 y 4), pero aún así su temperatura fue inferior a la temperatura del aire circundante debido a la mayor emisividad de las hojas y, consecuentemente, a la mayor pérdida de calor por radiación. Marcellos y Single (1984) encontraron que las espigas de trigo también tuvieron menor temperatura que el aire debido a su mayor emisividad, la cual es similar a la de las hojas.

En la primera fecha de medición (a las 7:07 h) la temperatura promedio de las hojas en maíz alcanzó -4.8°C y en las habas de -5.6 a -5.9 °C (Cuadro 1). En la segunda fecha (a las 7:01 h) el trigo alcanzó -3.8°C

mientras que las especies de hoja ancha (haba y girasol) alcanzaron temperaturas de -5.0 a -5.5 °C (Cuadro 2). Las hojas permanecieron con temperaturas iguales o inferiores a 0°C de 5 a 6 h (primera fecha) y de 6 a 7 h (segunda fecha).

Se debe mencionar que aún cuando parte del maíz estaba protegido con túneles de polietileno, las plantas cubiertas sufrieron daños por efecto de las primeras heladas. El 23 de febrero se encontraron plantas cubiertas presentando quemaduras leves, y se tomaron lecturas en las unidades experimentales en donde se dejó descubierto al maíz. El 24 de febrero las plantas de maíz habían sufrido daños irreversibles, aún las que estaban bajo cubierta. Pájaro y Ortíz (1988a) consideran al maíz como una especie ligeramente resistente a heladas, pero reportan que temperaturas del aire de -1 °C le producen daños. Las demás especies no presentaron

a 23 Y 24 DE FEB/89



b 10 Y 11 DE MAR/89

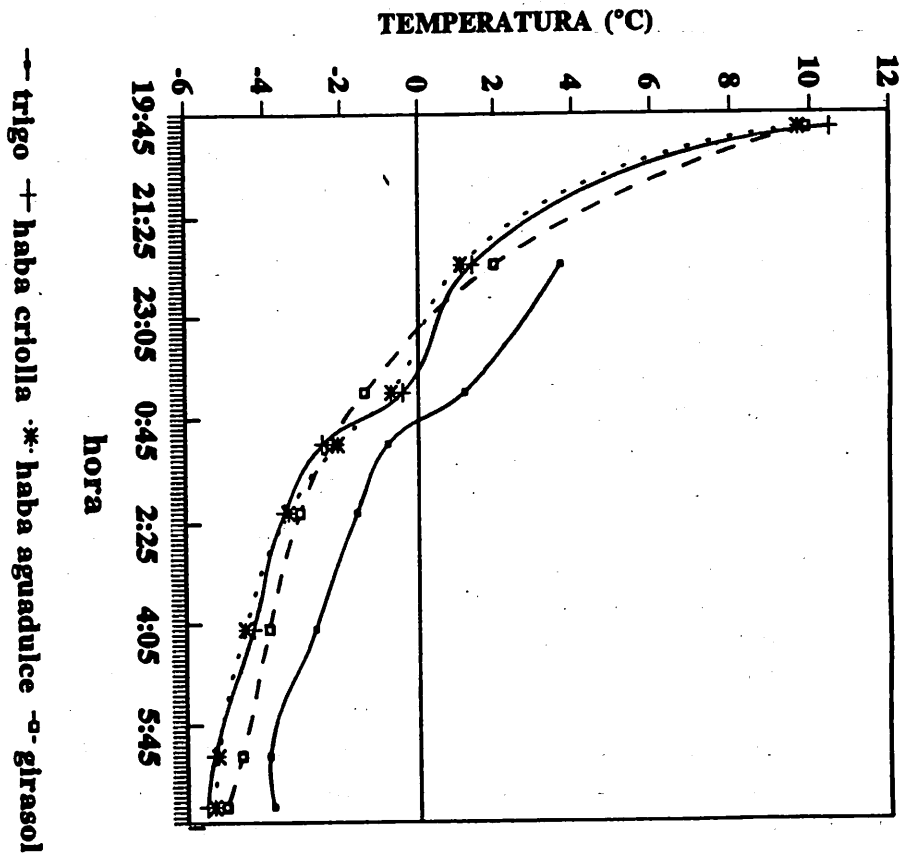
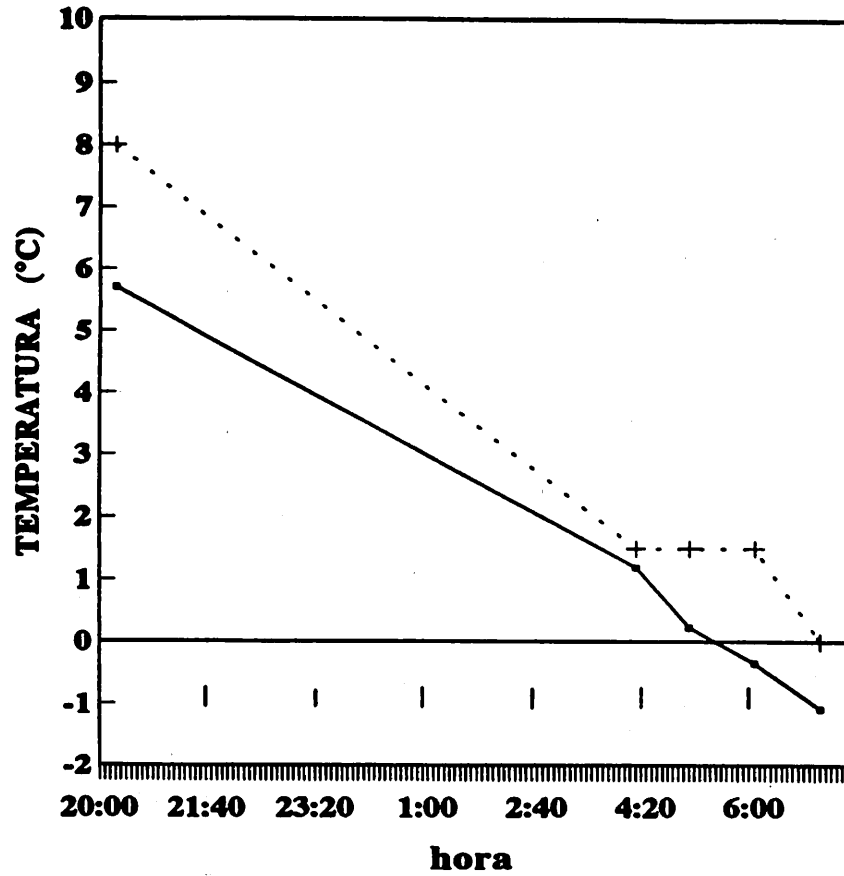


