

# LA PREDICCIÓN DE LAS HELADAS Y SU SEGUIMIENTO

## EL VALOR DE LA PREDICCIÓN DE LAS HELADAS

Evaluar el valor de la predicción de las heladas implica análisis complejos de toma de decisiones, que utilizan la economía y las probabilidades condicionales. La predicción precisa de heladas puede potencialmente reducir el daño por heladas, ya que proporciona una oportunidad a los agricultores de prepararse contra ellas. En este capítulo se presenta y se discute el valor de la predicción de heladas, algunos modelos actualmente utilizados para predecirlas, y un modelo sencillo para la predicción de la temperatura mínima durante una helada de radiación al nivel de explotación agrícola.

Mientras que el análisis de decisiones se utiliza en muchas disciplinas, su aplicación a la predicción de las heladas es escasa. Artículos de Banquet, Halter y Conklin (1976) y Katz, Murphy y Winkler (1982) tratan sobre el uso del análisis de decisiones para evaluar la relación coste efectividad de la predicción de heladas. Katz, Murphy y Winkler (1982) investigaron con detalle el valor de la predicción de las heladas en el valle Yakima en el estado de Washington, EE.UU. Este valle es bien conocido por la producción de manzanas y, en menor medida, de peras y de melocotones. El valle es también notorio por un problema de heladas frecuentes durante los estadios de apertura de yemas, floración y fruto pequeño de estos cultivos. Los autores han utilizado los procesos de toma de decisiones de Markov en un modelo que estructura el problema en la identificación de posibles acciones, eventos y consecuencias. La sensibilidad de los cultivos al enfriamiento cambia durante la apertura de yemas, la floración y el estadio de fruto pequeño, y por ello se han derivado funciones logísticas que relacionan las pérdidas del cultivo con la temperatura mínima para cada periodo de desarrollo donde la relación entre daño y temperatura era conocida. Estos autores evaluaron la utilidad de tres métodos de predicción de heladas. El primero, calculando la desviación típica condicional para realizar la predicción utilizando únicamente datos climáticos. El segundo, se corresponde con las predicciones oficiales que efectúa el Servicio Meteorológico Nacional de los EE.UU. y el tercero, se corresponde con una predicción perfecta donde la predicción de la temperatura mínima siempre es correcta. La desviación típica es “condicional” ya que se basa en un nivel asumido de precisión de la predicción.

Basándose únicamente en datos climáticos, Katz, Murphy y Winkler (1982) estimaron que la desviación típica condicional de la predicción mínima sería de 3,6 °C. Por definición, la desviación típica es 0 °C para una predicción perfecta. Basándose en las habilidades de los que realizaban el pronóstico en los años 70, la desviación típica condicional de la predicción “oficial” fue de 2,1 °C. Por ello, la habilidad predictiva del Servicio Meteorológico Nacional mejoró la desviación típica condicional en un 48% [i.e.  $0,48 \approx (3,6 - 2,1) / 3,6$ ] de la diferencia entre utilizar datos climáticos y una predicción perfecta. Los valores relativos (i.e. valor económico de la predicción dividida por el valor total de la producción), expresados en porcentajes, se muestran en la Tabla 5.1. El valor económico de la predicción es el valor neto adicional de producción que resulta de tenerla. La tabla muestra que aumentar las capacidades de la predicción oficial hasta el nivel de la predicción perfecta aumentaría los valores relativos en un 18%, 15% y 23% para manzanos, perales y melocotoneros. En consecuencia, excepto para melocotoneros, los beneficios económicos de futuras mejoras en la predicción son menores que las mejoras comparables del pasado.

TABLA 5.1

**Valor relativo (% de la producción total) y valor total de la producción (\$ por hectárea) para manzanos cv. Red Delicious, perales cv. Bartlett y melocotoneros cv. Elberta en el Valle del río Yakima en el Estado de Washington (EE.UU.) utilizando las predicciones climatológicas de los años 70 del Servicio Meteorológico Nacional, y un pronóstico perfecto**

PREDICCIÓN	MANZANOS	PERALES	MELOCOTONEROS
Perfecta	52	42	45
Oficial	34	27	22
Climatología	0	0	0
Valor Total	5 802 \$ ha <sup>-1</sup>	4 586 \$ ha <sup>-1</sup>	3 064 \$ ha <sup>-1</sup>

NOTAS: Las desviaciones típica condicionales de la temperatura mínima real fueron 3,6°C para la climatología, 2,1°C para las predicciones oficiales y 0°C para una predicción perfecta (según Katz, Murphy y Winkler, 1982).

## PREDICCIÓN DE LAS TEMPERATURAS MÍNIMAS

Es importante poder predecir cuándo cae la temperatura hasta un valor crítico para poner en marcha los métodos activos de protección contra las heladas. Poner en marcha y detener la protección a la temperatura apropiada es importante ya que evita las pérdidas que resultan de poner en marcha demasiado tarde y ahorra energía al reducir el tiempo de funcionamiento de los distintos métodos. Aunque está fuera de los objetivos de esta publicación obtener la

predicción de la temperatura mínima con modelos sinópticos o de meso-escala, es posible obtener algunas directrices de cómo predecir la temperatura mínima durante las condiciones de una helada de radiación, utilizando datos locales.

Idealmente, se podría desarrollar un modelo de predicción de temperatura a microescala (i.e. local) utilizando los cálculos del balance de energía. Esto ha sido extensamente revisado por Kalma *et al.* (1992). La principal conclusión de su revisión es que “las temperaturas del aire no puede predecirse con satisfacción a partir únicamente del balance de energía en la superficie, incluso estableciendo con precisión las diferencias entre las temperaturas de la superficie y del aire”. Ésta incapacidad la atribuye a las dificultades en: (1) la medida del flujo de calor sensible turbulento en el intervalo típico de las noches de helada; (2) tener en cuenta la advección; y (3) las variaciones espaciales en la emisividad de la radiación desde la superficie. Más que utilizar el balance de energía para estudiar la tasa de enfriamiento de la superficie del suelo, Kalma *et al.* (1992) propusieron estimar la tasa de enfriamiento de una columna de aire. Sin embargo, reconocieron que tanto el flujo radiativo como el flujo del calor sensible turbulento dependen de los perfiles verticales del viento, la humedad y la temperatura, lo que hace que el proceso sea impracticable por los problemas de medida.

Kalma *et al.* (1992) discuten los modelos unidimensionales de predicción de la temperatura de Sutherland (1980) y Cellier (1982, 1993). El modelo de Sutherland utiliza la ecuación del balance de energía de superficie asumiendo que las contribuciones del calor latente son negligibles, un modelo de flujo de calor al suelo y un modelo de flujo de calor sensible para los 9,0 m inferiores de la atmósfera. Las variables que utiliza el modelo son la temperatura a 0; 1,5; 3,0 y 9,0 m, la temperatura del suelo a 0,1 y 0,5 m de profundidad, la velocidad del viento a 10 m y la radiación neta. Se ha descrito que este modelo predice dentro de los 3 °C un 90% del tiempo y dentro de los 2 °C un 82% del tiempo. Finalmente, el modelo se combinó con un modelo estadístico para mejorar la predicción en Florida, EE.UU.

El modelo de temperatura de Cellier (1982, 1993) calcula los cambios de temperatura dentro de ocho capas hasta una altura de unos 100 m en la atmósfera y por debajo de 1,0 m en el suelo. Las variables que utiliza el modelo incluyen la temperatura media del suelo y la velocidad del viento y la temperatura del aire a 3,0 m de altura en el momento en que la radiación neta se hace negativa, el valor más expectante de radiación neta negativa y la temperatura del punto de rocío cuando la radiación neta alcanza su valor más negativo. Se ha indicado que el modelo proporciona estimaciones realistas del balance de energía de superficie durante la noche, pero se necesitan mejoras en la estimación de la transferencia de calor en el suelo y en los coeficientes de intercambio atmosférico (Kalma *et al.*, 1992).

