

LOS MÉTODOS RECOMENDADOS DE PROTECCIÓN CONTRA LAS HELADAS

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta información sobre aspectos importantes de los métodos de protección de heladas sin utilizar ecuaciones o conceptos complicados. Se proporciona información más detallada en los siguientes capítulos. Las referencias no se han incluido en este capítulo para reducir su tamaño y para simplificar la lectura.

LA SENSIBILIDAD DE LOS CULTIVOS Y LAS TEMPERATURAS CRÍTICAS

El daño que provocan las heladas a los cultivos no se debe a las frías temperaturas sino principalmente a la formación de hielo extracelular (i.e. fuera de las células) dentro del tejido de la planta, provocando la salida de agua y dañando las células por deshidratación. Después de periodos fríos, las plantas tienden a endurecerse contra el daño por congelación y pierden su dureza tras una temporada cálida. Una combinación de estos y otros factores determina la temperatura a la cual se forma el hielo dentro del tejido de las plantas y en qué momento se produce el daño. La cantidad de daño por helada aumenta con la caída de temperatura y la temperatura correspondiente a un nivel específico de daño se denomina “Temperatura crítica” o “Temperatura crítica de daño”, y se expresa por el símbolo T_c . En general, la mayor parte de temperaturas críticas se determinan en estudios realizados en cámaras de crecimiento que se van enfriando a un ritmo predeterminado que se mantiene durante 30 minutos. Después se registra el porcentaje de daño.

Las categorías de resistencia de cultivos hortícolas a las heladas y de otras plantas se indican en las Tablas 4.1 y 4.2. Para otros cultivos herbáceos los intervalos de temperatura crítica de daño se presentan en la Tabla 4.5. Los valores de temperatura crítica se dan para almendros (Tabla 4.6), otros frutales de hoja caduca y viña (Tablas 4.7 y 4.8), pequeños frutos, kiwis y fresas (Tabla 4.9), y cítricos (Tabla 4.10). En muchas de estas tablas, se proporcionan los valores T_{10} y T_{90} , donde T_{10} y T_{90} son las temperaturas donde el 10% y el 90% de la producción comercial es probable que sea dañada. Generalmente, las dos

temperaturas T_{10} y T_{90} aumentan con el tiempo después del desarrollo inicial de las yemas hasta el estadio de fruto pequeño, que es cuando los cultivos son más sensibles a la congelación. El valor T_{90} es bastante bajo al comienzo del crecimiento pero aumenta más rápidamente que T_{10} y existe una diferencia pequeña entre T_{10} y T_{90} cuando el cultivo es más sensible. Los valores de T_c para árboles frutales y viña varían con el estadio fenológico (Tablas 4.6 a 4.8). En Internet pueden encontrarse fotografías donde se muestran los estadios fenológicos de muchos de estos cultivos, incluyendo direcciones como fruit.prosser.wsu.edu/frsttables.htm o www.msue.msu.edu/vanburen/crittemp.htm.

A pesar de que los valores de T_c proporcionan alguna información sobre cuándo poner en marcha y detener los métodos activos de protección contra heladas, deberían utilizarse con precaución. Generalmente, los valores de T_c representan la temperatura de las yemas, de las flores y de los frutos pequeños donde se ha observado un nivel conocido de daño. Sin embargo, es difícil medir los tejidos sensibles de las plantas, y estas temperaturas es probable que difieran de la temperatura del aire, que es la que normalmente miden los agricultores. Excepto para frutos grandes (e.g. como las naranjas), las temperaturas de las yemas, de las flores y de los frutos pequeños tienden a ser más frías que la temperatura del aire, por ello los métodos activos de protección deberían ponerse en marcha y detenerse a temperaturas del aire más altas que las indicadas en las tablas del Capítulo 4. Para los frutos grandes, como los cítricos, la temperatura del aire al atardecer a menudo cae más rápidamente que la temperatura del fruto, por ello las estufas o los ventiladores pueden ponerse en marcha cuando la temperatura del aire está a la temperatura T_c o ligeramente por debajo. Los valores de T_c en el Capítulo 4 proporcionan unas directrices para conocer el momento de activar los métodos activos de protección, aunque estos valores deberían utilizarse con precaución ya que hay otros factores como las diferencias entre la temperatura de la planta y del aire; el grado de endurecimiento; y la concentración de bacterias activas en la nucleación de hielo (INA).

LA PROTECCIÓN PASIVA

La protección pasiva incluye métodos que se han implementado antes de la noche de la helada lo que puede evitar la necesidad de protección activa. Los principales métodos pasivos son:

- La selección del emplazamiento;
- El manejo del drenaje de aire frío;
- La selección de plantas;
- La cobertura con árboles;

- La gestión de la nutrición de las plantas;
- La poda adecuada;
- La cobertura de las plantas;
- El evitar el laboreo del suelo;
- El riego;
- El suprimir las cubiertas de hierba que cubren el suelo;
- Las coberturas del suelo;
- El pintar los troncos y envolturas;
- El control bacteriano; y
- La fecha de siembra para los cultivos anuales.

Los métodos pasivos son normalmente menos costosos que los métodos activos y a menudo los beneficios son suficientes para evitar la necesidad de la protección activa.

La selección del emplazamiento y manejo

Los agricultores son conscientes de que algunas zonas son más propensas que otras al daño por heladas. El primer paso para seleccionar un emplazamiento para una nueva plantación es hablar con la gente del lugar sobre qué cultivos y variedades son apropiadas para el área. Los agricultores y técnicos de la zona a menudo tienen más idea sobre qué emplazamientos pueden ser más problemáticos. Normalmente, las zonas topográficas bajas tienen temperaturas más frías y por tanto pueden sufrir más daño. Hay que tener en cuenta que el daño a veces puede ocurrir en una parte del área cultivada y no en otra, sin que se aprecien diferencias topográficas. En algunos casos ello puede ser debido a las diferencias en el tipo de suelo, que puede afectar a la conducción y al almacenamiento del calor en el suelo.

Los suelos arenosos y secos transfieren el calor mejor que los suelos arcillosos pesados y secos, y ambos transfieren el calor mejor que los suelos orgánicos (turbas). Cuando el contenido de agua está cerca de la capacidad de campo (i.e. un día o dos después de una buena humectación del suelo), muchos suelos presentan las condiciones que son más favorables para la transferencia y almacenamiento del calor. No obstante, los suelos orgánicos tienen una pobre transferencia y almacenamiento de calor independientemente del contenido de agua. Cuando se selecciona un emplazamiento en una región propensa a las heladas, hay que evitar plantar en los suelos orgánicos.

El aire frío es más denso que el aire caliente, y por consiguiente fluye ladera abajo y se acumula en las zonas bajas igual que el agua en una inundación (Figura 6.4). Por ello se deben evitar las posiciones más bajas de fondo, a no ser que como

estrategia a largo plazo se incluyan métodos de protección activos efectivos con relación a su coste. Esto es importante tanto a escala regional como al nivel de explotación agrícola. Por ejemplo, a escala regional, los fondos de valle cercanos a los ríos son normalmente más fríos que las pendientes situadas más arriba. Estas zonas pueden identificarse a partir de mapas topográficos, recogiendo datos de temperatura, y localizando las áreas donde se forman primero las nieblas a nivel del suelo. Las zonas bajas tienen consistentemente las noches más frías, cuando el cielo está despejado y el viento es débil, durante todo el año. Por esto, las medidas de temperatura para identificar las zonas frías pueden realizarse en cualquier momento del año.

La plantación de cultivos de hoja caduca en las pendientes cara norte retrasa la floración en primavera y, a menudo, proporciona protección. En el caso de los árboles subtropicales, es mejor plantarlos en las pendientes de las solanas donde el suelo y los cultivos pueden recibir y almacenar más energía directa del Sol.

El drenaje de aire frío

Para controlar el flujo de aire alrededor de zonas agrícolas, a veces se utilizan los árboles, los arbustos, los terraplenes, las pilas de heno, y las verjas. El propio emplazamiento puede afectar el potencial de daño por helada. Un estudio cuidadoso de los mapas topográficos puede, a menudo, prevenir los problemas de daño por helada más importantes. También puede proporcionar información el uso de bombas de humo u otros dispositivos que generen humo para estudiar el flujo de aire frío durante la noche pendiente abajo. Estos estudios se deben realizar en noches con heladas de radiación características, pero no necesariamente cuando la temperatura está bajo cero. Una vez se conoce el patrón del drenaje de aire, entonces la correcta colocación de obstáculos para su desviación puede proporcionar un elevado grado de protección.