FIGURA 4. DISMINUCION DE LA TEMPERATURA NOCTURNA DE LA HOJA (TH) EN VARIAS ESPECIES.

a 23 Y 24 DE FEB/89



b 10 y 11 DE MAR/89

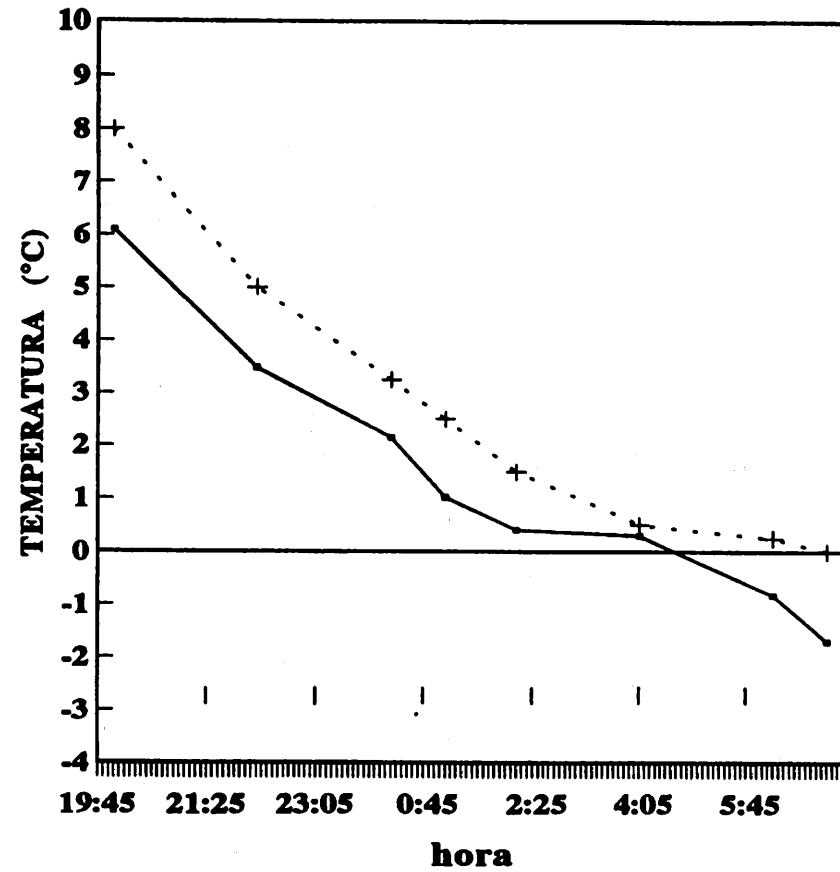


FIGURA 5. TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO (+ , TSS) Y TEMPERATURA A 5 CM DE PROFUNDIDAD (+, TS5).

Cuadro 3. Temperatura de la hoja (TH), temperatura del aire circundante a la hoja (TAC), diferencia entre la temperatura de la hoja y la temperatura del aire circundante a la hoja (Dif) y errores estándar (ee) de TH y TAC, del 23-24/feb/89.

Maíz						Haba criolla					
h	TH	ee	TAC	ee	Dif	h	TH	ee	TAC	ee	Dif
20:13	7.2	0.32	8.0	0.23	0.8	20:13	6.0	0.61	8.5	0.71	2.5
4:14	-2.8	0.51	-2.3	1.85	0.5	4:14	-4.2	0.23	-3.2	1.19	1.0
5:15	-3.8	0.23	-3.3	0.31	0.5	5:15	-4.5	0.96	-2.3	1.02	2.2
6:15	-4.6	0.62	-4.2	0.50	0.4	6:15	-5.4	0.36	-4.0	1.24	1.4
7:07	-4.8	0.63	-4.5	0.69	0.3	7:07	-5.9	0.53	-4.5	0.64	1.4
Promedio					0.5	Promedio					1.7

Haba Aguadulce					
h	TH	ee	TAC	ee	Dif
20:13	5.8	0.63	7.9	0.33	2.1
4:15	-4.0	0.18	-3.5	1.34	0.5
5:15	-4.5	0.79	-2.9	0.87	1.6
6:15	-5.1	0.39	-4.6	0.19	0.5
7:07	-5.6	0.32	-4.8	0.30	0.8
Promedio					1.1

Cuadro 4. Temperatura de la hoja (TH), temperatura del aire circundante a la hoja (TAC), diferencia entre la temperatura de la hoja y la temperatura del aire circundante a la hoja (Dif) y errores estándar (ee) de TH y TAC, del 10-11/mar/89.

