

GENERALIDADES

Cuando la temperatura del aire cae por debajo de los 0 °C, los cultivos sensibles pueden sufrir daños, con un efecto significativo en la producción. Por ejemplo, en los EE.UU., hay más pérdidas económicas por el daño de las heladas que por cualquier otro fenómeno relacionado con la meteorología (White y Haas, 1975). Por lo tanto los impactos sobre los agricultores afectados y sobre la economía local son, con frecuencia, devastadores. A pesar de su importancia, la información sobre cómo proteger a los cultivos de la congelación es escasa. Por consiguiente, existe la necesidad de una información, mayor y más simplificada, que permita ayudar a los agricultores a afrontar este grave problema. En este libro se presentan y se discuten, junto con los métodos de protección, la distribución, la economía, la historia, y los aspectos físicos y biológicos de los daños por helada.

Este libro contiene un amplio abanico de información que va desde lo más básico a lo más complejo; sin embargo está escrito para ayudar a los agricultores a entender mejor la protección contra heladas y a desarrollar estrategias para combatir las pérdidas por congelación. Se presentan las referencias necesarias para los que quieran ir más allá en las investigaciones científicas sobre la protección contra heladas. No obstante, el objetivo, más que proporcionar una revisión bibliográfica, es proporcionar una guía para los más prácticos. Debido a que algunos aspectos de la protección contra heladas son complejos, se incluyen en el libro algunos programas informáticos de utilidad para algunas de las aplicaciones. Además, se proporciona información sobre aplicaciones y medidas simples y asequibles a partir de tablas y gráficas junto a los algoritmos utilizados para su elaboración.

Para aquellos lectores que están más interesados en los aspectos prácticos que los científicos hay que leer el capítulo 2 sobre Métodos Recomendados de Protección contra Heladas, que proporciona información menos técnica de todos los aspectos de la protección contra heladas. Para aquellos lectores que quieren explicaciones más detalladas los capítulos del 3 al 8 discuten la mayoría de aspectos de la protección contra heladas incluyendo su base científica. El volumen II de este libro cubre los aspectos de probabilidad, riesgo y economía de la protección contra heladas. Aunque hay información de utilidad para meteorólogos el libro no cubre ni el pronóstico a escala sinóptica o meso-escala

ni la modelización del riesgo de heladas. Estos están revisados en otras publicaciones más técnicas (e.g. Kalma *et al.*, 1992). No obstante, para los agricultores locales y para los técnicos, el libro debería proporcionarles la mayor parte de la información necesaria para tomar decisiones acertadas, que permitan ayudar a los agricultores y a la comunidad local a minimizar los efectos devastadores del daño por helada.

DEFINICIONES DE CONGELACIÓN Y DE HELADA

Técnicamente, la palabra “helada” se refiere a la formación de cristales de hielo sobre las superficies, tanto por congelación del rocío como por un cambio de fase de vapor de agua a hielo (Blanc *et al.*, 1963; Bettencourt, 1980; Mota, 1981; Cunha, 1982); no obstante, la palabra es ampliamente utilizada por el público para describir un evento meteorológico cuando los cultivos y otras plantas experimentan daño por congelación. Los agricultores a menudo utilizan los términos “helada” y “congelación” de forma indistinta, con la definición vaga de “una temperatura del aire inferior o igual a 0 °C”. Ejemplos de definiciones de helada en la literatura incluyen:

- La ocurrencia de una temperatura inferior o igual a 0 °C medida en una garita “tipo Stevenson” a una altura entre 1,25 y 2,0 m (Hogg, 1950, 1971; Lawrence, 1952);
- La ocurrencia de una temperatura inferior a 0 °C, sin definición del tipo de garita y de la altura (Raposo, 1967; Hewett, 1971);
- Cuando la temperatura de la superficie cae por debajo de 0 °C (Cunha, 1952); y la existencia de una temperatura del aire baja que causa el daño o la muerte de las plantas, sin mencionar la formación de hielo (Ventskevich, 1958; Vitkevich, 1960).

Snyder, Paw U y Thompson (1987) y Kalma *et al.* (1992) han definido helada en dos ámbitos: “advectiva” y “radiativa”. Las heladas advectivas están asociadas con incursiones a gran escala de aire frío con una atmósfera con viento y bien mezclada y una temperatura que a menudo está por debajo de cero, incluso durante el día (Tabla 1.1). Las heladas de radiación están asociadas con el enfriamiento debido a la pérdida de energía por el intercambio radiante durante las noches despejadas y en calma, y con inversiones de temperatura (i.e. la temperatura aumenta con la altura). En algunos casos, se produce una combinación tanto de condiciones advectivas como radiativas. Por ejemplo, no es extraño tener condiciones advectivas que traen una masa de aire frío en una región provocando una helada advectiva. Esto puede venir seguido por varios días despejados, con condiciones de calma que conducen a heladas de radiación.

TABLA 1.1

Terminología de los eventos de helada y características típicas

TIPO DE HELADA	CARACTERÍSTICAS
Radiación	Despejado; calma; inversión; la temperatura es superior a 0 °C durante el día
Advección	Ventoso; sin inversión; la temperatura puede ser inferior a 0 °C durante el día.

Además, los autores han observado condiciones consideradas como “heladas de advección a microescala”. Esto ocurre cuando la región es expuesta a condiciones de heladas tipo radiación, pero el drenaje de aire frío local conduce a una caída rápida de temperatura a pequeña escala dentro del área con helada de radiación.

Las definiciones sobre helada y congelación en los diccionarios y en la literatura son variables y confusas; sin embargo, en un sentido muy amplio, el término protección de heladas se utiliza más comúnmente que protección contra la congelación. De acuerdo con la literatura, se ha decidido que las siguientes definiciones son adecuadas y serán utilizadas en este libro.