Si ya existe un cultivo en una zona fría, hay varias prácticas de manejo que pueden ayudar a reducir el riesgo de daño por helada. Cualquier obstáculo que impida el drenaje de aire frío pendiente abajo desde un cultivo debe eliminarse. Estos obstáculos pueden ser los setos, las verjas, las balas de heno o la vegetación densa situada en la parte baja de la pendiente del campo. La nivelación de tierras a veces puede mejorar el drenaje de aire frío a través del cultivo y en consecuencia al aire frío que llega continua el paso a su través. Las hileras de las plantaciones frutales y de los viñedos deberían orientarse a favor del drenaje natural del aire frío hacia fuera del cultivo. Sin embargo, la ventaja de orientar las hileras de los cultivos tiene que equilibrarse frente a la desventaja de una mayor erosión y de otros inconvenientes. Las hierbas y los rastrojos de las plantas en las zonas

superiores de las pendientes donde esta situado el cultivo pueden enfriar más el aire y favorecer el drenaje de aire en el cultivo. La temperatura del aire medida dentro de los viñedos o de las plantaciones de cítricos con residuos de plantas o cubierta de hierba normalmente varía entre 0 °C y 0,5 °C más fría que los viñedos y las plantaciones de cítricos con suelo desnudo, dependiendo de las condiciones del suelo y de la meteorología. Si el cultivo no está presente, las diferencias serían probablemente más grandes. Por ello, tener un suelo desnudo pendiente arriba de un cultivo generalmente conducirá a temperaturas del aire más altas en el suelo de la parte superior de la pendiente y menor probabilidad de drenaje de aire frío hacia el cultivo.

La selección de plantas

Es importante escoger plantas con floración tardía para reducir la probabilidad de daño debido a la congelación, y seleccionar plantas más tolerantes a la congelación. Por ejemplo, los árboles frutales de hoja caduca y las viñas normalmente no sufren daño por helada en el tronco, las ramas o en las yemas dormidas, pero experimentan daños conforme se desarrollan las flores y los frutos. Seleccionar plantas de hoja caduca que tienen yemas de brotación tardía proporciona una buena protección ya que la probabilidad y el riesgo de daño por helada disminuyen rápidamente en primavera. En cítricos, hay que seleccionar variedades más resistentes. Por ejemplo, los limoneros son menos tolerantes al daño por helada, seguido de las limas, los pomelos, los tangerinos y las naranjas, que son las más tolerantes. También se sabe que los patrones o porta-injertos de naranjo trifoliado mejora la tolerancia de los cítricos comparado con otros porta-injertos.

Para los cultivos anuales y en hilera, es importante determinar la fecha de plantación que minimiza el potencial para las temperaturas bajo cero. En algunos casos, los cultivos no se plantan directamente en el exterior sino que se plantan en ambientes protegidos y transplantados al campo después de que el peligro de congelación ha pasado. En este libro se incluyen algunos programas de aplicación Excel sobre probabilidad y riesgo y su uso se discute en el capítulo de probabilidad y riesgo. Si las temperaturas de congelación no pueden evitarse, entonces hay que seleccionar los cultivos a plantar basándose en su tolerancia a las temperaturas bajo cero.

La cobertura con árboles

En el sur de California, los agricultores plantan cultivos intercalados de cítricos y de palmera datilera, en parte porque las palmeras datileras proporcionan algo de protección a los cítricos. Como los dátiles también son un producto

comerciable, constituyen un método eficiente de proporcionar protección contra heladas sin experimentar pérdidas económicas relevantes. En Alabama, algunos agricultores interplantan pinos en las plantaciones de mandarina Satsuma y los pinos favorecen la radiación incidente de onda larga y proporcionan protección a los mandarinos. En Brasil se utilizan árboles de sombra para proteger los cafetales del daño por helada.

La gestión de la nutrición de las plantas

Los árboles que no están sanos son más susceptibles al daño por heladas y la fertilización mejora la salud de las plantas. Los árboles que no están adecuadamente fertilizados, también tienden a perder sus hojas antes en otoño y la floración es más temprana en primavera, lo cual aumenta la susceptibilidad al daño por helada. Sin embargo, se desconoce la relación entre determinados nutrientes y el aumento de resistencia, y la literatura contiene muchas contradicciones e interpretaciones parciales. En general, la fertilización con nitrógeno y fósforo antes de una helada favorece el crecimiento y aumenta la susceptibilidad al daño por helada. Para favorecer el endurecimiento de las plantas, hay que evitar las aplicaciones de fertilizante nitrogenado al final del verano o al inicio del otoño. No obstante, el fósforo también es importante para la división celular y por ello es importante para recuperar los tejidos después de la congelación. El potasio tiene un efecto favorable en las plantas sobre la regulación hídrica y la fotosíntesis. Sin embargo, los investigadores están divididos sobre los beneficios del potasio en la protección contra heladas.

El manejo de plagas

La aplicación de aceites insecticidas a los cítricos se sabe que aumenta el daño por helada y la aplicación debería evitarse con anterioridad a la estación de heladas.

Una poda adecuada

La poda tardía está recomendada en las vides para retrasar el crecimiento y la floración. La doble poda es a menudo beneficiosa por que supone que todavía se dispone de madera para la producción tras una helada dañina. La poda, en primer lugar, de las ramas más bajas de las vides y volver a podar más tarde las ramas más altas es una buena práctica, ya que las ramas más bajas son más propensas al daño. La poda de las vides para que el fruto esté más alto sobre el suelo proporciona protección, ya que, durante las noches de helada, las temperaturas aumentan normalmente con la altura. La poda a finales de otoño de los cítricos conduce a más actividad fisiológica durante la estación de heladas de invierno. La poda de cítricos

debería estar completamente realizada mucho antes de la estación de heladas. Por ejemplo, se han observado daños importantes en cítricos desmochados en octubre al producirse la helada en diciembre. Si los árboles de hoja caduca se cultivan en un clima suficientemente frío para provocar daño a las yemas dormidas, entonces los árboles no deberían podarse. Por otra parte, la poda de árboles de hoja caduca puede realizarse durante el periodo de dormancia con pocos problemas.

Cobertura de las plantas

Las plantas protegidas están más calientes que el cielo despejado y, en consecuencia, aumentan la radiación de onda larga descendente durante la noche, además de reducir las pérdidas de calor por convección hacia el aire. Normalmente se utilizan las cubiertas con paja y materiales sintéticos. Debido a los costes de mano de obra, este método se utiliza principalmente en pequeñas plantaciones de plantas bajas que no requieren de una estructura sólida. Algunas veces se dan problemas de enfermedades debido a una ventilación deficiente. Los plásticos de polipropileno tejido o 'spunbonded' se utilizan a veces para proteger cultivos de alto valor. El grado de protección varía de 1 °C a 5 °C, dependiendo del grosor del plástico. El plástico blanco se utiliza a veces en viveros pero no para cultivos frutales y hortícolas. Se ha observado que la cobertura parcial de las vides, con polietileno negro, aumenta la temperatura del aire cerca del follaje hasta 1,5 °C. Sin embargo, el plástico claro es generalmente más efectivo.

Evitar el laboreo del suelo

El trabajo del suelo crea espacios de aire en el suelo y debería evitarse durante los periodos propensos a las heladas. El aire es un pobre conductor del calor y tiene un calor específico bajo, por ello los suelos, con más espacios de aire y más grandes, tienden a transferir y a almacenar menos el calor. Si se labra un suelo, para mejorar la transferencia y el almacenamiento del calor, hay que compactarlo y regarlo.