Trigo						Haba criolla					
h	TH	ee	TAC	ee	Dif	h	TH	ee	TAC	ee	Dif
						20:02	10.5	0.21	11.6	0.35	1.1
20:10	3.7	0.28	4.7	0.41	1.0	22:10	1.4	0.66	4.8	0.36	3.4
0:15	1.2	0.31	1.0	0.28	0.2	0:15	-0.4	0.20	1.6	0.65	2.0
1:04	-0.8	0.39	-0.3	0.32	0.5	1:04	-2.5	0.43	0.1	0.58	2.6
2:10	-1.6	0.53	-1.5	0.58	0.1	2:10	-3.5	0.45	-0.6	1.10	2.9
4:06	-2.7	0.45	-2.2	0.91	0.5	4:06	-4.3	0.81	-2.1	1.13	2.2
6:10	-3.9	0.64	-4.7	0.51	0.8	6:10	-5.3	0.20	-4.2	1.23	1.1
7:01	-3.8	0.25	-4.1	0.13	0.3	7:01	-5.5	0.25	-4.4	0.22	1.1
Promedio					0.5	Promedio					2.0

Continúa.....

Cuadro 4. Continuación....

Haba Aguadulce						Girasol					
h	TH	ee	TAC	ee	Dif	h	TH	ee	TAC	ee	Dif
20:02	9.7	0.50	11.4	0.30	1.7	20:02	9.9	0.60	11.3	0.36	1.4
22:10	1.1	0.91	5.7	0.79	4.6	22:10	2.0	0.53	5.0	0.49	3.0
0:15	-0.7	0.73	1.3	0.29	2.0	0:15	-1.4	0.43	0.9	0.15	2.3
1:04	-2.1	0.37	-0.1	0.18	2.0	1:04	-2.3	0.24	-0.3	0.21	2.0
2:10	-3.4	0.38	-1.1	0.39	2.3	2:10	-3.1	0.16	-1.9	0.40	1.2
4:06	-4.5	0.34	-2.6	0.18	1.9	4:06	-3.9	0.53	-2.7	0.25	1.2
6:10	-5.2	0.17	-4.6	0.26	0.6	6:10	-4.6	0.25	-4.5	0.32	0.1
7:01	-5.3	0.14	-4.5	0.15	0.8	7:01	-5.0	0.50	-4.5	0.08	0.5
Promedio					2.0	Promedio					1.5

daños apreciables. Se sabe que los tejidos resistentes al frío se caracterizan ya sea por formar hielo extracelular acompañado de una deshidratación parcial de la célula a temperaturas de congelamiento, o porque el agua intracelular permanezca superenfriada (Bochorova y Klyachko, 1988). En cambio, las especies susceptibles a temperaturas de congelamiento presentan daños irreversibles en la membrana celular (Lyons *et al.*, 1979). En el caso del maíz, se puede afirmar que, como especie no resistente a heladas, debió haber sufrido alteraciones en su membrana celular que le causaron su muerte.

Comparando la TH de las 7 h con las temperaturas registradas a esta misma hora en la estación meteorológica situada a 100 m del sitio del experimento, se encontró que la TH fue 0.1 a 0.8 °C inferior a la temperatura registrada en el higrotermógrafo (T) al abrigo y 5.2 a 5.9 °C superior a la temperatura registrada a la intemperie a 30 cm. No obstante, es necesario señalar que en otras horas en las cuales se hicieron mediciones, las diferencias máximas entre TH y la temperatura registrada en el higrotermógrafo sólo fueron de 3°C.

Las tasas promedio de enfriamiento de hojas (TPEH) de la noche del 10-11/febrero presentaron tendencias diferentes a las tasas promedio de enfriamiento del aire circundante a la hoja (TPEAC), ya que éstas fueron más dependientes de la velocidad del viento al presentar una caída escalonada conforme pasaba la noche, similar al comportamiento de la velocidad del viento. Sin embargo, aunque a partir de las 12:00 h la velocidad del viento se mantuvo más o menos constante, la TPEAC siguió disminuyendo debido al enfriamiento del aire; ello significa que la TAC desciende tanto por influencia del viento como por el enfriamiento del aire por sí mismo (Figuras 3b y 6). No se encontraron diferencias en las TPEH entre las especies. Después de las 12:00 h, la TPEH fue alrededor de 0.5°C/h y antes de esta hora alcanzó a ser de 4°C/h (Figura 6).

Comparando los registros de la temperatura del aire a 1.5 m a la intemperie (TAS) y del higrotermógrafo (Figura 7) se puede observar que en la primera fecha se encontraron diferencias de 0.1 a 2.9°C (Figura 7a) y en la 2ª fecha de 0.1 a 2.1°C (Figura 7b); la mayor diferencia pudo deberse a que

