



**MANUAL DE VIVEROS PARA LA
PRODUCCIÓN DE ESPECIES
FORESTALES EN CONTENEDOR**

VOLUMEN 3

**Condiciones Ambientales
del Vivero**

**Capítulo 3
Luz**

Contenido

3.3.1 Introducción	X
3.3.1.1 Biofísica de la luz	X
3.3.1.2 Definiciones y unidades	X
3.3.2 Papel de la luz en el crecimiento y desarrollo de plantas	X
3.3.2.1 Fotosíntesis	X
Efecto de la intensidad de la luz	X
Uso de luz artificial	X
3.3.2.2 Fotomorfogénesis	X
El sistema fitocromo	X
Extendiendo el fotoperiodo	X
Acortando el fotoperiodo	X
Fototropismo	X
3.3.3 Niveles óptimos de luz	X
3.3.3.1 Programación del cultivo	X
3.3.3.2 Fase de establecimiento	X
3.3.3.3 Fase de crecimiento rápido	X
3.3.3.4 Fase de endurecimiento	X
3.3.4 Modificando la luz en los viveros forestales que producen en contenedor	X
3.3.4.1 Efecto de las cubiertas estructurales	X
3.3.4.2 Sombreado el área de cultivo	X
3.3.4.3 Tipos de lámparas	X
Lámparas incandescentes	X
Lámparas fluorescentes	X
Lámparas de descarga de alta intensidad	X
Reflectores	X
3.3.4.4 Alumbrado fotosintético	X
Intensidad de la luz	X
Calidad de la luz	X
Ubicación y fijación de las lámparas	X
3.3.4.5 Alumbrado fotoperiódico	X
Tipos de alumbrado fotoperiódico	X
Intensidad y calidad de la luz	X
Fijación y posición de las lámparas	X
3.3.4.6 Tratamiento de día corto	X
3.3.5 Sistemas de monitoreo y control de la luz	X
3.3.5.1 Midiendo los niveles de luz	X
Fotómetros	X
Radiómetros	X
3.3.5.2 Sistemas de control	X
3.3.6 Conclusiones y Recomendaciones	X
3.3.7 Literatura Citada	X

3.2.1 Introducción

La naturaleza de la luz ha fascinado al ser humano durante miles de años, pero apenas tiene poco más de un siglo que su verdadera naturaleza comenzó a ser comprendida por éste. La luz es el más complejo y variable de los factores ambientales que afectan el crecimiento de las plantas, y es el más importante (Smith y Whitelam, 1990). Además de su importancia biológica, la luz tiene implicaciones prácticas y económicas en los viveros forestales que producen en contenedores. La luz es un fenómeno subjetivo, así que los administradores de viveros deben recordar que las respuestas a la luz que observen en sus plantas no son las mismas, en términos de longitud de onda (color) o de intensidad (Fig. 3.3.1).

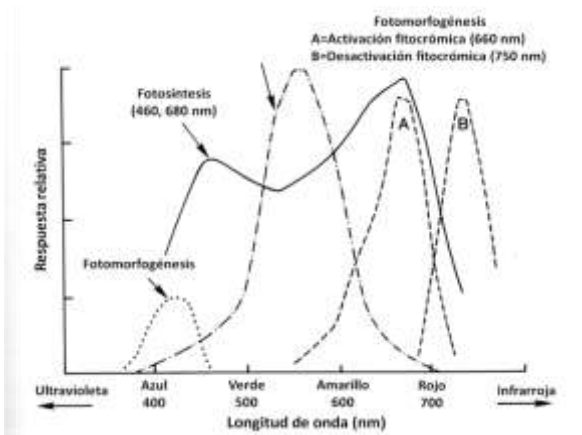


Figura 3.3.1 La sensibilidad del ojo humano a la radiación solar difiere considerablemente de la de las plantas, que responden en varias formas a distintas longitudes de onda.

3.3.1.1 Biofísica de la luz

La **luz** es definida como la parte del espectro electromagnético que es visible al ojo humano. Nuestro planeta recibe una amplia variedad de ondas electromagnéticas tanto de fuentes naturales como artificiales. Esta radiación puede ser descrita en términos de longitud de onda o de energía (Fig. 3.3.2). Ya que las longitudes de onda más cortas llevan más energía que las longitudes de onda más largas, los rayos cósmicos son mortales, mientras que las ondas de televisión y radio pasan a través de muchos objetos sin causarles daño. Los intervalos del espectro electromagnético oscilan desde las longitudes de onda muy largas, las de radio AM (1 km), a la luz visible (10^{-9} m), y hasta las longitudes

extremadamente cortas, de onda cósmica (10-15 m) (Fig. 3.3.2).

El término **luz solar** es el nombre común para la radiación electromagnética que se origina en nuestro sol, a unos 150 millones de kilómetros (93 millones de millas). Todos los materiales bajo el cero absoluto, es decir -273°C (-469°F), emiten alguna radiación electromagnética, y la longitud de onda de esta radiación es función de la temperatura de la fuente. El sol, con una temperatura superficial de 6,000°C (10,800°F), produce un amplio intervalo de radiación electromagnética; 99% de la cual está entre los 200 y los 2,000 nanómetros (nm) de longitud de onda (Fig. 3.3.3).