El riego

Cuando los suelos están secos, hay más espacios de aire que inhiben la transferencia y el almacenamiento del calor. Además, en los años secos, la protección contra heladas se mejora humedeciendo los suelos secos. El objetivo es mantener el contenido de agua del suelo cercano a la capacidad de campo, que normalmente es el contenido de agua entre 1 y los 3 días que siguen a su humedecimiento. No es necesario humedecer el suelo en profundidad ya que la mayoría de las transferencias de calor diarias y el almacenamiento se produce en los 30 cm superiores. Humedecer el suelo lo hace más oscuro, y aumenta la

absorción de la radiación solar. Sin embargo, cuando la superficie está húmeda, entonces también aumenta la evaporación y las pérdidas de energía por evaporación tienden a contrarrestar los beneficios de una mejor absorción de la radiación. Lo mejor es humedecer los suelos secos con antelación a la helada, de forma que el Sol pueda calentar el suelo.

Eliminación de las cubiertas de hierba

Para una protección pasiva de las heladas, es mejor eliminar toda la vegetación (cultivos de cobertura) de las plantaciones de frutales y de los viñedos. Eliminar los cultivos de cobertura favorecerá la absorción de la radiación por el suelo, lo cual mejora la transferencia y almacenamiento de energía. Se sabe que los cultivos de cobertura hospedan concentraciones más altas de bacterias activas nucleadoras de hielo (INA) que muchas plantaciones de frutales y viñedos, por ello la presencia de vegetación en el suelo de una plantación frutal y de un viñedo aumenta la concentración de bacterias INA sobre el cultivo y favorece el potencial de daño por helada.

Generalmente, segar, labrar y vaporizar con herbicidas son los métodos para eliminar la vegetación del suelo. Si es posible, la vegetación debe segarse suficientemente temprano para permitir que los residuos se descompongan o de lo contrario la vegetación cortada debería eliminarse. Para hierbas más altas de 5 cm, hay una diferencia pequeña con la temperatura de la superficie del suelo de la plantación frutal, pero la temperatura de la superficie aumenta conforme la cubierta vegetal es más corta, hasta la temperatura mínima de la superficie más alta que se obtiene para un suelo desnudo. Diferencias en la temperatura mínima de la superficie del suelo de la plantación frutal tan altas como 2 °C han sido descritas entre un suelo desnudo y un suelo con una cubierta de hierba de 5 cm de altura. Sin embargo, la diferencia con la temperatura del aire es probable que sea menos de 2 °C. El laboreo del suelo debería realizarse con bastante antelación a la estación de heladas y el suelo debería compactarse y regarse después del laboreo para mejorar la transferencia y el almacenamiento de calor. El método más efectivo es el uso de herbicidas para matar la vegetación del suelo o detener su crecimiento. Una vez más, ésta práctica debería realizarse con bastante antelación al periodo de heladas.

Las coberturas de los suelos

Las coberturas con plásticos se utilizan con frecuencia para calentar el suelo y aumentar la protección. Los plásticos claros calientan más el suelo que los plásticos negros, y humedecer el suelo antes de aplicar el plástico mejorará más su eficacia. Algunas veces se utilizan coberturas vegetales durante la dormancia

de los árboles cultivados para ayudar a prevenir el daño a las raíces por congelación y evitar el empuje del suelo hacia arriba cuando se congela; no obstante, las coberturas vegetales reducen la transferencia del calor en el suelo haciendo las plantaciones frutales más sensibles a las heladas una vez se han abierto las yemas. En general, las coberturas vegetales sólo se recomiendan para localidades donde hay problemas de heladas que provocan una elevación de la superficie del suelo debido a su congelación. Para las plantaciones de árboles frutales de hoja perenne, la poda de los bordes de los árboles permite una mejor transferencia de radiación hacia el suelo bajo los árboles y una mejor protección.

Pintar los troncos y envolturas

La corteza de los árboles de hoja caduca, algunas veces, se separa cuando existen fluctuaciones grandes en la temperatura entre un día cálido y una noche helada. Pintar los troncos con una pintura blanca de látex diluida al 50% con agua a finales de otoño, cuando la temperatura del aire está por encima de 10 °C, reducirá este problema. La pintura blanca, el aislamiento y otras envolturas se sabe que mejora la dureza contra el daño por las heladas en melocotoneros. La pintura o las envolturas disminuyen las altas temperaturas del cámbium a finales de invierno debido a la radiación durante el día, lo cual mejora su resistencia. Envolver los troncos de los árboles con aislantes (i.e. materiales que contienen espacios de aire que resisten la transferencia del calor) protegerá los árboles jóvenes del daño por heladas y de su posible muerte. Los factores críticos son el uso de aislantes que no absorban agua y que los troncos deben envolverse desde la superficie del suelo hasta lo más alto posible. Las envolturas aislantes que utilizan fibra de vidrio y de poliuretano con una resistencia más alta a la transferencia del calor proporcionan la mejor protección entre las envolturas comercialmente disponibles. Normalmente, las envolturas de troncos se quitan después de 3 a 4 años. Se ha descrito que envolver los troncos de cítricos jóvenes con bolsas de agua da incluso mejor protección que la fibra de vidrio o la espuma de poliuretano. El principal inconveniente de las envolturas de troncos es el aumento potencial de problemas de enfermedades, por ello, los puntos de injerto deberían estar por lo menos a 15 cm por encima del suelo. Para ayudar a reducir los problemas de enfermedades hay que aplicar fungicidas antes de envolver el tronco.

El control bacteriano

Para que ocurra la congelación, el proceso de formación de hielo se inicia principalmente por la presencia de bacterias INA. Contra mayor sea la concentración de bacterias INA, más probable será la formación de hielo. Después

de su formación, se propaga dentro de las plantas a través de oberturas en la superficie en los tejidos de las plantas. Normalmente, para matar las bacterias se utilizan pesticidas (compuestos a base de cobre) o se aplican bacterias inactivas en la nucleación de hielo (NINA) competitivas para competir con ellas y reducir las concentraciones de bacterias INA. Sin embargo, este método de protección contra heladas no se ha utilizado ampliamente; para más información ver el capítulo 6.

LA PROTECCIÓN ACTIVA

Los métodos de protección activa incluyen

- Las estufas;
- Los ventiladores;
- Los helicópteros;
- Los aspersores;
- El riego de superficie;
- El aislamiento con espumas; y
- Las combinaciones de métodos

Todos los métodos y combinaciones se implementan durante la noche de ocurrencia de heladas para mitigar los efectos de las temperaturas bajo cero. El coste de cada método varía dependiendo de la disponibilidad local y de los precios, pero en la Tabla 7.1 se dan algunos ejemplos de costes basados en precios de los EE.UU. Algunos métodos de protección contra heladas tienen más de un uso (e.g. los aspersores también pueden utilizarse para el riego) y los beneficios de otros usos necesitan descontarse del coste total para evaluar de forma más justa los beneficios en términos de la protección contra heladas.

Las estufas

Las estufas proporcionan calor suplementario para ayudar a reemplazar las pérdidas de energía. Generalmente, las estufas o bien aumentan la temperatura de los objetos de metal (e.g. estufas con chimenea) o bien funcionan como fuegos abiertos. Si se suministra suficiente calor al volumen de cultivo de forma que se reemplazan todas las pérdidas de energía, la temperatura no caerá a los niveles que provocan daños. Sin embargo, los sistemas son generalmente ineficientes (i.e. una gran proporción de la energía producida se pierde hacia el cielo), por ello es necesario un diseño y manejo apropiado. Si se diseña un sistema para utilizar más estufas y más pequeñas con un buen manejo, se puede mejorar la eficiencia hasta el nivel que permite proteger el cultivo en las condiciones de la mayoría de las heladas de radiación. Sin embargo, cuando no hay inversión o es muy pequeña y hay viento, las estufas puede que no proporcionen la protección adecuada.