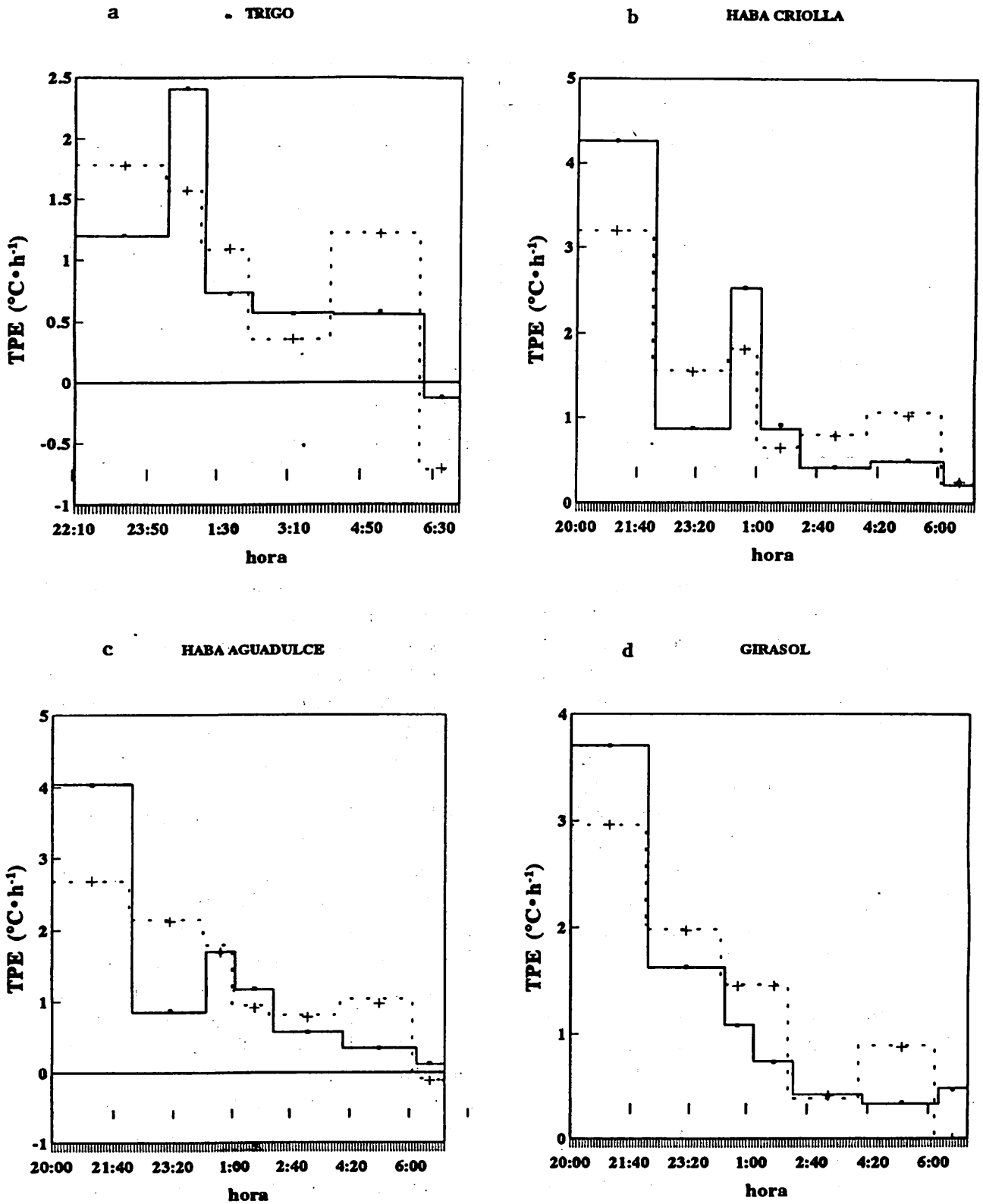


FIGURA 6. TASAS PROMEDIO DE ENFRIAMIENTO (TPE) EN LAS ESPECIES ESTUDIADAS, EL 10 Y 11 DE MARZO DE 1989. (• HOJA, + AIRE CIRCUNDANTE)

en la primera fecha la velocidad del viento permaneció por más tiempo arriba de 0.5 m/s que en la segunda. Es importante señalar que TAS es inferior a T (Figura 7), lo que indica que T puede no estar representado la temperatura presente en la parcela a la intemperie a una altura de 1.5 m.

Con relación al suelo, la temperatura del suelo superficial (TSS) fue inferior a la temperatura del suelo a 5 cm de profundidad (TS5). La TS5 no descendió por abajo de 0°C (Figura 5).

Al analizar el crecimiento vegetal, se encontró que el trigo tuvo las mayores tasas relativas de crecimiento (TRC) (Figura 8), y que en las otras especies, ésta disminuyó debido a una reducción en la TAN (Figuras 9 y 10). Ello significa que el frío afectó la eficiencia fotosintética del área foliar, similarmente a lo encontrado en otros trabajos (Miedema, 1982). La especie más afectada en su TRC fue el maíz, seguida del girasol (Figura 8).

De este análisis del microclima ocurrido durante la incidencia de heladas, se puede afirmar que no sólo la temperatura mínima a las 7:00 h es importante para definir el grado de tolerancia o resistencia a las heladas a ser aplicado en mejoramiento genético, sino que también se debe considerar la velocidad de enfriamiento y el lapso que las hojas permanecen bajo temperaturas de 0°C o menos, así como la temperatura crítica en donde se inician los daños a la planta.

Además, en el mejoramiento genético para obtener tolerancia a heladas se deben considerar aspectos microclimáticos y morfológicos de la planta, tales como dimensión de la hoja, posición y altura con respecto al suelo, de tal forma que se evite confundir escape a las heladas con resistencia o tolerancia a las heladas, ya que algunas condiciones favorecen que la planta permanezca a temperaturas mayores y estas variaciones

pueden ser en tiempo y en espacio. Otras condiciones que afectan la temperatura del microclima de la planta, son las edáficas, la acumulación de materia orgánica en el suelo, la humedad realtiva y la posición espacial de las plantas en el terreno (Mendoza, 1979; Blanc *et al.*, 1969).

