

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA

LOS METODOS DE CALCULO DE HORAS FRIO:
EL METODO GOMEZ-MORALES

FALLA DE ORIGEN

SECRETARIA DE
ASUNTOS ESCOLARES

TESIS PROFESIONAL
Que para obtener el título de
LICENCIADO EN GEOGRAFIA

PRESENTA

LUIS MIGUEL MORALES MANILLA

MEXICO, D.F.

OCTUBRE 1989

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

LOS METODOS DE CALCULO DE HORAS FRIO: EL METODO GOMEZ-MORALES.

I. INTRODUCCION.

- I.1. *Efectos perjudiciales y efectos benéficos de las bajas temperaturas en las plantas.*

II. LOS METODOS DE CUANTIFICACION DE HORAS FRIO.

- II.1. *El Método Directo.*
- II.2. *El Método de Da Mota.*
- II.3. *El Método de Sharpe.*
- II.4. *El Método de Weinberger.*
- II.5. *El Método de Crossa-Raynaud.*

III. EL METODO GOMEZ-MORALES PARA EL CALCULO DE HORAS FRIO.

- III.1. *Fundamento Teórico.*
- III.2. *Observaciones sobre la aplicación del método.*

IV. ANALISIS COMPARATIVO DE LOS DIVERSOS METODOS.

- IV.1. *Análisis cuantitativo.*
- IV.2. *Análisis cualitativo.*

V. CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

ANEXO I.

I. Introducción.

I. INTRODUCCION.

El estudio del clima desde el punto de vista de la influencia que ejerce sobre las actividades agrícolas , pecuarias y forestales, conforma la rama de la Climatología denominada Agroclimatología. En ella son posibles dos enfoques: los estudios teóricos y los estudios aplicados. Los estudios teóricos pueden referirse a aspectos climáticos o bien, a aspectos fisiológicos. Los primeros pueden tratar del clima en su conjunto o de algún elemento hidrico o térmico. En el caso de la temperatura, elemento térmico del clima, es posible estudiar los efectos de las bajas temperaturas, ya sea desde el punto de vista de los daños que ocasionan a los vegetales, o bien, haciendo énfasis sobre la importancia de su existencia para los vegetales criófilos.

El presente trabajo se sitúa dentro del tema de estudio de las bajas temperaturas, y en particular trata sobre los métodos de estimación ó cálculo del frio necesario para las plantas.

Frio, biológicamente hablando, es una palabra utilizada para denotar la presencia o la sensación de temperaturas por debajo de aquella considerada como óptima para la vida. Es un término un poco ambiguo, pues, el dónde comienza y el dónde termina el frío, sólo pueden definirse en función de la respuesta fisiológica de cada organismo frente a este fenómeno, ya que inclusive organismos pertenecientes a una misma especie pueden no poseer la misma sensibilidad hacia el frio.

En los organismos vegetales el frio ejerce una influencia más notoria que en los animales, puesto que no tienen movilidad, o un mecanismo de regulación homeostático, ni tampoco pueden, como los seres humanos, utilizar medios artificiales para combatir el frio.

1. Introducción.

En las plantas esta influencia se manifiesta más en la ocurrencia de reacciones químicas, es decir en la fisiología, que en el aspecto externo de ellas. En virtud de esta influencia, las características hereditarias de las plantas derivadas de su adaptación al medio condicionan su existencia y difusión en la superficie terrestre, de manera tal que una planta originaria de una zona considerada como fría difícilmente se desarrolla en otra catalogada como más cálida, e incluso puede llegar a morir cuando las temperaturas rebasan ciertos límites vitales.

El frío tiene dos efectos sobre las plantas: uno benéfico y otro perjudicial. Esta diferencia es sólo de grado, pues lo que para un organismo puede ser mortal, para otro puede ser necesario. Así pues conviene conocer en que consiste cada uno de estos efectos.

I.1. Efectos perjudiciales y efectos benéficos de las bajas temperaturas en las plantas.

Es bien sabido que cada especie vegetal tiene una temperatura óptima asociada a cada una de sus funciones y etapas de desarrollo tales como la fotosíntesis, floración, formación del fruto, germinación de la semilla, etc. Existe también un límite superior y otro inferior de temperatura para cada una de las funciones de la planta, a estos límites se les llama comúnmente temperaturas umbrales; en el caso que nos ocupa, interesan en particular aquellos umbrales de baja temperatura que marcan un límite, por debajo o por encima del cual, una determinada función de la planta puede no realizarse, o pueden existir daños en el vegetal.

I. Introducción.

Se tratará primero de manera general sobre los perjuicios que ocasionan las bajas temperaturas cuando se rebasan ciertos umbrales.

En general puede decirse que la mayoría de los vegetales sufren daños cuando la temperatura ambiente es cercana, igual o inferior a 0°C (la temperatura exacta depende de la especie y variedad del vegetal). Las razones de esto son las siguientes:

"Entre las células del vegetal existe agua casi pura, pero dentro de las células, en el protoplasma, el agua posee solutos por lo que se congela a temperaturas inferiores a 0°C. Cuando la temperatura baja a 0°C se forman cristales de hielo del agua existente entre las células. El protoplasma de las células expuestas a temperaturas bajas está sujeto a varios tipos de daños, entre los que están la gradual deshidratación del protoplasma, reduciendo el volumen de la célula y aumentando la concentración de sales en el líquido que permanece en la célula, para evitar la congelación de los líquidos protoplásmicos; sin embargo, la célula puede no dañarse y volver a su condición y forma originales, pero al derretirse el hielo, ocasionando la difusión de agua, el protoplasma se rehidrata rápidamente y puede ocasionar la ruptura del ectoplasma y de la membrana celular, o por otra parte, la concentración de sales en el protoplasma pudo llegar a ser tan alta que tuvo efectos tóxicos." (Torres, 1983).

Cuando la temperatura baja lo suficiente para ocasionar los fenómenos anteriores, se dice que ocurre una helada. Sin embargo no es la intensidad de las bajas temperaturas el único factor causante de daños, también la duración de las bajas temperaturas puede tener efectos nocivos. Por ejemplo, se ha encontrado que cuando una planta es sometida a un período más o menos largo a una temperatura de 4°C, disminuye notablemente su capacidad para absorber agua y en cambio continúa transpirando, llegando a morir por deshidratación si se prolonga dicho período.

En virtud de esto, algunas plantas, como las caducifolias, han desarrollado ciertas características para defenderse de tales

1. Introducción.

adversidades, de tal forma que diferentes plantas presentan diferente susceptibilidad al frío, y aun en el mismo vegetal las diversas partes que lo forman pueden tener una resistencia variable al frío. También hay que considerar que ésta resistencia o susceptibilidad al frío depende de la etapa vegetativa en la que se encuentre el vegetal. Estas características defensivas están dadas por la herencia, la que a su vez se deriva de la adaptación al medio, en este caso de regiones frías, en las cuales se presentan inviernos crudos y bien definidos.

Uno de los principales mecanismos de defensa en los vegetales caducifolios criófilos, consiste en entrar en reposo durante la época invernal. Este estado se caracteriza por "la pérdida del follaje, detención del crecimiento y agostamiento, así como por la acumulación de almidones." (Calderón, 1983).

A pesar de que el frío representa potencialmente un daño para la planta, los vegetales caducifolios criófilos necesitan de una cierta cantidad de él para entrar en reposo, es entonces que se habla del efecto benéfico del frío.

Aún está en discusión el mecanismo por el cual la planta entra en reposo. Los fisiólogos vegetales se inclinan por la siguiente hipótesis: al parecer existen ciertas sustancias que se denominan promotores e inhibidores del crecimiento, las cuales tienen efectos antagónicos, de tal manera que cuando el balance interno de la planta indica un predominio de sustancias inhibidoras, el vegetal entra en reposo, el cual se rompe cuando se cumplen ciertas necesidades de frío, lo que origina un aumento

I. Introducción.

de las sustancias promotoras del crecimiento. Al respecto de esto último, Calderón (1983) menciona que:

"...el rompimiento del estado de reposo es función de la presencia de frío invernal, que parece ser que actúa destruyendo a las sustancias inhibitoras y favoreciendo el incremento de las promotoras."

Esta aseercción carece de lógica pues de ser cierta resultaría que la planta en lugar de entrar en reposo como respuesta al frío invernal y al aumento de sustancias inhibitoras, al destruir el frío a dichas sustancias y favorecer el de las promotoras, la planta continúa su etapa de crecimiento durante la etapa invernal, lo cual es absolutamente contrario a lo que ocurre en la realidad.

Otra hipótesis se basa en la ley química que establece que a menor temperatura la velocidad de las reacciones químicas es menor, de lo que se infiere que cuando las temperaturas diarias comienzan a ser bajas, la actividad vegetal disminuye, sin llegar a una inactividad total, entrando por ello en reposo, de modo que cuando las temperaturas vuelven a ser suficientemente altas como para que ocurran ciertas reacciones químicas y se acelera la velocidad de otras, el reposo se rompe, lo cual ocurre a finales del invierno. Esta hipótesis, aunque más simple que la anterior, es completamente lógica y acorde con la realidad.

Combinando ambas hipótesis en una sola puede decirse lo siguiente: el inicio de la ocurrencia de bajas temperaturas propicia por un lado la generación de sustancias inhibitoras, y, por otro, la disminución de la actividad química del vegetal y de la cantidad de sustancias promotoras del crecimiento. Cuando a finales de invierno, nuevamente las temperaturas comienzan a ser altas, y la actividad química se reanuda, se produce un aumento en

I. Introducción.

la cantidad de substancias promotoras del crecimiento y el reposo se rompe.

El cumplimiento de las necesidades de frío depende del tiempo que dure el reposo, el cual depende a su vez de la duración e intensidad de las bajas temperaturas durante la etapa invernal.

Si estas necesidades de frío, no se satisfacen íntegramente durante el reposo, en la etapa de crecimiento siguiente existirán "desordenes fisiológicos que determinarán un pobre y lánguido desarrollo, la improductividad del árbol y su desaparición total después de algunas temporadas invernales en situación de déficit de bajas temperaturas."(Calderón, 1983). Según este mismo autor, algunas de las deficiencias que se presentan en el vegetal son:

1. Alargamiento del periodo de descanso.
2. Floración irregular y raquítica.
3. Inhibición de yemas florales y vegetativas.
4. Falta de ramificación.
5. Polinización y fecundación deficientes.
6. Producción extemporánea de frutos, de mala calidad, con falta de maduración y de reducido tamaño.
7. Muerte prematura del árbol.

Como se ha visto, el frío es de vital importancia en el desarrollo de ciertas especies de cultivo. El paso siguiente es conocer cuáles son estas necesidades y como es posible determinarlas en la práctica.

Los umbrales térmicos bajo los cuales comienza a existir un efecto vernalizante (o de inducción al reposo) son muy variables. Estos están determinados por la especie, la variedad y las

I. Introduccion.

condiciones climatológicas particulares a cada año. Sin embargo, convencionalmente se ha establecido que este umbral tome valores de 0°C a 5°C para cereales de invierno y de 6°C a 7°C para frutales caducifolios (Swets y Zeitlinger, 1975).

Para dar una idea de la variabilidad de las necesidades de frío mencionamos a Crossa Raynaud (citado por Rojas y Rovalo, 1985), quien dice que en Túnez, los drupáceos (v.gr. durazno, melocotón, ciruelo, etc.) necesitan únicamente 400 horas de temperaturas por debajo de 7.2°C, en cambio en los Estados Unidos de América requieren de más de 1000 horas bajo este nivel térmico.