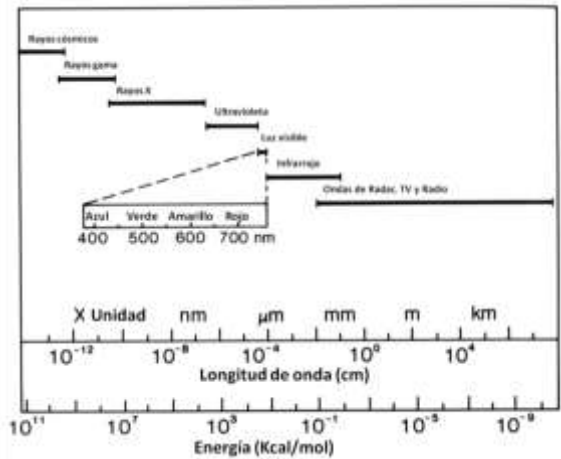


Figura 3.3.2 El espectro electromagnético varía desde los rayos cósmicos a través de la luz visible, de la radiación infrarroja a las ondas de radio y televisión (modificado de Withrow y Withrow, 1956).

La atmósfera terrestre selectivamente nos protege de la mayor parte de la radiación ultravioleta, y también impide el paso a algunas longitudes de onda visibles (Fig. 3.3.3). Puesto que las nubes absorben y reflejan mucha luz visible, la cantidad total de radiación solar que está disponible para el cultivo de plantas está afectado por la latitud y por el número de días despejados de nubes (Fig. 3.3.4). Debido a esta variación geográfica, muchos invernaderos hortícolas están localizados en la región suroeste de los Estados Unidos, donde el cielo se mantiene soleado a través del año (los efectos del clima en la localización de viveros forestales son descritos con más detalle en el volumen uno de esta serie).

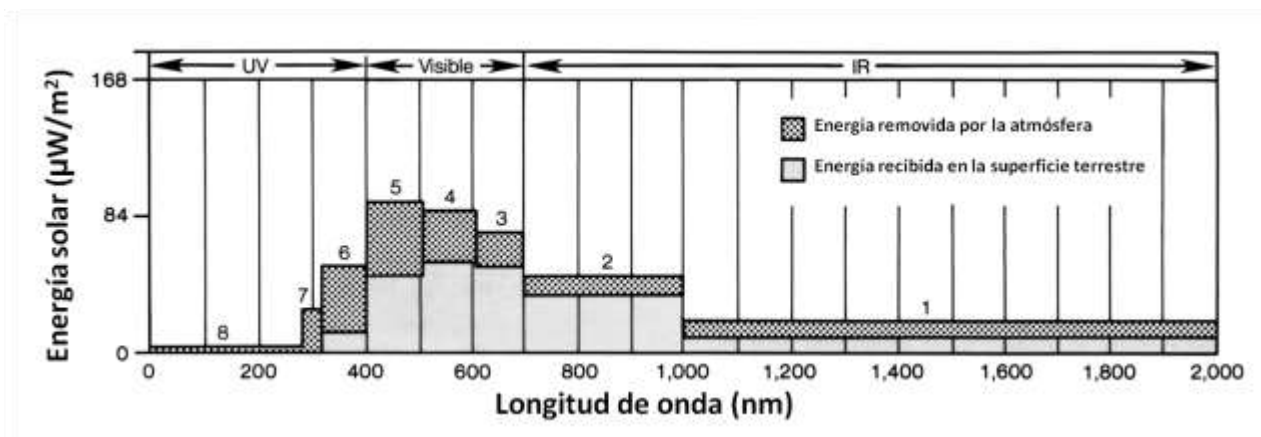


Figura 3.3.3 La energía en el espectro solar puede ser dividida en 8 bandas (Cuadro 3.3.1), que se relacionan con sus efectos en el crecimiento de la planta. La atmósfera terrestre filtra selectivamente mucha de la radiación más intensa (Adaptado de Reifsnnyder y Lull, 1965).