Los requerimientos de energía para hacer frente a las pérdidas en una noche helada de radiación están en el intervalo de 10 a 50 W m⁻², mientras que la producción de energía de las estufas está en el intervalo de 140 a 280 W m⁻², dependiendo del combustible, ritmo de quemado, y número de estufas. Cien estufas con chimenea por hectárea quemando 2,85 l h⁻¹ de combustible con una producción de energía de 37,9 MJ l⁻¹ producirían aproximadamente 360 W m⁻². El beneficio neto depende de las condiciones meteorológicas, pero se puede esperar un aumento de 1 °C en la temperatura media del aire desde el suelo hasta unos 3 m, con unas temperaturas algo más altas medidas a 1,5 m de altura. Sin embargo, la radiación directa desde las estufas suministra un beneficio adicional a las plantas que están en el campo de visión de las estufas. Como la producción de energía es mucho más grande que las pérdidas de energía desde un cultivo no protegido, gran parte de la producción de energía desde las estufas se pierde y no contribuye a calentar el aire o las plantas. Si el sistema de calefacción estuviera perfectamente diseñado y manejado para reemplazar la pérdida de energía desde el volumen de aire bajo la capa de inversión sin ninguna o muy escasa pérdida de calor convectivo hacia el cielo, entonces los requerimientos de producción de energía estarían cercanos a los requerimientos de energía necesarios para prevenir los daños por helada y la aportación de calor sería eficiente. Para conseguir la mejor eficiencia, hay que aumentar el número de estufas y disminuir su temperatura. Sin embargo, esto es a menudo difícil de conseguir por los costes de los equipos, de la mano de obra, etc. Si la inversión de temperatura es débil o si los fuegos son demasiado grandes y calientes, el aire calentado asciende demasiado y la energía se pierde al aire por encima del cultivo, disminuyendo entonces la eficiencia. Las estufas modernas tienen más control sobre la temperatura de los gases emitidos para reducir las pérdidas ascensionales y mejorar la eficiencia. Los sistemas más eficientes tienen poca llama por encima de la chimenea y no humean. Hacer funcionar las estufas a temperatura demasiado alta también reduce su vida media. Las estufas con combustible líquido y las de gas normalmente producen casi el doble de energía que las estufas de combustible sólido. Cuando hay una inversión fuerte (i.e. un techo muy bajo), el volumen calentado es menor, y las estufas son más efectivas en aumentar la temperatura, si los fuegos no son demasiado grandes (i.e. la temperatura de los gases que dejan la chimenea de la estufa está cercana a 635 °C) por eso el aire calentado asciende lentamente. El funcionamiento de la estufa es menos eficiente en condiciones de inversión débil (i.e. un techo alto) ya que el volumen a calentar es más grande. En los bordes de las parcelas ocurre más daño por helada y para evitarlo se necesitan más estufas. Antes, se creía que

el humo era beneficioso como protección contra las heladas. Sin embargo, el humo no ayuda y contamina el ambiente, por lo que debería evitarse.

La distribución de estufas debería ser relativamente uniforme, con más estufas en los bordes, especialmente contra el viento, y en las zonas bajas y frías. Los bordes deberían disponer de un mínimo de una estufa por cada dos árboles en la zona exterior del borde y dentro de la primera fila. En el borde de la zona contra el viento, se recomienda también una estufa por cada dos árboles dentro de la segunda fila. Las primeras estufas a encender deberían ser las situadas en los bordes, especialmente en las situadas contra el viento, y a continuación encender cada cuatro filas de la plantación frutal (o cada dos filas si es necesario). A continuación hay que hacer un seguimiento de la temperatura y encender más hileras de estufas si aumenta la necesidad. Las estufas son caras de poner en funcionamiento, por ello normalmente se utilizan en combinación con los ventiladores o como calor de borde en combinación con los aspersores. Ver el capítulo 7 para tener más información sobre el uso de las estufas.

El uso de estufas de combustible líquido disminuye con el aumento de los precios del petróleo y las preocupaciones sobre la contaminación del aire. Las estufas de combustible líquido requieren una considerable mano de obra para su colocación, llenado de combustible y limpieza, además de los costes de capital de las estufas y del combustible. Observa que las pequeñas plantaciones frutales y aisladas requieren más estufas que las plantaciones frutales grandes o que aquellas que están rodeadas de otras plantaciones protegidas.

Las recomendaciones de combustible para el encendido de las estufas varía desde ratios 1 : 1 petróleo-gasolina hasta 8 : 5 petróleo-gasolina. Para rellenar las estufas, después de una helada, se utilizan los tanques remolcados por un tractor, que permiten llenar de forma simultánea dos hileras de quemadores. Cuando se utiliza el calentamiento directo, para minimizar el consumo de combustible la protección se inicia justo antes de alcanzar la temperatura crítica de daño. La temperatura debería medirse en una garita Stevenson, o con una protección especialmente diseñada para las heladas en frutales o con una pantalla Gill que evite la exposición del termómetro al cielo despejado.

Los requerimientos de mano de obra para rellenar las estufas de combustible líquido son altos, por ello se han popularizado los sistemas de distribución centralizada que utilizan gas natural, propano líquido o petróleo combustible presurizado. En los sistemas más elaborados, la ignición, la tasa de combustión y el cierre también están automatizados, además de la distribución del combustible. El coste de capital para instalar sistemas centralizados es alto, pero los costes de funcionamiento son bajos. Las estufas de propano requieren menos limpieza y las

tasas de quemado son más fáciles de controlar que las estufas que queman petróleo. Como la tasa de quemado es menor se requieren más estufas (e.g. normalmente unas 100 estufas con chimenea por hectárea y unas 153 estufas de propano por hectárea), pero la protección es mejor ya que más estufas con una tasa de quemado más baja son más eficientes. Bajo condiciones extremas, el tanque de suministro de propano puede algunas veces congelarse, y por ello debería instalarse un vaporizador que prevenga la congelación de la tubería de gas.

La relación entre la radiación y la energía total liberada es del 40% si se queman combustibles sólidos en comparación con el 25% si se queman combustibles líquidos, en consecuencia, los combustibles sólidos son más eficientes en calentar las plantas, especialmente bajo condiciones de viento. La principal desventaja de los combustibles sólidos es que la energía liberada disminuye conforme se va consumiendo el combustible, y por ello la energía que se libera se ve limitada cuando más se necesita. Otro inconveniente es que los combustibles sólidos son más difíciles de encender, y por ello debe iniciarse el encendido más pronto. También son difíciles de apagar con lo que se desperdicia más combustible.

Los ventiladores

Los ventiladores por si solos utilizan normalmente sólo de un 5% a un 10% del combustible consumido por un sistema de protección con estufas de petróleo. Sin embargo, la inversión inicial es alta (e.g. unos 20 000 \$ por máquina). Los ventiladores, en general, tienen unos requerimientos de mano de obra y unos costes de funcionamiento más bajos que otros métodos; especialmente los ventiladores eléctricos.

La mayoría de ventiladores empujan el aire casi horizontalmente para mezclar el aire más caliente de la parte superior en una inversión de temperatura con el aire más frío cercano a la superficie. También, al nivel de micro escala, éstos rompen las capas límites sobre las superficies de las plantas, mejorando las transferencias de calor sensible desde el aire a las plantas. Sin embargo, antes de invertir en ventiladores, hay que estar seguro de que las inversiones entre 2 y 10 m de altura están por lo menos 1,5 °C o más en la mayoría de las noches de helada.

Cuando se instalan ventiladores eléctricos, normalmente las compañías eléctricas requieren al agricultor que pague unas cargas por “estar a punto”, que cubren los costes de instalación de la línea y su mantenimiento. Las cargas por “estar a punto” se pagan independientemente de que los ventiladores se usen o no. Los ventiladores de combustión interna son más efectivos desde el punto de vista del coste, pero requieren más mano de obra. El ruido de los ventiladores es un problema grande para los agricultores con cultivos cerca de las poblaciones, y

ello debería tenerse en cuenta al seleccionar un método de protección contra las heladas. Generalmente, se necesita un ventilador grande con 65 a 75 kW de potencia por cada 4,0 a 4,5 ha. El efecto sobre la temperatura disminuye aproximadamente con la inversa del cuadrado de la distancia desde la torre, con lo que un solapamiento de las áreas de protección favorecerá la protección.

