

Serie Fruticultura práctica



Métodos Chapingo I y II para calcular la acumulación de frío invernal en Chapingo, México

Elías Jaime Matadamas Ortiz



ACADEMIA DE FRUTICULTURA
ÁREA DE AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Métodos Chapingo I y II para calcular la acumulación de frío invernal en Chapingo, México

Elías Jaime Matadamas Ortiz

Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Preparatoria Agrícola. Área de Agronomía. Academia de Fruticultura. Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. Tel. 01(595)95 215 32. Ext. 5403. emata993@hotmail.com.

Resumen

En la determinación de las Horas Frío de una región dada a fin de decidir las especies y variedades de cultivos frutícolas caducifolios a plantarse existen diversos métodos. El método directo que consiste en determinar las horas frío directamente de las gráficas del termógrafo. Hay otros métodos indirectos utilizados frecuentemente en México, como lo son algunas fórmulas, las cuales se basan en correlaciones con variables del clima. Estos métodos poseen ciertas ventajas, como la facilidad de su aplicación y que tienen una cierta aproximación a la cantidad de horas frío acumulada realmente. En este estudio se hizo el cómputo directamente de los datos de temperatura aportados por la Estación Meteorológica Automática ubicada en el Campo Experimental "San Ignacio" de la Universidad Autónoma Chapingo, complementando la información con la Estación Meteorológica Automatizada Chapingo (OCAVM) de la Comisión Nacional del Agua, a fin de conocer el dato exacto de las horas frío acumuladas en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero de los ciclos 2015-2016 y 2016-2017. Posteriormente se aplicaron varias fórmulas y algunos modelos para esos mismos datos y se hizo una comparación, detectándose una diferencia importante y significativa con relación a los valores observados. Por lo que se proponen dos modelos matemáticos que presentan una buena exactitud y facilidad de cálculo, al que hemos denominado, Método Chapingo, el cual se basa en las temperaturas mínimas diarias de los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, y que está más adaptado a las condiciones de zonas de bajas latitudes con invierno benigno en el que después de presentarse bajas temperaturas por la noche, al día siguiente se presentan temperaturas mayores de 18°C. Con el Modelo I del Método Chapingo se realizó el cálculo de las horas frío desde el año de 1953 hasta 2017, a partir de un calculador por computadora que nos facilita el procesamiento de los datos.

Palabras clave: *Horas frío, requerimiento de frío, dormancia, brotación de yemas, Método Chapingo.*

Introducción

La zona de Chapingo, Méx., presenta buenas condiciones climáticas y edáficas para el establecimiento de huertos frutícolas, además de tener una ubicación estratégica de mercado al contar con la cercanía a la Central de Abastos de la CDMX. No obstante, es necesario conocer el comportamiento de la

acumulación de frío invernal, a fin de introducir las especies y variedades adecuadas y proporcionarles a los huertos un manejo agronómico óptimo. Las especies frutales de hoja caduca por lo general son originarias de regiones frías por lo que están adaptadas a inviernos severos y bien definidos. Cuando éstas son plantadas bajo condiciones subtropicales con inviernos de baja acumulación de frío, sus requerimientos climáticos no son satisfechos traduciéndose en falta de brotación de yemas, escaso crecimiento, falta de producción y muerte prematura del árbol, conduciendo lo anterior a la descapitalización de los productores, falta de inversiones y esfuerzos improductivos. Uno de estos requerimientos esenciales es el frío invernal. Cada especie tiene un rango de necesidades de frío y dentro de cada especie hay variedades que varían en su requerimiento. Así, se han clasificado variedades de altos y bajos requerimientos de frío. De acuerdo con esto, es importante determinar la cantidad de frío que se acumula en las zonas potencialmente frutícolas y con esta información decidir la especie y la variedad adecuada y evitar problemas que conducen al fracaso de los proyectos de desarrollo frutícola.

En la Meseta Central de México con climas templados húmedos y subhúmedos presenta buenas posibilidades para el establecimiento de huertos frutícolas con especies caducifolias, pero es necesario determinar la acumulación de frío para de esta manera tomar decisiones técnicas sobre las especies, variedades y manejo agronómico.

El objetivo de este estudio fue determinar el comportamiento de la acumulación de frío invernal en esta localidad.

Concepto de Hora Frío

Weinberger (1950) observó que las temperaturas menores a 7°C tenían un efecto sobre la salida de la dormancia endógena, y en la brotación de yemas de árboles de durazno después del invierno y acuñó el término de *hora frío*, la cual es un periodo de 60 minutos a una temperatura por debajo de una temperatura umbral, que en este caso es de 7°C. A partir de entonces, los investigadores siguen utilizando este concepto. Este mismo autor propuso una serie de valores de horas frío en relación a las temperaturas medias mensuales de los meses de diciembre y enero y concluyó que los valores resultantes están correlacionados con la respuesta de los árboles.

Métodos indirectos para el cálculo de las horas frío

Dentro de la categoría de métodos indirectos para el cálculo de las horas frío en el periodo invernal existen una gran variedad, aunque para el caso de nuestro país, pocos han sido los estudios para generar métodos adaptados a

nuestras condiciones de baja latitud. A continuación mencionaremos algunos métodos que en este estudio se utilizaron para alcanzar nuestro objetivo.

Método de Weinberger

Este modelo fue propuesto por Weimberger en 1950, y correlaciona el promedio de las temperaturas medias de los meses de diciembre y enero y calcula las horas frío de los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero. Su correlación puede resumirse aplicando la siguiente fórmula:

$$\mathbf{H.F. = 2124.95 - 125.23 x}$$

En la que H.F. = número de horas frío

X = Promedio de la temperatura media de los meses de diciembre y enero.

Método de Da Motta

Por su parte Da Motta (1956) trabajando en Brasil en la región de Rio Grande do Sul propuso una fórmula que relaciona las temperaturas medias de los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, y la acumulación de horas frío. La suma de las horas frío acumuladas de cada mes serán la cantidad total invernal de frío.

$$\mathbf{H.F. = 485.1 - 28.52 x}$$

En la que H.F. = cantidad mensual de horas frío

X = temperatura media mensual.

Método de Sharpe

El método de Sharpe (1969) consiste en una correlación entre las temperaturas medias mensuales del invierno, usándose los datos de noviembre, diciembre, enero y febrero, y el número de horas frío acumuladas. El modelo lineal de Sharpe es el siguiente:

$$\mathbf{H.F. = 638.95 - 33.008 x}$$

Donde: H.F.= número de horas frío acumuladas en el mes en cuestión.

X= temperatura media mensual.

Método de Crossa-Raynaud

En este método el cálculo de horas frío se realiza de manera diaria con base a los datos de temperaturas máximas y mínimas diarias observadas. La suma de

los datos diarios de horas frío calculados durante los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero proporciona el dato total de horas frío presentadas durante el invierno respectivo. La fórmula es la siguiente:

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

En la que: H.F.= Horas frío presentadas cada día.
M = Temperatura máxima diaria.
m = Temperatura mínima diaria.

Método de Torres-Ruiz

Este investigador propuso en 1983 la siguiente fórmula después de hacer algunos ajustes a la de Sharpe:

$$H.F. = 639 - 33 x$$

En la que H.F.= Horas frío del mes
X = Temperatura media mensual.

Método de Morales

Esta fórmula generada en el Colegio de Geografía de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM, posiblemente basada y con ajustes a la fórmula de Sharpe, es la siguiente:

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

Dónde: H.F. = Horas frío del mes en cuestión.
X = Temperatura media mensual.

Método de Gómez y Morales

En un intento por generar una fórmula para las condiciones de los inviernos de México, se generaron dos modelos matemáticos en la UNAM para el cálculo de las horas frío. El primero de ellos, es una fórmula que calcula las horas frío en forma diaria y el segundo las calcula de forma mensual.

La fórmula de Gómez y Morales en su variante de cálculo diario contempla dos casos:

- 1) Primer caso: Si la temperatura ambiente (8:00 A.M.) es mayor a 7°C entonces:

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

2) Segundo caso: Si la temperatura ambiente (8:00 A.M.) es menor o igual a 7°C entonces:

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

Dónde:

H.F. = Horas frío.

TMA = Temperatura máxima del día anterior.

TM = Temperatura máxima.

TA = Temperatura ambiente (8:00 A.M.).

Tm = Temperatura mínima.

En la variante de cálculo mensual solo cambian los siguientes datos:

TMA – Temperatura media máxima del mes anterior

TM – Temperatura media máxima del mes presente

Tm – Temperatura media mínima del mes presente

TA – Temperatura media ambiente del mes presente

Además hay que considerar el siguiente ajuste para los valores TM, Tm y TA:

1. Se cuentan los días en los que hubo “frío”, esto es, los días en los que la temperatura mínima (Tm) fue menor a 7°C.

2. Se obtienen las medias mensuales para todos los días del mes (medias de TMA, TM, Tm y TA).

3. Se obtienen las medias mensuales para los mismos parámetros pero contando únicamente los días en los que hubo “frío”. (Si no existe “frío” para algún mes se tomarán las medias mensuales normales, por ejemplo, cuando se está calculando para el mes de noviembre se necesita la TMA de octubre; pero como en este mes generalmente no hay frío, se toma la media máxima mensual calculada con los 31 días de octubre).