Una “helada” es la ocurrencia de una temperatura del aire de 0 °C o inferior, medida a una altura de entre 1,25 y 2,0 m por encima del nivel del suelo, dentro de una garita meteorológica adecuada. El agua dentro de las plantas puede que se congele o no durante un evento de helada, dependiendo de varios factores de evitación (e.g. superenfriamiento y concentración de bacterias nucleadoras de hielo). Una “congelación” ocurre cuando el agua extracelular dentro de la planta se congela (i.e. cambia de líquido a hielo). Esto puede o no dañar el tejido de la planta, según los factores de tolerancia (e.g. contenido de solutos de las células). Un evento de helada se convierte en un evento de congelación cuando se forma hielo extracelular dentro de las plantas. El daño por congelación ocurre cuando la temperatura del tejido de las plantas cae por debajo de un valor crítico donde hay condición fisiológica irreversible que conduce a la muerte o al funcionamiento incorrecto de las células de las plantas. Esta temperatura que produce el daño de los tejidos se correlaciona con las temperaturas del aire denominadas “temperaturas críticas” medidas en garitas con instrumentos estándar. Las temperaturas del aire bajo cero son producidas por disminuciones en el contenido de calor sensible del aire cerca de la superficie, principalmente debido a (1) una pérdida neta de energía a través de la radiación desde la superficie hacia el cielo (i.e. helada de radiación); (2) viento que fluye con aire por debajo de cero para reemplazar el aire más caliente (i.e. helada de advección); o (3) alguna combinación de los dos procesos.

LAS HELADAS DE RADIACIÓN

Las heladas de radiación son acontecimientos usuales. Se caracterizan por un cielo despejado, en calma o con poco viento, inversión de temperatura, temperaturas del punto de rocío bajas y temperaturas del aire que normalmente caen por debajo de 0 °C durante la noche pero que están por encima de 0 °C durante el día. La temperatura del punto de rocío es la temperatura que se alcanza cuando el aire se enfría hasta que alcanza una humedad relativa del 100%, y es una medida directa del contenido de vapor de agua del aire. Para ilustrar la diferencia entre una helada de advección y una helada de radiación, datos de los dos peores eventos de helada ocurridos en el siglo veinte en la región de cultivo de cítricos en California se muestran en las Figuras 1.1 y 1.2. Observa que las temperaturas máximas durante el día caen considerablemente conforme el aire frío se mueve dentro de la región. De acuerdo con la velocidad del viento no se consideraría como un evento de helada de advección ya que durante la noche no había viento o era muy ligero, cuando las temperaturas estaban bajo cero. Sin embargo, como estuvo nublado durante los primeros días de los eventos, las temperaturas bajo cero fueron atribuidas a la advección de aire frío en el área más

FIGURA 1.1

Temperaturas medias del aire y del punto de rocío a 1,5 m de altura y velocidad del viento media a 2,0 m de altura registradas durante el evento de diciembre de 1990 en Lindcove, California, EE.UU.

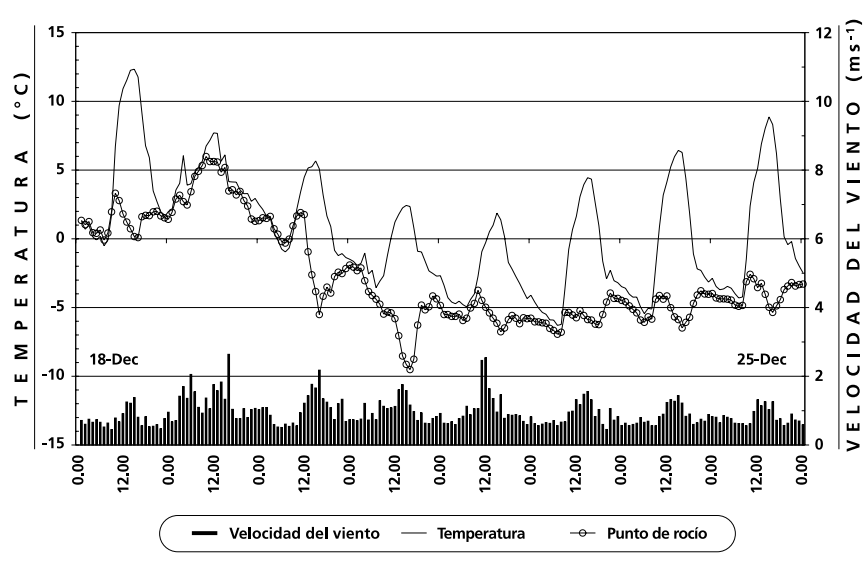
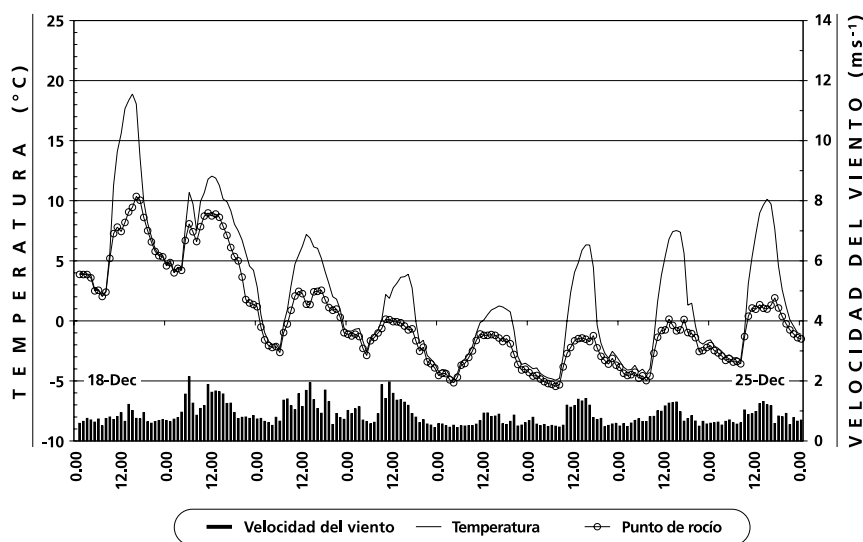