Esta variabilidad puede ser atribuida a las condiciones del medio físico, principalmente climáticas. Este hecho determina que las tablas que contienen las necesidades de frío invernal para ciertas especies y variedades de frutales y cereales, deban ser tomadas con reserva, pues si bien representan las necesidades medias halladas experimentalmente y en el campo, pueden diferir considerablemente de las reales para una cierta localidad cuyas condiciones ambientales sean completamente diferentes a aquellas para las cuales se elaboraron las tablas. Esto sucede frecuentemente, porque tales tablas están diseñadas para otras latitudes, concretamente para latitudes templadas.

Pese a esta dificultad de determinar con exactitud las necesidades de frío propias de cada vegetal, debe existir un marco de referencia que permita cuantificar al frío y de ahí partir para hacer las correcciones o ajustes que se requieran. Para esto se creó el concepto de horas frío.

I. Introducción.

Una hora frío se define como una hora de tiempo transcurrido bajo una temperatura menor o igual a 7.2°C (Torres, 1983). Con fines prácticos se toma el valor de 7°C en lugar de 7.2°C .

Este índice nos da una idea aproximada de la cantidad de frío que se puede acumular en un cierto periodo de tiempo.

El conocimiento de la cantidad de horas frío disponibles en una cierta localidad o región nos es útil de dos maneras:

a. Para saber si un determinado cultivo existente está bien localizado en lo que respecta a sus necesidades de frío. Sobre todo es importante observar si hay carencia de frío, en cuyo caso se puede recurrir a control hormonal para solventar esta carencia.

b. Para determinar que cultivos es posible introducir en una región que se va a abrir a la agricultura. En un sentido más amplio esto significa realizar un proceso de regionalización agrícola en base a las necesidades de frío de los cultivos y a la existencia de determinados valores de frío en el espacio geográfico.

II. LOS METODOS DE CUANTIFICACION DE HORAS FRIO.

Una vez que se ha reconocido la importancia de la ocurrencia del frío invernal para las plantas, es necesario conocer cuánto está disponible en una cierta región. Para ello existen diversos procedimientos, siendo el más usual aquel en el que se cuentan las horas de frío sobre la gráfica de un termógrafo, este método es llamado directo, en contraposición a aquellos denominados indirectos, en los cuales la cantidad de horas frío es estimada por medio de algún parámetro térmico que muestre una relación adecuada con la ocurrencia de horas frío.

De los métodos existentes, el Método Directo, por su exactitud, es el más recomendable siempre y cuando existan termógrafos debidamente calibrados y su funcionamiento sea correcto, tanto en lo mecánico como en la operación del instrumento por parte del encargado. Sin embargo la mayoría de las veces no se dispone de estas condiciones, y es entonces que se recurre a los métodos indirectos, que, aunque no tienen la precisión del directo, proporcionan una estimación que puede ser de bastante utilidad si se selecciona el correcto y se aplica adecuadamente.

Entre los métodos indirectos más conocidos están: Da Mota, Sharpe, Weinberger y Crossa-Raynaud. De éstos, los tres primeros requieren datos mensuales y por ello son más usados que el de Crossa-Raynaud, el cual utiliza datos diarios. En cuanto a su precisión, Muñoz Santamaría (1969), Calderón (1977), Romo (1982), Reyna (1981,1983) y Ortiz (1984), coinciden en afirmar que los métodos de Da Mota y Weinberger son los más aproximados, en particular éste último, y además agregan que si se promedian los

II. Los Métodos de Cuantificación de horas frío.

resultados de ambos métodos se obtiene un indicador más exacto.

Respecto a la forma de obtención de estos métodos, Da Mota, Sharpe y Weinberger fueron obtenidos por el método de regresión lineal, tomando como variable independiente a la temperatura media mensual de los meses que abarca el período invernal y como variable dependiente a la ocurrencia de horas frío para esos mismos meses. En cuanto al método de Crossa-Rauynaud, está basado en relaciones entre las temperaturas máxima y mínima diarias, y el valor de 7°C , o sea, la temperatura umbral que se considera para la ocurrencia de horas frío.

En las páginas siguientes se hace una descripción de los métodos mencionados, indicando el procedimiento y/o fórmula de cálculo, y además se hacen algunas sugerencias y mejoras para su aplicación.

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frio.

II.1. El Método Directo.

Consiste en el procedimiento manual de contar el número de horas frío, a partir de las gráficas registradas por un termógrafo.

Las gráficas del termógrafo pueden ser diarias o semanales, obteniéndose mayor exactitud con las primeras, si bien, en las segundas también está registrada la temperatura para cada día de la semana.

Las horas frío se cuentan para cada día, sumándose para cada mes para posteriormente sumar estos resultados mensuales y obtener el total de horas frío acumuladas en el periodo invernal correspondiente.

Existen tres maneras diferentes de contar las horas frío sobre un termograma, mismas que he denominado tradicional, aritmética y gráfica, y que a continuación se describen en orden de menor a mayor en relación a su eficiencia:

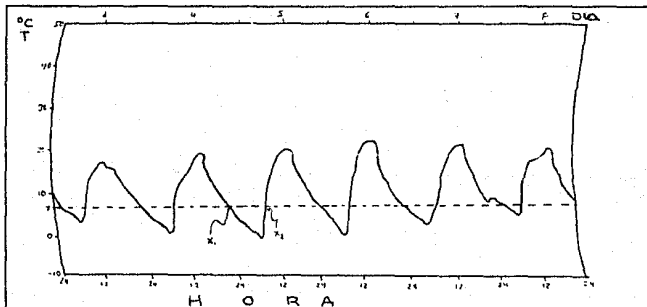


Fig. 2.1. Gráfica semanal del termógrafo. Los puntos X1 y X2 corresponden a los momentos de descenso y ascenso de la temperatura por debajo y por encima de los 7°C.

1. Procedimiento tradicional. En el termograma se traza una

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frío.

línea horizontal sobre la ordenada de los 7°C y se procede a contar las horas y fracciones de hora (si es posible) que quedan comprendidas entre el momento en que la temperatura desciende por debajo de los 7°C y el momento en que asciende por encima de este valor: puntos X₁ y X₂ en la Fig.2.1.

2. Procedimiento aritmético. Se encuentran los valores de las abscisas para los puntos X₁ y X₂ (Fig.2.1.) y se restan:

$$\text{horas frío} = X_2 - X_1$$

3. Procedimiento gráfico. Previamente al conteo se construye una regla o escala, cuyas unidades serán de la misma magnitud que las unidades del eje de las equis en las gráficas del termógrafo. Esta regla se coloca de tal manera que el cero coincida con el punto X₁, y luego se ve sobre qué valor de la regla cae el punto X₂, obteniendo de esta manera y en forma inmediata la cantidad de horas frío para un determinado día. La longitud de la regla deberá ser de 24 unidades (c/u correspondiendo a una hora), y si la escala lo permite deberán incluirse los medios y cuartos de unidad.

Teóricamente el Método Directo se supone el más exacto y recomendable para calcular las horas frío, sin embargo, existen varios factores que pueden disminuir su eficacia:

- carencia de termógrafos
- la exactitud del método varía según se utilice un termógrafo semanal o uno diario,
- mal funcionamiento mecánico del instrumento,
- mala calibración del instrumento,
- incorrecta operación por parte del encargado,

II. Los Metodos de Cuantificación de horas frío.

-discontinuidad en la serie de registros (falta de algunos días).

Al respecto Smith (1975) apunta que:

"... los registros autográficos... deben ser usados con mucha precaución, particularmente en lo que respecta a los valores extremos.... También pueden dar resultados erróneos cuando se quiere conocer el tiempo ocurrido por arriba o por debajo de cierta temperatura umbral."

Munoz Santamaría (1969) y Calderon (1983) agregan que el dato proporcionado por el método directo debe utilizarse con reserva, porque no toma en cuenta condiciones que contrarrestan el efecto del frío ocurrido. Esta aseveración es parcialmente válida, pues si bien es cierto que no da idea de la efectividad del frío (que por otra parte ningún método lo hace), también es cierto que no fué ideado para tal estimación, sino para contar cuanto tiempo permanece la temperatura por debajo de un cierto valor. Por tanto no es un defecto del método sino una incorrecta aplicación de quienes lo utilizan con tal fin.

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frio.

II.2. El Método de Da Mota.

Este método está basado en la correlación que existe entre la temperatura media mensual y la cantidad de horas frío acumuladas en los meses de Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero.

Para el cálculo se utilizan las temperaturas medias mensuales de los meses citados. La fórmula es la siguiente:

$$H.F. = 485.1 - 28.52TM$$

donde:

TM = temperatura media mensual en °C.

Esta fórmula fué obtenida por regresión lineal, en la cual se consideró a las horas frío como función de la temperatura media mensual. La fórmula equivale a la ecuación de la recta en su forma punto-pendiente: $Y = mX + b$, de manera que:

$Y = H.F.$ (horas frío a calcular)

$m = -28.52$ (pendiente de la recta)

$X = TM$ (temperatura media mensual)

$b = 485.1$ (ordenada en el origen, es decir, cantidad de horas frío cuando la temperatura media mensual es 0°C.

La fórmula calcula la cantidad de horas frío ocurridas en un solo mes, como Da Mota considera que se deben tomar los cuatro meses arriba mencionados, entonces se procede a calcular las horas frío para cada mes y luego se suman los resultados, obteniendo así la cantidad de horas frío acaecidas durante el período otoño-invierno. Por ejemplo:

si tenemos las siguientes temperaturas medias mensuales:

Noviembre..... 14.8 °C

Diciembre..... 14.0 °C

Enero..... 13.8 °C

II. Los Metodos de Cuantificación de horas frío.

Febrero..... 15,3 °C

aplicamos la fórmula:

$$\text{H.F. Noviembre} = 485.1 - 28.52 \times 14.8 = 63.00$$

$$\text{H.F. Diciembre} = 485.1 - 28.52 \times 14.0 = 85.82$$

$$\text{H.F. Enero} = 485.1 - 28.52 \times 13.8 = 91.52$$

$$\text{H.F. Febrero} = 485.1 - 28.52 \times 15.3 = 48.74$$

Sumando los cuatro resultados tenemos 289.08 que es el total de horas frío acumuladas en los cuatro meses. El proceso anterior implica 9 operaciones aritméticas y es equivalente a:

$$\text{H.F.} = \sum_{i=\text{nov}}^{\text{feb}} 485.1 - 28.52 \times \text{TM}_i$$

donde:

i = mes (desde noviembre a febrero)

TM = temperatura media mensual

Cuando nos interesa encontrar el número de horas frío acumuladas en los cuatro meses, más que el de cada mes, podemos utilizar un proceso más rápido y simple que el anterior:

sumamos las cuatro temperaturas medias mensuales:

$$\text{SUMA} = 14.8 + 14.0 + 13.8 + 15.3 = 57.9$$

y aplicamos la siguiente fórmula:

$$\text{H.F.} = 1940.4 - 28.52 \times \text{SUMA}$$

substituyendo:

$$\text{H.F.} = 1940.4 - 28.52 \times 57.9$$

$$\text{H.F.} = 1940.4 - 1651.3$$

$$\text{H.F.} = 289.1$$

Este resultado es el mismo (los decimales no son significativos) que el calculado anteriormente, con la ventaja de que sólo realizamos 5 operaciones aritméticas en vez de 9. Es claro que si

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frio.

deseamos conocer las horas frio de cada mes, debemos aplicar la fórmula original. En la fórmula condensada que hemos propuesto arriba, el valor 1940.4 corresponde a la multiplicación de la ordenada al origen por el número de meses, es decir, 485.1×4 .

El Método de Da Mota tiene dos restricciones para su correcta aplicación:

a. La temperatura media mensual de cualquier mes debe ser menor a 17°C .

b. La temperatura media mínima mensual de cualquier mes debe ser inferior a 7°C .