Para estimar los cambios de temperatura durante la ocurrencia de heladas es preferible un modelo de balance de energía determinístico; Sin embargo, actualmente no está disponible ningún modelo de aplicación universal con variables que sean de fácil obtención. Se han documentado (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978) numerosos modelos empíricos de predicción de la temperatura mínima y se sabe que algunos dan una predicción razonablemente precisa. Por ejemplo, la ecuación de Young (1920) ha sido utilizada extensamente por el Servicio Meteorológico Nacional (NWS) de los EE.UU. con un éxito considerable a lo largo de la zona oeste de los EE.UU. Sin embargo, la ecuación de Young no fue utilizada directamente sino que se calibró para las condiciones locales para tener en cuenta la época del año y las condiciones locales. Estas modificaciones son específicas del lugar y no están ampliamente publicadas. No se sabe si modificaciones similares se han utilizado para mejorar la multitud de fórmulas predictivas que se utilizan en distintos países (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978). Está claro que considerar la época del año y las condiciones locales mejoraría la predicción de la temperatura mínima. De hecho, Bagdonas, Georg y Gerber (1978) recomendaron que un modelo de predicción que utilice factores meteorológicos locales y datos climáticos específicos del lugar, es probable que proporcione los mejores resultados. Además de pronosticar la temperatura mínima, también es útil predecir la tendencia de la temperatura durante una noche de helada. Se utilizó un modelo basado en el artículo original de Allen (1957) para desarrollar el modelo de tendencia de temperatura de la helada (FTrend.xls) incluido con este libro. Krasovitski, Kimmel, y Amir (1996) presentaron otro modelo más complicado.

## **CALIBRACIÓN DE PRONÓSTICOS DE LA MESO-ESCALA A LA MICRO-ESCALA**

Durante varias décadas, el servicio NWS proporcionó pronósticos de heladas a los agricultores en regiones de los EE.UU. con cultivos de alto valor sensibles a las heladas. Como el personal que realiza la predicción en el NWS tiene más experiencia en predicción y más y mejores facilidades, pueden proporcionar predicciones más precisas que las que un agricultor puede realizar con un día o dos de antelación a la helada. Sin embargo, a finales de los años 80, el servicio meteorológico dejó de realizar este servicio y los agricultores tuvieron que emplear servicios de predicción privados o desarrollar sus propios métodos para predecir las temperaturas mínimas para sus cultivos.

Cuando el servicio de heladas estaba en funcionamiento, los meteorólogos del Servicio meteorológico realizaban la predicción para estaciones clave dentro de una región y los agricultores tenían que desarrollar factores de corrección para

predecir las temperaturas mínimas en sus cultivos. Generalmente, las correcciones consistían en añadir o sustraer una corrección a la estación clave usada para la predicción. Por ejemplo, un agricultor podía sustraer 0,5 °C de una estación clave usada para la predicción para un cultivo localizado en una zona baja. En algunos casos, los agricultores tenían que utilizar hojas de cálculo o programa estadísticos de ordenador para determinar la ecuación de regresión con las temperaturas mínimas de la estación clave como variable independiente y las temperaturas mínimas en su cultivo como la variable dependiente.

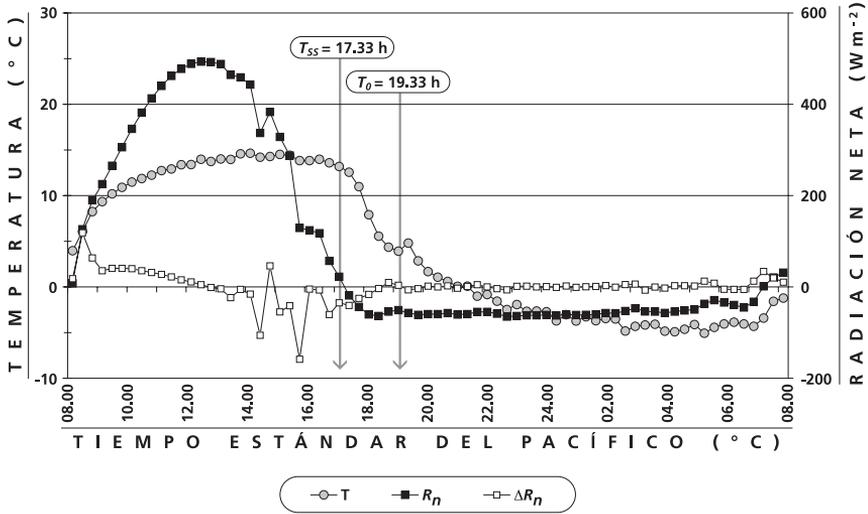
Una vez que el Servicio de predicción de heladas finalizó, los grandes agricultores y los que tenían importantes problemas con las heladas emplearon servicios de predicción privados para proporcionar las predicciones de temperatura mínima específicas para una determinada localidad. En muchos casos, agrupaciones de agricultores cooperaron y contrataron una persona privada para realizar la predicción para estaciones clave utilizadas por el NWS. Los factores de corrección todavía podían utilizarse para predecir las temperaturas mínimas en sus cultivos. Aunque el uso de los factores de corrección y de las estaciones clave para proporcionar un pronóstico de heladas específico para una determinada localidad es útil para una planificación y para su gestión durante dos o tres días, la utilización directa de datos recogidos en o cerca del cultivo es probable que proporcione mejor predicción durante una noche de helada en particular. En la siguiente sección se presenta un método para desarrollar predicciones locales.

## **UN MODELO SENCILLO DE PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA MÍNIMA**

Con este libro se incluye un modelo empírico y sencillo de predicción, (FFST.xls), que puede calibrarse fácilmente para las condiciones locales. El modelo, que se basa en el método de Allen (1957), utiliza registros históricos de la temperatura del aire y del punto de rocío a las dos horas después de la puesta de Sol y la temperatura mínima observada durante las noches de heladas con el cielo despejado y en calma para desarrollar los coeficientes de regresión necesarios para predecir la temperatura mínima durante un periodo en particular del año. Dos horas después de la puesta de Sol es el tiempo de partida ( $t_0$ ) para el modelo. Este tiempo corresponde al momento en que la radiación neta ha alcanzado el valor más negativo (Figura 5.1). Si se asume que durante la noche la cobertura por nubes o por niebla es pequeña o nula, la radiación neta cambia poco desde el momento  $t_0$  hasta la salida del Sol la mañana siguiente. En una noche con cobertura intermitente por nubes o por niebla o con una velocidad del viento variable, el modelo puede predecir una temperatura que es

FIGURA 5.1

Temperatura del aire a 2,0 m de altura, radiación neta y cambio de la radiación neta utilizando datos a intervalos de 20 minutos registrados durante una noche de helada (28 de febrero a 1 de marzo de 2002) en una plantación de nogales cerca de Ladoga, California (EE.UU.)



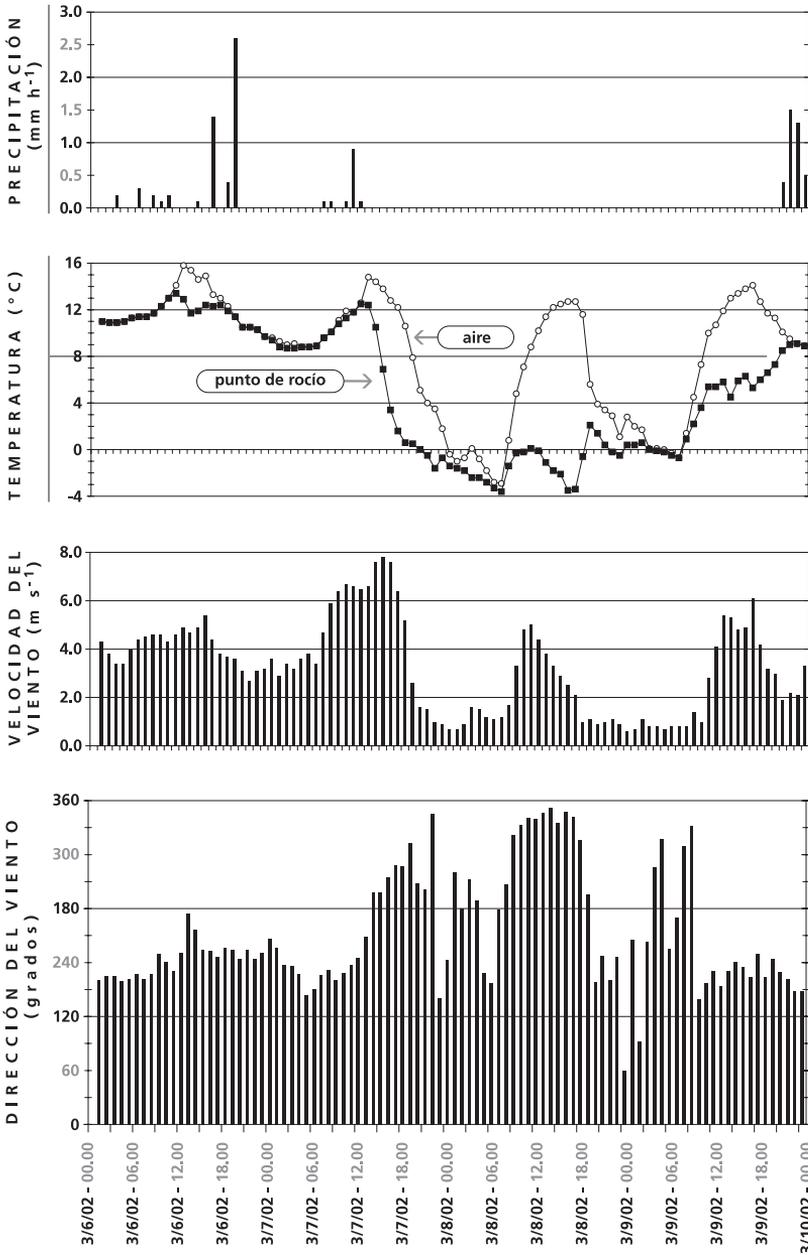
Clave:  $T_{ss}$  = Hora de la puesta de Sol.  $T_0$  = 2 horas después de la puesta de Sol.

más baja que la observada. El modelo puede predecir una temperatura mínima demasiado alta si pasa un frente frío o si hay drenaje de aire frío.