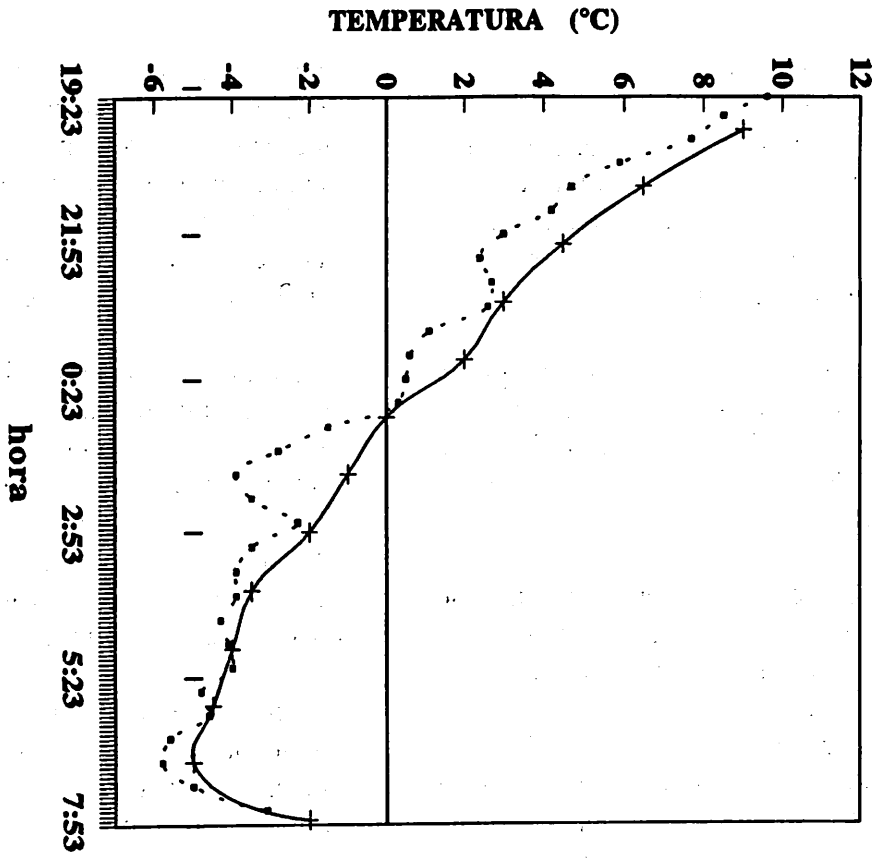
En adición, debe señalarse que no siempre son similares la temperatura medida en la planta y la registrada en la estación meteorológica, por lo cual se requiere establecer relaciones matemáticas entre ambas con la finalidad de predecir la primera con base en datos de la segunda tomados en condiciones de campo.

Finalmente, es importante mencionar que aunque las causas de la susceptibilidad a las heladas son a nivel celular, para fines del fitomejoramiento se puede trabajar a nivel de población en el campo con el auxilio de la micrometeorología, para una mejor comprensión del fenómeno y mayores posibilidades de éxito.

CONCLUSIONES

1. En las heladas estudiadas (23-24/feb y 10-11/mar) la temperatura mínima del aire a la intemperie a 1.5 m fue de -5.8°C (6:58 h) y de -5.9°C (6:51 h) respectivamente.
2. Durante heladas por convección y radiación, las hojas de los cultivos alcanzaron los 0°C de la 1:10 h a 2:10 h (23-24/feb) y de 12:15 h a 1:10 h (10-11/mar), permaneciendo con temperaturas iguales o inferiores a 0°C entre 5 y 7 horas.
3. El maíz murió cuando la temperatura de la hoja descendió hasta -4.8°C, y las hojas permanecieron con temperaturas iguales o inferiores a 0°C por cerca de 5 horas. Las plántulas de trigo, haba y girasol sobrevivieron toda la temporada de heladas.

a 23 Y 24 DE FEB/89



b 10 Y 11 DE MAR/89

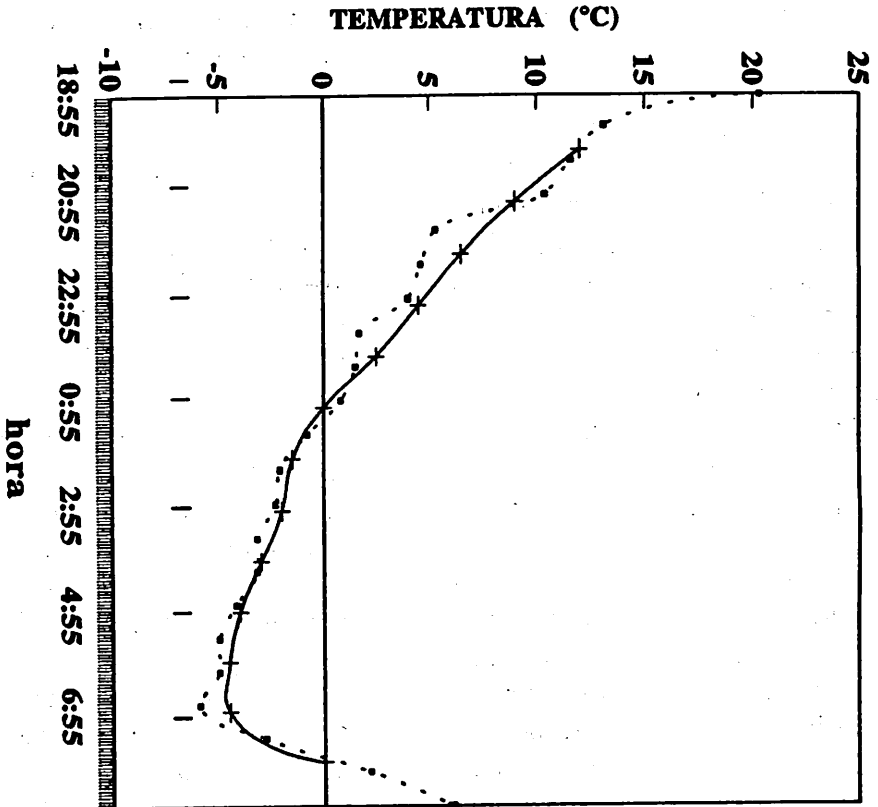


FIGURA 7. COMPARACION DE LA TEMPERATURA DEL AIRE REGISTRADA AL ABRIGO CON EL HIGROTHERMOGRAFO (+, T) Y LA TEMPERATURA DEL AIRE A LA INTemperIE A 1.5 M REGIS- TRADA CON LA ESTACION OMNIDATA (-, TAS).