4. Con los resultados obtenidos en los pasos (2) y (3) se obtienen promedios para cada parámetro, excepto para TMA.

5. Seguidamente se obtiene un promedio entre los valores medios normales y los valores medios calculados con los días en que la temperatura mínima fue menor a 7°C.

6. El promedio así obtenido para las máximas es el que se utiliza en las fórmulas, igualmente el calculado para las ambientes. Para las mínimas se procede como sigue:

7. Llamemos: A, el promedio de las mínimas, considerando únicamente los días en que la temperatura mínima diaria es menor a 7°C; B, el promedio de las mínimas obtenido en la fórmula usual; C, el promedio de los dos valores anteriores; D, el porcentaje de días con temperatura mínima inferior a 7°C respecto al total de días del mes; luego:

$$E = (D \times B) / 100 \text{ y } T_m = 4 + E$$

Entonces:

Si T_m es mayor que C entonces $T_m = C$
De lo contrario $T_m = 4 + E$
Si T_m es menor que A entonces $T_m = A$
De lo contrario $T_m = C$.

Una vez hechas las consideraciones anteriores se aplican las mismas fórmulas que para el primer caso.

Otros métodos de cálculo de horas frío

Por su parte, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias de México (INIFAP) tiene en su portal electrónico un calculador de horas frío por varios métodos o modelos dentro de los cuales se encuentran:

- 1) Método de Bajas Necesidades de frío (Florida).
- 2) Método de Carolina del Norte (Shaltout y Unrath, 1983)
- 3) Método Dinámico Sudáfrica I.
- 4) Método Dinámico Sudáfrica II (Erez y Couvillon, 1987)
- 5) Método de Richardson (1974).
- 6) Método Utah.

Estos métodos generalmente fueron propuestos para altas latitudes y climas fríos bien definidos donde en lugar de tomar todas las horas por debajo de un umbral (7°C), consideran temperaturas óptimas para la acumulación de frío. Por ejemplo Erez y Lave (1971), establecieron que la temperatura óptima para acumular frío y romper el reposo es de 6°C, en donde una hora de exposición de las yemas a esta temperatura equivale a una hora de eficiencia absoluta. Por otra parte, mencionan que cuando la temperatura sube a 10°C la

eficiencia se reduce, siendo equivalente a 0.5 horas frío. De acuerdo a esto se hace una ponderación de eficiencia según la temperatura registrada.

Por su parte el método Utah no solo pondera la eficiencia de la temperatura sino también puede haber una anulación del frío acumulado por la presencia de temperaturas por arriba de los 16°C, por lo que en climas como los de México que después de una cierta acumulación de frío en la noche, pueden presentarse temperaturas en el día por arriba de 16°C que anulan el frío acumulado.

Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló en el Campus central de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) cuyas coordenadas son: 19° 29' 13'' de Latitud Norte y 98° 53' 21'' de Longitud Oeste, y a una altura promedio sobre el nivel del mar de 2,253 metros, dentro del Campo Experimental "San Ignacio" perteneciente al Departamento de Preparatoria Agrícola. Se aprovechó la Estación Meteorológica Automática "San Ignacio", y se complementó la información con datos de la Estación Meteorológica Automatizada "Chapingo" (OCAVM) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se hicieron los cálculos con los métodos indirectos más conocidos y se compararon los resultados. Posteriormente se generaron dos modelos matemáticos para el cálculo de las horas frío para las condiciones de la localidad en estudio a los cuales se le denominó "Método Chapingo" y se desarrolló un programa de computadora para hacer el cálculo de las horas frío con el Modelo I del Método Chapingo en un periodo histórico desde el año de 1954 hasta el 2017. Finalmente, también se realizaron observaciones del comportamiento de desarrollo en el Huerto Frutícola Experimental "San Ignacio" donde se cuenta con árboles de manzano, durazno, ciruelo, chabacano, cerezo, capulín y peral de diversas variedades con diferentes requerimientos de frío.

Clima

El clima del sitio del proyecto tiene la fórmula Cw (w₁) (w) (i') y está caracterizado por ser templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano, con una relación P/T= 43.2, un porcentaje de lluvia invernal del 3.7% y una oscilación térmica anual de 6.1°C, de acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificado por García (1980) para las condiciones de la República Mexicana. El promedio anual de temperatura es de 15.9°C y un promedio de precipitación total anual de 691.5 mm. En la Figura .2 se presenta el climograma del sitio.

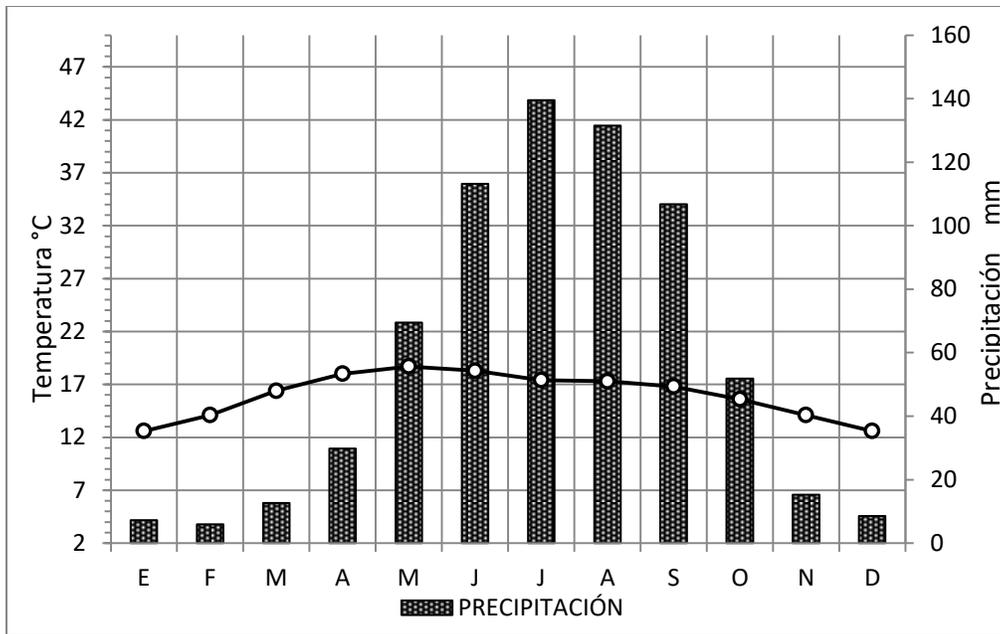


FIGURA 1. Gráfica de temperatura y precipitación de Chapingo, México.

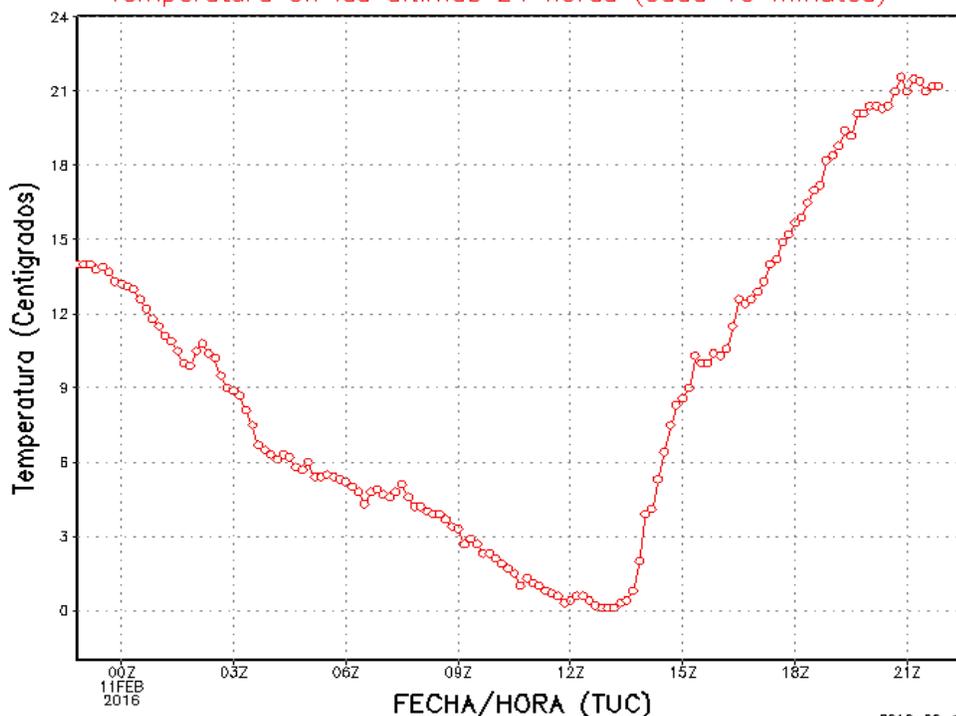
Metodología

Los datos de temperatura fueron obtenidos del portal del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (México) y de la Estación Meteorológica Automática "San Ignacio" de la Universidad Autónoma Chapingo, con el programa *Weather Link 6.03* de Davis Instruments (E.U.A.).