Para ser utilizados en el programa FFST.xls, únicamente se deben seleccionar datos de noches de heladas de radiación. Hay que evitar incluir noches con velocidades del viento superiores a los  $2,0 \text{ m s}^{-1}$  y noches nubosas o con niebla. Por ejemplo, la Figura 5.2 ilustra el problema de selección de datos. El 6 de marzo, hubo condiciones de viento y lluvia, que continuaron hasta cerca de mediodía del 7 de marzo. A continuación se paró la lluvia, pero el viento cambió desde el sur hacia el oeste-noroeste y la velocidad del viento fue alta hasta las 21.00 h. Una caída brusca de la temperatura de punto de rocío es típica con el paso de un frente frío. La puesta de Sol ocurrió sobre las 17.42 h, con lo que la velocidad del viento fue alta durante más de tres horas tras la puesta de Sol. La radiación neta no se midió en la zona, y por ello se desconoce la información sobre la cobertura de nubes. Sin embargo, tras el paso de un frente frío sigue una cobertura de nubes intermitente. A las dos horas después de la puesta del Sol, las temperaturas del aire y del punto de rocío fueron  $5,1 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $0,0 \text{ }^\circ\text{C}$  y la velocidad

FIGURA 5.2

Muestra de datos meteorológicos durante una helada de advección cerca de Zamora, California (EE.UU.), en marzo de 2002. La puesta de Sol fue hacia las 19.42 h. Las fechas vienen dadas en notación de EE.UU. (mm/dd/aa)



del viento cayó de 2,6 a 1,6 m s<sup>-1</sup>. Todavía hubo una larga caída en la temperatura después de este punto que no es característico de una helada de radiación. Basándose en estos datos meteorológicos, las condiciones meteorológicas del 7 al 8 de marzo fueron de demasiado viento al atardecer siendo poco típico de una helada de radiación. El 8 y 9 de marzo, las temperaturas del aire y del punto de rocío fueron 3,9 °C y 1,4 °C a las dos horas después de la puesta del Sol y la velocidad del viento cayó pronto al atardecer (i.e. cerca de la puesta del Sol). No hubo evidencia de advección de aire frío, y por ello los datos del 8 al 9 de marzo pueden utilizarse en el programa FFST.xls para determinar un modelo de predicción. Observa que se pueden utilizar datos de noches cuando la temperatura mínima del aire no ha caído por debajo de los 0 °C mientras la noche tenga los cielos despejados y en calma o con muy poco viento.

El programa FFST.xls está escrito en MS Excel para facilitar los datos de entrada y la representación gráfica así como para la representación de los datos que proporciona el modelo en formato de tabla. Durante 50 noches, la temperatura del aire y del punto de rocío a las dos horas tras la puesta del Sol son datos de entrada junto con la temperatura mínima observada a la mañana siguiente. En la figura 5.3 se muestra un ejemplo de pantalla con los datos de entrada de 10 días.

FIGURA 5.3

**Muestra de datos de entrada y cálculo del programa FFST.xls de predicción de la temperatura mínima ( $T_p$ )**

Muestra número	Observaciones dos (2) horas después de la puesta del sol		Mínimo observado	Predicción a partir de la temperatura	Residuo	Residuo a partir del punto de rocío	Temperatura mínima prevista	Residuo de la temperatura
	$T_a$ (°C)	Punto de rocío $T_d$ (°C)	$T_m$ (°C)	$T_p'$ (°C)	$R_1 = T_m - T_p'$	$R_1'$	$T_p$ (°C)	$T_m - T_p$ (°C)
1	3,2	-4,2	-3,1	-4,3	1,2	0,0	-4,3	1,2
2	0,8	-8,8	-8,0	-5,5	0,5	-0,2	-5,5	0,7
3	0,2	-6,5	-6,3	-5,8	-0,5	-0,1	-5,9	-0,4
4	2,6	-8,2	-8,4	-4,6	-0,9	-0,1	-4,7	-0,8
5	4,4	-6,1	-4,9	-3,7	-0,3	-0,1	-3,8	-0,2
6	5,2	2,6	-2,5	-3,3	0,8	0,2	-3,2	0,6
7	2,7	-0,7	-4,8	-4,5	-0,3	0,1	-4,5	-0,4
8	1,2	-1,7	-8,0	-5,3	0,4	0,0	-5,3	0,3
9	4,5	-1,2	-4,4	-3,7	-0,7	0,1	-3,6	-0,8
10	5,6	0,1	-3,3	-3,1	-0,2	0,1	-3,0	-0,2
11								
12								

Los datos son de las heladas de diciembre de 1990 y de 1998 en la región de cítricos de Lindcove, California (USA).

En la Figura 5.3, los datos de entrada se utilizaron para determinar una regresión lineal entre la temperatura mínima observada ( $T_n$ ) y la del aire a las dos horas después de la puesta de Sol ( $T_0$ ), y los resultados se muestran en la columna “Predicción a partir de la temperatura ( $T_p'$ )”. La ecuación que proporciona el resultado  $T_p' = b_1 \times T_0 + a_1$  se muestra en la parte superior de la página. A la izquierda de la ecuación se muestra la raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE). Este estadístico es similar a la desviación típica siendo una medida de cómo de cerca están los valores observados y los predichos. En la figura 5.3, el RMSE es 0,65 °C para la fórmula que se basa únicamente en la temperatura de dos horas tras la puesta de Sol. Esto implica que una desviación de la línea 1:1 es aproximadamente 0,65 °C, y dos desviaciones de la línea 1:1 sería de 1,3 °C. Dado que la variación de RMSE es casi la misma que la de la desviación típica, ello significa que la desviación de la línea 1:1 sería menor de 1,3 °C un 85% del tiempo. Una vez calculado  $T_p'$ , se calculan y se muestran los residuos ( $R_1 = T_n - T_p'$ ). A continuación, se calcula una regresión lineal entre  $R_1$  y la temperatura del punto de rocío ( $T_d$ ) y se muestran los valores residuales predichos ( $R_1'$ ). Si  $T_p' = b_1 \times T_0 + a_1$  y  $R_1' = b_2 \times T_d + a_2$ , entonces la temperatura mínima pronosticada viene dada por:  $T_p = T_p' + R_1' = b_1 \times T_0 + b_2 \times T_d + (a_1 + a_2)$ . En el programa Excel, la ecuación que proporciona el modelo  $T_p = b_1 T_0 + b_2 T_d + a_3$ , donde  $a_3 = a_1 + a_2$ , se muestra en la parte superior de la tabla de cálculo para una mejor visualización. De nuevo, la RMSE de comparar las temperaturas mínimas observadas y predichas se muestra a la izquierda de la ecuación. En este conjunto particular de datos, los valores RMSE fueron casi idénticos para las dos ecuaciones de predicción, por tanto no hubo una ventaja aparente por el hecho de incluir la temperatura del punto de rocío en la predicción de la temperatura mínima. Sin embargo, si se incluye la temperatura del punto de rocío en el modelo mejorará la predicción.