FIGURA 1.2

Temperaturas medias del aire y del punto de rocío a 1,5 m de altura y velocidad media del viento a 2,0 m de altura en el evento de Diciembre de 1998 en Lindcove, California, USA

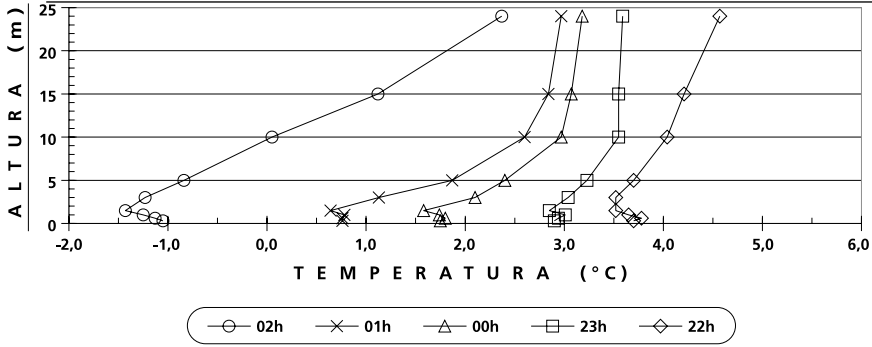


que al resultado de una pérdida de radiación neta. Eventos similares a las dos primeras heladas habían ocurrido en 1913 y en 1937, y por tanto son ocurrencias relativamente poco frecuentes. Sin embargo, no puede considerarse el caso en climas más continentales donde las temperaturas bajo cero son más frecuentes.

Durante la noche con cielos despejados, se pierde más calor por radiación que la que se recibe y ello conduce a una caída de la temperatura. La temperatura cae más rápido cerca de la superficie que está radiando provocando la formación de una inversión de temperatura (i.e. la temperatura aumenta con la altura por encima del suelo). El proceso se muestra en la Figura 1.3. Como hay una pérdida neta de energía por la radiación desde la superficie, el contenido de calor sensible de la superficie del suelo y del aire cercano a la superficie disminuye. Hay un flujo de calor sensible hacia abajo desde el aire y hacia arriba desde el suelo hacia la superficie para reemplazar la pérdida de calor sensible. Esto provoca que la temperatura disminuya también en el aire, pero no tan rápidamente como en la superficie. La altura de la parte superior de la inversión de temperatura es variable dependiendo de la topografía local y de las condiciones meteorológicas, pero generalmente varía de los 9 a los 60 m (Perry, 1994).

FIGURA 1.3

Desarrollo de una inversión sobre un campo de manzanos en el norte de Portugal



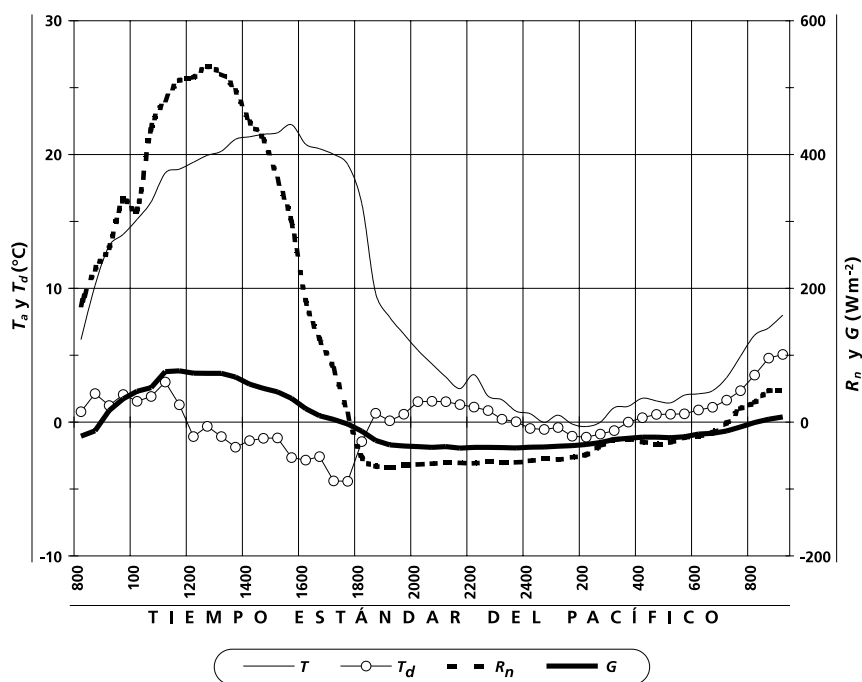
Si la temperatura del aire se mide a la altura suficiente por encima de la superficie del suelo, se alcanzará el punto donde se empieza a disminuir con la altura (una condición normal del gradiente de temperatura). El nivel donde el perfil de temperatura cambia desde una inversión hasta una condición normal del gradiente de temperatura, se denomina techo. Una inversión débil (techo alto) ocurre cuando las temperaturas de la parte superior únicamente son ligeramente más altas que cerca de la superficie y una inversión fuerte (techo bajo) tiene un incremento rápido de la temperatura con al altura. Los métodos de protección intensivos, desde el punto de vista energético, son más efectivos durante las condiciones de techo bajo, condiciones de inversión fuerte que son típicas de las heladas de radiación.