Lo anterior significa que si en algún mes, la temperatura media mensual es superior a 17°C y/o la temperatura media mínima mensual es superior a 7°C , entonces se supone que en ese mes no existen horas frío.

Estas restricciones están derivadas de la información que manejó Da Mota para obtener su fórmula.

La primera restricción la podemos encontrar en la fórmula misma, buscando a qué temperatura media mensual ya no hay horas frío (0 horas frío):

$$\text{H.F.} = 485.1 - 28.52 \times \text{TM}$$

donde: H.F. = 0.0 y TM es la incógnita

despejando TM:

$$0.0 = 485.1 - 28.52 \times \text{TM}$$

$$28.52 \times \text{TM} = 485.1 - 0.0$$

$$\text{TM} = \frac{485.1 - 0.0}{28.52} = \frac{485.1}{28.52}$$

TM = 17.0019°C , que es el valor buscado.

La segunda restricción está basada en la suposición de que

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frío.

cuando la temperatura media mínima mensual es mayor a 7°C no hay suficiente cantidad de horas frío, o bien que no hubo "frío". Lo cual no siempre es cierto, al menos para nuestro país.

II. Los Métodos de Cuantificación de horas frío.

II.3. El Método de Sharpe.

Como el anterior, éste también funciona en base a la relación entre las horas frío observadas y las temperaturas medias mensuales correspondientes.

Difiere del de Da Mota en dos aspectos principales:

1. Utiliza una tabla en vez de una fórmula.
2. La relación no es lineal.

Como en el caso de Da Mota, Sharpe manejó información local, lo cual, constituye un inconveniente grave cuando el método se aplica en otras localidades.

La tabla que utiliza el método es la siguiente:

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL EN °C	HORAS FRÍO ACUMULADAS EN EL MES
7.8	395
8.9	353
10.0	311
11.1	270
12.2	230
13.3	190
14.4	152
15.6	115
16.7	79
17.8	47
18.9	23
20.0	0

TABLA II.1. Valores usados en el Método de Sharpe.

En esta tabla se observan dos aspectos interesantes. Primero, las temperaturas medias mensuales están igualmente espaciadas, con intervalos de 1.1°C, pero existe una discontinuidad a partir del octavo valor, pues en vez de continuar con 15.5, 16.6, 17.7, 18.8, y 19.9, se dan los valores que se observan en la tabla, esta discontinuidad en realidad no afecta en gran manera al método, pues su único fin es forzar a que con 20°C de temperatura media

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frio.

mensual ocurran 0 horas frio, es decir, no haya horas frio. El segundo rasgo interesante es precisamente el hecho de que se fije la no ocurrencia de horas frio a los 20°C de temperatura media mensual, temperatura que difiere de la dada por Da Mota para la misma situación: 17°C, y como en éste, el valor de 20°C se deriva de los datos utilizados por Sharpe, es decir que para las localidades que manejó al formular su método, a partir de los 20°C de temperatura media mensual ya no existen horas frio.

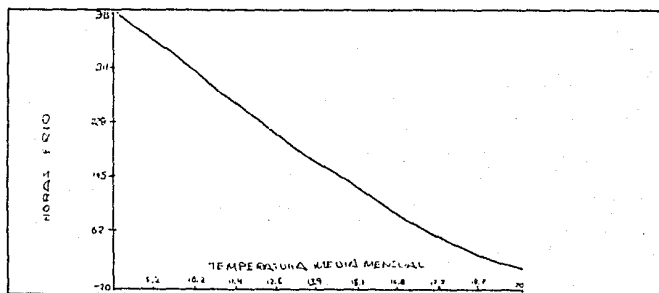


Fig 2.2. Gráfica que representa la relación entre la temperatura media mensual y la ocurrencia de horas frío según el Método de Sharpe.

La representación gráfica del Método de Sharpe basada en los valores de la tabla II.1 es la que se observa en la Fig.2.3. En virtud de que la curva se aproxima bastante a una recta, algunos autores, Reyna (1983) y Torres Ruiz (1983), han obtenido la ecuación lineal correspondiente:

$$H.F. = 639 - 33TM \quad (a)$$

donde:

H.F. = horas frío mensuales.

TM = temperatura media mensual

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frio.

Sin embargo si se va a utilizar una fórmula en lugar de la tabla, conviene entonces utilizar la fórmula de la curva que a continuación se propone, pues es mucho más precisa que la de la recta:

$$H.F. = 613.02472 - 1.87018TM - 6.31733TM^2 + 0.52585TM^3 - 0.02137TM^4 + 0.00036TM^5 \quad (b)$$

donde:

H.F. = horas frío

TM = temperatura media mensual

Las constantes numéricas son los coeficientes de regresión.

En la Tabla II.2. se comparan los resultados obtenidos de las fórmulas a y b con los valores originales de la Tabla II.1, correspondientes al Método de Sharpe.

HORAS FRIO SHARPE	HORAS FRIO FORMULA a	HORAS FRIO FORMULA b
395	381.4	395.0
353	345.1	352.9
311	308.8	311.1
270	272.5	269.9
230	236.2	229.6
190	199.9	190.5
152	163.6	152.6
115	124.0	113.2
79	87.7	79.4
47	51.4	48.5
23	15.1	21.6
0	-21.2	0.3

TABLA II.2. Comparación de resultados entre las dos fórmulas ajustadas al Método de Sharpe y los valores originales de éste.

En esta tabla se observa que la fórmula propuesta (b) es la más adecuada para obtener resultados precisos de acuerdo al método, Sin embargo su utilización sólo resulta recomendable cuando se tiene con una calculadora programable o una computadora.

La forma de cálculo del método original, consiste en

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frio.

encontrar, en la Tabla II.1, los valores de horas frio correspondientes a las temperaturas medias mensuales de los meses en cuestión. El problema que presenta esta forma de cálculo es que cuando tenemos una temperatura que no coincide exactamente con ninguna de las dadas en la tabla, es necesario interpolar para encontrar el valor correcto. Esto se evita cuando se utiliza cualquiera de las dos fórmulas citadas (a ó b).

Ejemplo (con la fórmula a):

si tenemos las siguientes temperaturas medias mensuales:

Noviembre..... 14.8

Diciembre..... 14.0

Enero..... 13.8

Febrero..... 15.3

aplicamos la fórmula:

$$\text{H.F. Noviembre} = 639 - 33 \times 14.8 = 150.6$$

$$\text{H.F. Diciembre} = 639 - 33 \times 14.0 = 177.0$$

$$\text{H.F. Enero} = 639 - 33 \times 13.8 = 183.6$$

$$\text{H.F. Febrero} = 639 - 33 \times 15.3 = \underline{134.1}$$

$$\text{Total} = 645.3$$

Para este ejemplo hemos utilizado los mismos datos que para el Método de Da Mota, y la suma de los cuatro resultados mensuales totaliza 645.3 horas frio, resultado que, si se compara con el arrojado por Da Mota, 289.08 horas frio, resulta bastante dispar.

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frio.

II.4. El Metodo de Weinberger.

También esta basado en la correlación observada entre el número de horas frío y las temperaturas medias mensuales, pero a diferencia de los métodos de Da Mota y Sharpe, utiliza solamente las de los meses de Diciembre y Enero.

De Acuerdo con esta correlación, Weinberger ajustó una curva con la información que utilizó para generar su método. Esta curva se muestra en la Fig. 2.3.

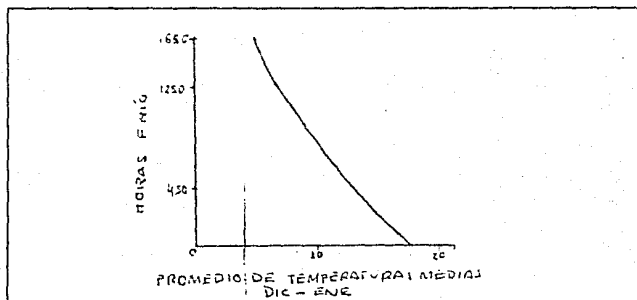


Fig. 2.3. Gráfica que representa la curva del Método de Weinberger.

Nuevamente tenemos el caso de que este método está limitado por el hecho de que se manejó información local para obtenerlo, además de que sólo considera como efectivo al frío acumulado en los meses de Diciembre y Enero (lo cual puede ser cierto para las latitudes más altas a las de nuestro país, pero no para las del nuestro).

El método tampoco considera la existencia de bajas acumulaciones de frío, lo cual es frecuente en nuestro país, pues está diseñado para proporcionar valores en el rango de 450 a 1250 horas frío, dicho de otra manera, sólo pueden calcularse horas

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frio.

frio para temperaturas medias mensuales que estén entre 6.9°C y 13.2°C. Por esto, Muñoz (1969), mediante extrapolación elaboró una tabla (Tabla II.3) en la que están indicados los valores de horas frio por encima de 1250 y por debajo de 450, con sus correspondientes temperaturas medias.

HORAS FRIO ACUMULADAS	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL	HORAS FRIO ACUMULADAS	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL
0	17.6°C	850	9.8
50	17.1	900	9.4
100	16.6	950	9.0
150	16.1	1000	8.6
200	15.6	1050	8.3
250	15.1	1100	7.9
300	14.6	1150	7.6
350	14.1	1200	7.2
400	13.6	1250	6.9
450	13.2	1300	6.6
500	12.8	1350	6.3
550	12.3	1400	6.0
600	11.8	1450	5.7
650	11.4	1500	5.4
700	11.0	1550	5.1
750	10.6	1600	4.8
800	10.2	1650	4.6

TABLA II.3. Valores obtenidos mediante interpolación y extrapolación por Muñoz (1969), en base al Método de Weinberger.

En la Tabla II.3 se observa que según el método, a una temperatura media mensual de 17.6°C ya no existen horas frio, este valor es muy similar al manejado por Da Mota para la misma situación: 17.0019°C.

Para encontrar el número de horas frio que ocurren en los meses de Diciembre y Enero dadas sus temperaturas medias mensuales basta referir dichas temperaturas a la Tabla II.3 y encontrar el valor respectivo de horas frio. Si una o ambas temperaturas no se encuentran en la tabla, es necesario interpolar para encontrar el valor de horas frio correspondiente.

Ejemplo (utilizando las mismas temperaturas que para Da Mota

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frio.

y Sharpe):

Diciembre..... 14.0

Enero..... 13.8

Como estas temperaturas no se encuentran en la Tabla II.3, procedemos a interpolar. Observando la tabla referida, notamos que a partir de los 13.6°C, a cada grado centigrado de aumento en la temperatura media mensual corresponde una disminuci3n de 100 horas frio. Por lo tanto:

$$\text{H.F. Diciembre} = 400 - ((14.0 - 13.6) \times 100) = 360$$

$$\text{H.F. Enero} = 400 - ((13.8 - 13.6) \times 100) = 380$$

$$\text{Total} = \underline{740}$$

Este resultado difiere notoriamente de los obtenidos con Sharpe (645.3) y Da Mota (289.08).

II. Los Métodos de Cuantificación de horas frío.

II.5. El Método de Crossa-Raynaud.

Utiliza relaciones entre las temperaturas mínima y máxima diarias y la temperatura umbral: 7°C.

La relación, expresada en la siguiente fórmula, es un tanto empírica, si bien, no carece de cierta lógica:

$$H.F. = \frac{7-m}{M-m} \times 24$$

donde:

H.F. = horas frío

M = temperatura máxima diaria

m = temperatura mínima diaria

24 = horas del día

7 = límite umbral de las horas frío (en °C)

Aunque no fué posible obtener la referencia en la que el autor describe su método, se logró llegar al fundamento teórico del cual se obtuvo la fórmula.

Supóngase una relación de las temperaturas mínima y máxima diarias como la mostrada en la Fig.2.4.