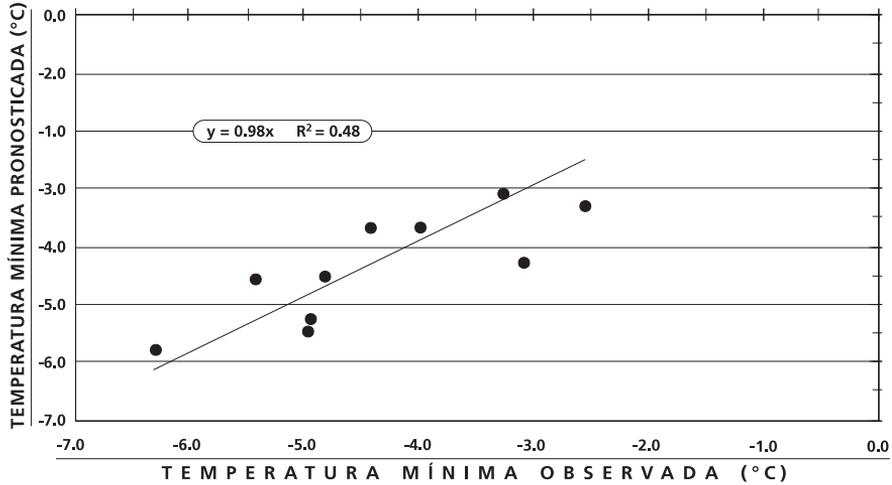
El programa FFST.xls también traza la temperatura predicha contra la observada, tanto para el modelo que utiliza únicamente la temperatura (Figura 5.4) como para el modelo de predicción con temperatura y punto de rocío (no mostrado).

## UN MODELO SENCILLO DE PREDICCIÓN DE LA TENDENCIA DE LAS TEMPERATURAS

Además de predecir la temperatura mínima, es útil tener la tendencia de temperatura durante la noche para decidir cuándo se ponen en marcha y cuándo se detienen los métodos de protección. Conocer la tendencia de temperatura durante la noche ayuda a los agricultores a prever cuándo hay que iniciar los métodos activos durante la noche. El modelo FTrend.xls estima la tendencia de temperatura desde las dos horas siguientes a la puesta del Sol hasta la salida del

FIGURA 5.4

**Temperatura mínima prevista frente a la observada a partir de los datos de la Figura 5.3, utilizando únicamente los datos de temperatura de las dos horas después de a la puesta de Sol**



Sol a la mañana siguiente. La salida y la puesta del Sol se determinan a partir de los datos de latitud, longitud y fecha. El programa utiliza un modelo de tendencia empírico de la temperatura para predecir cuánto cambiará la temperatura durante la noche. Este modelo utiliza una función raíz cuadrada para predecir la temperatura del aire a partir de las dos horas siguientes de la puesta de Sol (i.e. tiempo  $t_0$ ) hasta alcanzar la temperatura mínima prevista ( $T_p$ ) a la salida del Sol la mañana siguiente (i.e. tiempo  $t_p$ ). Además de la temperatura del aire, la aplicación calcula el cambio de la temperatura del bulbo húmedo basándose en la tendencia de temperatura y la temperatura inicial del punto de rocío.

La aplicación FTrend.xls contiene las hojas de cálculo “Título”, “Ayuda”, “Entrada”, “Gráfica”, “BulboHúmedo” y “Previsión”. Las hojas “Título” y “Ayuda” proporcionan información sobre los programadores e instrucciones de cómo utilizar el programa. La hoja Input se utiliza para los datos de entrada de temperatura y para mostrar los resultados de los cálculos de tendencia. La hoja “BulboHúmedo” se utiliza para calcular la temperatura del aire que se corresponde con la temperatura del aire y del punto de rocío a una elevación dada. Se utiliza como ayuda para determinar la temperatura del aire para detener los aspersores después de una noche de helada. La hoja “Previsión” se utiliza para calcular una estimación de la temperatura mínima a la salida del Sol la mañana

siguiente utilizando como input las temperaturas del aire y del punto de rocío medidas a las dos horas siguientes a la puesta de Sol. En las secciones que vienen a continuación se discute estas hojas de cálculo y sus funciones.

### HOJA DE CÁLCULO “PREVISION”

Para la aplicación FTrend.xls se necesita prever la temperatura a la salida del Sol. Esta predicción puede provenir de un servicio de predicción meteorológico o basarse en el modelo desarrollado en el programa FFST.xls. Si se utiliza el servicio de predicción, entonces no se necesita la hoja “Previsión” del programa FTrend.xls. Si la predicción de la temperatura mínima proviene del programa FFST.xls, entonces se utiliza la hoja “Previsión” en FTrend.xls para realizar el cálculo.

La Figura 5.5 muestra unos datos de entrada como ejemplo para la hoja “Previsión”. Primero se entran los coeficientes de regresión tanto de la ecuación  $T_p' = b_1 \times T_0 + a_1$  como de la ecuación  $T_p = b_1 T_0 + b_2 T_d + a_3$  en las celdas apropiadas de la hoja predicción (e.g.  $b_1 = 0,494$ ,  $b_2 = 0,027$ ,  $a_1 = -5,872$  y  $a_3 = -5,783$  en la Figura 5.5). Las dos ecuaciones en la hoja Previsión son completamente independientes y los datos pueden entrarse en cualquiera de ellas para predecir la temperatura mínima. En la Figura 5.5, la temperatura del aire a las dos horas de la puesta de Sol  $T_0 = 9,0$  °C se entró en la ecuación superior y la predicción fue  $T_p = -1,4$  °C. Las temperaturas del aire y del punto de rocío que se entraron en la ecuación inferior fueron  $T_0 = 9,0$  °C y  $T_d = -5,0$  °C y la predicción resultante fue  $T_p = -1,5$  °C.

FIGURA 5.5

Muestra de entrada de los coeficientes de predicción de temperatura mínima y de temperaturas en la hoja “Previsión” del programa de aplicación FTrend.xls

$T_p$ previsto	$T_0$ mult	$T_0$	Offset
-1,4	0,494	9,0	-5,872

$T_p$ previsto	$T_0$ mult	$T_0$	$T_d$ mult	$T_d$	Offset
-1,5	0,494	9,0	0,027	-5,0	-5,783

Utilice la primera ecuación si se utiliza la temperatura dos horas después de la puesta de Sol para la previsión. Introduzca el multiplicador y el "offset" del programa FFST.xls y después introduzca el valor de  $T_0$  para la predicción de la temperatura mínima.

Utilice la segunda ecuación si se utiliza la temperatura del aire y la temperatura del punto de rocío dos horas después de la puesta de sol para la predicción de la temperatura mínima. Introduzca los multiplicadores de  $T_0$  y  $T_d$  y el "offset" asociados del programa FFST.xls. Después introduzca los valores  $T_0$  y  $T_d$  para prever la temperatura mínima.

## HOJA DE CÁLCULO “BULBOHÚMEDO”

La hoja de cálculo “BulboHúmedo” en la aplicación FTrend.xls sirve para determinar la temperatura del aire correspondiente a un valor de entrada de la temperatura del bulbo húmedo y del punto de rocío a una elevación definida. Se utiliza como ayuda para determinar cuando hay que poner en marcha y cuando hay que detener los aspersores en la protección contra heladas. En la Figura 5.6 se muestra un ejemplo de la hoja bulbo húmedo. En el ejemplo, la elevación se entró como  $E_L = 146$  m por encima del nivel del mar. Si la temperatura crítica de daño para el cultivo a proteger es  $T_c = -1,0$  °C, entonces  $T_w = -1,0$  es input como se muestra en la Figura 5.6. Recuerda que la temperatura crítica variará en función del cultivo, de la variedad, del estadio fenológico y del endurecimiento. En la Figura 5.6, el valor  $T_d = -6,0$  °C fue un dato de entrada para la temperatura del punto de rocío. Tras la elevación, se entran las temperaturas del bulbo húmedo y del punto de rocío, el programa calcula la correspondiente temperatura del aire. Cuando se utilizan aspersores para la protección contra heladas, deben ponerse en marcha y detenerse cuando la temperatura del aire medida contra el viento desde el cultivo protegido es más alta que la temperatura del aire que muestra la hoja de cálculo bulbo húmedo. La hoja de cálculo bulbo húmedo también calcula la presión barométrica como una función de la elevación y de las presiones de vapor a saturación a las temperaturas del punto de rocío ( $e_d$ ), del bulbo húmedo ( $e_w$ ) y del aire ( $e_s$ ). Observa que la presión del vapor de agua real ( $e$ ) es igual a  $e_d$ .