Hay dos subcategorías de heladas de radiación. Una “helada blanca” ocurre cuando el vapor de agua se deposita sobre la superficie y forma una capa blanca de hielo que se denomina normalmente “escarcha”. Una helada “negra” ocurre cuando la temperatura cae por debajo de 0 °C y no se forma hielo sobre la superficie. Si la humedad es suficientemente baja, entonces la temperatura de la superficie puede que no alcance la temperatura del punto de formación de hielo y no se formará escarcha. Cuando la humedad es alta, el hielo es más probable que se deposite y se produce una “helada blanca”. Como el calor se libera durante el proceso de deposición del hielo, las heladas blancas normalmente producen menos daño que las heladas negras.

Observa que las gráficas de la temperatura del aire diaria para las heladas de diciembre de 1990 y de 1998 en California (Figuras 1.1 y 1.2) tienen formas similares en los dos años; sin embargo, la tendencia de la temperatura del punto

FIGURA 1.4

Temperaturas del aire (T_a) y del punto de rocío (T_d) a 1,5 m de altura, radiación neta (R_n) y densidad de flujo de calor al suelo (G) medidos en un campo de nogales en el Valle Indian en el Norte de California, EE.UU.



de rocío fue diferente en los dos años. Como las gráficas de la temperatura del aire tienen una forma similar durante muchas heladas de radiación nocturnas, una buena aproximación de los cambios en la temperatura del aire durante la noche puede hacerse con un modelo empírico. No obstante, debido a la variabilidad, es casi imposible generalizar sobre los cambios en la temperatura del punto de rocío durante la noche.

Una característica de la temperatura del aire en las heladas de radiación nocturnas es que su mayor caída se produce en unas pocas horas después de la puesta del Sol, cuando la radiación neta sobre la superficie cambia rápidamente de positiva a negativa. Este cambio rápido en la radiación neta ocurre porque la radiación solar disminuye desde el valor más alto en mediodía hasta cero en la puesta de Sol, y la radiación neta de onda larga siempre es negativa. Esto se explica con más detalle en el capítulo 3. La Figura 1.4 muestra las tendencias

típicas de la temperatura, la radiación y la densidad de flujo de calor al suelo durante una helada de radiación nocturna. En este ejemplo, la temperatura cae unos 10 °C durante la primera hora después que la radiación neta se vuelva negativa. Una vez la radiación neta ha alcanzado su valor más negativo, la temperatura caerá 10 °C más durante el resto de la noche. La tasa de cambio de temperatura fue pequeña (e.g. menos de 1,0 °C h⁻¹) desde las dos horas después de la puesta de Sol hasta la salida del Sol.

LAS HELADAS DE ADVECCIÓN

Las heladas de advección se producen cuando el aire frío fluye en un área para reemplazar el aire más caliente que estaba presente antes del cambio meteorológico. Está asociada con condiciones de nubosidad, vientos de moderados a fuertes, sin inversión de temperatura y baja humedad. A menudo las temperaturas caerán por debajo del punto de fusión (0 °C) y permanecerán así todo el día. Como muchos de los métodos de protección activos trabajan mejor con la presencia de una inversión, las heladas de advección son difíciles de combatir. En muchos casos, una serie de noches bajo cero empiezan como una helada de advección y cambiarán más tarde a noches con heladas de radiación. Por ejemplo, las dos heladas importantes de California de 1990 y de 1998 que se muestran en las Figuras 1.1 y 1.2 empezaron como heladas de advección. Aunque las velocidades del viento fueron bajas, hubo condiciones de nubosidad desde el 18 al 20 de diciembre de 1990 y del 18 al 22 de diciembre de 1998. Sin embargo, la temperatura todavía cayó hasta mínimos bien por debajo de 0 °C durante estos períodos. Una vez los cielos se despejaron (i.e. 21–25 de diciembre de 1990 y 23–25 de diciembre de 1998), la temperatura bajo cero resultó más por pérdidas de radiación que por advección de aire frío.

Las heladas principales se producen en los climas mediterráneos, pero tienden a ser más comunes en la parte este de los continentes donde las masas de aire frío continental penetran desde las regiones árticas a las áreas subtropicales. Algunos de los mejores ejemplos están en Florida, EE.UU., en la región de cultivo de cítricos. Attaway (1997) describe la primera helada “de mayor impacto”, ocurrida en 1835, citando a John Lee Williams’ que da cuenta de la helada, y que escribió que “el viento del noroeste sopló durante 10 días y la temperatura cayó hasta los -13,9 °C. Incluso el río local se heló, y toda clase de árboles frutales murieron hasta la latitud 28° N”. Evidentemente, existe una gran diferencia cuando se intenta proteger contra temperaturas bajo cero en condiciones de viento sin una inversión que proteger contra una helada de radiación poco severa. Por suerte las heladas de este tipo suelen ser esporádicas, mientras que las heladas de radiación ocurren más a menudo.

CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PROTECCIÓN

Las técnicas de protección contra heladas normalmente se dividen en métodos indirectos y directos (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978), o en métodos pasivos y activos (Kalma *et al.*, 1992). Los métodos pasivos son los que actúan en términos de prevención, normalmente para un periodo largo de tiempo y cuyas acciones son particularmente beneficiosas cuando se producen las condiciones de helada. Los métodos activos son temporales y requieren intensamente energía o trabajo, o ambos. Los métodos pasivos se relacionan con técnicas biológicas y ecológicas, e incluyen prácticas llevadas a cabo antes de las noches de helada para reducir el potencial de daño. Los métodos activos se basan en métodos físicos e intensivos desde el punto de vista energético. Requieren esfuerzo en el día previo o durante la noche de la helada. La protección activa incluye estufas, aspersores y máquinas de viento, que se usan durante la noche de helada para reemplazar las pérdidas de energía natural. En la Tabla 1.2 se presenta una clasificación de los métodos.