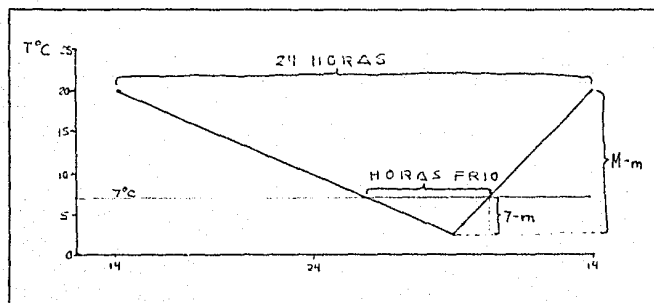


Fig.2.4. Relación sobre la que se basa el Método de Crossa-Raynaud

II. Los Metodos de Cuantificacion de horas frio.

De acuerdo con la gráfica:

$$a = 7-m \quad \text{y} \quad b = M-m$$

estas expresiones corresponden respectivamente al numerador y al denominador de la división que se halla en la fórmula original.

Partiendo de esta gráfica, se establece la siguiente igualdad:

$$\frac{b}{a} = \frac{24}{\text{H.F.}} \quad \Delta \quad \text{H.F.} = \frac{24a}{b} \quad \Delta \quad \text{H.F.} = \frac{24(7-m)}{M-m}$$

fórmula que es equivalente a la original.

III. El Metodo Gomez-Morales para el calculo de horas frio.

III. EL METODO GOMEZ-MORALES PARA EL CALCULO DE HORAS FRIO.

Este método presenta una opción más exacta y confiable que el resto de los métodos indirectos para el cálculo de horas frío. Este es el resultado del trabajo conjunto con el Dr. Juan Carlos Gómez Rojas, de quién es la idea original. Pero es necesario mencionar que el desarrollo del método pertenece casi exclusivamente al autor de esta tesis.

A continuación se expone brevemente una relación del surgimiento de este método, para posteriormente explicar sus fundamentos teóricos y hacer algunas observaciones sobre la aplicación del mismo.

Hacia fines de 1983, el Dr. Gómez se encontraba realizando un estudio comparativo de los diversos métodos indirectos para el cálculo de horas frío. El objetivo era determinar cual de ellos era el más preciso. Para ello tenía como punto de comparación a las mediciones de horas frío obtenidas de las gráficas del termógrafo del Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía de la UNAM, localizada en la Cd. Universitaria. Estas mediciones fueron recabadas para cada día de los meses de Octubre, Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero y Marzo del período 1961-1983.

Como producto de esta labor continua sobre las gráficas del termógrafo, surgió la idea de representar la marcha diaria de la temperatura utilizando tres datos diarios: temperatura mínima, temperatura ambiente (8:00 am) y temperatura máxima (en realidad se necesitan cuatro valores, puesto que para trazar el descenso nocturno de la temperatura del día anterior al día siguiente se necesita también la temperatura máxima del día anterior). Fig.3.1.

III. El Método Gomez-Morales para el calculo de horas frío.

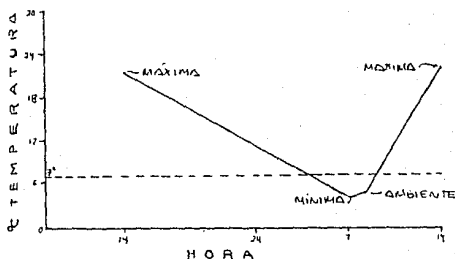


Fig 3.1.

Para obtener las horas frío correspondientes a un día en particular basta con trazar la línea de 7°C sobre la gráfica y contar las horas frío de la misma manera que con una gráfica del termógrafo según el Método Directo. De este modo, en las estaciones meteorológicas que no cuentan con un termógrafo se podrían calcular las horas frío diarias con bastante aproximación, ya que en la mayoría de las estaciones meteorológicas del país se registran diariamente al menos los tres valores de temperaturas citados.

Con esta idea en mente, el Dr. Gómez se impuso la tarea de elaborar gráficas diarias con el fin de determinar si este procedimiento, al que denominó "semidirecto", era más preciso que los llamados indirectos, los cuales habían demostrado tener poca confiabilidad, por dar valores muy dispares, tanto entre sí como respecto al Método Directo (termógrafo). En principio el método

III. El Método Gomez-Morales para el cálculo de horas frío.

semidirecto arrojó resultados más cercanos al Método Directo que los métodos indirectos.

Sin embargo, el trabajo de construir gráficas diarias, además de ser tedioso y estar sujeto a error, requiere de mucho tiempo para realizarlo, por lo cual se pensó en la utilización de una computadora para elaborarlas. Aún así, el valor de horas frío sigue resultando impreciso, surgiendo la necesidad de formalizarlo y darle toda la precisión posible mediante el uso del lenguaje matemático. Por esta razón y tomando como base el método "semidirecto", se desarrolló el Método Gómez-Morales. Este es un método diario, para cuya aplicación se recomienda el uso de una computadora o al menos una calculadora programable, en virtud de la cantidad de información que es preciso manejar.

III.1. Fundamento Teórico.

Sea un sistema cartesiano cuyo eje de ordenadas señala temperaturas en °C y el de las abscisas, las horas del día, el origen de este plano cartesiano se encuentra en (0h,0°C). En este plano se han localizado los puntos B,C, y D, los cuales representan a la temperatura mínima, la temperatura ambiente y la temperatura máxima de un día (los valores son hipotéticos). Estos puntos han sido unidos con líneas, con lo cual se han obtenido las rectas \overline{BC} y \overline{CD} . Supóngase también una tercera recta, \overline{EF} , la cual representa la temperatura límite para la ocurrencia de horas frío (7°C convencionalmente). Como se observa en la Fig.3.2., la recta \overline{EF} intersecta a la recta \overline{BC} en el punto indicado como I_2 , en el cual la temperatura comienza a ascender por encima de los 7°C. Este es uno de los puntos usados por el método para calcular el valor de horas frío. Sin embargo, se necesita un segundo punto, denominado I_1 , el cual señala el momento en el que la temperatura desciende por debajo de los 7°C. Este punto está indicado en la Fig.3.2. por la intersección de las rectas \overline{AB} y \overline{EF} .

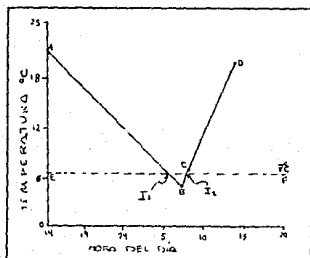


Fig.3.2. Primer caso para la ocurrencia del punto I_2 .

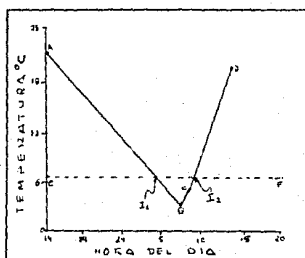


Fig.3.3. Segundo caso para la ocurrencia del punto I_2 .

III. El Método Gomez-Morales para el cálculo de horas frío.

El punto I_2 , en el caso de la Fig.3.2., está definido por la intersección de las rectas \overline{BC} y \overline{EF} . Sin embargo existe un segundo caso para la definición de este punto, el cual ha sido ilustrado en la Fig.3.3. En este caso, el punto I_2 está determinado por la intersección de las rectas \overline{CD} y \overline{EF} , debido a que la temperatura ambiente (ordenada del punto C) tiene un valor menor a 7°C (también puede ser igual a 7°C).

Como en el Método Directo, lo que interesa conocer de los puntos I_1 e I_2 , es el valor de su abscisa, ya que restando el primero del segundo obtendremos la cantidad de horas frío. Para efectos prácticos del método se han tomado como fijos los valores de las abscisas de los puntos A, B, C y D. Tales valores son:

Para el punto A: -10. Este valor en realidad corresponde a las 14 hrs del día anterior, pero como se está usando un sistema cartesiano, posee un valor negativo en las abscisas. El valor de 14 hrs para la ocurrencia de la temperatura máxima se ha tomado porque, en promedio, esta ocurre a tal hora en nuestras latitudes.

Para el punto B: 7. Este valor señala la ocurrencia promedio de la temperatura mínima en nuestras latitudes, en la estación invernal.

Para el punto C: 8. Esta es la hora en que se toma una lectura del termómetro de ambiente en la mayoría de las estaciones meteorológicas del país.

Para el punto D: 14. Por las razones explicadas para el punto A.

Así pues contamos con varios elementos conocidos para calcular las abscisas de los puntos I_1 e I_2 , podemos proceder

entonces a hacer el planteamiento matemático necesario.

Definamos primero los elementos conocidos y las incógnitas:

Elementos conocidos:

Coordenadas del punto A: X_a, Y_a

Coordenadas del punto B: X_b, Y_b

Coordenadas del punto C: X_c, Y_c

Coordenadas del punto D: X_d, Y_d

Ordenada del punto I_1 : 7

Ordenada del punto I_2 : 7

Incógnitas:

Abscisa del punto I_1 : X'

Abscisa del punto I_2 : X''

Tomemos como base de nuestro planteamiento a la fórmula de la recta apoyada en dos puntos:

$$Y - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1) \quad (1)$$

donde X y Y corresponden a las coordenadas del punto de intersección buscado.

Como conocemos Y ($Y=7$ para ambos puntos de intersección), despejamos X:

si hacemos que:

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

entonces partiendo de la fórmula (1):

$$\begin{aligned} Y - Y_1 &= m (X - X_1) \\ Y - Y_1 &= mX - mX_1 \\ mX - mX_1 &= Y - Y_1 \\ mX &= Y - Y_1 + mX_1 \\ X &= \frac{Y - Y_1 + mX_1}{m} \end{aligned} \quad (2)$$

III. El Metodo Gomez-Morales para el calculo de horas frio.

Para encontrar la abscisa X' del primer punto de intersección I_1 , sustituimos en (2):

$$X' = \frac{7 - Y_a + m\overline{AB}X_a}{m\overline{AB}} \quad (3)$$

De la misma manera procedemos para el punto de intersección I_2 , tomando en cuenta que existen dos casos de ocurrencia de este punto.

para el caso de la Fig.3.2., es decir cuando la temperatura ambiente es $> 7^\circ\text{C}$:

$$X'' = \frac{7 - Y_b + m\overline{BC}X_b}{m\overline{BC}} \quad (4)$$

para el caso de la Fig.3.3., es decir cuando la temperatura ambiente es $\leq 7^\circ\text{C}$:

$$X'' = \frac{7 - Y_c + m\overline{CD}X_c}{m\overline{CD}} \quad (5)$$

Como sabemos que las horas frío se obtienen por la diferencia entre las abscisas de ambos puntos de intersección:

$$H.F. = X'' - X$$

entonces resultan dos fórmulas, para los dos casos de X'' :

si la temperatura ambiente $> 7^\circ\text{C}$:

$$H.F. = \frac{7 - Y_b + m\overline{BC}X_b}{m\overline{BC}} - \frac{7 - Y_a + m\overline{AB}X_a}{m\overline{AB}} \quad (6)$$

si la temperatura ambiente $\leq 7^\circ\text{C}$:

$$H.F. = \frac{7 - Y_c + m\overline{CD}X_c}{m\overline{CD}} - \frac{7 - Y_a + m\overline{AB}X_a}{m\overline{AB}} \quad (7)$$