FIGURA 5.6

**Muestra de los datos de entrada y de los cálculos de la hoja de cálculo bulbo húmedo del programa de aplicación FTrend.xls**

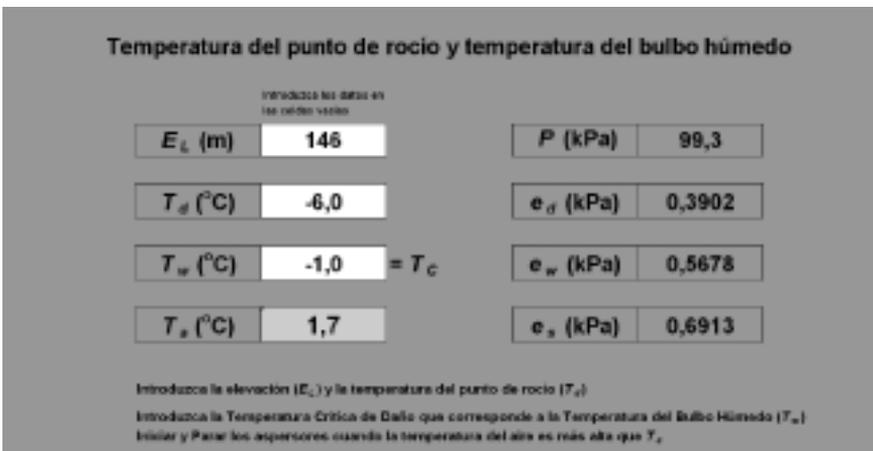
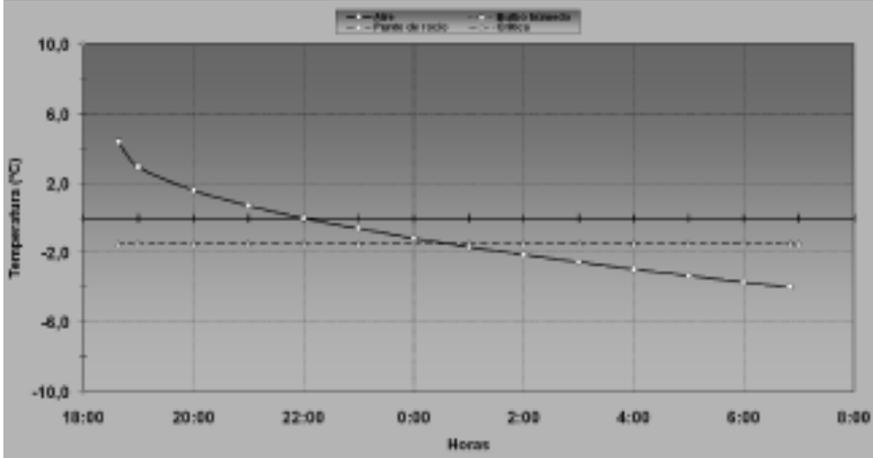




FIGURA 5.8

Muestra de gráfica que resulta de los datos entrados en la hoja de cálculo "Entrada" de la aplicación FTrend.xls, utilizando los datos mostrados en la Figura 5.7



### Pronosticar la tendencia en la temperatura del bulbo húmedo

Si la temperatura del punto de rocío a las dos horas de la puesta de Sol también se entra en la hoja de cálculo de inputs, entonces la aplicación calculará el cambio en la temperatura del bulbo húmedo y del punto de rocío así como de la temperatura del aire. Una muestra de la hoja de cálculo de inputs con  $T_d = -2,8$  °C se muestra en la Figura 5.9 y la gráfica se muestra en la Figura 5.10. La temperatura del punto de rocío se fija como valor input durante la noche a no ser que la temperatura del aire caiga por debajo del input punto de rocío (Figura 5.10). Entonces, la temperatura del punto de rocío cae con la temperatura del aire hasta la temperatura mínima pronosticada. Por ejemplo, tanto el aire como el punto de rocío caen desde  $T = -2,8$  °C, cuando el aire alcanza la temperatura del punto de rocío, hasta  $T_p = -4,0$  °C a la salida del Sol (Figura 5.10). Esto ocurre normalmente en las noches en las que el aire se satura.

La curva de la temperatura del bulbo húmedo en la aplicación FTrend.xls se utiliza para estimar cuándo se necesita poner en marcha los aspersores para la protección contra heladas. Por ejemplo, la temperatura del bulbo húmedo cae hasta la temperatura crítica de daño  $T_c = -1,5$  °C a las 23.00 h en la Figura 5.10. En esta situación, los aspersores deberían ponerse en marcha antes de las 23.00 h, antes de que la temperatura del bulbo húmedo ( $T_w$ ) caiga por debajo de  $T_c = -1,5$  °C. Si

FIGURA 5.9

Una muestra de la hoja de cálculo de inputs del programa de aplicación FTrend.xls con la entrada adicional de la temperatura del punto de rocío ( $T_d$ ) a las dos horas de la puesta de Sol

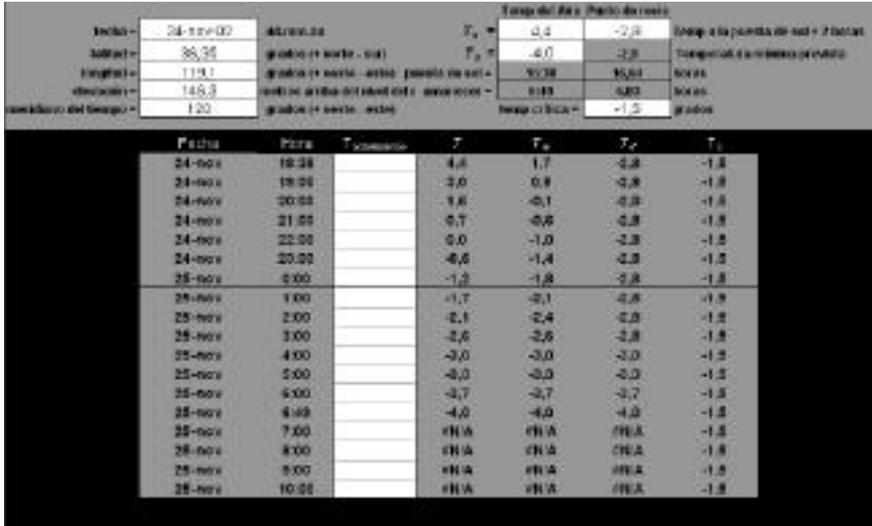
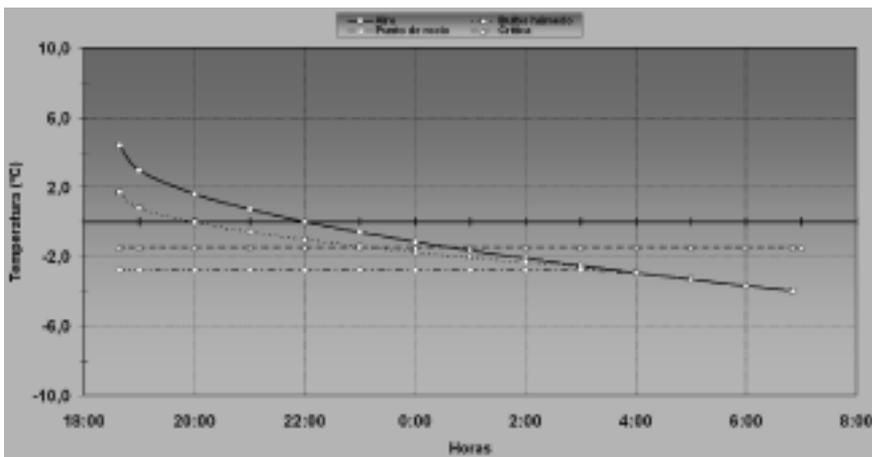


FIGURA 5.10

Muestra del gráfico que resulta a partir de los datos de entrada en la hoja de cálculo "Entrada" de la aplicación FTrend.xls utilizando datos de la Figura 5.9 con una temperatura del punto de rocío de  $T_d = -2,8$  °C a las dos horas de la puesta de Sol



asumimos que la latitud, la longitud y la fecha son correctas, la gráfica de tendencias de temperatura va desde las dos horas después de la puesta de Sol hasta la salida del Sol (e.g. 18.38 h hasta 07.05 h en la Figura 5.10).

### Decidir cuándo poner en marcha los aspersores

La gráfica de la aplicación FTrend.xls también es útil para ayudar en la toma de decisiones sobre si los aspersores deben usarse o no. Para agricultores sin problemas de encharcamiento del suelo, de falta de agua o preocupados por el coste, es mejor poner en marcha los aspersores cuando la temperatura del bulbo húmedo se aproxima tanto a 0 °C como a la temperatura crítica de daño, dependiendo del valor del cultivo y de la preocupación por las pérdidas. Sin embargo, para agricultores que están preocupados con estos problemas, el uso de la aplicación FTrend.xls les ayudará a determinar cuándo poner en marcha los aspersores para minimizar el daño, el encharcamiento, el uso de energía y la pérdida de suministro de agua.