EVALUACIÓN GEOGRÁFICA DEL DAÑO POR HELADA A LOS CULTIVOS

Los daños por helada pueden producirse casi en cualquier localidad, fuera de las zonas tropicales, donde la temperatura desciende por debajo del punto de fusión del agua (0 °C). La cantidad de daño depende de la sensibilidad del cultivo a la congelación en el momento de producirse el evento y del tiempo que la temperatura está por debajo de la temperatura “crítica de daño” (T_c). Por ejemplo, Argentina, Australia, Canadá, Finlandia, Francia, Grecia, Israel, Japón, Jordania, Nueva Zelanda, Portugal, Suiza, Estados Unidos de América y Zambia han desarrollado técnicas de previsión de temperatura mínima (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978) para ayudar en la protección contra heladas. Naturalmente, muchos otros países en climas templados y áridos y con altitudes elevadas también tienen problemas con el daño por helada.

En gran medida, el potencial del daño por helada depende de las condiciones locales. Además, es difícil presentar una evaluación geográfica del daño potencial. La longitud media del periodo libre de heladas, que se extiende desde la ocurrencia de la última temperatura bajo cero en la primavera hasta la primera en otoño, es a veces utilizada para caracterizar geográficamente el potencial de daño.

Un mapa mundial de la longitud media del periodo libre de heladas (Figura 1.5) muestra claramente que el mayor potencial de daño por helada aumenta conforme nos movemos hacia los polos. Únicamente a latitudes entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio son áreas relativamente grandes con pocas o ningunas temperaturas bajo cero. Incluso en estas áreas tropicales, los daños

TABLA 1.2

Categorías y subcategorías para los métodos de protección contra heladas

CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	METODOS DE PROTECCION
Pasiva	Biológica (evitación o resistencia)	Inducción de resistencia a la congelación sin modificar la genética de las plantas Tratamiento de las semillas con agroquímicos Selección de plantas y mejora genética Selección de especies por el momento de desarrollo fenológico Selección de fechas de plantación para cultivos anuales una vez la probabilidad de helada en primavera ha disminuido Reguladores del crecimiento y otras sustancias químicas
	Ecológica	Selección de emplazamiento para cultivar Modificación del paisaje y microclima Control del estado nutritivo Manejo del suelo Control de la cobertura del cultivo (malas hierbas) y otras coberturas
Activa	Coberturas y Radiación	Materiales orgánicos Coberturas con soporte Coberturas sin soporte
	Agua	Aspersores sobre las plantas Aspersores bajo las plantas Micro-aspersores Riego por superficie Niebla artificial
	Estufas	Combustible sólido Combustible líquido Propano
	Máquinas de viento	Horizontal Vertical Helicópteros
	Combinaciones	Ventiladores y estufas Ventiladores y agua

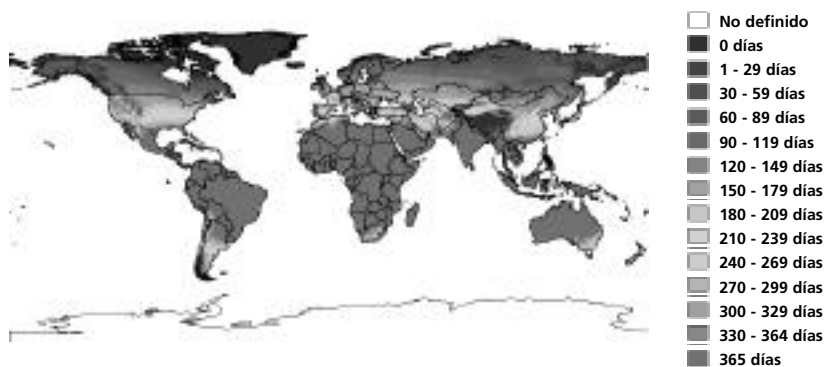
por heladas ocurren a veces a altitudes elevadas. El daño es menos probable cuando la masa de tierra es en la área para donde sopla el viento o está rodeada de grandes cuerpos de agua, por el efecto moderador del ambiente marítimo sobre la humedad y la temperatura, y por tanto de las fluctuaciones de la temperatura y la formación del rocío o escarcha.

A pesar de que el mapa de la longitud media del periodo libre de heladas proporciona una guía general de utilidad sobre dónde es mayor el potencial de daño por helada, no es un mapa detallado. De nuevo, la probabilidad de temperaturas bajo cero está afectada por las condiciones locales que no pueden mostrarse en un mapa global. De hecho, los agricultores pueden experimentar algunas pérdidas económicas debido al daño por heladas incluso si ocurren con poca frecuencia.

Aunque está fuera del alcance de este libro, un esfuerzo considerable se ha realizado recientemente para mejorar la caracterización geográfica del riesgo de daño por helada a escala regional. Kalma *et al.* (1992) publicaron una revisión extensa sobre la caracterización geográfica del riesgo de helada. Por ejemplo, Lomas *et al.* (1989) prepararon un atlas de mapas de riesgo de heladas para Israel. Utilizaron más de 25 años de datos de temperatura e información topográfica para desarrollar los mapas, que muestran claramente una estrecha relación entre la elevación y el riesgo de temperatura bajo cero. Otros han utilizado temperaturas tomadas en dispositivos móviles o información topográfica y de suelos, sin datos de temperatura, para derivar mapas de riesgo. Estudios de casos sobre desarrollo de un mapa de riesgo de helada utilizando un modelo de elevación fueron presentados por Kalma *et al.* (1992) basándose en Laughlin y Kalma (1987, 1990), y por Zinoni *et al.* (2002b).