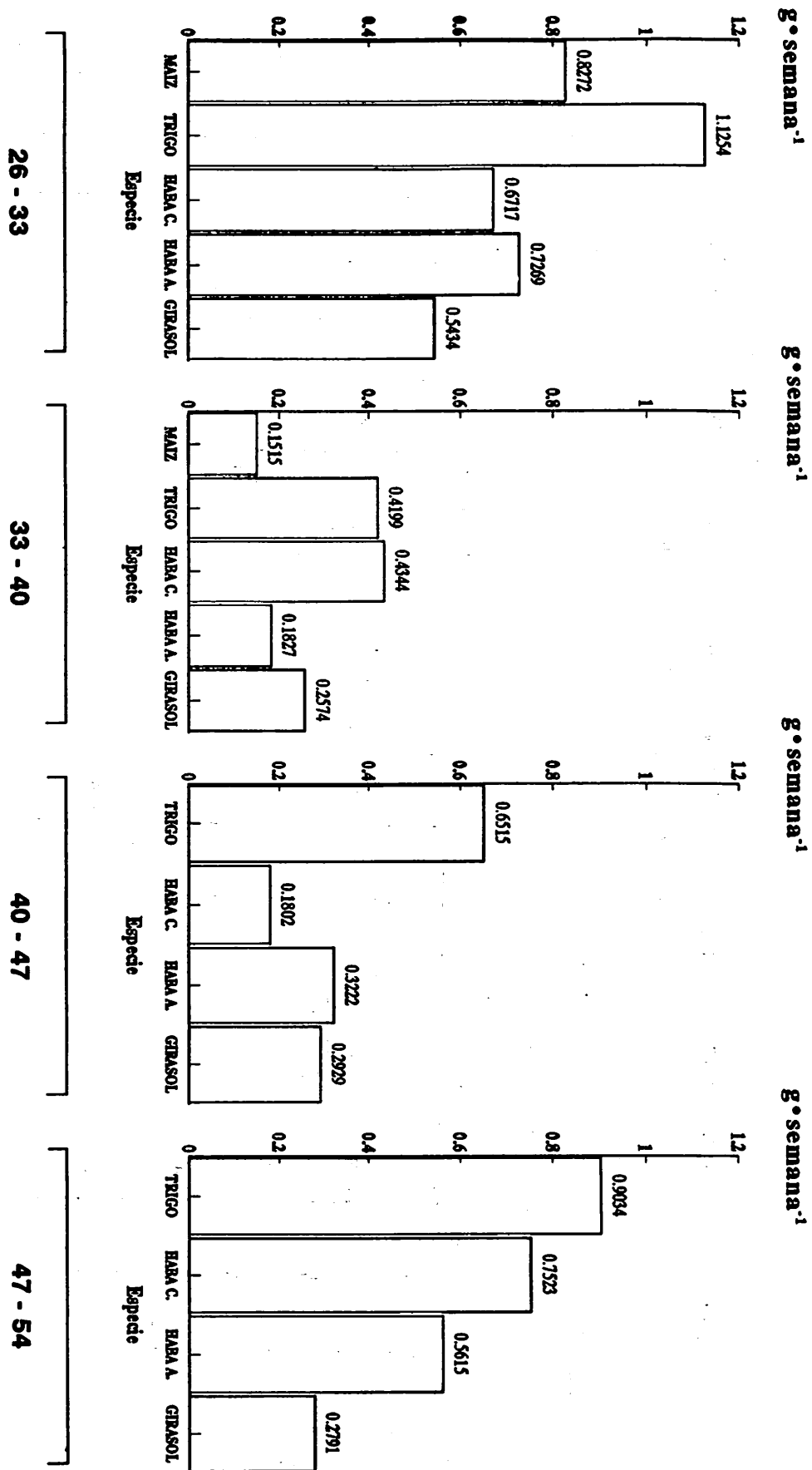


FIGURA 8. TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO (TRC) DEL PESO SECO TOTAL DE VARIOS CULTIVOS SEMBRADOS EN INVIERNO. MONTECILLO, MEX.

DIAS DESPUES DE LA SIEMBRA (DDS)