Cuando se utilizan micro-aspersores bajo la cubierta vegetal, la temperatura de puesta en marcha es menos importante que para otros sistemas de aspersión ya que principalmente se humedece el suelo y no las plantas. Al principio de la puesta en marcha, puede haber un periodo corto en que la temperatura cae conforme el agua aplicada se evapora; sin embargo, si la tasa de aplicación es suficiente, la temperatura debería recuperarse rápidamente. Con micro-aspersores por debajo de la cubierta vegetal, se pueden poner en marcha cuando la temperatura del aire se aproxima a 0 °C, sin demasiado riesgo. Lo mismo se aplica a los sistemas de aspersores bajo la cubierta convencionales que no mojan las ramas más bajas de los árboles. Si los aspersores bajo la cubierta mojan las ramas más bajas, entonces se debería utilizar el mismo criterio de puesta en marcha que para los aspersores por encima de la cubierta.

Los aspersores sobre la cubierta deberían ponerse en marcha de forma que estén todos en funcionamiento cuando la temperatura del bulbo húmedo se aproxima a la temperatura crítica de daño ( $T_c$ ). No obstante, observa que las temperaturas críticas de daño publicadas no son siempre correctas, por lo que es aconsejable seleccionar una  $T_c$  ligeramente más alta (e.g. unos 0,5 °C) que los valores publicados. La elección depende del riesgo que se quiere tomar. Si la temperatura mínima ( $T_p$ ) se pronostica que será más de 1,0 °C inferior que  $T_c$ , se aconseja en general poner en marcha los aspersores conforme la temperatura del bulbo húmedo se aproxima a  $T_c$  utilizando el programa FTrend.xls, que se ha descrito previamente. El problema surge cuando se pronostica que  $T_p$  es cercano a  $T_c$ . Incluso si  $T_p$  es ligeramente superior que  $T_c$ , es posible que la ecuación no sea correcta en cualquier noche dependiendo de las condiciones locales. Por

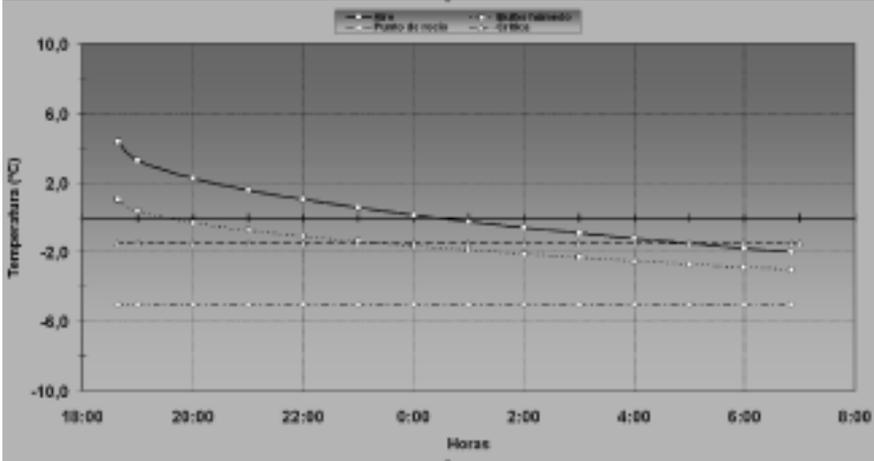
ejemplo, la ecuación de pronóstico de  $T_p$  podría trabajar bien durante años y podría fallar completamente una noche debido a condiciones extrañas durante esa noche (e.g. a menudo se relaciona con drenaje poco frecuente del aire frío). El hecho no es extraño y les ha sucedido a meteorólogos profesionales con heladas en frutales en California. Sin embargo, en muchos casos, las ecuaciones de predicción deberían trabajar bien. Ésta es una buena razón para un minucioso seguimiento de la temperatura durante una noche de helada.

Cuando se pronostica que  $T_p$  será cercana a  $T_c$ , la decisión de si debe protegerse y cuándo debe protegerse depende de la temperatura del punto de rocío. Si la temperatura del punto de rocío es baja, entonces es aconsejable poner en marcha los aspersores antes que  $T_w$  caiga por debajo de  $T_c$ . Ésto se ilustra en la Figura 5.11, donde  $T_p = -2,0\text{ }^\circ\text{C}$  y  $T_d = -5,0\text{ }^\circ\text{C}$  eran los inputs. Aunque  $T_p$  es escasamente más baja que  $T_c$ , como  $T_d$  es baja,  $T_w$  cae hasta  $T_c$  antes de medianoche. En consecuencia, la decisión de si utilizar o no los aspersores debe hacerse antes de la medianoche. En este ejemplo, los aspersores deben funcionar durante más de siete horas. Si los aspersores no se han puesto en marcha, es muy probable que la temperatura del aire caiga ligeramente por debajo de  $T_c$  durante unas dos horas. Dependiendo de la precisión de la predicción, del endurecimiento del cultivo, etc., el cultivo experimentará probablemente algún daño. No obstante, si la predicción es baja o  $T_c$  se fija demasiado alta, puede que no haya daño o que sea muy pequeño. Ésto hace que la decisión de poner en marcha los aspersores sea una decisión difícil. De nuevo, depende de la cantidad de riesgo que el agricultor quiera aceptar y si hay problemas de encharcamiento, o de falta de agua o problemas de costes. No obstante, si se utilizan aspersores en este ejemplo, éstos deberían ponerse en marcha antes de la medianoche.

La Figura 5.12 muestra una gráfica de la tendencia de temperatura siendo el input la temperatura del punto de rocío  $T_d = T_p = -2,0\text{ }^\circ\text{C}$ . En este caso,  $T_p$  es inferior a  $T_c$  y quizás se necesite protección. Sin embargo, como la temperatura del punto de rocío es relativamente alta, el agricultor puede esperar hasta más tarde en la noche para decidir si toma medidas o no de protección. Si se utilizan los aspersores, el agricultor debería ponerlos en marcha hacia las 04.00 h, y deberían funcionar durante algo más de tres horas. Si los aspersores han funcionado correctamente será extraño que haya resultado algún tipo de daño con una helada moderada en la noche descrita en la Figura 5.12. Si no se han utilizado los aspersores, no se sabe si hubiera habido o no daño. De nuevo, depende del pronóstico y de otros factores físicos y económicos. También, algunos cultivos que abortan frutos (e.g. manzanos), pueden perder yemas, flores, frutas o frutos secos dañados por congelación, aunque la producción global puede que no se vea muy afectada. Para otros cultivos que

FIGURA 5.11

Gráfica de tendencia de temperatura utilizando los datos de la Figura 5.9, pero con la temperatura mínima prevista  $T_p = -2,0\text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura del punto de rocío  $T_d = -5,0\text{ }^\circ\text{C}$

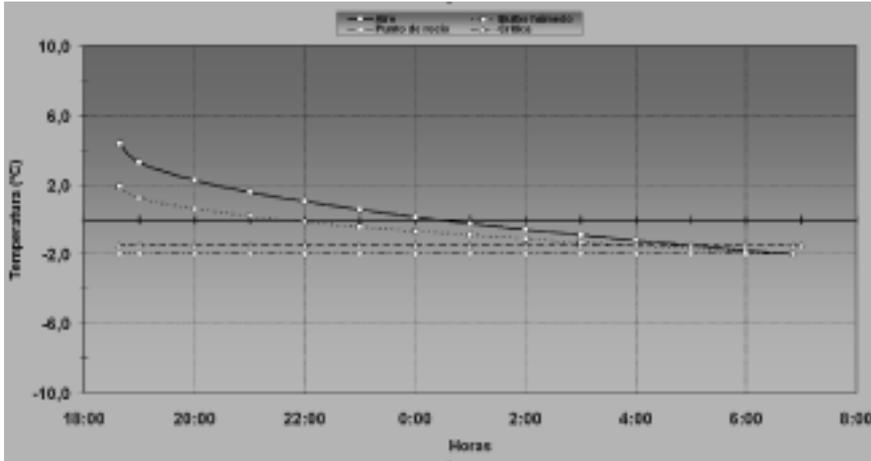


pierden la producción debido a la pérdida de algunas yemas, flores, frutos secos o frutas (e.g. almendros), debe evitarse el daño y tomar menos riesgos. Otra decisión importante está relacionada con el que las condiciones sean o no muy graves para que la tasa de aplicación de los aspersores proporcione la protección adecuada. Esto se discute en el capítulo sobre protección activa contra heladas.