Se realizó la determinación de las horas por debajo de una temperatura de 7°C directamente de las gráficas de registro de temperatura de cada 10 minutos de todos los días de los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero de los ciclos de 2015-2016 y 2016-2017, este procedimiento nos brindó los datos de las horas frío acumuladas diariamente, por mes y el total del periodo de estudio. Luego se hicieron los cálculos con las fórmulas de Weinberger, Da Motta, Sharpe, Crossa-Raynaud, Torres-Ruiz, Morales, Gómez y Morales, en sus modalidades de cálculo diario y de cálculo mensual, y se recurrió al calculador de horas frío del INIFAP para obtener los datos de los otros métodos. Una vez obtenida la información se procedió a comparar los resultados calculados y consultados con el valor determinado directamente de las gráficas del termógrafo.



Estación: MX25 – CHAPINGO, ultimo dato: 11/02/2016 22:40 TUC
Temperatura en las ultimas 24 horas (cada 10 minutos)



GRADS: COLA/IGES

2016-02-11-23:17

FIGURA 2. Gráfica de la marcha de la temperatura diaria.

Resultados y discusión

Horas frío determinadas directamente de las gráficas del termógrafo o método directo.

El total de horas frío que se acumularon en Chapingo, México en el invierno 2015-2016 registradas directamente de la estación automática del Campo Experimental "San Ignacio" fue de 321.45. Como se observa en la gráfica, la distribución diaria de horas frío no es homogénea en los meses considerados.

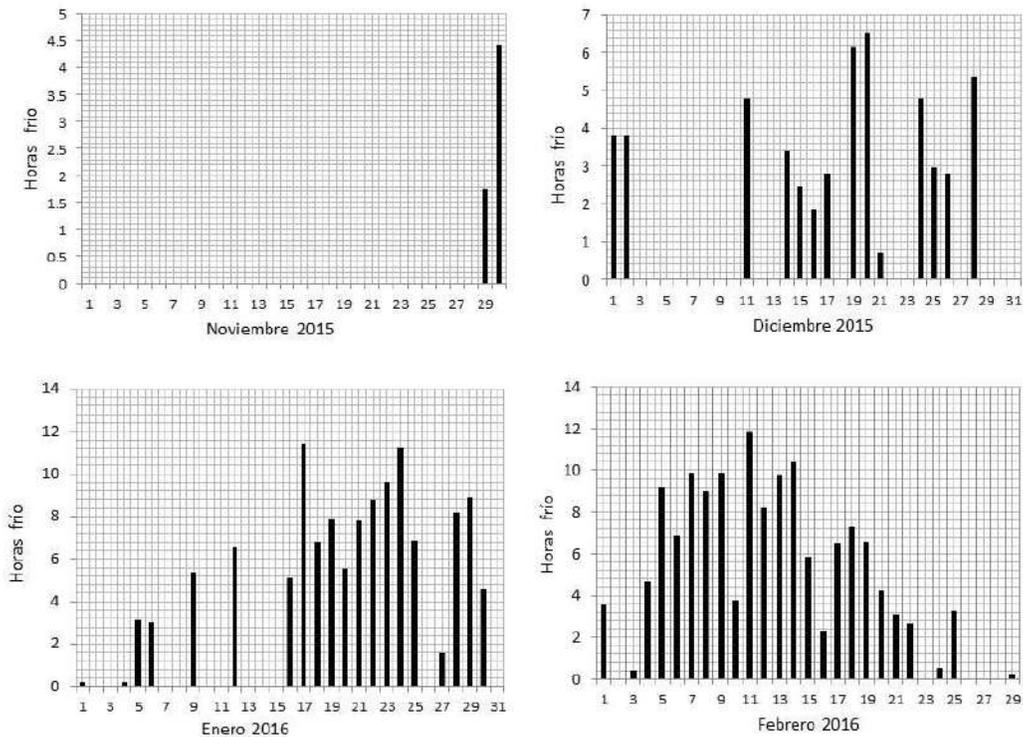


FIGURA 3. Distribución diaria de horas frío en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero del ciclo 2015- 2016 en Chapingo, México.

En el mes de noviembre, que es cuando la temperatura comienza a descender, se observó que solo en los dos últimos días de ese mes hubo acumulación de frío. En el mes de diciembre, las horas frío se presentaron con una distribución irregular, observándose que no todos los días se acumulan las horas frío. En el mes de enero la acumulación de horas frío fue mayor en la segunda quincena, a partir del día 17 de enero, y finalmente, las horas frío en el mes de febrero se concentró del día cuatro al día veinte, al final del mes la temperatura comenzó a elevarse paulatinamente. La distribución mensual del frío se muestra en la siguiente Figura:

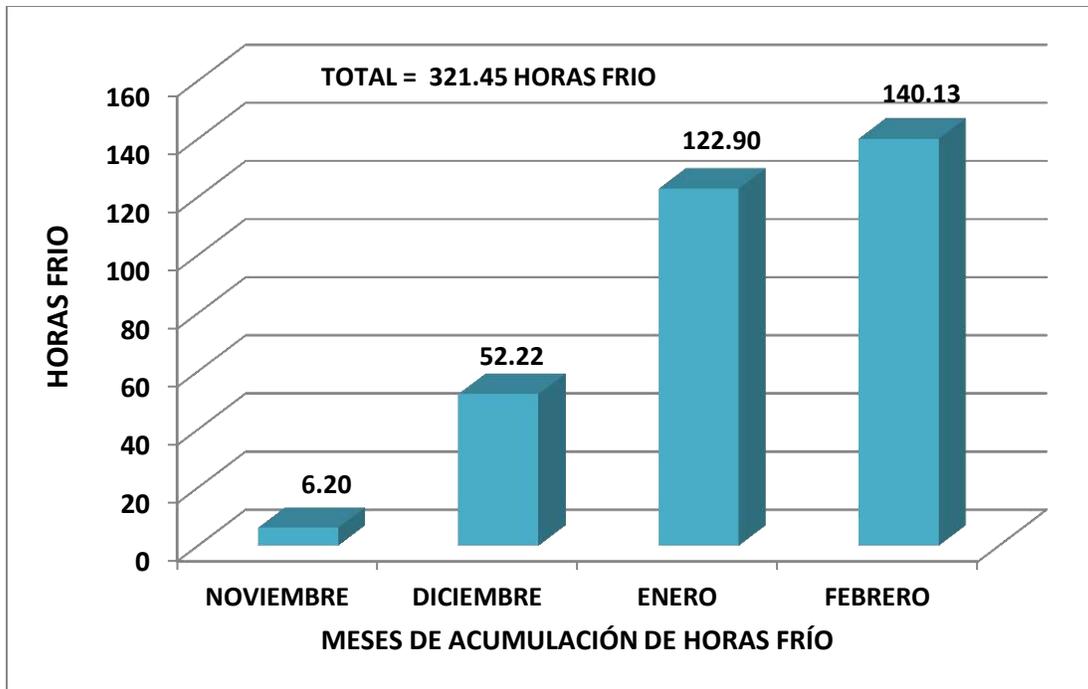


FIGURA 4. Distribución mensual de horas frío en Chapingo, México (2015-2016).

Los resultados de método directo y los de los cálculos de horas frío por los métodos indirectos, así como de la consulta al contador de horas frío del portal electrónico del INIFAP, se presentan en el siguiente Cuadro:

CUADRO 1. Horas frío observadas y calculadas por métodos indirectos en Chapingo, México (2015-2016).

Método	Mes				Total
	noviembre	diciembre	enero	febrero	
Directo	6.20	52.22	122.90	140.13	321.45
Weinberger	---	----	----	----	396.78*
Da Motta	11.66	68.71	114.34	80.17	274.83
Sharpe	91.02	157.03	209.85	170.24	628.13
Crossa Raynaud	4.61	37.11	98.03	98.57	238.33
Torres-Ruiz	91.20	157.20	210.00	170.40	628.80
Morales	82.30	151.18	206.28	164.95	604.70
Gómez y Morales (cálculo diario)	4.76	40.59	99.79	103.90	249.04
Gómez y Morales (cálculo mensual)	3.8	17.30	70.34	115.92	207.36
Bajas necesidades de frío (Florida)	6.90	64.00	156.02	83.23	310.15
Carolina del Norte	1.22	33.06	101.12	39.68	175.08
Dinámico Sudáfrica I	96.76	215.46	261.29	230.99	804.50
Dinámico Sudáfrica II	4.96	43.39	104.68	58.25	211.28
Richardson	2.21	34.34	89.18	38.58	164.31
Utah	3.16	37.55	93.76	55.55	190.02

*Con el método de Weinberger solo es posible obtener el total.