Los ventiladores, en general, consisten en una torre de acero con una gran hélice de dos hojas giratorias (3 a 6 m diámetro) cerca de la parte superior, colocadas sobre un eje inclinado unos 7° hacia abajo desde la horizontal en la dirección de la torre. Normalmente, la altura de los ventiladores es de unos 10–11 m, y giran a unas 590–600 rpm. También existen ventiladores con hélices de cuatro hojas. Cuando funciona un ventilador, extrae el aire de la parte superior y lo empuja con una ligera inclinación entre la torre y el suelo. El ventilador también fluye hacia arriba el aire frío cercano a la superficie y el aire caliente por arriba y frío por debajo se mezclan. Al mismo tiempo que funciona el ventilador, la hélice gira alrededor de la torre con una vuelta cada tres, o hasta cinco, minutos. La cantidad de protección que se consigue depende de la fuerza de la inversión sin proteger. En general, el uso de los ventiladores provoca un aumento de la temperatura a 2,0 m de altura que equivale a un 30% de la fuerza de la inversión entre 2 y 10 m de altura en un cultivo sin proteger. Los ventiladores se ponen en marcha normalmente cuando la temperatura del aire alcanza los 0 °C. Los ventiladores no se recomiendan cuando hay viento superior a los 2,5 m s⁻¹ (8 km h⁻¹) o cuando hay una niebla súper enfriada que puede provocar daño a la hélice si se hielan sus hojas.

Los ventiladores que empujan el aire caliente verticalmente hacia abajo desde la parte superior no son, en general, efectivos y pueden causar daño a las plantas cercanas a la torre. Existen y se han probado ventiladores, comercialmente disponibles, que empujan verticalmente el aire hacia arriba. Sin embargo, no existían investigaciones publicadas en el momento de preparación de este libro.

Los helicópteros

Los helicópteros mueven el aire caliente desde la parte superior de la inversión de temperatura hacia la superficie más fría. El área que cubre un solo helicóptero depende de su tamaño y peso y de las condiciones meteorológicas. Se estima que el área que cubre un único helicóptero varía entre 22 y 44 ha. Las recomendaciones sobre la frecuencia de las pasadas varían entre 30 a 60 minutos, dependiendo de las condiciones meteorológicas. Si el tiempo entre las pasadas se alarga demasiado provoca que las plantas se enfríen y la agitación por el pase del helicóptero puede causar la nucleación heterogénea del hielo y provocar un daño grave. La nucleación heterogénea del hielo ocurre cuando el agua es súper

enfriada (i.e. a la temperatura bajo 0 °C) y algunas materias foráneas o la agitación inicia la formación del hielo. En el caso de los helicópteros, la agitación puede causar la formación de hielo si los pases son demasiado poco frecuentes y la temperatura del tejido de las plantas baja demasiado.

La altura óptima de vuelo se sitúa normalmente entre los 20 y los 30 m, y las velocidades de vuelo van de los 8 a los 40 km h⁻¹. Los pilotos, con frecuencia, cargan los tanques vaporizadores de los helicópteros con agua para aumentar el peso y aumentar el empuje. Bajo condiciones de heladas severas con una inversión alta, un helicóptero puede volar sobre otro para favorecer la transferencia del calor hacia abajo. Para ayudar a los pilotos a saber dónde hay que realizar las pasadas, se utilizan luces controladas por un termostato en la parte superior de la copa de los árboles. En las laderas, la transferencia del calor se propaga pendiente abajo una vez ha alcanzado la superficie, por eso volar sobre la parte superior de la pendiente normalmente proporciona más protección. Los vuelos se detienen cuando la temperatura del aire contra el viento desde el cultivo ha subido por encima de la temperatura crítica de daño.

Los aspersores

El consumo de energía de los aspersores es considerablemente más bajo que el utilizado para la protección de heladas con estufas, y por consiguiente, los costes de funcionamiento son más bajos. La necesidad de mano de obra también es inferior que en otros métodos, y es relativamente no contaminante. Las principales desventajas del uso de aspersores son el elevado coste de instalación y la gran cantidad de agua necesaria. En muchos casos una disponibilidad limitada de agua restringe el uso de los aspersores. En otros casos, el uso excesivo puede provocar problemas de encharcamiento lo cual puede causar problemas a las raíces así como impedir el laboreo y cualquier otro tipo de manejo. El lavado de nutrientes (principalmente nitrógeno) es un problema cuando se utilizan los aspersores con frecuencia.

El secreto de la protección con aspersores de tipo convencional que aplican el agua sobre las plantas es volver a aplicar el agua frecuentemente con el suficiente caudal para evitar que la temperatura del tejido de la planta baje demasiado entre los pulsos de agua. Para aspersores que aplican el agua sobre las plantas y que no giran, la idea es aplicar el agua de forma continuada con un caudal más bajo pero que sea sobre una superficie más pequeña. Para aspersores de tipo convencional que aplican el agua por debajo de las plantas, la idea es aplicar el agua a una frecuencia y con una caudal que mantenga la temperatura superficial del suelo cerca de 0 °C. Esto aumentará la radiación de onda larga y la transferencia de

calor sensible a las plantas respecto a un cultivo sin protección. Para los microaspersores bajo cubierta, que aplican menos agua que los aspersores convencionales, el objetivo es únicamente mantener el suelo bajo las plantas cerca de 0 °C para poder concentrar y favorecer la transferencia de radiación y de calor sensible hacia las plantas.

Aspersores convencionales por encima de las plantas

El riego con aspersores por encima de las plantas se utiliza para proteger cultivos que no crecen mucho y en árboles frutales de hoja caduca con las ramas bien apuntaladas para que no se rompan con el peso del hielo. Normalmente no se usa en árboles de tipo subtropical (e.g. cítricos) excepto para limoneros jóvenes que son más flexibles. Incluso durante las heladas de advección, los aspersores por encima de la cubierta proporcionan una excelente protección contra helada hasta casi -7 °C si los caudales son suficientes y la aplicación es uniforme. Bajo condiciones con viento o cuando la temperatura del aire cae tan baja que el caudal es inadecuado para suministrar más calor que el que se pierde por evaporación, el método puede producir más daño que el experimentado por un cultivo no protegido. Los inconvenientes de este método son el daño severo que puede producirse si el sistema de aspersión falla, las elevadas necesidades de agua que tiene el método, la carga del hielo que puede causar daño a las ramas y si los suelos están mal drenados pueden ser un problema las enfermedades de las raíces.

Los requerimientos de caudal para aspersores por encima de la cubierta difieren para los aspersores convencionales, los aspersores con caudales variables y los aspersores de volumen de aplicación bajo. Mientras haya una mezcla de líquido-hielo sobre las plantas, con agua goteando de los carámbanos, las plantas cubiertas de hielo estarán protegidas. Sin embargo, si se utiliza un caudal inadecuado o si la velocidad de rotación de los aspersores es demasiado lenta, toda el agua puede congelarse y las temperaturas de las plantas cubiertas con hielo pueden descender por debajo de la temperatura de las plantas no protegidas.

Los sistemas con aspersores convencionales por encima de las plantas utilizan aspersores de impacto estándar para mojar las plantas y el suelo completamente. Las plantas más grandes tienen más superficie, y por tanto, se necesita un caudal mayor para las plantas altas que para las bajas. Para que los aspersores sobre la cubierta sean más efectivos, las distintas partes de las plantas deben estar cubiertas con agua y rehumedecidas en 30 a 60 segundos. Las tasas de rotación más largas requieren caudales más altos. Además, las plantas más grandes requieren más agua para proteger las plantas. Ver la Tabla 2.1 para directrices sobre los caudales para varias plantas.

TABLA 2.1

Caudales para aspersores de protección por encima de la cubierta de cultivos altos (frutales y viña) y bajos, en función de la temperatura mínima y la tasa de giro, para velocidades de viento entre 0 y 2,5 m s⁻¹

TEMPERATURA MINIMA °C	CULTIVOS ALTOS		CULTIVOS BAJOS	
	30 s rotación mm h ⁻¹	60 s rotación mm h ⁻¹	30 s rotación mm h ⁻¹	60 s rotación mm h ⁻¹
-2,0	2,5	3,2	1,8	2,3
-4,0	3,8	4,5	3,0	3,5
-6,0	5,1	5,8	4,2	4,7

NOTA: Los caudales son casi 0,5 mm h⁻¹ más bajos cuando no hay viento y casi 0,5 mm h⁻¹ más altos con velocidades de viento próximas a 2,5 m s⁻¹. Los caudales para "cultivos bajos" se refieren a cultivos herbáceos con cubierta similares en tamaño a las fresas. Los cultivos que cubren todo el campo o en hileras (e.g. patatas y tomates) requieren caudales intermedios.