Los aspersores pueden pararse después de la salida del Sol cuando la temperatura del bulbo húmedo sube de nuevo por encima de la temperatura crítica de daño. El aumento de temperatura después de la salida del Sol depende de muchos factores y es casi imposible hacer un pronóstico con exactitud. Para determinar cuándo hay que parar los aspersores, se debería medir la temperatura del bulbo húmedo o la temperatura del punto de rocío contra el viento desde el cultivo protegido, y entonces utilizar la hoja de cálculo “BulboHúmedo” del programa de aplicación FTrend.xls para calcular la temperatura mínima del aire para detener los aspersores. Entra la elevación, la temperatura del punto de rocío y la temperatura del bulbo húmedo igual a la temperatura crítica de daño (i.e.  $T_w = T_c$ ). Los aspersores pueden detenerse si el Sol está elevado y radiante sobre el cultivo y la temperatura del aire es más alta que la temperatura del aire calculada en la hoja de cálculo “BulboHúmedo”. Para una seguridad absoluta, ponga  $0\text{ }^\circ\text{C}$  para la temperatura del bulbo húmedo y detenga los aspersores cuando el Sol esté radiante y la temperatura

FIGURA 5.12

Gráfica de tendencia de temperatura utilizando los datos de la Figura 5.9, pero con la temperatura mínima prevista  $T_p = -2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la temperatura del punto de rocío  $T_d = -2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$



del aire medida contra el viento desde el campo protegido sea más alta que la temperatura del aire calculada en la hoja de cálculo “BulboHúmedo“.

### Actualización con las observaciones de las temperaturas actuales

Otra característica del programa FTrend.xls es que la tendencia de temperatura puede actualizarse durante la noche con las temperaturas observadas. Por ejemplo, si estuviera nublado entre las 20.00 h y las 22.00 h durante la noche descrita en la Figura 5.9 y la temperatura medida a las 22.00 h fuera  $T = 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  más que los  $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  previstos en la Figura 5.9, entonces se entraría  $T = 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  para las 22.00 h en la columna  $T_{update}$  (Figura 5.13) y todas las temperaturas posteriores se mueven hacia arriba en respuesta a la actualización (Figura 5.14). Las tendencias de la temperatura mínima prevista y de la temperatura del bulbo húmedo desde las 22.00 h hasta la salida del Sol serían ambas incrementadas. El cambio en la tendencia de la temperatura del bulbo húmedo es significativo, ya que la hora en que la temperatura del bulbo húmedo intercepta a la temperatura crítica de daño ha sido desplazada de las 23.00 h a las 01.00 h. Por tanto, poner en marcha los aspersores para la protección contra heladas podría retrasarse unas dos horas. Esto ilustra la importancia del seguimiento de temperaturas y la actualización del modelo de la aplicación FTrend.xls durante la noche.

FIGURA 5.13

Un ejemplo de la hoja de cálculo del programa FTrend.xls con la temperatura del aire de las 22.00 h actualizada para  $T_{update} = 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

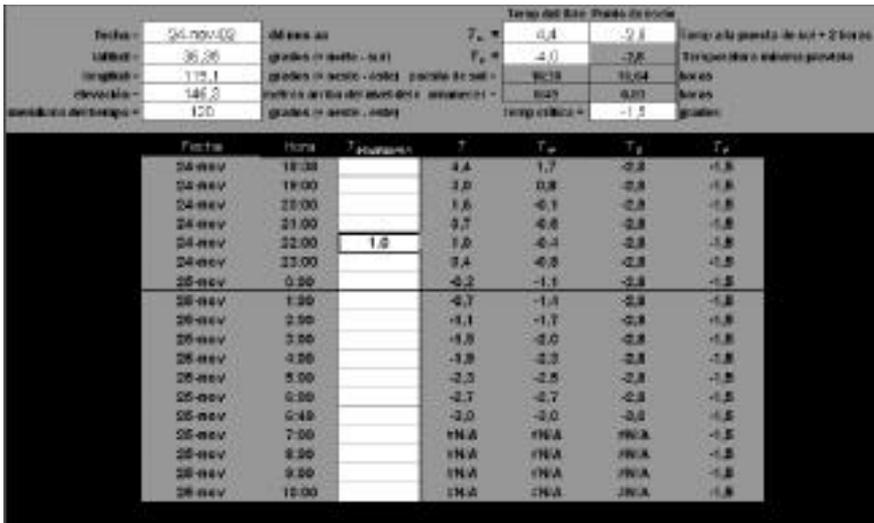
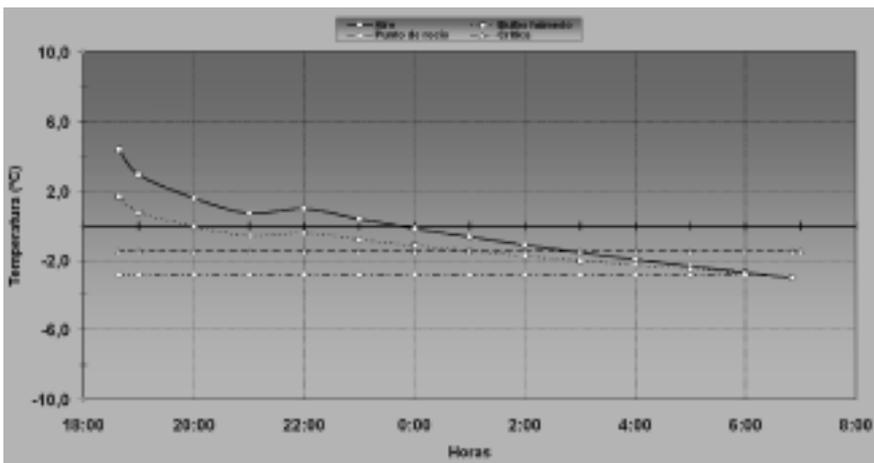


FIGURA 5.14

Un ejemplo de la gráfica trazada a partir de la hoja de cálculo FTrend.xls utilizando los datos de la Figura 5.12 con la temperatura del aire medida actualizada a las 22.00 h



### Documentación de la aplicación FTrend.xls

El cálculo de la tendencia de la temperatura utiliza la función raíz cuadrada de las dos horas después de la puesta de Sol (i.e. tiempo  $t_0$ ) hasta la salida del Sol (i.e. tiempo  $t_p$ ) de la mañana siguiente. Primero se calcula un factor de calibración  $b'$  a partir de la Temperatura mínima predicha ( $T_p$ ) y la temperatura en el momento  $t_0$  ( $T_0$ ) como:

$$b' = \frac{T_p - T_0}{\sqrt{h}} \quad \text{Ec. 5.1}$$

donde  $h$  es el tiempo (horas) entre  $t_0$  y  $t_p$  (e.g.  $h = (24 - t_0) + t_p$ ). La temperatura ( $T_i$ ) en cualquier momento  $t_i$  horas después de  $t_0$  se estima como:

$$T_i = T_0 + b' \sqrt{t_i} \quad \infty\text{C} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Si únicamente se utilizan los datos de temperatura de  $T_0$  y  $T_p$ , entonces la aplicación FTrend.xls calcula únicamente la tendencia de temperaturas. Sin embargo, si se utiliza como input la temperatura del punto de rocío a las dos horas después de la puesta de Sol ( $T_d$ ), la aplicación también calcula la temperatura del bulbo húmedo entre  $t_0$  y  $t_p$ . Durante la noche, el punto de rocío se fija como el valor inicial de  $T_d$  a menos que la tendencia de temperatura caiga por debajo de  $T_d$ . Cuando la tendencia de la temperatura del aire es menor que  $T_d$ , la temperatura del punto de rocío se iguala a la temperatura del aire. La temperatura del bulbo húmedo se calcula como una función de las correspondientes temperaturas del aire y del punto de rocío y de la presión barométrica, que se estima a partir de la elevación.