Como se puede observar, los valores de horas frío calculados varían de los valores obtenidos por el método directo. Los valores resultantes de los métodos de Bajas necesidades de frío (Florida), Weinberger y Da Motta se aproximan, siendo el primero de ellos el que da un valor muy cercano al total observado. Sin embargo, cuando se analiza la distribución diaria nos percatamos que éste método adjudica acumulación en días que no se observaron horas frío, y por otro lado, indica que no se presentaron horas frío, cuando el método directo si las registra. Es decir, el dato total de horas frío coincide con el observado, pero no tiene precisión en la distribución diaria, ni mensual.

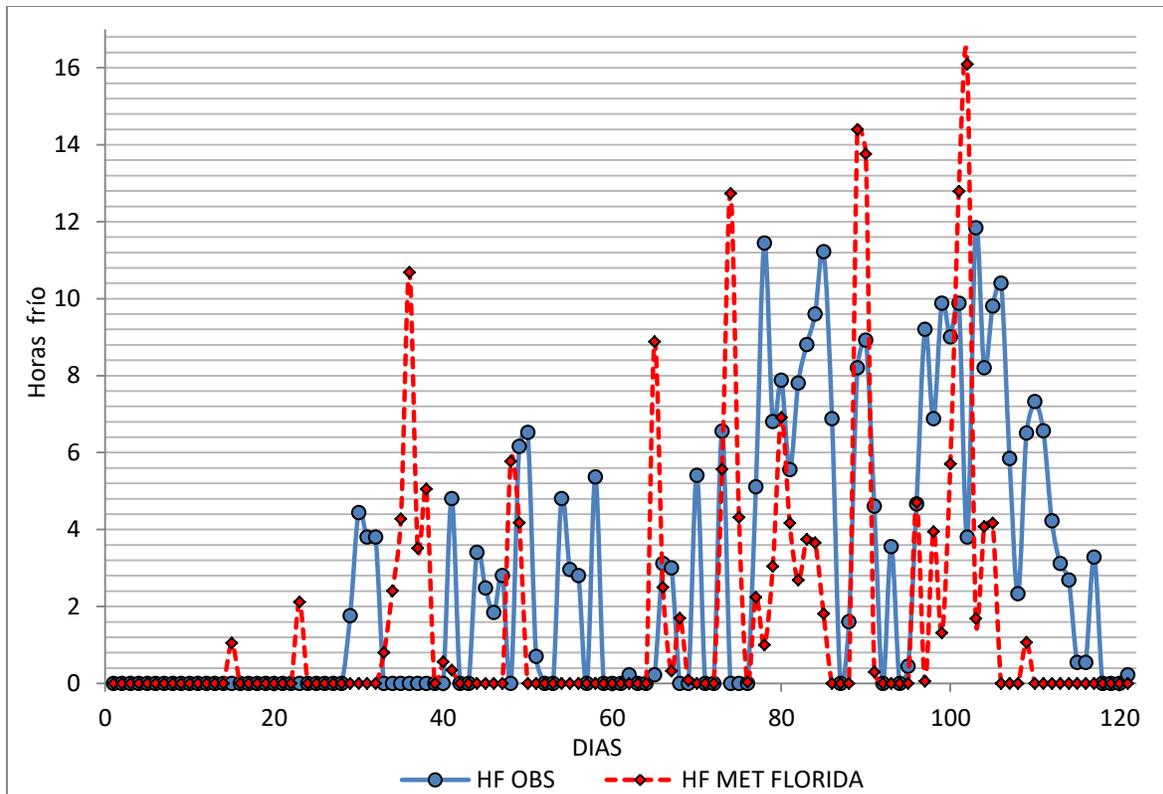


FIGURA 5. Horas frío diarias observadas y cuantificadas por el método de Bajas necesidades de Florida en Chapingo, Méx., (2015-2016).

Quedan los métodos de Weinberger y de Da Motta. El primero con un valor más alto (396.78), y el segundo con un valor más bajo (274.83) que el observado (321.45). Los demás métodos no resultan muy confiables dada la gran discrepancia con relación a los resultados obtenidos por el método directo.

Si hacemos un promedio de los totales de los dos métodos mencionados, nos da un valor bastante aproximado al real (335.80). Romo, citado por Ortiz (1987), indica que el método de Da Motta es el que da mejores resultados para las condiciones de la República Mexicana, y que si los promediamos con los valores del método de Weinberger, se obtendrán indicadores precisos y apegados a la realidad. Lo anterior no deja de ser una manera artificiosa de ajustar los valores de los métodos indirectos a los datos observados.

La gran mayoría de los textos y artículos que tratan este tópico, mencionan al método de Da Motta como el más adecuado para hacer cálculos de horas frío. Elox, *et al.*, (1989), hace una comparación de los resultados de algunos métodos indirectos de horas frío para Chapingo, Méx., para cuatro años en el

periodo que va de 1978 a 1987, y concluye que el mejor método es el de Carolina del Norte. Lo que este autor hace es comparar resultados de los métodos de Da Motta, Weinberger, Sharpe, Crossa-Raynaud y de Carolina del Norte, con el método directo; pero tomando como temperatura umbral, no 7°C, sino, 10°C. Este es un notable caso de error de metodología, que hace que sus conclusiones sean incoherentes e inútiles para fines científicos y prácticos.

Pero además, este investigador y sus colaboradores, llaman método directo, no a un procedimiento que registra los datos de las horas frío directamente del termógrafo, sino a otro método indirecto al citar en su publicación: "...dado que el método directo utiliza la temperatura horaria, las cuales no están disponibles en las estaciones meteorológicas, se procedió a estimarlas a través de un modelo matemático elaborado en programación Basic denominándose este modelo del triángulo ajustado..."(Elox, et al.,1989).

Gómez y Morales (1983), proponen dos modelos matemáticos para el cálculo de las horas frío y sus resultados los comparan con los métodos de Da Motta, Crossa-Raynaud, Weinberger y Sharpe para la Ciudad Universitaria, UNAM. El primer método de cálculo diario tiene diferencias que varían entre 90 y 100 horas frío con relación a los datos observados. Su segundo modelo de cálculo mensual no se puede aplicar sin hacer ajustes.

Al observar que ningún método indirecto reportado en la literatura presenta una exactitud aceptable para el cálculo de las horas frío, generamos un modelo matemático que se basa en la correlación de las temperaturas mínimas diarias y las horas frío, al cual denominamos, Método Chapingo.

Método Chapingo para el cálculo de las horas frío para las condiciones de México.

Se propone un método sencillo que nos ahorra el trabajo de analizar día por día los registros de temperatura del termógrafo y que predice resultados muy cercanos a los valores reales. Este método se basa en el registro de las temperaturas mínimas diarias de los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero. El cálculo se realiza solo tomando en consideración las temperaturas mínimas de los días debajo de los 7°C. Es decir, a una temperatura de 7°C o mayor, no hay acumulación de frío. Para el cálculo de las horas frío que se presentan cada día, el valor de la temperatura mínima (<7°C) se sustituye en la siguiente fórmula:

$$H.F. = 9.942 - 1.2475 (T_m < 7^\circ C)$$

Dónde: H.F.= Número de horas frío del día.

T_m = Temperatura mínima del día menor de 7°C.

Insistimos, cuando en un día se presenta una temperatura mínima de 7°C o mayor, no se realiza el cálculo porque no hay acumulación de horas frío. Cuando ya hemos realizado el cálculo para todos los días en el periodo comprendido entre el 1 de noviembre y el 28 o 29 de febrero, se suman las horas frío de todos los días con temperaturas mínimas por debajo de los 7°C y se registra el total.

Comparación de las horas frío observadas y los datos del modelo.

Tomando los datos de las temperaturas mínimas del periodo comprendido en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, se registraron 60 días con temperaturas mínimas que oscilaron entre -1.1 y 6.9°C. Se realizó el procedimiento de cálculo y se obtuvieron los siguientes resultados:

CUADRO 2. Comparación de los valores de horas frío por el Método Chapingo y los valores del registro directo del termógrafo (Ciclo 2015-2016).

Mes	Método Directo	Distribución %	Método Chapingo	Distribución %	Diferencia
Noviembre	6.20	1.93	7.6585	2.38	1.4585
Diciembre	52.22	16.24	55.23125	17.20	3.01125
Enero	122.90	38.23	118.002	36.70	-4.898
Febrero	140.13	43.60	140.5545	43.72	0.4245
Total	321.45	100	321.446	100	-0.004

Análisis de varianza del modelo de regresión lineal.