La uniformidad de distribución de los aspersores es importante para evitar una cobertura inadecuada, lo que podría provocar daños. Si se sabe que el aire frío llega desde una dirección específica, se puede mejorar la protección aumentando la densidad de aspersores contra el viento en el borde del cultivo o incluso en un campo abierto contra el viento desde el cultivo. En la mayoría de los casos, los cabezales de los aspersores deberían colocarse a 30 cm o más altos por encima de la parte superior de la cubierta vegetal evitando que las plantas bloqueen la vaporización. En la protección contra heladas, se utilizan unos muelles especialmente diseñados, los cuales están protegidos por una envoltura para prevenir la formación de hielo en los cabezales. Se necesitan filtros limpiadores para asegurarse de que el sistema funciona correctamente, especialmente cuando se utiliza agua de ríos o de estanques.

Puesta en marcha y parada de los aspersores

Los aspersores que actúan sobre las plantas deberían ponerse en marcha cuando la temperatura del bulbo húmedo sea más alta que la temperatura crítica (T_c). Poner en marcha cuando la temperatura del bulbo húmedo alcanza los 0 °C tiene menos riesgo y puede ser más prudente si no hay problemas de falta de agua, encharcamiento o por la carga del hielo. Incluso si el Sol luce sobre las plantas y la temperatura del aire está por encima de 0 °C, los aspersores no deberían cerrarse hasta que la temperatura del bulbo húmedo medida contra el viento desde el cultivo esté por encima de la temperatura crítica de daño. Si el encharcamiento del suelo o la falta de agua no son problemas, el permitir que la temperatura del bulbo húmedo exceda ligeramente de los 0 °C antes de cerrar los aspersores supone una medida de seguridad extra.

La temperatura del bulbo húmedo puede medirse directamente con un psicrómetro (Figura 3.9) o puede estimarse a partir de las temperaturas del punto de rocío y del aire. Las medidas de la temperatura del bulbo húmedo se explican en el Capítulo 3. Una medida del punto rocío sencilla y de bajo coste, del punto de rocío se consigue con un termómetro, un cubo con brillo, agua, sal y hielo (Figura 7.11). Primero hay que poner un poco de agua salada en el cubo con brillo. A continuación, empezar a añadir hielo al cubo mientras se remueve la mezcla con el termómetro. Observa el exterior del cubo para ver cuando se condensa agua o se deposita hielo sobre la superficie. Inmediatamente hay que realizar una lectura de la temperatura del termómetro cuando se condense el agua o se forme hielo. Iluminar la superficie del cubo con una linterna ayudará a observar la condensación del agua o la formación de hielo y a leer el termómetro. Bajo condiciones muy frías y secas, puede que se necesite más sal y hielo para alcanzar la temperatura del punto de formación de hielo o del punto de rocío. Hay una pequeña diferencia entre la temperatura de la formación de hielo y la temperatura del punto de rocío (explicada en el Capítulo 3), pero para estimar la temperatura del aire de puesta en marcha y detención de aspersores el error que se comete de considerarlos iguales es despreciable.

Una vez medida la temperatura del punto de rocío, las temperaturas del aire para poner en marcha y detener se encuentran utilizando la temperatura crítica (T_c) para el cultivo, la temperatura del punto de rocío, y la Tabla 2.2. Para una información más exacta, ver la Tablas 7.5 y 7.6 y la discusión relacionada en el capítulo 7.

Caudal de los aspersores

Los requerimientos de caudal para la aspersión de cobertura sobre las plantas con aspersores convencionales dependen de la velocidad de rotación, de la velocidad del viento y de la temperatura mínima no protegida. La Tabla 2.1 proporciona caudales normalmente utilizados para cultivos altos y bajos. Tanto para cultivos altos como para los bajos, los caudales aumentan con la velocidad del viento y son más altos para rotaciones más lentas.

Si hay una mezcla de hielo y líquido cubriendo las plantas y el agua gotea desde el hielo, entonces el caudal es suficiente para prevenir el daño. Si toda el agua se congela y tiene una apariencia blanca lechosa como la escarcha, entonces el caudal es demasiado baja para las condiciones meteorológicas. Si el caudal es insuficiente para cubrir adecuadamente todo el follaje, entonces puede producirse daño sobre distintas partes de las plantas que no estén adecuadamente humedecidas. Bajo condiciones de viento y alta evaporación, los caudales inadecuados pueden causar más daño que si no se utilizan los aspersores.

TABLA 2.2

Intervalo de temperaturas del aire (°C) mínimas de puesta en marcha de los aspersores para la protección contra las heladas como una función de las temperaturas del bulbo húmedo y del punto de rocío (°C)

TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCÍO °C	TEMPERATURA DEL BULBO HUMEDO (°C)													
	-3,0	-2,5	-2,0	-1,5	-1,0	-0,5	0,0	0,0	0,0	0,0				
0,0											0,0	0,0		
-1,0								-1,0	-0,9	-0,2	-0,1	0,6	0,7	
-2,0					-2,0	-1,8	-1,2	-0,8	-0,4	-0,2	0,4	0,6	1,2	1,4
-3,0	-3,0	-2,7	-2,2	-1,9	-1,4	-1,1	-0,6	-0,3	0,2	0,5	1,0	1,3	1,8	2,1
-4,0	-2,5	-2,1	-1,7	-1,4	-0,9	-0,6	-0,1	0,2	0,7	1,0	1,5	1,8	2,3	2,6
-5,0	-2,0	-1,6	-1,2	-0,8	-0,4	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2
-6,0	-1,5	-1,1	-0,7	-0,3	0,1	0,5	0,9	1,4	1,7	2,1	2,5	2,9	3,3	3,7
-7,0	-1,1	-0,6	-0,3	0,2	0,5	1,0	1,3	1,8	2,1	2,6	2,9	3,4	3,7	4,2
-8,0	-0,7	-0,2	0,1	0,6	0,9	1,4	1,7	2,2	2,5	3,0	3,3	3,8	4,1	4,8
-9,0	-0,3	0,3	0,5	1,1	1,3	1,9	2,1	2,7	2,9	3,5	3,7	4,3	4,5	5,1
-10,0	0,1	0,7	0,8	1,5	1,6	2,3	2,4	3,1	3,2	3,9	4,0	4,7	4,9	5,6

NOTA: Selecciona una temperatura del bulbo húmedo que esté por encima (más caliente que) la temperatura crítica de daño para tu cultivo y selecciona la columna adecuada. A continuación selecciona la fila con la temperatura correcta del punto de rocío y lee la temperatura del aire correspondiente de la Tabla para abrir o cerrar los aspersores. Utiliza las temperaturas del aire más bajas para las altitudes bajas (0–500 m) y aumenta hasta las temperaturas más altas para las altitudes más altas (1500–2000 m).

Aspersores dirigidos sobre las plantas

El uso de micro-aspersores dirigidos sobre las plantas se ha estudiado como un método para reducir los caudales en los aspersores sobre las plantas, pero los costes de instalación son altos y el método no ha sido ampliamente aceptado por los agricultores excepto en aquellos con problemas de falta de agua. Los aspersores dirigidos vaporizan el agua directamente sobre las plantas, con cantidades mínimas de agua que caen entre las filas de plantas. Una gran ventaja de utilizar los aspersores dirigidos es que los aspersores convencionales tienen tasas de aplicación de 3,8 a 4,6 mm h⁻¹, mientras que los aspersores dirigidos normalmente tienen caudales de 2,8 a 3,1 mm h⁻¹. Bajo condiciones de viento, debido a que la aplicación no es uniforme, se necesitan tasas de aplicación más altas de 3,1 mm h⁻¹ para proteger los cultivos. En un estudio sobre el uso de aspersores dirigidos sobre el cultivo de viña, hubo un ahorro del 80% del agua respecto a los aspersores convencionales sobre planta.