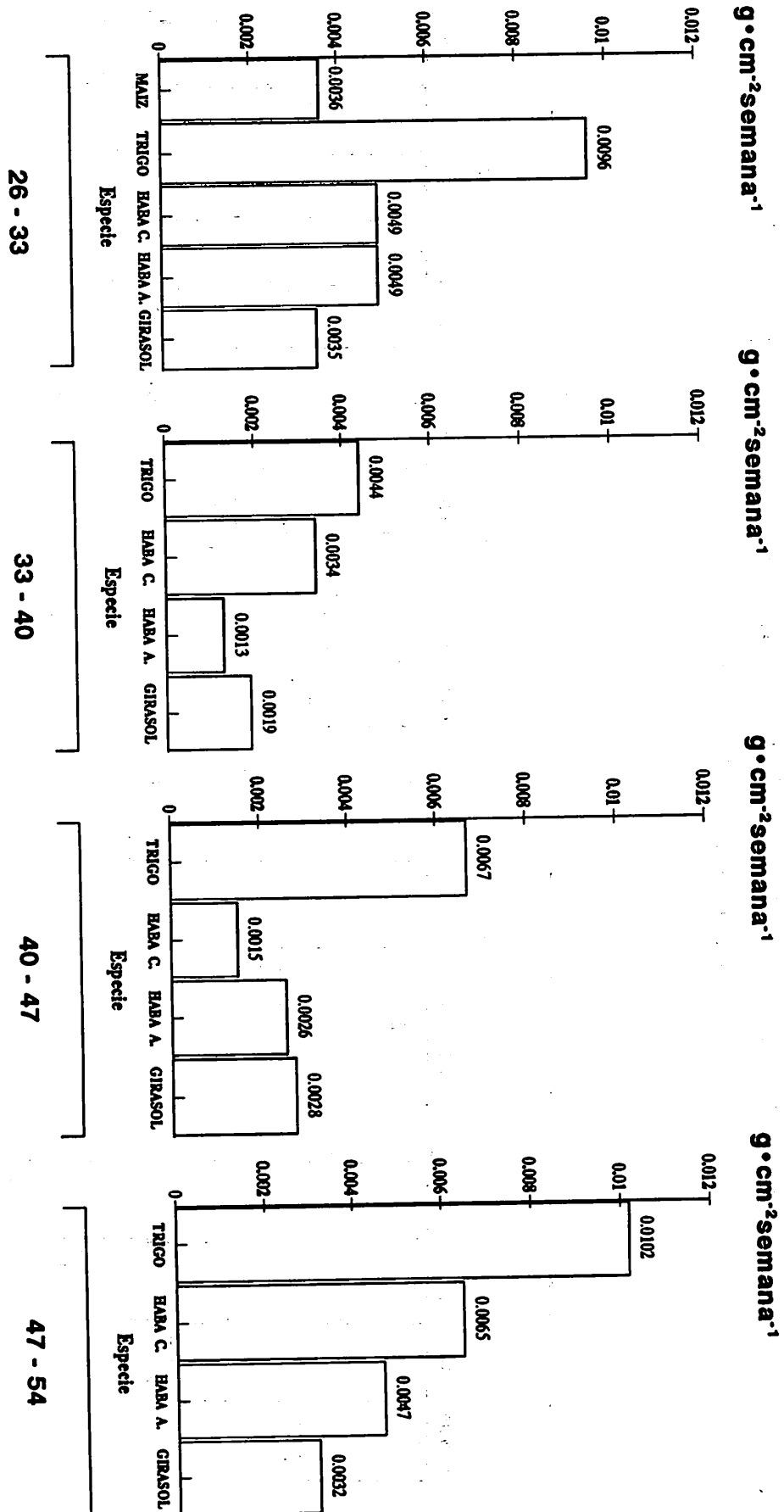
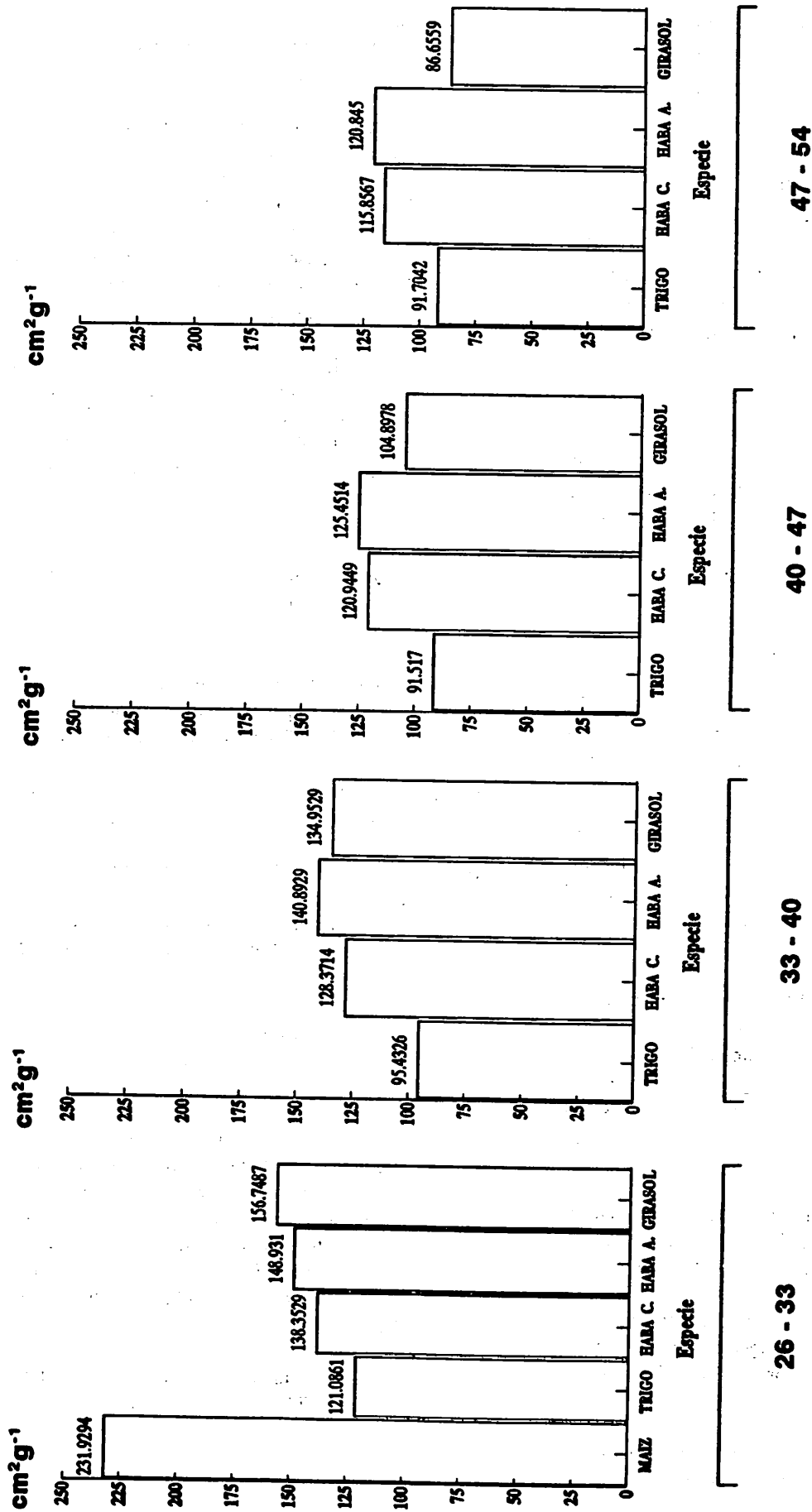