Conocemos las coordenadas de los puntos A, B, C y D:

$$X_a = -10, \quad Y_a = TMA \text{ (Temperatura Máxima del día Anterior)}$$

$$X_b = 7, \quad Y_b = Tm \text{ (Temperatura mínima)}$$

$$X_c = 8, \quad Y_c = Ta \text{ (Temperatura ambiente)}$$

III. El Metodo Gomez-Norales para el calculo de horas frio.

$$X_d = 14, \quad Y_d = T_M \text{ (Temperatura Máxima)}$$

Substituyendo estos valores en las fórmulas (6) y (7)

obtenemos:

si $T_a > 7^\circ\text{C}$:

$$H.F. = \frac{7 - T_m + 7\overline{mBC}}{\overline{mBC}} - \frac{7 - TMA + -10\overline{mAB}}{\overline{mAB}} \quad (8)$$

si $T_a \leq 7^\circ\text{C}$:

$$H.F. = \frac{7 - T_a + 8\overline{mCD}}{\overline{mCD}} - \frac{7 - TMA + -10\overline{mAB}}{\overline{mAB}} \quad (9)$$

Sabemos también que:

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$\overline{mAB} = \frac{Y_b - Y_a}{X_b - X_a} = \frac{T_m - TMA}{7 + 10} = \frac{T_m - TMA}{17}$$

$$\overline{mBC} = \frac{Y_c - Y_b}{X_c - X_b} = \frac{T_a - T_m}{8 - 7} = \frac{T_a - T_m}{1} = T_a - T_m$$

$$\overline{mCD} = \frac{Y_d - Y_c}{X_d - X_c} = \frac{T_M - T_a}{14 - 8} = \frac{T_M - T_a}{6}$$

Substituyendo \overline{mAB} y \overline{mBC} en la ecuación (8), obtenemos:

si $T_a > 7^\circ\text{C}$:

$$H.F. = \frac{7 - T_m + 7(T_a - T_m)}{T_a - T_m} - \frac{7 - TMA - 10((T_m - TMA)/17)}{(T_m - TMA)/17} \quad (10)$$

simplificando el primer término de la ecuación (10):

$$\frac{7 - T_m + 7(T_a - T_m)}{T_a - T_m} = \frac{7 - T_m + 7T_a - 7T_m}{T_a - T_m} = \frac{7T_a - 8T_m + 7}{T_a - T_m} \quad (10.1)$$

cambiando de signo al segundo término de la ecuación (10):

$$\frac{7 - TMA - 10((T_m - TMA)/17)}{(T_m - TMA)/17} = \frac{-7 + TMA + 10((T_m - TMA)/17)}{(TMA - T_m)/17}$$

III. El Metodo Gomez-Morales para el calculo de horas frio.

simplificando este mismo término:

$$\frac{-7}{1} + \frac{TMA}{1} + \frac{10Tm - 10TMA}{17} = \frac{-119 + 17TMA + 10Tm - 10TMA}{17}$$

$$\frac{TMA - Tm}{17} = \frac{TMA - Tm}{17}$$

eliminando divisores:

$$= \frac{10Tm + 7TMA - 119}{TMA - Tm} \quad (10.2)$$

reemplazando los dos términos de la ecuación (10) por (10.1)

y (10.2):

$$H.F. = \frac{7Ta - 8Tm + 7}{Ta - Tm} - \frac{10Tm + 7TMA - 119}{TMA - Tm} \quad (11)$$

Simplificando el primer término:

$$Ta - Tm \left[\frac{7}{7Ta - 8Tm + 7} - \frac{7 - Tm}{-7Ta - 7Tm - Tm + 7} \right] = 7 + \frac{7 - Tm}{Ta - Tm} \quad (11.1)$$

simplificando el segundo término:

$$TMA - Tm \left[\frac{7}{7TMA + 10Tm - 119} - \frac{17Tm - 119}{-7TMA + 7Tm + 17Tm - 119} \right] = 7 + \frac{17Tm - 119}{TMA - Tm} \quad (11.2)$$

por lo tanto:

$$H.F. = 7 + \frac{7 - Tm}{Ta - Tm} - \left(7 + \frac{17Tm - 119}{TMA - Tm} \right)$$

$$H.F. = 7 + \frac{7 - Tm}{Ta - Tm} - 7 - \frac{17Tm - 119}{TMA - Tm}$$

$$H.F. = \frac{7 - Tm}{Ta - Tm} - \frac{17Tm - 119}{TMA - Tm} \quad (12)$$

Substituyendo \overline{mAB} y \overline{mCD} en la ecuación (9), obtenemos:

III. El Metodo Gomez-Morales para el calculo de horas frio.

si $T_a \leq 7^\circ\text{C}$:

$$H.F. = \frac{7 - T_a + 8((T_a - T_m)/6)}{(T_m - T_a)/6} - \frac{7 - TMA - 10((T_m - TMA)/17)}{(T_m - TMA)/17} \quad (13)$$

simplificando el primer término de la ecuación (13):

$$\frac{7 - T_a}{1} + \frac{8TM - 8Ta}{6} = \frac{42 - 6Ta + 8TM - 8Ta}{6} = \frac{8TM - 14Ta + 42}{6}$$

$$\frac{TM - Ta}{6} = \frac{TM - Ta}{6} = \frac{TM - Ta}{6}$$

eliminando divisores:

$$= \frac{8TM - 14Ta + 42}{TM - Ta}$$

simplificando:

$$TM - Ta \left[\frac{8TM - 14Ta + 42}{-8TM + 8Ta - 6Ta + 42} \right] = 8 + \frac{42 - 6Ta}{TM - Ta} \quad (13.1)$$

En virtud de que el segundo término de las ecuaciones (8) y (9) son idénticos, podemos tomar la ecuación (11.2), que es resultado de la simplificación de dicho término y substituirlo, conjuntamente con la ecuación (13.1), en la ecuación siguiente:

$$H.F. = 8 + \frac{42 - 6Ta}{TM - Ta} - \left[7 + \frac{17Tm - 119}{TMA - Tm} \right]$$

$$H.F. = 8 + \frac{42 - 6Ta}{TM - Ta} - 7 - \frac{17Tm - 119}{TMA - Tm}$$

$$H.F. = 1 + \frac{42 - 6Ta}{TM - Ta} - \frac{17Tm - 119}{TMA - Tm} \quad (14)$$

De esta forma hemos llegado a las fórmulas finales del Método Gómez Morales, y que corresponden a las ecuaciones (12) y (14). Una para cada caso de T_a . Ver el cuadro 3.1.

III. El Método Gómez-Morales para el cálculo de horas frío.

METODO GOMEZ-MORALES PARA EL CALCULO DE HORAS FRIO

si $T_a > 7^{\circ}\text{C}$:

$$\text{H.F.} = \frac{7 - T_m}{T_a - T_m} - \frac{17T_m - 119}{TMA - T_m}$$

si $T_a \leq 7^{\circ}\text{C}$:

$$\text{H.F.} = 1 + \frac{42 - 6T_a}{TM - T_a} - \frac{17T_m - 119}{TMA - T_m}$$

donde:

T_a = Temperatura Ambiente

T_m = Temperatura Mínima

TM = Temperatura Máxima

TMA = Temperatura Máxima del día anterior.

Cuadro 3.1. Fórmulas del Método Gómez-Morales.

III. El Metodo Gomez-Morales para el calculo de horas frio.

III.2. Observaciones sobre la aplicacion del metodo.

El método está diseñado, por necesidad, para ser aplicado con la ayuda de una computadora, aunque puede hacerse manualmente. En el anexo I se dan dos ejemplos de su aplicación: el primero sobre su aplicación manual para el cálculo de las horas frío de un cierto día, y el segundo mediante un programa de computadora en lenguaje BASIC, para calcular las horas frío de todo un periodo invernal.

El método trata de reproducir el comportamiento diario de la temperatura. En la Fig.3.4 se ha representado una comparación entre una gráfica del termógrafo semanal del Observatorio Meteorológico de Cd. Universitaria y una gráfica construida con datos de las temperaturas mínima, ambiente y máxima correspondientes a los mismos días.

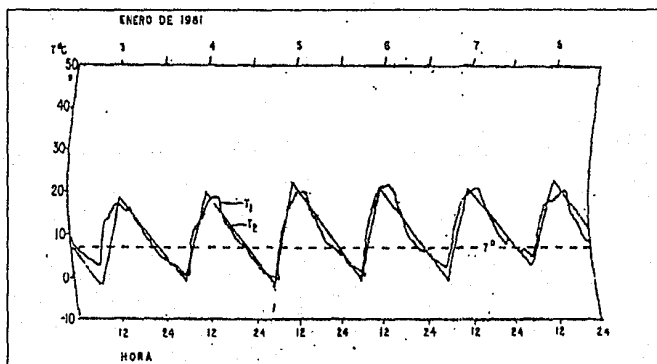


Fig.3.4. Comparación entre el comportamiento diario de la temperatura según una gráfica del termógrafo (T1), y el comportamiento diario de la temperatura según el método Gómez-Morales (T2).

III. El Método Gomez-Morales para el cálculo de horas frío.

Sobre esta figura podemos hacer algunos comentarios. Por ejemplo es fácilmente observable que el ajuste del método es, en general, bastante aproximado, aun cuando las temperaturas de ambos instrumentos (termómetro y termógrafo) no coinciden con exactitud, lo cual introduce un margen de error, que sin embargo, no resulta significativo. Otra observación es que dicho ajuste es menos preciso en las horas del mediodía y tarde, donde el comportamiento de la temperatura no sigue un patrón lineal, debido quizá a factores tales como la presencia de nubes o vientos, pero esto no constituye ningún inconveniente serio para el método, pues normalmente en nuestras latitudes, las horas frío ocurren en el transcurso de la noche y madrugada, donde la temperatura sigue un patrón más lineal.

Durante la etapa de prueba surgieron varias cuestiones tanto en la teoría como en la práctica; las tres más importantes fueron:

1. ¿Sería mejor la simulación del comportamiento de la temperatura si se utilizase un registro diario de temperatura a las 18:00 hrs, en lugar de las 14:00 hrs correspondientes a la ocurrencia de la temperatura máxima del día anterior?
2. En el método se ha establecido que las máximas ocurren a las 14:00 hrs y las mínimas a las 7:00 hrs, ¿si las máximas y las mínimas ocurrieran antes o después de las horas indicadas, en qué afectaría esto al método?
3. ¿Qué ocurre cuando en un día la temperatura máxima es $< a 7^{\circ}\text{C}$?

En la primera cuestión se recurrió a la observación de las gráficas del termógrafo, llegando a concluir que posiblemente podría existir una mejora en los resultados calculados por el

III. El Metodo Gomez-Morales para el calculo de horas frio.

método, sin embargo esta mejora sería infima, además de que este registro a las 18:00 hrs sería difícil de conseguir en la mayoría de las estaciones meteorológicas de nuestro país.

Para la segunda pregunta, se encontró que los resultados obtenidos al variar las horas de ocurrencia de máximas y mínimas difieren muy poco de los calculados con las horas usadas en el método. Se probó variando para las máximas a las 13:00, 15:00 y 16:00 hrs, y para las mínimas a las 5:00 y 6:00 hrs, y se encontró que las diferencias eran de poca significatividad. Sin embargo es pertinente aclarar que para otras latitudes, quizá sería necesario modificar las horas de ocurrencia promedio de mínimas y máximas, lo cual podría hacerse partiendo de las fórmulas (6) y (7), modificando los valores de X_a , X_b , X_c y X_d .

En cuanto a la última cuestión pueden ocurrir dos casos:

- que sólo exista un punto de intersección (Fig.3.5)
- que no existan puntos de intersección (Fig.3.6).

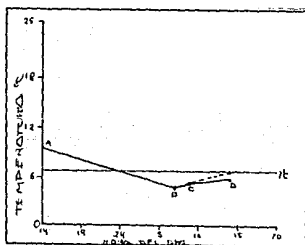


Fig.3.5. Representación gráfica de la situación que se presenta cuando existe sólo un punto de intersección. Con línea discontinua se señala lo que se hace de acuerdo con el método G-M.