En unos ensayos de agricultor, con un sistema de bajo volumen se aplicaron aproximadamente 140 l min⁻¹ ha⁻¹, en comparación con el sistema convencional del agricultor con el que aplicó, a las viñas, de 515 a 560 l min⁻¹ ha⁻¹ durante dos

heladas de radiación. En el primer año, la temperatura mínima sin proteger fue de $-3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero no hubo diferencias, ni en las cargas del cultivo ni el peso de las podas, entre ambos sistemas. En el segundo año, una noche se observó hasta $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y algunos de los cabezales de los aspersores se congelaron y pararon de girar. Las pérdidas por el daño de la helada fueron similares en los bloques de ambos sistemas. El agricultor señaló que era importante orientar los cabezales de los aspersores que no giran para obtener una cobertura uniforme de las hileras de las viñas. En consecuencia, el requerimiento de mano de obra es alto. También fue importante poner en marcha y detener los aspersores cuando la temperatura del bulbo húmedo estaba por encima de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aspersores sobre cultivos protegidos

La aspersión sobre cultivos protegidos en invernaderos y túneles proporciona una protección considerable. Se han observado niveles de protección de $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizando caudales de $7,3\text{ mm h}^{-1}$ sobre plantas protegidas con vidrio. La aspersión con 10 mm h^{-1} sobre invernaderos de plástico durante un evento de helada se observó que mantenía las temperaturas en su interior $7,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ más alto que en el exterior. La energía utilizada fue un 20% de la energía utilizada en un invernadero de plástico idéntico que fue calentado hasta alcanzar la misma diferencia de temperatura.

Aspersores convencionales por debajo de los árboles

Los aspersores por debajo de los árboles se utilizan normalmente para la protección contra heladas de los árboles cultivados de hoja caduca en regiones donde las temperaturas mínimas no son demasiado bajas y únicamente se necesitan unos pocos grados de protección. Además, para disminuir los costes de instalación y de funcionamiento, el sistema se puede utilizar para el riego, con menores problemas de enfermedades y costes más bajos, por ello tienen algunas ventajas relativas sobre los aspersores que actúan sobre las plantas. La rotura de limbos debido a la carga del hielo, la falta de oxígeno en el suelo y el fallo del sistema de aspersión suponen menos problemas con los sistemas de aspersión bajo cubierta, que tienen unos requerimientos de caudal más bajos ($2,0$ a $3,0\text{ mm h}^{-1}$).

Una vez en marcha, los aspersores deberían funcionar de forma continua sin secuencias. Si el suministro de agua es limitado, hay que regar las áreas más dadas a las heladas o las áreas contra el viento desde las plantaciones de frutales no protegidas. Una buena uniformidad de la aplicación mejora la protección. Los sistemas de aspersores móviles no deberían parar y moverse durante la noche de helada. Sin embargo, bajo condiciones de heladas no muy severas ($T_n > -2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$),

para cubrir un área más grande las líneas de aspersores pueden situarse cada dos hileras en lugar de en cada una. Para heladas, entre moderadas y severas, puede ser necesario que las líneas de aspersores estén más cercas.

Algunos investigadores han encontrado que es beneficioso, como protección, cubrir los cultivos cuando se utilizan aspersores bajo los árboles como protección contra las heladas. Esta recomendación se basa parcialmente en la idea de que la presencia de un cultivo de cobertura proporciona más área de superficie para que el agua se congele y en consecuencia libere más calor. La recomendación también se basa parcialmente en la idea de que la altura de la mezcla de hielo líquido y con ello la altura donde la temperatura de la superficie se mantiene a 0 °C es elevada más cerca de las yemas, las flores y los frutos de los árboles que se están protegiendo. La dificultad de tener un cultivo de cobertura es que a pesar de que puede haber una protección adicional, cuando el sistema se está utilizando, es también más probable que se necesite protección activa si está presente un cultivo de cobertura. Donde los recursos de agua y de energía son limitados y las heladas son poco frecuentes, puede ser inteligente eliminar el cultivo de cobertura y reducir la necesidad de protección activa. En climas donde las heladas son más comunes y existen recursos adecuados para poner en funcionamiento los aspersores bajo planta, entonces un cultivo de cobertura puede mejorar la protección. Sin embargo, aumentará el uso de energía y de agua.

Los micro-aspersores bajo las plantas

En los últimos años, los micro-aspersores bajo planta para riego han aumentado su popularidad entre los agricultores, seguido por un interés en utilizarlos como protección contra las heladas. Se obtiene más protección cubriendo un área más grande con un sistema de aspersores de cobertura total. Sin embargo, con los micro-aspersores, el agua se aplica bajo las plantas donde la radiación y la convección son más beneficiosas que el agua aplicada entre las hileras de los cultivos. Sin embargo, si se esparce la misma cantidad de agua sobre un área más grande, es probable que el hielo se enfríe más que si el agua se concentra en un área más pequeña. De nuevo, la mejor práctica es suministrar la suficiente cantidad de agua para cubrir un área tan grande como sea posible y asegurarse de que hay una mezcla hielo –líquida sobre la superficie bajo las peores condiciones que es probable que ocurran.

El riego localizado por goteo

Los sistemas de riego de bajo volumen (por goteo) se han utilizado a veces para la protección contra heladas con resultados diversos. Cualquier beneficio de aplicar agua proviene principalmente de la congelación del agua sobre la

superficie, lo cual libera calor latente. Sin embargo, si las tasas de evaporación son altas, es posible que se pierda más energía en vaporizar el agua que la que se gana en el proceso de congelación. Debido a la amplia variedad de componentes del sistema y de caudales, es difícil generalizar sobre la eficacia de los sistemas de bajo volumen. Se debería tener en cuenta que el funcionamiento de sistemas de bajo volumen bajo condiciones de helada puede dañar el sistema de riego si la congelación es severa. Calentar el agua reduciría las probabilidades de daño y proporcionaría una mayor protección. Sin embargo, el calentamiento puede que no sea efectivo en cuanto al coste.

Aspersores por debajo las plantas con agua calentada

Algunos investigadores han sugerido la hipótesis que congelar el agua sobre la superficie para liberar el calor latente de fusión proporciona poco calor sensible al aire. Debido a la baja trayectoria de la pulverización bajo las plantas, la evaporación es reducida en relación con los sistemas que actúan sobre las plantas, y el calentamiento previo del agua puede proporcionar algún beneficio para los aspersores bajo las plantas. Se ha descrito que aplicar agua calentada hasta 70 °C con aspersores bajo árboles en una plantación de cítricos aumentó la temperatura en promedio de 1 °C a 2 °C. Para disminuir los requerimientos de caudales se ha recomendado utilizar un sistema de calefacción económico para calentar el agua hasta unos 50 °C donde se dispone de energía barata o el agua es limitada, o ambas. Sin embargo, el mismo beneficio puede obtenerse aumentando el caudal, por ejemplo, de 2,0 mm h⁻¹ a 2,6 mm h⁻¹, por tanto aumentar el caudal puede ser más efectivo desde el punto de vista de costes si el agua no es una limitación.

El riego de superficie

El riego por inundación

En este método, el agua se aplica al campo y su calor se libera en el aire al enfriarse. Sin embargo, la eficacia decrece con el enfriamiento del agua con el tiempo. La sumersión parcial o total de las plantas tolerantes es posible; sin embargo, las enfermedades y la asfixia de las raíces son algunas veces un problema. El método funciona mejor para árboles de crecimiento bajo y vides durante heladas de radiación.

Los beneficios económicos que resultan de su uso son altos y el método se utiliza normalmente en muchos países debido al coste relativamente bajo del riego por inundación. Si el riego se realiza con anterioridad al evento de helada, la protección que puede alcanzarse es como mucho entre 3 y 4 °C. La altura de agua a aplicar depende del balance de energía durante la noche y de la

temperatura del agua. La Tabla 2.3 proporciona una estimación de la altura de agua a aplicar como una función de la temperatura máxima del agua en el día que precede al evento de helada.