En el Cuadro No. 3 se presentan los resultados del análisis de varianza del modelo de regresión lineal simple para la correlación de las temperaturas mínimas (x) y las horas frío (y).

CUADRO 3. Análisis de varianza del modelo de regresión lineal simple.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F_0	Valor F $P=(\alpha=0.01, 1, 58)$
Regresión	455.904	1	455.904	204.99	4.001
Error	128.9975	58	2.224		
Total	584.9015	59			

El modelo de regresión lineal simple entre la variable independiente x, temperaturas mínimas, y la variable dependiente y, horas frío, es significativo a nivel de $\alpha = 0.01$, lo que indica que las temperaturas mínimas determinan las horas frío, y que este modelo explica la acumulación de frío con una alta probabilidad.

Los valores resultantes de la aplicación del Método Chapingo no presentan diferencias estadísticas significativas, tanto en la distribución mensual como en el total, por lo que se puede decir que tiene gran exactitud, con una diferencia de 0.004 hora frío en el total.

Existe una fuerte tendencia de correlación ($R^2=0.7798$) entre las temperaturas mínimas del día y las horas frío que se presentan. A menor temperatura mínima se presentan más horas frío.

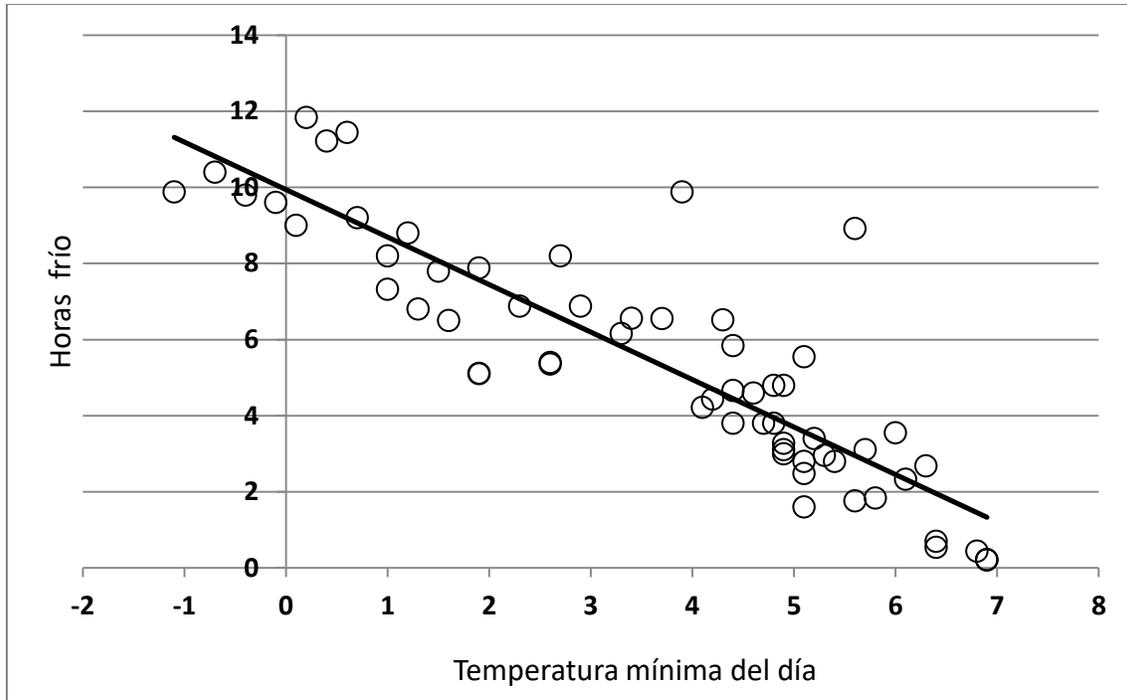


FIGURA 6. Gráfica de correlación entre las temperaturas mínimas y las horas frío.

Aunque este modelo matemático logra gran exactitud, cuando se trata del total de horas frío, existen algunas diferencias significativas entre los valores observados y los valores calculados de algunos días.

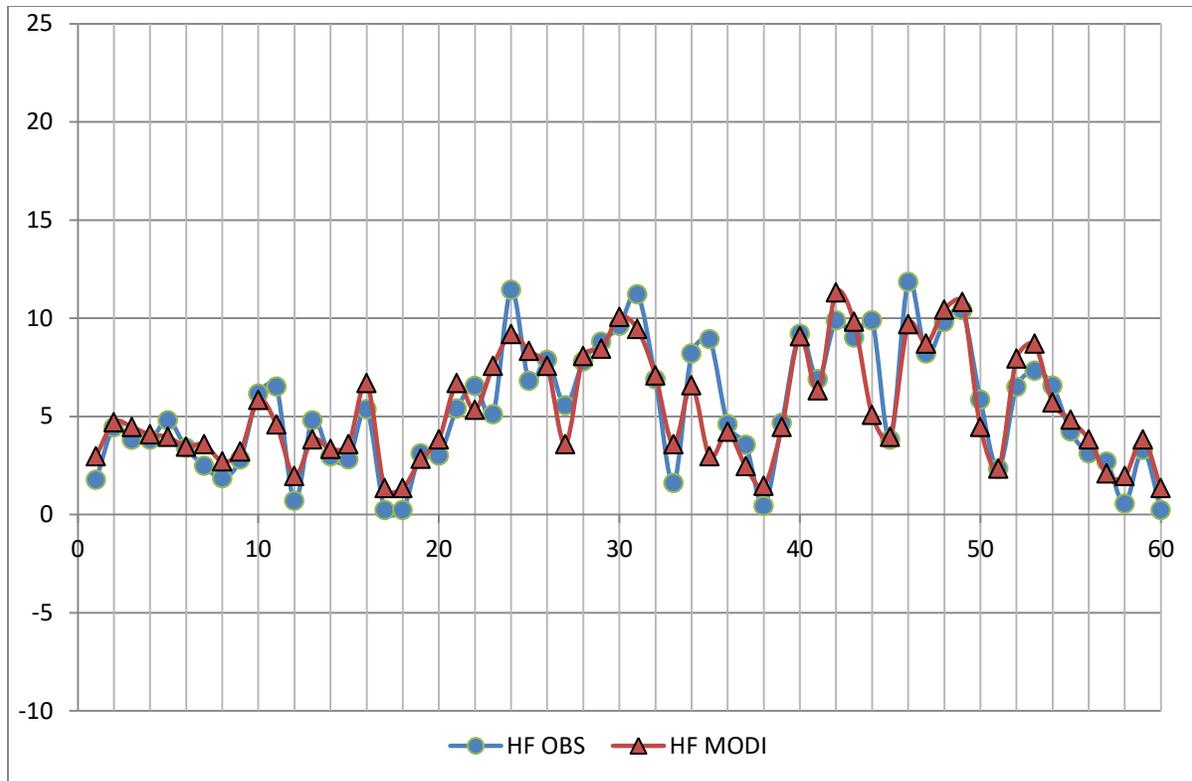


FIGURA 7. Distribución diaria de horas frío en Chapingo, México (2015-2016) calculada con el Método Chapingo y la obtenida por el método directo.

Para reducir estas diferencias diarias, procedimos a introducir más variables a otro modelo matemático, además de la temperatura mínima del día, como son: la temperatura máxima del día, la temperatura máxima del día anterior y algunas constantes que reducen las diferencias diarias entre los valores de horas frío del modelo I y las horas frío observadas. Como las condiciones climáticas son muy variables día a día, éstas constantes se ajustan para cada mes. De esta manera, se generó el modelo II del Método Chapingo, cuya ecuación se presenta a continuación:

$$\text{Horas frío} = (7 - T_{\min}) \left[\frac{a}{(T_{\text{Max1}} - T_{\min})} + \frac{b}{(T_{\text{Max2}} - T_{\min})} \right]$$

Dónde: 7= Valor de temperatura debajo de la cual se acumulan horas frío (7°C).

T min= Temperatura mínima del día (°C).

T Max1=Temperatura máxima del día (°C)

T Max2= Temperatura máxima del día anterior (°C).

a y b = Constantes para cada mes que representan la influencia de otros factores climáticos y que reducen la desviaciones diarias.

Se procede de la misma manera que con en el modelo I y se calculan las horas frío de cada día que se presentan temperaturas mínimas menores a 7°C. Posteriormente se suman todos los valores diarios para obtener el total.

En el siguiente Cuadro se presentan los valores de las constantes climáticas para cada mes de este modelo matemático.

CUADRO 4. Valores de las constantes climáticas para cada mes

Mes	a	b
Noviembre	12.3	19.3
Diciembre	12.0	20.3
Enero	12.0	18.5
Febrero	12.0	21.8

Comparación de las horas frío observadas y los datos calculados del modelo II.