FIGURA 9. TASA DE ASIMILACION NETA (TAN) DE VARIAS ESPECIES SEMBRADAS EN INVIERNO. MONTECILLO, MEX.



DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA (DDS)
FIGURA 10. RELACION DE AREA FOLIAR (RAF) DE VARIAS ESPECIES SEMBRADAS EN INVIERNO.
MONTECILLO, MEX.

4. En promedio, la temperatura de las hojas fue de 0.5 a 2.0°C inferior a la temperatura del aire circundante, debido a la mayor emisividad de las hojas.

5. A través de la noche la temperatura de la hoja no es similar a la temperatura registrada a 1.5 m al abrigo por el higrómetro, que es la temperatura que normalmente registran las estaciones meteorológicas, con diferencias promedio hasta de 3.0°C o más.

6. El trigo tuvo las tasas relativas de crecimiento (TRC) más altas; en las otras especies estudiadas esta tasa disminuyó porque el frío afectó la tasa de asimilación neta (TAN). El cultivo con menor TRC fue el maíz.

BIBLIOGRAFIA

- Blanc, M. L., H. Gelsin, I. A. Holzberg, and B. Mason. 1969. Protection against frost damage. Technical Note N° 51. WMO. Geneva, Switzerland. 62 pp.
- Bochorova, M. A., and N. L. Klyachko. 1988. Effect of low temperatures on polysome content in tissue of plants with different cold hardiness. *Soviet Plant Physiol.* 35: 906-912.
- Campbell, G. S. 1981. 1. Fundamentals of radiation and temperature relations. *In: Physiological Plant Ecology. I. Responses to the Physiological Environment.* O. L. Lange, P. S. Nobel, C. B. Osmond and H. Ziegler (eds.). Springer-Verlag. USA. pp. 19-33.
- García, E. 1981. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Tercera edición. UNAM. México, D.F. 252 pp.
- Gates, D. M., S. La Verne, and E. Papian. 1971. Atlas of Energy Budgets of Plant Leaves. Academic Press. London-New York. pp. 1-23.
- Kramer, P. J. 1983. Water Relations in Plants. Academic Press. Inc. USA. 373 pp.
- Landsberg, H. E. 1981. General Climatology. Elsevier Scientific Publishing, Co. N. Y. USA. 408 pp.
- Lyons, J., D. Graham, and J. Raison. 1979a. The plant membrane in response to low temperature: An overview. *In: Low Temperature Stress in Crop Plants; the Role of the Membrane.* J. Lyons, D. Graham, and J. Raison (eds.). Proceedings of an International Seminar. Academic Press. USA. pp. 1-24.
- _____. 1979b. Appendix E. Membrane hypothesis. *In: Low Temperature Stress in Crop Plants; the Role of the Membrane.* J. Lyons, D. Graham and J. Raison (eds.). Proceedings of an International Seminar. Academic Press USA. pp. 543-548.
- Marcellos, H. and W. V. Single. 1984. Frost injury in wheat ears after ear emergence. *Aust. J. Plant Physiol.* 11: 7-15.
- Mendoza G., J. 1979. Prácticas para Evitar Algunos Efectos Meteorológicos Nocivos en la Agricultura. Departamento de Irrigación, Chapingo, México. 40 pp.
- Miedema, P. 1982. The effects of low temperature on *Zea mays* L. *Adv. Agron.* 60: 129-132.
- Minorsky, P. V. 1985. An heuristic hypothesis of chilling injury in plants: a role for calcium as the primary physiological transducer of injury. *Plant, Cell and Environment* 8: 135-142.
- Nobel, P. 1974. Introduction to Biophysical Plant Physiology. W. H. Freeman and Co. USA. 488 pp.
- _____. 1988. Principles underlying the prediction of temperature in plants, with special reference to desert succulents. *In: Plants and Temperature. Symposia of the Society for Experimental Biology.* S. P. Long, and F. I. Woodward (eds.). University of Cambridge, England. pp. 1-23.
- Oke, T. P. 1978. Boundary layer climates. Methuen and Co. LTD. U. K. 372 pp.

Pájaro, D. y C. Ortiz. 1988a. Estimación del período libre de heladas para la República Mexicana. En: Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología. Sociedad Mexicana de Agroclimatología, A. C. (ed.). Departamento de Irrigación. UACH, México. pp. 103-125.

_____. 1988b. Estimación del período de crecimiento por disponibilidad de agua y libre de heladas para la República Mexicana. En: Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología. Sociedad Mexicana de Agroclimatología, A. C. (ed.). Departamento de Irrigación. UACH, México. pp. 145-163.

Rogers, C. 1980. Dark opening of stomates of *Vicia faba* in CO₂-free air. Effect of temperature on stomatal aperture and potassium accumulation. *Plant Physiol.* 65: 1036-1038.

Rosenberg, N. J., B. L. Blad, and S. B. Verma. 1983. *Microclimate; The Biological Environment.* John Willey and Sons. USA. 315 pp.