La temperatura del bulbo húmedo ( $T_w$ ) se calcula a partir de la temperatura del punto de rocío ( $T_d$ ) y de la temperatura del aire ( $T_a$ ) en  $^{\circ}\text{C}$  como:

$$T_w = T_a - \left( \frac{e_s - e_d}{\Delta + \gamma} \right) \quad \infty\text{C} \quad \text{Ec. 5.3}$$

donde  $e_s$  y  $e_d$  son las presiones de vapor a saturación (kPa) a las temperaturas del aire y del punto de rocío,  $\Delta$  es la pendiente de la curva de la presión de vapor a saturación a la temperatura del aire ( $T_a$ ) en  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T_a + 237,3)^2} \quad \text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1} \quad \text{Ec. 5.4}$$

y  $\gamma$  es aproximadamente igual a la constante psicrométrica.

$$\gamma = 0,00163 \frac{P_b}{\lambda} \quad \text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \text{Ec. 5.5}$$

donde  $P_b$  es la presión barométrica en kPa y  $\lambda$  es el calor latente de vaporización:

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} T_a \quad \text{MJ kg}^{-1} \quad \text{Ec. 5.6}$$

donde  $T_a$  es la temperatura del aire en  $^\circ\text{C}$ . Observa que  $\gamma$  de la Ecuación 3.6 proporcionará los mismos resultados que utilizando las Ecuaciones 5.5 y 5.6.

### Alarmas y seguimiento meteorológico durante una noche de helada

Aunque prever cuál es la tendencia de la temperatura durante las noches de heladas es importante para estimar si es necesaria la protección y cuándo ésta es necesaria, puede ser más importante un buen programa de seguimiento de la temperatura. Lo esencial incluye una alarma de helada para levantarnos a tiempo de poner en marcha cualquiera de los métodos de protección antes de que se produzca el daño y una red de estaciones de temperatura distribuida por el cultivo. Las alarmas de helada están disponibles comercialmente. El coste de una alarma depende de sus características. Algunas alarmas tienen cables con sensores de temperatura que pueden situarse en la parte exterior de una vivienda en una caseta meteorológica estándar mientras que la alarma está situada en el interior con un despertador para despertarnos. También hay alarmas que realizan una llamada por teléfono o que utilizan señales de radio o infrarrojas para comunicarse con la vivienda y hacer funcionar la alarma desde una estación alejada. No obstante, el coste se incrementa con el nivel de sofisticación de la alarma contra heladas.

Normalmente, los porcentajes de daño por helada se basan en la exposición de tejidos de plantas a temperaturas críticas durante media hora, donde las temperaturas del aire se miden en una garita meteorológica a una altura de 1,5 m. Perry (1994) recomienda que los termómetros sean colocados a la altura más baja que se desea proteger. Perry (1994) también aconseja que los sensores deben situarse donde no sean afectados directamente por los métodos de protección (e.g. radiación de las estufas). La recomendación general es colocar los termómetros más bajos en cultivos densos y bajos y más altos en cultivos espaciados y más altos. La idea es disponer de la temperatura del aire protegida lo más cerca posible de la temperatura de la planta que hay que proteger.

En realidad la temperatura de una hoja, de una yema o de un fruto pequeño es probablemente más baja que la temperatura de la garita. Igual que existe una capa

límite sobre una superficie cultivada, también existe una capa límite sobre micro superficies (e.g. hojas, yemas, frutas o frutos secos). Debido a las pérdidas de radiación de onda larga, las hojas, yemas, flores, etc. estarán normalmente más frías que la temperatura del aire durante una noche de helada. El calor sensible se difunde desde el aire a las superficies más frías a través de la capa límite, pero la tasa de difusión es insuficiente para reemplazar las pérdidas de calor por radiación. Como resultado, el contenido de calor sensible de los tejidos de las plantas y del aire cerca de la superficie causa una caída de temperaturas y conduce a una condición de inversión sobre los tejidos de las plantas. La profundidad de la capa límite a esta micro-escala y el gradiente de calor sensible ayudan a determinar cuánto de rápido el calor sensible se transfiere a la superficie.

La importancia de la capa límite a esta micro-escala puede ilustrarse considerando lo que ocurre en nuestra piel en un ambiente cálido (e.g. en una sauna seca). Si permanecemos en una sauna “seca” y no nos movemos, nos sentiremos calientes debido a que la temperatura del ambiente es más alta que la temperatura de la piel. El calor sensible se transfiere por difusión desde el ambiente a través de la pequeña capa límite a nuestra piel. Sin embargo, si empezamos a hacer ejercicio (e.g. hacer calistenia), entraremos en calor rápidamente. Esto ocurre porque al realizar ejercicio ventilamos la piel reduciendo el grosor de la capa límite, lo cual favorece la transferencia de calor sensible a la superficie más fría (i.e. hacia nuestra piel). El balance de energía de una hoja, yema, fruta o fruto seco es similar. Aumentando la ventilación (e.g. velocidad del viento más alta) se reducirá el grosor de la capa límite y se favorecerá la transferencia de calor sensible. Durante una noche de helada, las diferentes partes de la planta tenderán a estar más frías que el aire, y por ello una velocidad del viento más alta calentará las plantas aun nivel tan alto como la temperatura del ambiente. Si la temperatura del ambiente es suficientemente alta, entonces el daño que se produce es muy poco o ninguno.

Aparecen algunos problemas si se utiliza la temperatura del aire en una garita ( $T_a$ ) como temperatura crítica para el daño ( $T_c$ ). La temperatura de la planta puede ser bastante diferente de la temperatura del aire dependiendo de la radiación neta, la exposición al cielo, y al suelo, y de las condiciones de la hoja y de ventilación (viento). Las temperaturas críticas de daño se determinan a menudo colocando ramas escindidas en una cámara fría. En la cámara, la temperatura se baja lentamente y se mantiene por debajo de una temperatura específica durante 30 minutos y, a continuación, se evalúa en la rama el porcentaje de daño en las yemas, los botones florales, los frutos o frutos secos. No existe una solución fácil para poder comparar los valores publicados de  $T_c$  con lo que realmente ocurre en una noche de helada. En la práctica, deberíamos utilizar únicamente los valores de  $T_c$

como una directriz y recordar que la temperatura a la que están expuestas las ramas está probablemente por debajo de la temperatura medida en una garita.

Si conocemos las relaciones entre la temperatura de los tejidos de la planta más sensibles y la temperatura de la garita ayudará en la toma de decisiones en la protección contra heladas. Por ejemplo, se sabe que las hojas de los cítricos se congelan aproximadamente a  $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Powell y Himelrick, 2000). Sin embargo, la relación entre la temperatura de la hoja y la temperatura de la garita depende de las condiciones ambientales locales. Si controlamos que la temperatura de la hoja de los cítricos no caiga por debajo de  $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  podemos salvar un cultivo bajo condiciones de una helada muy severa. Sin embargo, la medida de la temperatura de la hoja es un trabajo intenso y que no realiza normalmente. Por ello es conveniente estimar la temperatura de la hoja a partir de la temperatura de la garita. Además de los cítricos, la relación entre la temperatura de la hoja y la temperatura de la garita no está disponible para yemas, botones florales, pequeños frutos, y frutos de hueso en estadio inicial de crecimiento y en frutos del bosque (Powell y Himelrick, 2000).

El super-enfriamiento de las partes de las plantas dificulta la identificación de las temperaturas críticas. Por ejemplo, los cítricos tienen concentraciones relativamente bajas de bacterias nucleadoras de hielo, y esto puede explicar porque la  $T_c$  de las hojas de los cítricos se encuentran de forma consistente a  $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En muchos cultivos de hoja caduca, identificar una temperatura crítica de forma clara es más difícil ya que el súper-enfriamiento varía con la concentración de bacterias nucleadoras de hielo.

La presencia de agua sobre las superficies de las plantas también afectará al daño por helada. Powell y Himelrick (2000) observaron que las superficies secas de las plantas congelan a una temperatura del aire más baja que las superficies húmedas. Citaron trabajos realizados en California que mostraban como los frutos húmedos de los cítricos se enfriaban más rápidamente que los frutos secos durante las heladas. A la misma temperatura del aire, un fruto húmedo está más frío que un fruto seco debido a que el agua se evapora y extrae calor sensible. El fruto húmedo puede enfriar hasta la temperatura del bulbo húmedo, que siempre es menor o igual que la temperatura del aire. Las zonas con agua en la piel de la fruta de un cítrico, en una noche de helada, pueden dañarse, ya que la piel bajo estas zonas con agua puede enfriarse hasta la temperatura del bulbo húmedo mientras que las partes secas del fruto están más calientes. Daños similares se producen en la piel de otras frutas si se humedecen en una noche de helada. Por lo tanto, es poco aconsejable humedecer las plantas antes de una noche de helada a no ser que los aspersores se utilicen durante la noche.