La aplicación del modelo II del Método Chapingo nos arroja coincidencias en el total de horas frío de los cuatro meses, en el total mensual de horas frío y una buena exactitud en las horas frío que se acumulan diariamente. Con esto es posible decir que el modelo II es más adecuado para pronosticar la acumulación de frío de cada día y de cada mes.

CUADRO 5. Comparación de los valores de horas frío por el Modelo II y los valores del registro directo del termógrafo.

Mes	Método Directo	Distribución %	Método Chapingo Modelo II	Distribución %	Diferencia
Noviembre	6.20	1.93	6.25	1.94	0.05
Diciembre	52.22	16.24	52.26	16.21	0.04
Enero	122.90	38.23	123.23	38.23	0.33
Febrero	140.13	43.60	140.60	43.62	0.47
Total	321.45	100	322.35	100	0.9

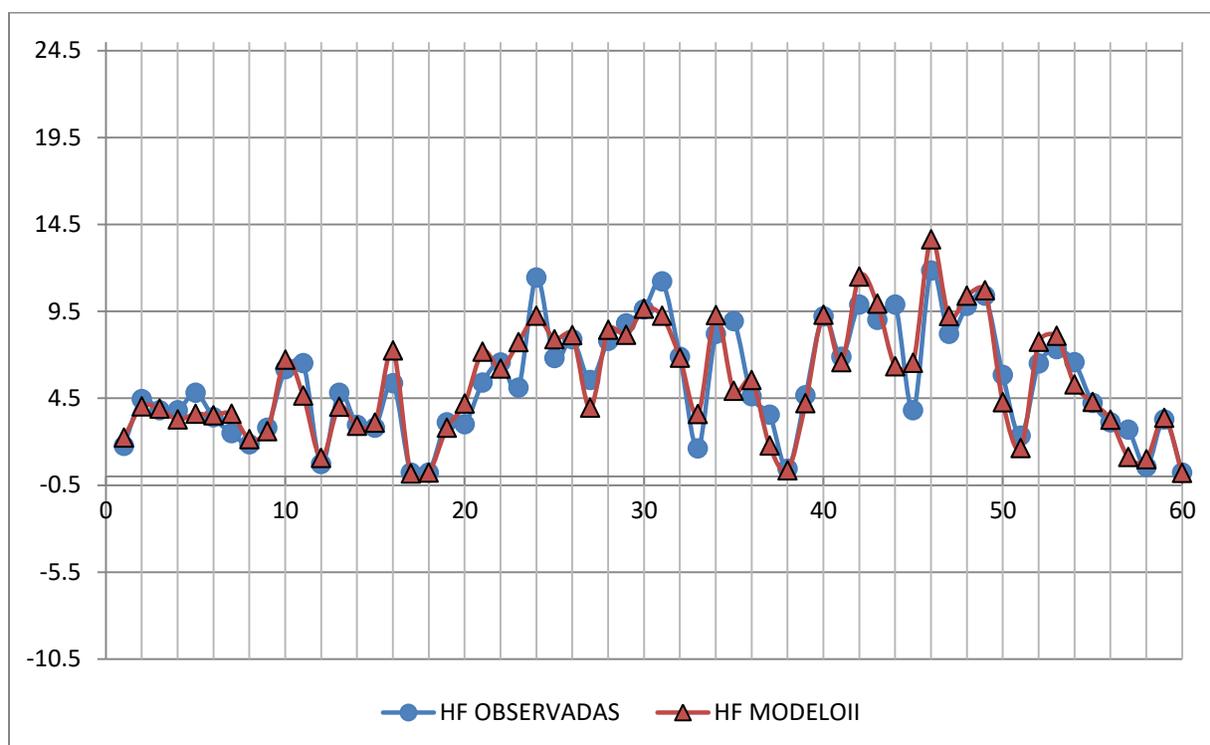


FIGURA 8. Distribución diaria de horas frío en Chapingo, Méx., (2015-2016) calculada con el Modelo II del Método Chapingo y la obtenida por el método directo.

Análisis de residuos del modelo II.

En la Figura 9 se presenta la gráfica de residuos o diferencias entre los valores calculados del modelo II y los datos de horas frío registradas.

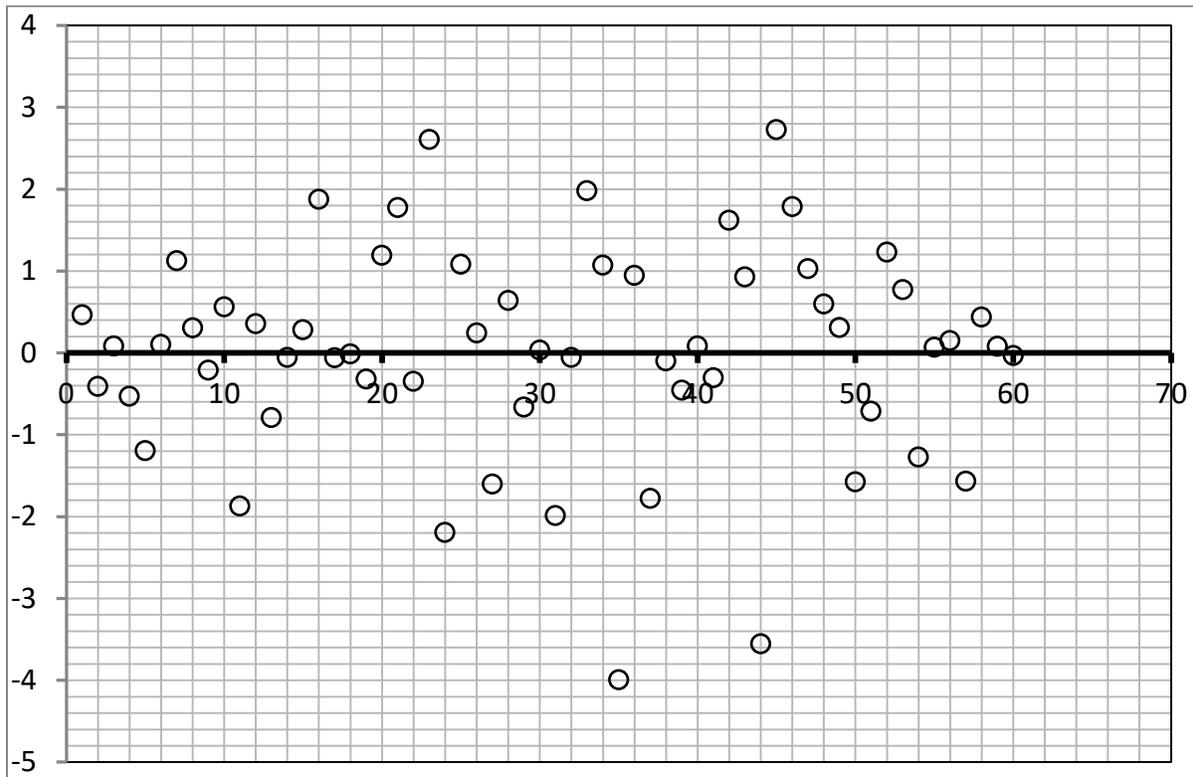


FIGURA 9. Gráfica de residuos de los valores calculados de horas frío con el modelo II del Método Chapingo y los valores observados

El análisis de los residuos nos muestra que no existen tendencias de las diferencias entre los valores calculados con el modelo II y los valores del método directo, lo que indica que el error es aleatorio.

En el ciclo de invierno 2016-2017, se procedió nuevamente al registro directo de las horas frío y se aplicaron los dos modelos del Método Chapingo. En el Cuadro 6 se resumen los resultados de los cálculos y se comparan los totales registrados directamente:

Cuadro 6. Comparación de las horas frío registradas por el método directo y las calculadas por los dos modelos del método Chapingo y los otros métodos indirectos en Chapingo, México (ciclos 2015-2016 y 2016-2017).

Método	Total de horas frío		Error absoluto	
	2015-2016	2016-2017	2015-2016	2016-2017
Directo	321.45	502.90	0	0
Modelo I. Método Chapingo	321.44	502.60	-0.01	-0.3
Modelo II. Método Chapingo	322.35	511.61	0.9	8.71
Weinberger	396.78	421.82	75.33	-81.08
Da Motta	274.83	366.28	-46.62	-136.62
Sharpe	628.13	740.34	306.68	237.44
Crossa-Raynaud	238.33	420.62	-83.12	-82.28
Torres-Ruiz	628.80	741.00	307.35	238.1
Morales	604.70	725.60	283.25	222.7
Bajas necesidades de frío (Florida)	310.15	248.37	-11.3	-254.53
Carolina del Norte	175.08	120.42	-146.37	-382.48
Dinámico Sudáfrica I	804.50	901.16	483.05	398.26
Dinámico Sudáfrica II	211.28	153.43	-110.17	-349.47
Richardson	164.31	95.94	-157.14	-406.96
Utah	190.02	137.70	-131.43	-365.2

En la Figura 10 se muestra la gráfica de los errores relativos porcentuales de cada uno de los métodos, siendo los modelos I y II, los que presentan un menor error relativo porcentual para los dos ciclos de estudio.