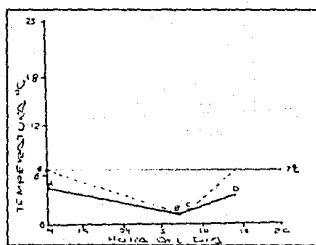


Fig.3.6. Representación gráfica de la situación que se presenta cuando no existe ninguno de los puntos de intersección. Con línea discontinua se ha indicado la solución según el método G-M.

III. El Metodo Gomez-Morales para el calculo de horas frio.

En ambos casos el método no podría calcular las horas frío, por ello es que se ha considerado que, para ambos casos, cuando una o las dos temperaturas máximas que utiliza el método (TMA, Tm) estén por debajo de los 7°C, se les asigne el valor de 7°C. De esta manera se proporcionan los puntos de intersección que necesita el método. Hay que decir que esta modificación no afecta al los resultados en lo más mínimo.

Además de la precisión en los resultados, el método tiene otra ventaja sobre los demás en lo que respecta al límite que ordinariamente se toma como umbral para medir horas frío. Este límite, como se ha mencionado anteriormente, se ha establecido en 7°C, sin embargo, se sabe ahora que no todos los vegetales comienzan a acumular el efecto de vernalización a esta temperatura, algunos lo hacen a temperaturas menores o mayores a ese valor.

Para lograr esta flexibilidad en cuanto a la selección de la temperatura umbral específica para cada especie (y aún para cada variedad), se modifica ligeramente al método de manera tal que permita cuantificar las horas frío bajo cualquier nivel térmico.

La modificación consiste en reemplazar, en las fórmulas finales del método (12) y (14), la temperatura umbral de 7°C por una variable K que representa la temperatura umbral deseada:

Para $T_a > K^\circ\text{C}$:

$$\text{H.F.} = \frac{K - T_m}{T_a - T_m} - \frac{17T_m - 17K}{TMA - T_m} \quad (12)$$

Para $T_a \leq K^\circ\text{C}$:

$$\text{H.F.} = 1 + \frac{6K - 6T_a}{TM - T_a} - \frac{17T_m - 17K}{TMA - T_m} \quad (14)$$

III. El Metodo Gomez-Morales para el calculo de horas frío.

donde:

K = Temperatura umbral por debajo de la cual existen horas
frío

Ta = Temperatura ambiente

Tm = Temperatura mínima

TM = Temperatura Máxima

TMA = Temperatura Máxima del día anterior.

Esta adaptación al método resulta particularmente útil no sólo para cuando se quiere calcular horas de tiempo transcurridas bajo un cierto valor, sino también cuando se desea conocer el número de horas transcurridas por encima de ese valor. De modo que el método no sólo resulta aplicable para el cálculo de horas frío, sino también para la estimación de otros parámetros térmicos relacionados con la permanencia por encima o por debajo de algún umbral térmico, cosa frecuente en los estudios fenológicos y agroclimatológicos.

IV. ANALISIS COMPARATIVO DE LOS DIVERSOS METODOS.

En este capítulo se analiza en forma cuantitativa y cualitativa, la precisión de los métodos indirectos, incluyendo el Gómez-Morales, a fin de probar la hipótesis siguiente:

El Método Gomez-Morales es el mejor estimador del Método Directo.

Para ello se hicieron los siguientes análisis y pruebas:

- comparación de resultados absolutos para cada año,
- comparación de desviaciones porcentuales respecto al Método Directo para cada año,
- comparación de los resultados absolutos medios y desviaciones medias, mínimas y máximas,
- análisis del coeficiente de correlación r de Pearson,
- análisis del Coeficiente de Variabilidad: C.V.,
- prueba de hipótesis I: comparación de medias,
- prueba de hipótesis II: análisis de varianza.

Se probaron todos los métodos indirectos excepto el de Weinberger, que por considerar únicamente a los meses de Diciembre y Enero no es comparable con el resto que utiliza además los meses de Noviembre y Febrero. Para el cálculo de las horas frío por el Método de Sharpe se utilizó la siguiente fórmula:

$$H.F. = 654.95 - 34.44 TM$$

Esta fórmula es más precisa que la propuesta por Torres(1983) y se obtuvo también por regresión lineal. Como los resultados que arroja Sharpe son muy altos, se optó por dividirlos entre dos y se encontró que resultaban más aproximados que los normales, por lo que son los que se utilizaron en el análisis.

IV. Análisis Comparativo de los diversos métodos.

Para los demás métodos se tomaron las fórmulas originales de c/u.

Los datos utilizados fueron datos diarios de temperatura mínima, temperatura ambiente (8:00 am) y temperatura máxima para los meses de Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero de una serie de 20 años de registros del Observatorio Meteorológico de Cd. Universitaria en México, D.F.

Finalmente para el análisis se consideraron únicamente 11 años de la serie de 20 debido a que en algunos de ellos faltan datos ya sea del termómetro o bien del termógrafo. De estos años se considera únicamente el período Otoño-Invierno determinado por los meses anteriormente citados. Estos años son: 1970-1971, 1971-1972, 1972-1973, 1974-1975, 1975-1976, 1977-1978, 1978-1979, 1979-1980, 1980-1981, 1981-1982 y 1982-1983.

En este análisis se toma como punto de referencia a los resultados del Método Directo, esto es a las cantidades de horas frío medidas directamente de las gráficas del termógrafo. Estas cantidades se obtuvieron previamente al análisis comparativo y son consideradas como las que realmente ocurrieron en los períodos señalados.

En las siguientes páginas se han abreviado los nombres de los métodos por comodidad:

- D = Método Directo
- GM = Método de Gómez-Morales
- CR = Método de Crossa-Raynaud
- DM = Método de Da Mota

IV. Analisis Comparativo de los diversos metodos.

SH = Método de Sharpe

Todos los cálculos estadísticos fueron realizados en una microcomputadora, utilizando el paquete de estadística MICROSTAT.

IV. Analisis Comparativo de los diversos metodos.

IV.1. Analisis Cuantitativo.

Comparación de resultados absolutos:

En la Tabla IV.1 se muestran los resultados que arrojaron los diferentes métodos, las cantidades están dadas en horas frío:

	70-71	71-72	72-73	74-75	75-76	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83
D	816.5	708.0	608.5	507.5	721.5	497.4	462.0	564.0	596.0	555.0	514.0
C-M	712.1	603.9	442.1	513.9	703.8	456.5	411.2	449.1	572.3	450.7	469.8
C-R	646.4	533.0	388.9	457.7	632.8	398.0	365.8	399.9	524.0	384.5	436.1
DM	542.4	506.6	367.4	465.1	561.3	466.9	394.0	443.7	539.4	410.1	448.1
SH	465.8	444.2	348.6	419.1	477.2	420.2	376.2	406.2	463.4	385.9	408.8

Tabla IV.1. Resultados del cálculo de horas frío, segun los diferentes métodos. Datos del Observatorio Meteorológico de Cd. Universitaria, D.F.

Se aprecia claramente que en casi todos los años el método Gómez-Morales fué el más cercano al Método Directo, seguido por el de Crossa-Raynaud. Igualmente se puede apreciar que los resultados de GM varían casi proporcionalmente a los del Método Directo, lo que no ocurre con los demás métodos, particularmente con DM y SH.

La Fig 4.1. muestra en forma gráfica los valores de la Tabla IV.1.

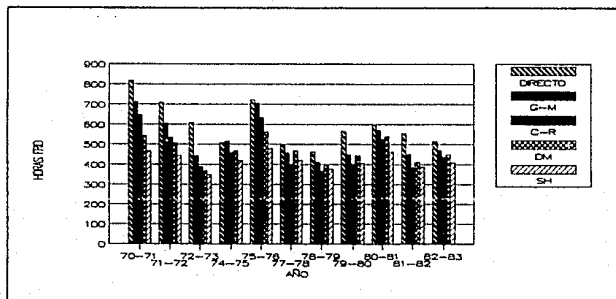


Fig. 4.1. Comparación de resultados entre el Método Directo (D) y los métodos indirectos.

IV. Análisis Comparativo de los diversos métodos.

Comparación de desviaciones porcentuales:

Con los datos de la Tabla IV.1 se elaboró la Tabla IV.2, en la que se indica el porcentaje de desviación de cada método indirecto respecto al Método Directo, de acuerdo con la fórmula:

$$\% \text{ desv} = \left| 100 - \frac{\text{MI} \times 100}{\text{MD}} \right|$$

	70-71	71-72	72-73	74-75	75-76	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83
GM	12.8	14.7	19.4	1.2	2.4	8.2	11.0	20.4	3.9	18.8	8.6
CR	20.8	24.7	29.1	9.8	12.3	19.9	20.8	29.1	12.1	30.7	15.2
DM	33.5	28.4	33.0	8.3	22.2	6.1	14.7	21.3	9.6	26.1	12.3
SH	42.9	37.3	36.4	17.4	33.8	15.5	18.5	27.9	22.5	30.4	20.4

Tabla IV. 2. Desviaciones porcentuales respecto al Método Directo.

En la tabla se puede apreciar qué porcentaje de horas frío para cada periodo faltó o se excedió del Método Directo. Mientras menor es el valor más cercano es el método indirecto al Método Directo. Se confirma que el Método Gómez-Morales es el más aproximado.

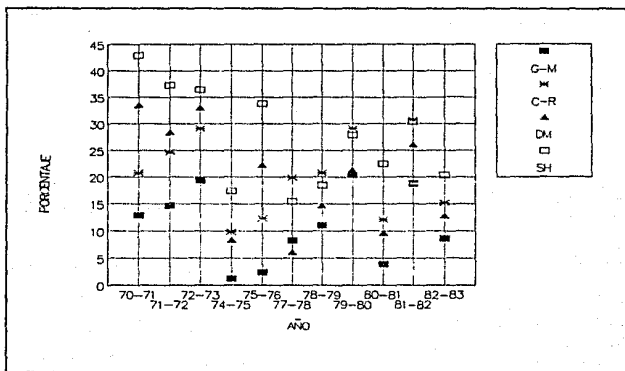


Fig. 4.2. Desviación en porcentaje de los métodos indirectos respecto al Método Directo.

Comparación de resultados medios, máximos y mínimos:

De las dos Tablas anteriores se obtuvo la Tabla IV.3., en la cual se presentan los valores medios de desviación y horas frío.

	HORAS FRÍO			X DE DESVIACION		
	MEDIA	MAXIMO	MINIMO	MEDIA	MAXIMO	MINIMO
D	595.4909	816.5	462.0	—	—	—
GM	525.9518	712.1	411.2	11.03636	20.4	1.2
CR	469.7291	646.4	365.8	20.40909	30.7	9.8
DM	467.6473	561.3	367.4	19.63636	33.5	6.1
SH	419.6218	477.2	348.6	27.54545	42.9	15.5

Tabla IV.3. Valores medios, máximos y mínimos de los resultados del cálculo de horas frío.

De los valores medios de horas frío se observa que la diferencia entre el Método Directo y el Gómez-Morales es de sólo 69.53 horas frío, mientras que la de los demás métodos indirectos es superior a 125 horas frío. Otro hecho que es necesario mencionar es que mientras para GM y CR, los años en que se registraron los valores extremos de horas frío fueron los mismos que para el Método Directo (70-71 y 78-79), y para DM y SH fueron totalmente diferentes (72-73 y 75-76 para ambos métodos). Esto último significa que la forma en que varían los métodos GM y CR es más aproximada a la del Método Directo, que los métodos DM y SH.