FIGURA 1.5

Distribución geográfica de la longitud media del periodo libre de heladas. Ver el archivo: "Frost free map.jpeg" en el CD de los programas para ver la distribución en colores



Mientras que se necesita más y mejor información espacial del riesgo de daño por heladas, no hay sustituto para una buena información y seguimiento local. Muchos agricultores tienen una idea acertada sobre la localización de las zonas frías en su localidad. Es definitivamente necesario consultar a los vecinos antes de plantar cultivos sensibles en un emplazamiento específico. Generalmente, deben evitarse las zonas bajas, donde el aire frío se embalsa. Hay que evitar también las áreas donde la topografía natural o modificada impide el drenaje del aire frío desde el emplazamiento. Como la niebla del suelo se forma inicialmente en las zonas bajas, una buena regla es evitar los emplazamientos donde se forma pronto la niebla. Definitivamente, se deberían revisar los mapas topográficos locales antes de plantar cultivos sensibles a las heladas en emplazamientos de alto riesgo. Por ejemplo, como la floración es tardía, raramente es necesaria la protección contra heladas en las plantaciones de nogales en California, pero los autores han observado que unas cuantas plantaciones situadas en zonas frías experimentan normalmente daños por heladas. Esto hubiera podido evitarse fácilmente comprobando los registros meteorológicos locales y los mapas topográficos. La selección del emplazamiento se discute con más detalle más tarde, en la sección dedicada a la protección pasiva.

IMPORTANCIA ECONÓMICA DEL DAÑO POR HELADAS

En los EE.UU. se producen más pérdidas económicas por congelación de cultivos que por cualquier otro riesgo meteorológico. En el Estado de Florida, la industria de los cítricos ha sido devastada por el daño de las heladas en varias ocasiones, resultando en el coste de frutos y árboles de varios miles de millones de dólares (Cooper, Young y Turrell, 1964; Martsolf *et al.*, 1984; Attaway, 1997). En California, la helada de diciembre de 1990 causó aproximadamente 500 millones de dólares en pérdidas de frutos y daños a aproximadamente 450 000 ha de árboles (Attaway, 1997). Hubo aproximadamente 700 millones de dólares en daños durante la helada de diciembre de 1998 (Tiefenbacher, Hagelman y Secora, 2000). De forma similar, se han observado con frecuencia en todo el mundo enormes pérdidas económicas otros cultivos hortofrutícolas sensibles.

Por ejemplo, Hewitt (1983) describió los efectos de la congelación en la producción de café en Brasil durante la década de 1960 y de 1970. La muerte en invierno de cereales también es un problema importante (Stebelsky, 1983; Caprio y Snyder, 1984a, 1984b; Cox, Larsen y Brun, 1986).

Aunque las pérdidas de los agricultores pueden ser enormes, también hay muchos efectos secundarios en las comunidades locales y regionales. Por ejemplo, si no hay fruta para recoger, los recogedores de fruta estarán sin empleo,

los procesadores tendrán poca o ninguna fruta, y por ello los empleados estarán sin trabajo, y, debido al desempleo, habrá menos dinero en circulación y la economía local sufrirá. Consecuentemente, hay que emplear un esfuerzo considerable en reducir el daño por helada.

La eficacia en costes de la protección contra heladas depende de la frecuencia de la ocurrencia, del coste del método de protección y del valor del cultivo. Generalmente, la protección pasiva de heladas se justifica con facilidad. La eficacia en costes de la protección activa depende del valor del cultivo y del coste del método. En este libro se discuten tanto los métodos pasivos como los activos, así como la economía de la protección.

HISTORIA DE LA PROTECCIÓN CONTRA HELADAS

El daño por helada a los cultivos ha sido un problema para los humanos desde que se cultivaron los primeros cultivos. Aunque todos los aspectos de la producción de los cultivos estén bien gestionados, una noche con temperaturas de congelación puede conducir a la pérdida completa del cultivo. Excepto para las latitudes de los trópicos, donde las temperaturas en raras ocasiones caen por debajo de punto de fusión, el daño debido a las temperaturas de congelación es un problema mundial. Normalmente, el daño por helada en climas subtropicales está asociado con el movimiento lento de masas de aire frío que puede traer 2–4 noches de 8–10 horas de temperatura bajo cero (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978). En las localizaciones continentales del este, los eventos que causan daño son normalmente los advectivos, con inversiones débiles. En los climas continentales del oeste y en los marítimos, los eventos de helada son más típicos en condiciones de calma y fuertes inversiones. Los eventos que causan daño empiezan normalmente con advección de aire frío seguido por unas pocas noches con heladas de radiación. En los climas templados, los periodos de helada son de duración más corta y se producen de forma más frecuente que en otros climas (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978).

Para los frutales de hoja caduca y árboles de frutos secos, los eventos de helada que producen daño ocurren principalmente en primavera, aunque a veces también ocurren en otoño. Para los frutales subtropicales, el daño a los cultivos ocurre normalmente durante el invierno. En los climas tropicales, normalmente no hay congelación excepto en las altitudes más altas. En consecuencia, cuando los cultivos tropicales son dañados por el frío, la temperatura está normalmente por encima de cero. Cuando ocurre daño a temperaturas por encima de 0 °C, se denomina daño por “enfriamiento” más que por “congelación”. En los climas templados, el daño a los cultivos de grano puede ocurrir también antes de la fase

de hinchamiento de las espigas bajo condiciones severas, o a las flores incluso con heladas moderadas.