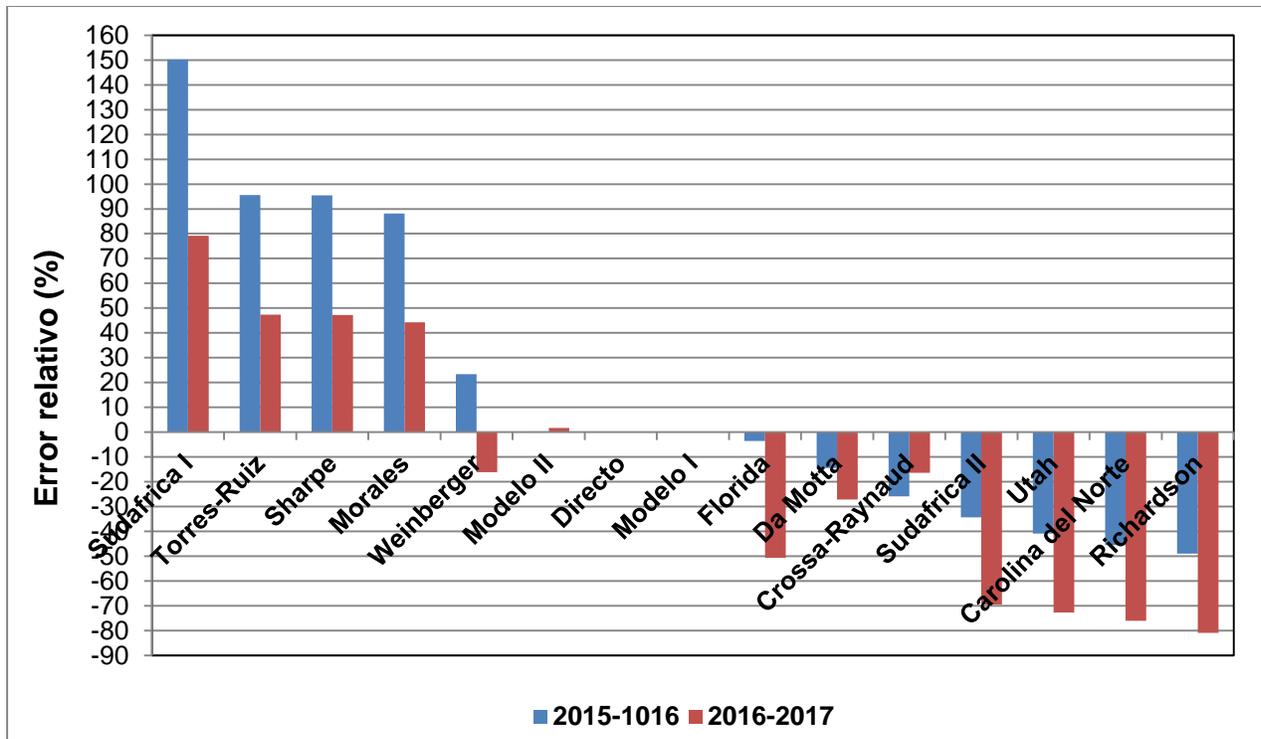


FIGURA 10. Error relativo porcentual de las horas frío calculadas por los métodos indirectos comparados con el registro del método directo en Chapingo, México (2015-2016 y 2016-2017).

Los dos modelos del Método Chapingo brindan gran exactitud por lo que pueden ser utilizados indistintamente. Para mayor facilidad de cálculo, se puede utilizar el Modelo I que solo utiliza los datos de la temperatura mínima diaria y su fórmula es simple.

Para mayor facilidad de cálculo, se generó un programa de computación para calcular las horas frío con el modelo I del Método Chapingo, con el que solo basta introducir los datos de las temperaturas mínimas diarias y nos devuelve los datos del día, del mes y el total para los cuatro meses, al igual que su distribución mensual porcentual.

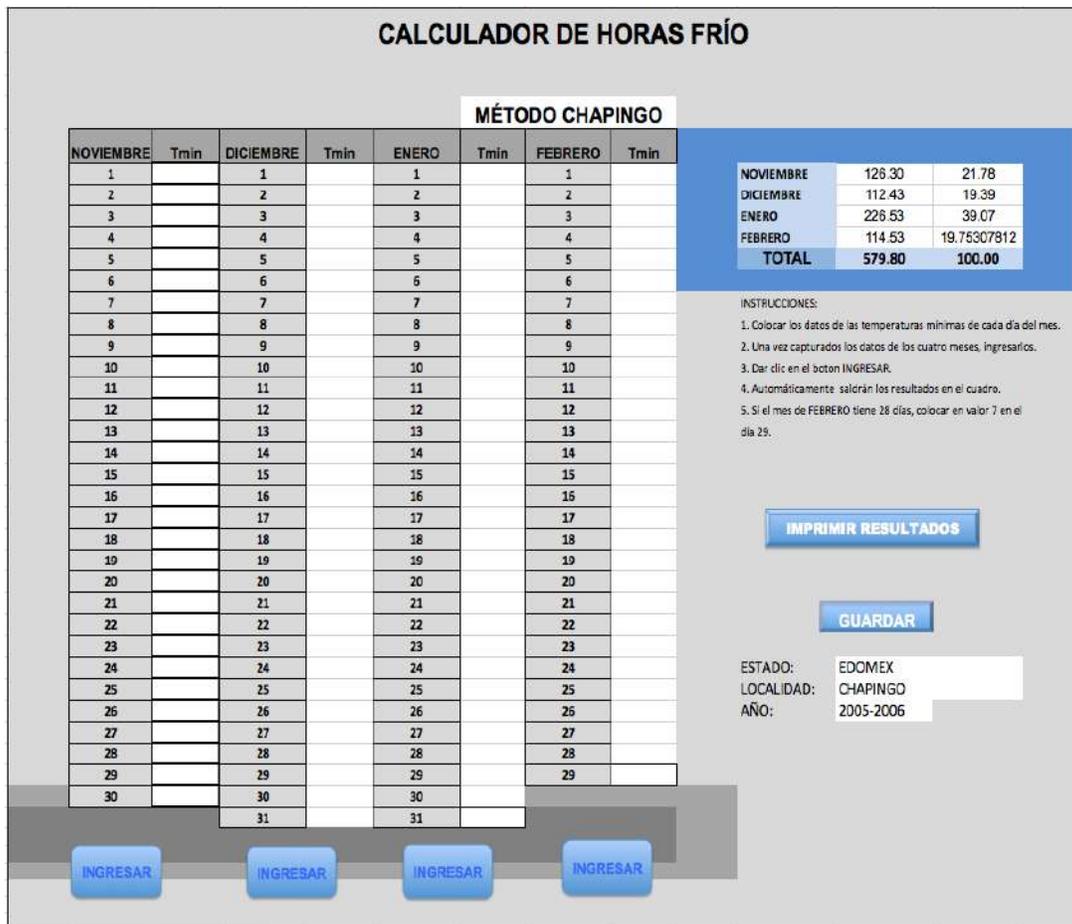
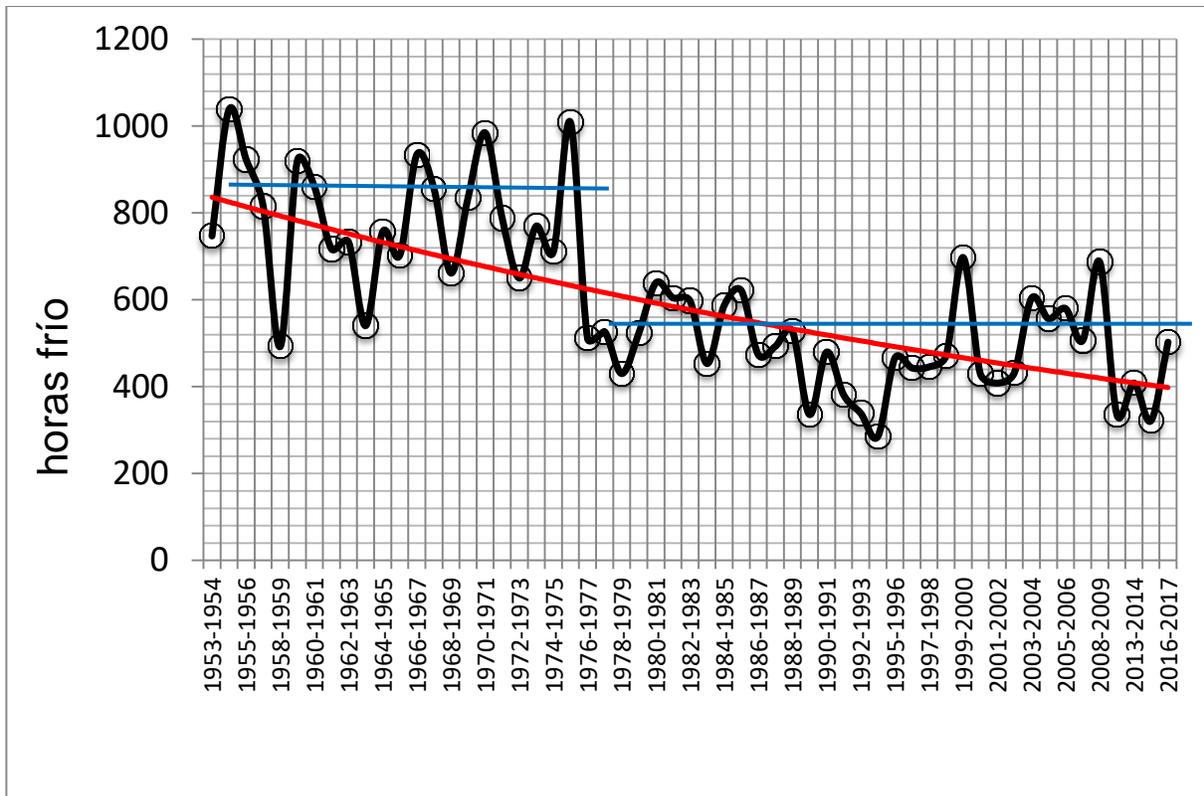