De acuerdo con esto el Método Gómez-Morales es el mejor estimador del Método Directo puesto que su error medio respecto a este último es de sólo un décimo, mientras que el resto tiene un error de un quinto o más. Es notorio también que aún cuando el promedio de horas frío de CR es ligeramente mayor que el de DM, la desviación media de este último es ligeramente menor que la del primero, esto ocurre porque el cálculo de las desviaciones medias se hizo tomando en cuenta las desviaciones de todos los años y no

IV. Analisis Comparativo de los diversos metodos.

los valores medios de horas frio de ambos metodos.

En las figuras siguientes se han representado en forma gráfica los resultados medios absolutos y porcentuales.

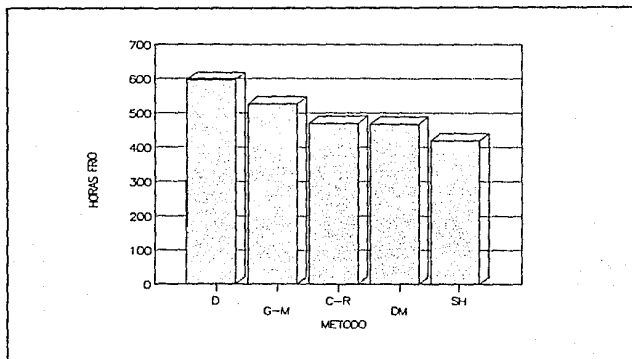


Fig. 4.3. Promedio de horas frio según los diferentes métodos.

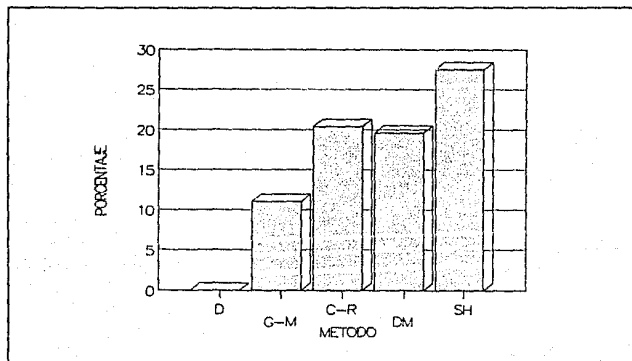


Fig. 4.4. Desviación media en porcentaje respecto al Método Directo

IV. Análisis Comparativo de los diversos métodos.

Coefficiente de correlación r de Pearson:

Este índice que reporta la medida de la correlación lineal entre dos variables nos sirve en este caso para conocer la proporción en que se acercan los métodos indirectos a los valores del Método Directo. Como el valor de r para el Método Directo es 1.0, mientras más se aproxime a 1.0 el valor de r para los métodos indirectos, mejor será su aproximación a la realidad.

En la Tabla IV.4. se han registrado los valores de r para los diferentes métodos indirectos respecto al Método Directo.

METODO	GM	CR	DM	SH
r	0.88449	0.86678	0.65678	0.62211

Tabla IV.4. Valores de r con respecto al Método Directo.

Nuevamente observamos que el método indirecto más aproximado es el de Gómez-Morales.

Coefficiente de Variabilidad C.V.:

En la Tabla IV.5 se han calculado los C.V. de los métodos de cálculo de horas frío. El C.V. es un índice que nos sirve para conocer la variación o uniformidad de diferentes poblaciones de datos, de tal manera que se considera como más variable a la que posea el C.V. más alto. El C.V. se calcula con la fórmula:

$$C.V. = \frac{\sigma}{\mu} \times 100$$

METODO	D	GM	CR	DM	SH
C.V.	18.54	20.33	21.35	13.63	9.63
DIF. ABS.	0.0	1.79	2.81	4.91	8.91

Tabla IV.5. Diferencia entre los C.V. de los métodos de cálculo de horas frío.

En este caso se utiliza la diferencia absoluta entre los C.V.

IV. Analisis Comparativo de los diversos metodos.

de cada método indirecto y el del Método Directo, puesto que nos interesa conocer cuál es el más variable, sino cuál es el que más se aproxima por su variación al Método Directo. De los resultados se puede decir que el Método Gómez-Morales varía casi en la misma proporción en que lo hace el Método Directo. También es notoria la poca variación que presentan los métodos de Da Mota y Sharpe, lo cual era de esperarse tratándose de métodos basados en estadísticas mensuales. Para comprender mejor este efecto de "suavización", en la figura 4.5 se ha representado la variación diaria de cada método. Se han modificado para ello a los métodos de Da Mota y Sharpe en la forma siguiente:

Da Mota:

$$\text{H.F.} = \frac{485.1 - 28.52\text{TM}}{M}$$

Sharpe:

$$\text{H.F.} = \frac{(654.95 - 34.44\text{TM})/2}{M}$$

donde:

TM = Temperatura Media diaria.
M = número de días del mes.

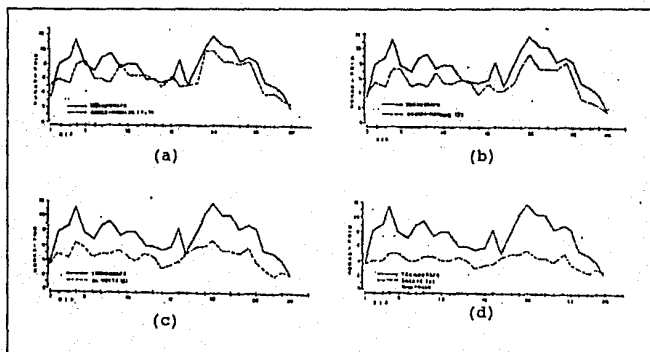


Fig.4.5. Efecto de "suavización" en los métodos de Da Mota (c) y Sharpe (d) con respecto a Gómez-Morales (a) y Crossa-Raynaud (b).

Prueba de hipótesis I: Comparación de medias (t de Student).

Con los datos de la Tabla IV.1 se realizó una prueba de hipótesis, consistente en la comparación de medias aplicando la prueba t de Student.

Se establecen las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula: la diferencia entre los resultados del Método Directo y los resultados del método indirecto *i* no es significativa.

$$H_0 = \mu_{ND} = \mu_{Ni i}$$

Hipótesis Alternativa: la diferencia entre los resultados del Método Directo y los resultados del método indirecto *i* es significativa.

$$H_A = \mu_{ND} \neq \mu_{Ni i}$$

En general, para la prueba t:

si $t_{calculada} \leq t_{\alpha(GL)}$ de tablas, se acepta H_0 porque $p > 0.05$

α = límite de significancia,

GL = grados de libertad,

p = probabilidad de α

METODO	GM	CR	DM	SH
t	2.1564	4.1578	6.6511	14.4328
p	0.0564	0.0019	5.0E-5	5.66E-8
SIGNIFICANCIA	NS	**	**	**

$\alpha = 0.05$, GL = 10
 nivel de significancia: NS (No Significativa)
 si $0.01 < p \leq 0.05$ entonces ** (diferencia altamente significativa)
 si $p \leq 0.01$ entonces ** (diferencia altamente significativa)

Tabla IV.6. Valores de t y p, y significancia resultantes de la aplicación de la prueba t.

De las tablas para la prueba t tenemos que:

$t_{0.05(10)} = 2.228$, por lo tanto:

$t_{GM} = 2.1564 < t_{0.05(10)} = 2.228$; $p_{GM} > 0.05$; SE ACEPTA H_0

$t_{CR} = 4.1578 > t_{0.05(10)} = 2.228$; $p_{CR} \leq 0.05$; SE ACEPTA H_A

$t_{DM} = 6.6511 > t_{0.05(10)} = 2.228$; $p_{DM} \leq 0.05$; SE ACEPTA H_A

$t_{SH} = 14.4328 > t_{0.05(10)} = 2.228$; $p_{SH} \leq 0.05$; SE ACEPTA H_A

IV. Análisis Comparativo de los diversos métodos.

Los resultados de esta prueba indican que sólo el Método Gómez-Morales proporciona una estimación adecuada de la cantidad de horas frío que ocurren en realidad.

Prueba de hipótesis II: Análisis de Varianza (F de Fisher).

Tomando los datos de la Tabla IV.1, se realizaron 4 análisis de varianza tomando en cada uno al Método Directo y a uno de los métodos indirectos. Los resultados de los 4 análisis se han resumido en la Tabla IV.7.

Previamente al análisis se establecieron las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula: la diferencia entre los resultados del Método Directo y los resultados del método indirecto *i* no es significativa.

$$H_0 = \mu_{MD} = \mu_{MII}$$

Hipótesis Alternativa: la diferencia entre los resultados del Método Directo y los resultados del método indirecto *i* es significativa.

$$H_A = \mu_{MD} \neq \mu_{MII}$$

En general, para la prueba F:

si $F_{calculada} < F_{\alpha(GLM, CLE)}$, se acepta H_0 porque $p > 0.05$

α = límite de significancia,

GLM = grados de libertad de las muestras,

CLE = grados de libertad del error

p = probabilidad de α

METODO	GM	CR	DM	SH
F	2.250	7.814	11.054	24.5940
P	0.2984	0.0224	0.0067	1.5E-4
SIGNIFICANCIA	NS	*	**	**

$\alpha=0.05$, GLM=1, CLE=20
niveles de significancia: NS (No Significativa)
* entonces ** (diferencia altamente significativa)
** entonces ** (diferencia altamente significativa)

Tabla IV.7. Valores de F y P, y significancia resultantes de la aplicación de la prueba F.

IV. Análisis Comparativo de los diversos métodos.

De las tablas para la prueba F tenemos que:

$F_{0.05(1,20)} = 4.35$, por lo tanto:

$F_{GM} = 2.250 < F_{0.05(1,20)} = 4.35$; $P_{GM} > 0.05$; SE ACEPTA H_0

$F_{CR} = 7.814 > F_{0.05(1,20)} = 4.35$; $P_{CR} \leq 0.05$; SE ACEPTA H_A

$F_{DM} = 11.054 > F_{0.05(1,20)} = 4.35$; $P_{DM} \leq 0.05$; SE ACEPTA H_A

$F_{SH} = 24.594 > F_{0.05(1,20)} = 4.35$; $P_{SH} \leq 0.05$; SE ACEPTA H_A

Los resultados de esta prueba indican nuevamente que sólo el Método Gómez-Morales proporciona una estimación adecuada de la cantidad de horas frío que ocurren en realidad.

Conclusiones del Análisis Cuantitativo.

Desde la simple comparación de los resultados absolutos en horas frío, hasta las pruebas formales con t y F, todo confirma la hipótesis planteada al principio de este capítulo en el sentido de que el Método Gómez-Morales es el mejor estimador del Método Directo y por ende de las horas frío ocurridas en la realidad.

IV.2. Analisis Cualitativo.

El análisis cuantitativo llevado a cabo anteriormente nos permite poner de relieve dos dicotomías aplicables a los métodos indirectos para el cálculo de horas frío:

1. Metodos Estadisticos VS Metodos Matematicos.

Esta dicotomía puede ejemplificarse por un lado con los métodos de Da Mota y Sharpe, los cuales son métodos estadísticos basados en estadísticas de un lugar o región, y por otro, por los métodos de Gómez-Morales y Crossa-Raynaud, que son métodos matemáticos que plantean relaciones más o menos exactas del comportamiento de la temperatura.

Las diferencias entre ambas clases de métodos están dadas en gran parte por el tipo de relaciones que implican. Por el lado de los métodos matemáticos, como éstos se apoyan en situaciones o hechos que ocurren en el mundo real y que son comunes a cualquier lugar de la superficie terrestre, sus resultados tienden a reflejar dicha realidad con cierto grado de aproximación. Esto no ocurre con los métodos estadísticos, que como están basados en información local y en relaciones estadísticas, siempre existe un factor de incertidumbre acerca de la validez de sus resultados cuando son aplicados en localidades diferentes a aquellas de donde se tomó la información para generar el método. Dicho de forma resumida, la realidad que reflejan estos métodos no es una realidad objetiva, sino una realidad estadística que es variable no sólo en terminos de espacio, sino también en el tiempo.