Para los agricultores productores de grano, la principal respuesta es plantar cultivos o variedades que sean menos susceptibles al daño (e.g. plantar trigo de primavera más que trigo de invierno), o no plantar cultivos sensibles en la zona si el daño se produce con demasiada frecuencia. En cualquier caso, la fecha de plantación debería ajustarse al cultivo, a la variedad y al microclima. De forma similar, si las temperaturas bajo cero se producen de forma muy frecuente, los cultivos subtropicales se cultivan preferentemente en regiones con menor ocurrencia de daño. Un buen ejemplo de ello es el movimiento de la industria de los cítricos más al Sur de Florida en respuesta a las distintas heladas graves durante la década de los años 1980 y de 1990 (Attaway, 1997). Al mismo tiempo, debido a temperaturas más favorables, la industria del olivo se ha ido moviendo hacia el norte de Italia donde los factores, suelo y clima, permiten la producción de aceite de oliva de alta calidad. Sin embargo, esto ha conducido al aumento de daño por heladas a los olivos durante los inviernos más rigurosos de 1985, 1991 y 1996 (Rotondi y Magli, 1998). De forma general, las fechas de la ocurrencia de la última helada en primavera y de la primera ocurrencia en otoño determinarán donde se cultivan los plantas en particular. Por ejemplo, muchos de los frutales de hoja caduca y de frutos secos tienden a cultivarse en los climas mediterráneos porque la probabilidad de perder un cultivo por daños por helada es menor que en climas continentales. La ciencia de la protección contra heladas se ha desarrollado principalmente en respuesta a la ocurrencia de daños de forma intermitente en climas relativamente favorables. Si el daño se produce con cierta regularidad, la mejor estrategia es cultivar el cultivo en cualquier localidad más favorable.

En algunos casos, las localizaciones de cultivos cambian en respuesta al cambio climático. Por ejemplo, Attaway (1997) observó que antes de 1835 los naranjos se cultivaban normalmente en Carolina del Sur, Georgia y el Norte de Florida, donde, la gente hoy en día no consideraría la producción comercial de naranjas debido a las pérdidas potenciales por daño por helada. Attaway citó algunos ejemplos de frutales subtropicales que han sobrevivido hasta aproximadamente 1835, cuando se produjo una helada grave. De hecho, existían citas de documentos recomendando el cultivo de frutas subtropicales en el Sudeste de América para poder competir con la fruta producida en los países mediterráneos de Europa. Con el clima actual, la producción de frutas subtropicales no se podría considerar en estas áreas. Attaway (1997) indica que sus observaciones están basadas más en la experiencia de los agricultores que en la climatología, pero pocos eventos de heladas capaces de producir daño deben haber ocurrido

durante los periodos de 1700–1800s para que los agricultores hayan producido frutas subtropicales donde, hoy en día, no pueden producirse económicamente.

La historia del daño por heladas es más esporádica en el clima mediterráneo de California. Han existido algunas pérdidas importantes de tanto en tanto, pero la diversidad de cultivos y el momento de las heladas conducen a una menor extensión de los impactos en California. Recientemente, la industria de los cítricos en California ha sufrido dos eventos que han producido daños importantes. Uno ocurrió en diciembre de 1990 y el otro en diciembre de 1998. La helada de 1990 causó los daños más importantes a la producción de cítricos desde las heladas de 1913 y de 1937 (Attaway, 1997). Es interesante cómo algunas regiones sufrieron daños pequeños, mientras que otras fueron devastadas. Attaway (1997) observó que a pesar de que el daño a los frutos fue inmenso,

“muchos árboles estaban en condiciones relativamente buenas aunque tuvieron que aguantar temperaturas que hubieran matado los árboles en Florida. Atribuimos esto al hecho de que las dos semanas anteriores a la helada se produjeron por las mañanas temperaturas bajas del orden de 20 y 30 °F [i.e. entre unos -4 °C y +2 °C], poniendo los árboles casi por completo en un estado durmiente.”

La helada de diciembre de 2000 fue un buen ejemplo de cómo el endurecimiento puede proporcionar protección contra el daño por helada. En Florida, antes del paso de un frente frío y la caída de las temperaturas bajo cero, temperaturas relativamente cálidas preceden a una helada grave. Consecuentemente, los árboles están menos endurecidos contra los daños por helada que aquellos expuestos en las dos heladas de California. De forma interesante, Attaway (1997) enfatizó la naturaleza inconsistente del daño por helada que se observó tras la helada. Por ejemplo, dentro de una región relativamente pequeña, observó pérdidas del 70% al 80% de la producción de naranjas en el valle de Ojai, pérdidas del 60% al 70% en el cañón de Santa Paula, pero solo pérdidas del 20% en el valle de Santa Clara, que está relativamente cerca. Esto ilustra la naturaleza asociada de forma específica a un lugar del daño por helada a los cultivos, especialmente en regiones montañosas y con cuevas como el condado de Ventura en California.

La helada de diciembre de 1998 no fue tan mala para los citricultores de California como lo fue la de 1990; sin embargo, todavía está considerada como una de las heladas más importantes del siglo veinte. Las pérdidas económicas fueron altas; no obstante, a diferencia de la helada de 1990, muchos agricultores fueron capaces de sobrevivir (Tiefenbacher, Hagelman y Secora, 2000). En su informe sobre la helada de diciembre de 1998 en el valle de San Joaquín, en California, Tiefenbacher, Hagelman y Secora (2000) observaron que existía una

clara relación entre la latitud y el daño producido y entre la latitud y la cosecha anticipada a la helada. Observaron que las plantaciones más al norte sufrieron más daño por helada, pero también que cosecharon considerablemente antes que la primera helada, lo que les permitió sobrevivir con menos pérdidas económicas. También observaron una relación entre la longitud y la edad y tamaño de las plantaciones, y a su vez la relación con la elevación. En el valle de San Joaquín, las plantaciones más viejas están localizadas en la zona este a elevaciones más altas, mientras que las plantaciones más jóvenes están en el oeste a las elevaciones más bajas del valle. Los revisores recomendaron que los modelos micrometeorológicos, combinados con datos digitales de la elevación e información detallada sobre los daños, podrían ayudar a entender los patrones espaciales del riesgo de daño.