FIGURA 11. Calculador de horas frío con el Modelo I del Método Chapingo.

Ya que el Método Chapingo tiene la virtud de ser exacto, comparado con los métodos indirectos existentes, se procedió a realizar el cálculo de las horas frío en Chapingo, México, a partir del año de 1953-1954 hasta el ciclo 2016-2017 con la fórmula del Modelo I. Los resultados se presentan en la Figura 12.



* Existen algunos años en los que no se tuvieron los datos de las temperaturas mínimas diarias por lo que no se hizo el cálculo.

FIGURA 12. Horas frío en Chapingo, México, durante el periodo de 1953-1954 a 2016-2017, calculadas con el Método Chapingo.

Para el periodo comprendido entre 1953 a 2017, tenemos que la acumulación promedio fue de 606.17 horas frío. Se observan dos periodos muy marcados, el primero de 1953-1976, que tiene una media de 793.03 horas frío, y el segundo de 1977-2017, que tiene una media de 488.71 horas frío. También existe una tendencia hacia la disminución del frío invernal. La diferencia entre el primer y segundo periodo es de 304.32 horas frío.

Es importante resaltar la gran irregularidad de la acumulación de frío, existen fluctuaciones muy marcadas de año a año, y para fines frutícolas es necesario tomar el valor más bajo que denominaremos *la base límite de frío*, que es el valor más bajo en el periodo histórico, que en este caso es de 285.32 horas frío. Este valor es el que tiene más probabilidades de ocurrir, y su valor práctico es mayor que el de la media de todo el periodo de estudio.

Observaciones de campo de la respuesta de variedades de manzana y pera y la acumulación de frío.

Se hicieron observaciones a diferentes especies frutícolas en el Huerto Experimental de árboles frutales de "San Ignacio" (datos no presentados), donde se cuenta con ejemplares de manzano, peral y durazno y se pudo constatar que la cantidad de frío que se acumula en Chapingo, México., condiciona su comportamiento fenológico, desarrollo y producción.

En la práctica observamos que las variedades de bajos requerimientos de frío son las que pueden desarrollarse regularmente, mientras que las variedades de medio y alto requerimiento presentan problemas de brotación, desarrollo y producción.

En general, las variedades de manzana de muy bajos requerimiento de frío como 'Anna', tienen una brotación de alrededor del 70% y muy precoz (principios de enero a la segunda quincena de febrero), pero perales del cultivar 'Precoz de Trevox' de bajos requerimientos (660 horas frío), al mes de mayo no presentaron brotación de yemas. En el caso de la variedad de manzana 'Tropical Beauty', presentó una rala brotación de yemas (solo las partes apicales de la rama) del orden de 10%. Existe una concordancia entre los porcentajes de brotación y la acumulación de frío invernal en Chapingo, México.



FIGURA 13. Comportamiento de algunas variedades y especies frutícolas en el Huerto de árboles frutales caducifolios de “San Ignacio”, Chapingo, México, a) Manzana var. ‘Anna’ con requerimiento de 300 horas frío, b) Durazno var., ‘Flordabelle’ de 150 horas frío, c) Peral var., ‘Precoz de Trévox’ de 660 horas frío, d) Manzana var., ‘Tropical Beauty’ de 400 horas frío. (Mayo de 2016).

Conclusiones

Por muchos años en México hemos estado utilizando métodos indirectos de cálculo de horas frío debido a la falta de termógrafos en la mayoría de las estaciones meteorológicas. Sin embargo, estos métodos, que han sido desarrollados para otras condiciones climáticas; producen valores diferentes según el método que se use. Los modelos que ponderan la eficiencia de la temperatura son menos recomendables para nuestras condiciones ya que frecuentemente dan resultados muy variados.

La acumulación de horas frío en Chapingo, México, es muy irregular a lo largo de los años y tiene una tendencia marcada a decrecer para los próximos años. El valor de la media de horas frío no es un referente a considerar para los proyectos frutícolas. El valor de la base límite de frío (BLF) puede ser de mayor utilidad.

A pesar de que los métodos de Weinberger y de Da Motta no son exactos se continúan utilizando para estudios de acumulación de frío con el bajo grado de confiabilidad que esto produce, al menos para la localidad bajo estudio.

El Método Chapingo es fácil de aplicar y puede ser de ayuda en los sitios del Valle de México donde no hay estaciones meteorológicas o no poseen termógrafo. Con la ayuda de un simple termómetro de máximas y mínimas podemos calcular las horas frío con gran precisión y así tomar decisiones sobre las especies y variedades frutícolas a establecer.

Los modelos del Método Chapingo podrán ser evaluados para otras regiones templadas de México y determinar su posible utilidad.

Agradecimientos

Agradecemos a los ingenieros Ulises Iván López Reyes y Alexander Martínez Hernández de la Academia de Meteorología del Área de Agronomía de la Universidad Autónoma Chapingo por su amable cooperación para ponernos a disposición los datos de la Estación Automática "San Ignacio".

Literatura citada

- Almaguer, V.G. (1991). Fruticultura General. Departamento de Fitotecnia. Ed. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Calderón, A. E. (1986). Fruticultura General. El Esfuerzo del Hombre. 3ª. Edición. Ed. Limusa. México.
- Elox, L.F., Almaguer, V.G., y Corona, S.T. (1989). Modelos matemáticos para cuantificar frío y predecir brotación en manzano *Malus pumila* Mill., cultivar Tropical Beauty y

- ciruelo *Prunus salicina* Lindhl, cultivar Shiro en Chapingo, Méx. *Revista Chapingo*. Años XIII-XIV. Núms. 62-63. Oct. – Dic. 1988. Ene.-Mar. 1989. p 86-89.
- Erez, A. & Lavee, S. (1971). The effects of climatic conditions on dormancy development of peach buds. I. Temperature. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 96:711-714.
- Erez, A., Couvillon, G.A. & Hendershot, C. (1979). Quantitative chilling enhancement and negation in peach buds by high temperature in daily cycle. *Jour. Amer. Soc. Hort. Sci.* 104(4):536-540.
- Da Motta, F.S. (1957). Os invernos de Pelotas, R.S., em relacao as exigencias as arvores frutiferas de folha caduca. *Boletim Técnico*. Instituto Agronômico do Sul, Pelotas. Brasil. 38 p.
- Díaz, M. D. H. (1987). Requerimiento de frío en frutales caducifolios. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. México. 54 p.
- Ortiz, S. C.(1987). Elementos de Agrometeorología Cuantitativa. Ed. Universidad Autónoma Chapingo.
- Richardson, E. A., Seeley, S.D. & Walker, D. R. (1974). A model for estimating the completion of rest for 'Redehaven' and 'Elberta' peach trees. *HortScience*. 9(4):236-237.
- Ruiz, C. J. A., Jiménez, L. A., Valenzuela, L. J., Núñez, M. J. H., García, R. G. E., Ruiz, A. O. y Grageda, G. J. (2016). Efecto del cambio climático en la acumulación de horas frío en la región nogalera de Hermosillo, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* [en línea].
- Shaltout, A.D. & Unrath, C.R. (1983). Rest completion model for 'Starkrimson Delicious' apples. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 108(6):957-961.
- Sharpe, R.H., Sherman, W.B. & Martsilf, D. (1990). Peach cultivars in Florida and their chilling requirements. *Acta Hort.* 279:191-197.
- Weinberger, J.H. (1950). Chilling requirement of peach varieties. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 56:122-128.