TABLA 2.3

Altura de agua (d) en milímetros de riego por inundación a aplicar como protección contra heladas correspondiente a una temperatura máxima del agua (T_{WX}) en °C el día previo a la noche de helada

T_{WX} (°C)	35	30	25	20	15	10
d (mm)	42	50	60	74	100	150

El riego por surcos

El riego por surcos se utiliza normalmente para la protección contra heladas y los conceptos básicos son similares a los del riego por inundación. Los surcos van mejor cuando se han formado a lo largo de la línea de goteo de las hileras de los cítricos donde el aire calentado por el agua del surco es transferido hacia arriba en el follaje que necesita protección, más que bajo los árboles donde el aire es normalmente más caliente, o en medio entre las hileras, donde el aire asciende sin interceptar los árboles. Los surcos deberían tener una anchura de unos 0,5 m con la mitad expuesta al cielo y la otra mitad bajo la copa de los árboles. Para los árboles de hoja caduca, el agua debería correr bajo los árboles donde el aire más caliente se transferirá hacia arriba para calentar las yemas, las flores o los frutos. Los surcos deberían estar bajo los árboles y de 1,0 a 1,5 m de ancho pero no deberían extenderse más allá de la línea de goteo. El riego por surcos debería iniciarse con suficiente antelación para asegurarse de que el agua alcanza el final del campo antes de que la temperatura del aire caiga por debajo de la temperatura crítica de daño. El caudal depende de varios factores, pero debería ser lo suficientemente elevado para minimizar la formación de hielo en los surcos. El agua de escorrentía fría no debería recircular. Calentar el agua es beneficioso, pero puede o no ser efectivo desde el punto de vista del coste, dependiendo de los costes del capital, de la energía y de la mano de obra.

Aislamiento con espumas

La aplicación de aislantes a partir de espumas ha aumentado la temperatura mínima sobre la superficie de las hojas de cultivos bajos en crecimiento unos 10 °C más que en los cultivos sin proteger. Sin embargo, el método no ha sido ampliamente adoptado por los agricultores debido al coste de los materiales y de

la mano de obra así como por el problema de cubrir áreas grandes en un periodo corto de tiempo debido a la poca precisión en la predicción de las heladas. Cuando se aplica, la espuma previene de las pérdidas de radiación desde las plantas y atrapa la energía conducida hacia arriba desde el suelo. La protección es mejor durante la primera noche y decrece con el tiempo ya que la espuma también bloquea la energía que calienta a las plantas y al suelo durante el día y se rompen con el tiempo. Mezclar aire y materiales líquidos en la proporción correcta para crear pequeñas burbujas es el secreto para generar espumas con una conductividad térmica baja. En el capítulo sobre métodos activos de protección sobre el uso de aislantes con espumas se presenta información más detallada.

Métodos combinados

Aspersores por debajo de la cubierta y ventiladores

Los aspersores por debajo de las plantas, con ángulos de trayectoria bajos, pueden utilizarse conjuntamente con ventiladores para la protección contra heladas. Si añadimos ventiladores se puede aumentar de forma potencial hasta unos 2 °C sobre el uso, únicamente, de aspersores bajo las plantas, dependiendo del diseño del sistema y de las condiciones meteorológicas. Además del calor suministrado por las gotas de agua cuando se desplazan desde los cabezales de los aspersores hasta el suelo, el agua congelada en el suelo libera calor latente y calienta el aire cerca de la superficie. Mientras el aire calentado se transferirá naturalmente a través del cultivo, el funcionamiento de los ventiladores con los aspersores favorecerá la transferencia de calor y de vapor de agua dentro de la capa mezclada hacia el aire y las plantas. Normalmente, los agricultores ponen en marcha primero los aspersores, de menor coste, y después ponen en marcha los ventiladores si se necesita más protección. A diferencia del uso de las estufas con los ventiladores, los aspersores pueden dejarse en marcha cerca de los ventiladores. Como los ventiladores aumentan de forma artificial la velocidad del viento, las tasas de evaporación son más altas y los ventiladores no deberían utilizarse si los aspersores humedecen las plantas.

Riego por superficie y ventiladores

La combinación de ventiladores y riego por superficie es una práctica extendida en California y otras localidades en los EE.UU., especialmente en plantaciones de cítricos. Los agricultores normalmente empiezan con el agua de superficie y más tarde ponen en marcha los ventiladores para complementar la protección cuando se necesita. Igual que con los aspersores bajo planta, los ventiladores facilitan la transferencia al aire y a los árboles del calor y el vapor de agua liberado por el agua dentro de la capa mezclada.

Combinación de estufas y de ventiladores

La combinación de ventiladores y estufas protege mejor contra las heladas que cualquiera de los dos métodos por separado (e.g. un ventilador con 50 estufas por hectárea equivale aproximadamente a utilizar únicamente 133 estufas por hectárea). Un sistema típico combina un ventilador de 74,5 kW con unas 37 estufas de chimenea por hectárea, uniformemente distribuidas, situadas a más de 30 m del ventilador. Como el funcionamiento del ventilador tiende a aspirar el aire frío cerca del suelo desde el borde exterior del área protegida, si se colocan más estufas en el borde exterior se calienta el influjo de aire frío. Se recomienda una estufa por cada dos árboles en el borde exterior y dentro de la primera hilera de plantas. Las estufas pueden espaciarse ampliamente por el área afectada por cada ventilador. También tiene que haber una estufa por cada dos árboles dentro de la segunda hilera en la cara contra el viento del cultivo. Los ventiladores deberían ponerse en marcha antes, y las estufas se encienden si la temperatura continua cayendo.

Aspersores y estufas

Aunque no se ha encontrado literatura científica sobre el uso conjunto de aspersores y estufas, el método se ha utilizado. Se ha descrito que un agricultor utilizó un trineo de nieve metálico montado horizontalmente sobre una estaca de unos 1,5 m por encima de cada estufa para evitar que el agua apagara la estufa. Las estufas se encendieron primero y los aspersores se ponían en marcha si la temperatura del aire bajaba mucho. Esta combinación reducía la acumulación de hielo sobre las plantas y, algunas noches, no se necesitaron los aspersores.

PREDICCIÓN Y SEGUIMIENTO

Prever la temperatura mínima y cómo la temperatura puede cambiar durante la noche es útil para la protección contra heladas ya que ayuda a los agricultores a decidir si se necesita la protección y cuándo poner en marcha sus sistemas. Primero hay que consultar los servicios meteorológicos locales para determinar si hay previsiones disponibles. Los servicios meteorológicos tienen acceso a más información y utilizan modelos sinópticos y/o de meso-escala para proporcionar pronósticos regionales. Normalmente, los pronósticos locales (micro-escala) están menos disponibles, a no ser que los proporcionen servicios de predicción privados. Por ello, en este libro se incluye un modelo de predicción empírico “FFST.xls”, que puede calibrarse fácilmente para las condiciones locales. El modelo utiliza registros históricos de la temperatura del aire y del punto de rocío a las dos horas después de la puesta de Sol y las temperaturas mínimas observadas para desarrollar coeficientes de regresión específicos del lugar necesarios para

predecir con exactitud la temperatura mínima durante un periodo particular del año. Este modelo únicamente será válido para eventos de heladas de radiación en áreas con un drenaje de aire frío limitado. En el capítulo 5 se describe el procedimiento para desarrollar los coeficientes de regresión y cómo utilizar el programa FFST.xls.

En este libro se incluye otra aplicación del programa – FTrend.xls – para estimar la tendencia de temperaturas empezando a las dos horas después de la puesta de Sol hasta que se alcanza la temperatura mínima prevista a la salida del Sol de la mañana siguiente. Si la temperatura del punto de rocío a las dos horas después de la puesta de Sol es el dato de entrada, FTrend.xls también calcula la tendencia de la temperatura del bulbo húmedo durante la noche. La tendencia de la temperatura del bulbo húmedo es útil para determinar cuándo poner en marcha y detener los aspersores. FTrend.xls se explica en el capítulo 5.

PROBABILIDAD Y RIESGO

La probabilidad y el riesgo de daño es un factor importante a la hora de tomar decisiones sobre la protección contra helada. Algunos aspectos de probabilidad y riesgo y aplicaciones informáticas se presentan en el capítulo 1 del Volumen II.

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS MÉTODOS DE PROTECCIÓN

El capítulo 2 del Volumen II discute la economía de los distintos métodos de protección contra heladas y presenta un programa de aplicación que ayuda a evaluar la eficacia en costes de todos los métodos más importantes de protección.

TECNOLOGÍAS MÁS CONVENIENTES

A pesar de que este libro presenta información sobre los métodos más conocidos de protección contra heladas, el que un método sea o no apropiado depende de muchos factores. El capítulo 8 discute qué métodos se utilizan normalmente y qué tecnologías son convenientes en los países con recursos limitados.