Esto último puede comprobarse claramente si, por ejemplo, partiendo del razonamiento que llevó a Da Mota a proponer su

IV. Analisis Comparativo de los diversos metodos.

método, hicieramos lo mismo con los datos utilizados en el presente estudio. Esto es, si aplicaramos el método de regresión lineal entre la temperatura media mensual y la cantidad de horas frío correspondiente, la fórmula resultante sería diferente de la que propone Da Mota, y esta fórmula así obtenida sólo sería estrictamente válida para la estación de Cd. Universitaria. Más aún, si obtuvieramos una fórmula para cada período otoño-invernal registrado en la estación, cada fórmula sería diferente de las demás.

Aún suponiendo que una fórmula obtenida de esta forma sólo es válida para una determinada localidad, los resultados no serían necesariamente aproximados a la realidad, ya que existe un factor de "suavización" que está explicado por la siguiente dicotomía y que ocasiona que para un cierto valor de temperatura exista un sólo valor de horas frío.

2. Métodos Mensuales VS Métodos Diarios.

La desventaja más importante de los métodos mensuales es precisamente que son mensuales, esto es, están basados en información mensual. Esto en términos prácticos significa que el valor mensual es un valor que ha sido despojado de las variaciones diarias de la temperatura, convirtiéndose en un valor medio que en otras circunstancias podría ser usado con confiabilidad, pero que en el caso de las horas frío, por tener estas un ciclo diario de ocurrencia, no logra reflejar las oscilaciones diarias de la temperatura, que son precisamente las que determinan la cantidad de horas frío que ocurren cada día. Esto ha sido ilustrado claramente en la Fig.4.5. Quizá el inconveniente más grave no es

IV. Analisis Comparativo de los diversos metodos.

tanto que al ser una media de medias, haya perdido la oscilación de la temperatura a lo largo del mes, sino que además al utilizar la temperatura media diaria como base para su cálculo, esta última puede ocasionar un error de la siguiente forma: si por ejemplo si en dos días diferentes las temperaturas mínima y máxima fueron:

1er. día. mínima = 1°C , máxima = 19°C

2o. día. mínima = 5°C , máxima = 15°C

la temperatura media de cada día sería de 10°C para los dos días, lo que tratándose de horas frío consiste en una diferencia de $3'36''$ aproximadamente, como se ha ilustrado en la figura siguiente. Se ha supuesto que las temperaturas máximas de los días anteriores fueron iguales a las máximas de esos días, y que las horas de ocurrencia de ambas temperaturas son a las 14:00 hrs y a las 7:00 hrs para las máximas y las mínimas respectivamente.

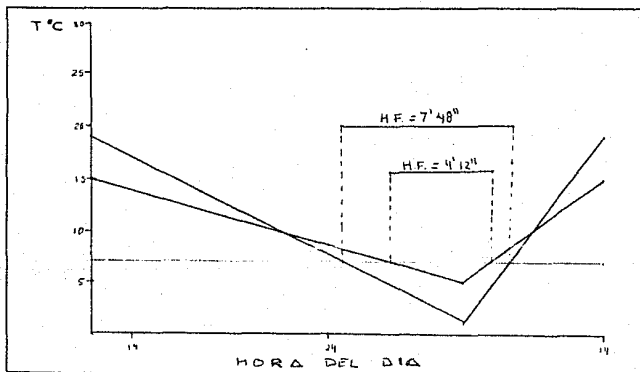


Fig. 4.6. La gráfica muestra el error que acarrea el valor de la temperatura media diaria en el caso de las horas frío. Se han graficado los valores de las temperaturas mínimas y máximas diarias para dos días con temperaturas medias diarias idénticas.

IV. Analisis Comparativo de los diversos metodos.

Y este error diario se acumula normalmente y está implícito en el valor de la temperatura media mensual, de manera tal que los resultados de horas frío que dan los métodos mensuales tampoco reflejan los valores medios de horas frío que ocurren en realidad.

Los métodos diarios al contabilizar diariamente la cantidad de horas frío, no provocan el efecto de "suavización" propio de los métodos mensuales, y son comunmente más precisos, sin embargo su principal defecto es que si la relación, sobre la que están basados es falsa total o parcialmente, o ha sido inadecuadamente planteada en términos matemáticos, sus resultados pueden ser igual o más erróneos que los de los métodos estadísticos mensuales. Por ello es que se pone especial cuidado en no cometer ninguno de estos errores. Sólo la comparación de resultados y las pruebas estadísticas pueden decir si un método de este tipo se aproxima a la realidad que trata de simular, y una vez que se prueba esto, el método se puede aplicar sin incertidumbres.

V. CONCLUSIONES.

Ningún método de estimación de horas frío es perfecto, pero algunos pueden ser más confiables que otros. Aún el mismo Método Directo, que no es un método que estime horas frío, puede presentar resultados incorrectos. De cualquier forma, lo ideal sería el poder utilizar este método en todos los lugares del país en donde se necesitara conocer la cantidad de horas frío que ocurren. Sin embargo la realidad es que no se cuenta con suficientes termógrafos en la red de estaciones meteorológicas que cubre al territorio, y aún de los que existen, muchos no están situados en los lugares donde es factible la presencia de horas frío.

Por ello, dado que es importante cuantificar este parámetro para poder realizar una planeación más cuidadosa y científicamente basada de los cultivos criófilos, es necesario recurrir a un método indirecto.

La selección adecuada del método es un hecho que no conviene descuidar, pues de los resultados que proporcione depende en gran medida la decisión de introducir un cierto tipo de cultivo.

A lo largo de este trabajo y principalmente en el capítulo anterior se ha tratado de dar una visión amplia acerca de la utilidad y exactitud que pueden reportarnos los diversos métodos indirectos para el cálculo de horas frío. Y se ha llegado a una conclusión:

Por una parte se ha probado que no es conveniente utilizar los métodos estadísticos basados en la relación observada entre el valor de la temperatura media mensual y la ocurrencia de horas

V. Conclusiones.

frio, debido a que sus resultados carecen de validez excepto para la zona que dió origen al método. Por otro lado se demostró que el método propuesto, el Método Gómez-Morales, además de proporcionar una excelente estimación de la cantidad de horas frio que ocurren en la realidad, es un método que por estar basado en datos diarios y sobre todo por la forma en que reproduce el comportamiento diario de la temperatura, hecho que constituye el núcleo del método, carece de los problemas que tienen los métodos estadísticos mensuales, es decir que es válido para cualquier lugar donde ocurran horas frio y que sus resultados son objetivos y no reflejo de una realidad estadística.

BIBLIOGRAFIA

1. Calderón Alcaraz, E. 1983. *Fruticultura General*. Ed. Limusa, México.
2. Muñoz Santamaría, G. 1969. Evaluación de Fórmulas para el cálculo de horas frío de algunas zonas frutícolas de México. *Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx. México.*
3. Ortiz Solorio, C.A. 1984. *Elementos de Agrometeorología Cuantitativa*. Universidad Autónoma de Chapingo, Méx. México.
4. Reyna Trujillo, T. 1981. Cuantificación de las horas frío y su importancia en la planeación de cultivos de caducifolios en México. En *Memorias del IX Congreso Nacional de Geografía*. Tomo I Toluca, Méx. México.
5. Reyna Trujillo, T. 1983. Importancia de las horas frío en la fruticultura. *Métodos de Cuantificación*. En *Memorias del Primer Congreso Interno del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México*. Instituto de Geografía, UNAM. México.
6. Rojas Garcidueñas, M. y Rovalo, M. 1985. *Fisiología Vegetal Aplicada*. Ed. McGraw Hill, México.
7. Romo González, J.R. y Arteaga Ramírez, R. 1982. *Meteorología Agrícola*. Depto. de Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo, Méx. México.
8. Smith, L.P. 1975. *Methods in Agricultural Meteorology*. Elsevier, Amsterdam, Holland.
9. Swets & Zeitlinger. 1975. *Agricultural Biometeorology and Bioclimatology*. In: *The Effect of Weather and Climate on Plants*. Chapter 3, Vol I. L.P. Smith Editor. Amsterdam, Holland.
10. Torres Ruiz, E. 1983. *Agrometeorología*. Ed. Diana, México.



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA

ANEXO I

Ejemplo de aplicación del método Gómez-Morales en forma manual:

Si se tienen los siguientes datos diarios:

Temperatura mínima (Tm): 3.5

Temperatura ambiente (Ta): 6.8

Temperatura máxima (TM): 23.0

Temperatura máxima del día anterior (TMA): 21.0

de acuerdo con las fórmulas:

si $T_a > 7^\circ\text{C}$:

$$H.F. = \frac{7 - T_m}{T_a - T_m} - \frac{17T_m - 119}{TMA - T_m}$$

si $T_a \leq 7^\circ\text{C}$:

$$H.F. = 1 + \frac{42 - 6T_a}{TM - T_a} - \frac{17T_m - 119}{TMA - T_m}$$

como la $T_a \leq 7^\circ\text{C}$, se aplica la segunda fórmula:

$$H.F. = 1 + \frac{42 - 6(6.8)}{23.0 - 6.8} - \frac{17(3.5) - 119}{21.0 - 3.5}$$

$$H.F. = 1 + \frac{42 - 40.8}{23.0 - 6.8} - \frac{59.5 - 119}{21.0 - 3.5}$$

$$H.F. = 1 + \frac{1.2}{16.2} - \frac{-59.5}{17.5}$$

$$H.F. = 1 + 0.074074 - (-3.4)$$

$$H.F. = 4.474074$$

de esta manera se ha encontrado el valor de horas frío acumuladas para ese día en particular.

Programa de computadora en lenguaje BASIC para el cálculo de horas frío por el método Gómez-Morales:

Este programa calcula los valores de horas frío para cada día de los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero. Además proporciona la cantidad de horas frío acumuladas en cada mes y el total de horas frío del período invernal. Adicionalmente almacena en un archivo de datos los valores de las temperaturas mínima, ambiente y máxima diarias.

```
'CALCULO DE HORAS FRIO POR EL METODO GOMEZ-MORALES
input "Dame el nombre de la estacion";nom$
open nom$+".dat" for output as 1
input "Dame el valor de la Temperatura Maxima del dia 31 de
octubre";Tma
hfttotal=0
'COMIENZA EL CICLO DE CUATRO MESES
for i = 1 to 4
input "Dame el nombre del mes";mes$
input "Dame el numero de dias";ndias
print #1,mes$,ndias
hfmes=0
for j= 1 to ndias
'ENTRADA DE LOS DATOS DIARIOS DE TEMPERATURA
input "Dame el valor de la temperatura minima:";Tmin
input "Dame el valor de la temperatura ambiente:";Tamb
input "Dame el valor de la temperatura maxima:";Tmax
'ASIGNACION DE VALORES EN CASO DE QUE TMAX O TMA <7 C
if tma<7 then tma=7
if tmax<7 then tmax=7
'CALCULO DE LAS HORAS FRIO DEL DIA
if tamb>7 then
hf=(7-tmin)/(tamb-tmin)-(17*tmin-119)/(tma-tmin)
else
hf=1+(42-6*tamb)/(tmax-tamb)-(17*tmin-119)/(tma-tmin)
end if
hfmes=hfmes+hf
print #1,j,tmin,tamb,tmax,hf
tma=tmax
next j
print #1,"Horas frio acumuladas en el mes de: ";mes$,"=";hfmes
hfttotal=hfttotal+hfmes
next i
print #1,"total de horas frio del periodo:";hfttotal
close #1
end
```