Tiefenbacher, Hagelman y Secora (2000) observaron que las empresas más grandes perdían, en proporción, más producción, mientras que los pequeños agricultores y los miembros de cooperativas perdían menos. Esto fue parcialmente atribuido a la comunicación entre las organizaciones cooperativas y al hecho de que muchos agricultores pequeños cosecharon antes de la helada. Después de la helada de 1990, muchos de los agricultores empezaron a comprar seguros de cosechas contra catástrofes y los agricultores con seguro experimentaron más daño en 1998. Esto pudo ocurrir debido a que sus plantaciones eran más dadas a sufrir daños o, a que pudo haber menos esfuerzo en utilizar métodos de protección ya que disponían de seguro. La respuesta no se sabe. Además, Tiefenbacher, Hagelman y Secora (2000) observaron que la asistencia del gobierno frente al desastre pudo influir en las actividades de protección contra heladas por parte de los agricultores. Tanto en 1990 como en 1998, el gobierno proporcionó ayudas para hacer frente al desastre y ayudar a los agricultores a recuperar sus pérdidas. Mientras este alivio frente al desastre es de gran ayuda para los agricultores, puede al mismo tiempo desanimar a los agricultores a utilizar métodos de protección activos y puede animar a la expansión de la industria hacia áreas donde el riesgo del daño por helada es más alto (Tiefenbacher, Hagelman y Secora, 2000).

Históricamente, las estufas se han utilizado para proteger las plantas de la congelación durante más de 2000 años (Powell y Himelrick, 2000). Originalmente, las estufas eran mayoritariamente fuegos abiertos; sin embargo, en la historia reciente, se han utilizado contenedores de metal para el fuego para retener mejor el calor por radiación y por convección para el cultivo. Powell y Himelrick (2000) escribieron que un 75% de la energía de las estufas de chimenea es utilizada para calentar el aire directamente, que después es convectado hacia el

cultivo directa o indirectamente mezclando el aire dentro de la capa de inversión. Atribuyeron el 25 por ciento adicional de energía como transferencia desde las chimeneas de las estufas hacia las plantas como radiación directa, lo cual es efectivo incluso durante las heladas de advección.

Las primeras estufas con contenedor metálico conocidas (i.e. estufas con chimenea o recipientes que producían humo) para la protección contra heladas fueron introducidas por W.C. Scheu en 1907 en Grand Junction, Colorado, EE.UU. Descubrió que los dispositivos utilizados para calentar que quemaban petróleo eran más eficientes que los fuegos abiertos. Más tarde se conoció como estufas para plantaciones frutales HY-LO, las cuales eran fabricadas por la Scheu Manufacturing Company, que todavía hoy produce estufas portátiles. Incluso antes de las estufas para plantaciones frutales HY-LO los agricultores utilizaban contenedores metálicos sencillos que quemaban aceites pesados o neumáticos viejos de caucho que contenían serrín. Estos fuegos producían considerable humo aceitoso que durante un largo tiempo se creyó que proporcionaban protección contra la congelación bloqueando las pérdidas de radiación neta desde la superficie. De hecho, se sabe que si añaden partículas de humo al aire desde las estufas en las plantaciones frutales se aporta una escasa o prácticamente nula protección (Mee y Bartholic, 1979). El uso de las estufas para plantaciones frutales fue una práctica muy extendida durante algún tiempo, pero el humo era un contaminante terrible y el uso de las estufas en las plantaciones frutales que producen humo fue más tarde prohibido en los EE.UU. por razones sanitarias y ambientales. Se necesitó una fuerte protesta pública para eliminar definitivamente el uso de estufas que producen humo. Por ejemplo, el periódico de Pasadena Star-News, el 20 de octubre de 1947, publicaron una petición de Louis C. McCabe, director del recientemente constituido distrito para el control de la contaminación del aire de Los Ángeles, para eliminar el humo que producían los más de 4 millones de estufas en las plantaciones frutales. El distrito de control de la contaminación del aire del condado de Orange y otros siete distritos en California adoptaron regulaciones que prohibían el uso de combustibles sucios y recipientes que producían humo (SCAQMD, 2002).

En los EE.UU., los agricultores tuvieron pocos años para encontrar un método de protección contra heladas menos contaminante. Eventualmente, se desarrolló y durante algún tiempo se utilizó la estufa “con chimenea de retorno”, que recirculaba el humo y el vapor, (Leonard, 1951). Hoy en día, las estufas con chimenea de retorno y las estufas con combustible de propano de quema limpia son legales en muchas localidades; sin embargo, antes de utilizar cualquier tipo de estufa deben consultarse las regulaciones locales. No obstante, la percepción

del aumento de los costes del combustible y los aspectos de contaminación de mediados de los años cincuenta ha llevado a la desaparición de la mayoría de las estufas para la protección contra heladas. Durante los años 50, las máquinas de viento empezaron a sustituir a las estufas como el método preferido de protección contra las heladas. Eran más caras de comprar, pero la mano de obra y los costes de funcionamiento eran más bajos. Hacia los años 70, el uso de estufas para la protección contra heladas era casi inexistente en California. Pequeños fuegos y estufas con combustible sólido todavía se utilizan en algunas partes del mundo. Sin embargo, es probable que finalmente se paralice el uso de todas las estufas quemadoras salvo las limpias.