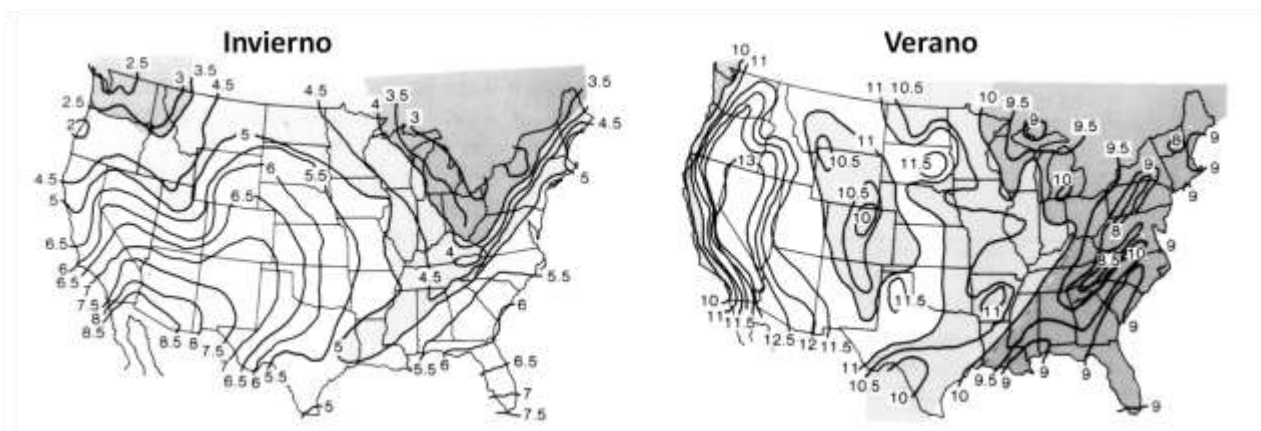


Figura 3.3.4 La cantidad de energía solar que está disponible para el cultivo de especies forestales, es afectada por la cubierta de nubes, pues es reflejada en función del promedio de horas diarias de sol para los Estados Unidos (De USDA, 1941).

3.3.1.2 Definiciones y unidades

Los diversos tipos de radiación electromagnética originados en el sol pueden ser identificados por su longitud de onda. Aunque cualquier unidad de longitud puede ser empleada, la longitud de onda de la radiación solar comúnmente es medida en nanómetros (1nm = 10⁻⁹ nm). También están disponibles las conversiones a unidades inglesas (Bickford y Dunn, 1972), pero casi no son empleadas. La porción del espectro electromagnético que tiene significancia biológica puede ser separada, a grandes rasgos, en **radiación ultravioleta** (UV = < 400 nm), **luz visible** (400 a 700 nm), y **radiación infrarroja** (IR = > 700 nm) (Fig. 3.3.3).

Las longitudes de onda que tienen significancia en la horticultura, han sido divididas en ocho bandas, con base en sus

efectos biológicos (Cuadro 3.3.1). Dos procesos fisiológicos específicos que son importantes para el cultivo de plantas pueden ser manipulados culturalmente mediante luz de longitudes de onda específicas. La fotosíntesis, es mayor en la banda roja (banda 3), con alguna actividad en las longitudes de onda azul-verde (banda 5), mientras que la fotomorfogénesis es más afectada por la luz roja lejana, roja, y azul-violeta (bandas 2, 3 y 5). Muchas de las otras longitudes de onda son reflejadas, dando a las plantas su característico color verde. Sin embargo, para propósitos prácticos, los científicos combinan las longitudes de onda de 400 a 700 nm en un sólo término: **radiación fotosintéticamente activa (RFA)**.

La energía radiante puede ser medida en muchas formas distintas, y han sido utilizados numerosos términos y unidades. La elección depende del uso; para propósitos hortícolas, la radiación debería ser medida en términos de poder (watts), o energía fotón (micro-moles) dentro del espectro de la RFA. Aunque éstos

también describen a la luz en términos de unidades de poder, los ingenieros que estudian el alumbrado usan unidades que reflejan la sensibilidad del ojo humano dentro del espectro visible (lux). Son tres los sistemas comúnmente utilizados para describir y medir la luz (Cuadro 3.3.2).

Cuadro 3.3.1 El "Dutch Plant Irradiation Committee" delineó ocho bandas separadas en el espectro electromagnético, para describir los diferentes efectos biológicos de la luz solar.

Banda	Longitud de onda (nm)	Visibilidad/color	Efectos biológicos
1	> 1,000	Invisible (IR)	Ningún efecto bioquímico específico – absorbida y convertida en calor
2	700 a 1,000	Invisible (IR)	Elongación del tallo
3	600 a 690	Rojo	Fuerte absorción de clorofila y actividad fotosintética*; también la región de mayor efectividad fotoperiódica
4	500 a 590	Naranja, Amarillo y Verde	Baja efectividad fotosintética*
5	400 a 490	Azul, Violeta	Moderada absorción de clorofila y actividad fotosintética; fotomorfogénesis no fitocrómica
6	315 a 390	Invisible (UV)	Fluorescente
7	280 a 314	Invisible (UV)	Actividad germicida
8	< 280	Invisible (UV)	Sin efectos bioquímicos específicos; absorbida por la atmósfera

IR: Infrarrojo; UV: Ultravioleta;

* Las longitudes de onda de 400 a 700 nm (bandas 3 a 5), son también conocidas colectivamente como radiación fotosintéticamente activa (RFA).

Fuente: modificado de Reifsnnyder y Lull (1965).

Cuadro 3.3.2 Unidades y factores de conversión para medirla en viveros que producen en contenedores (la selección de unidades depende del tipo de aplicación).

Unidades de energía	
Unidades preferidas	micromoles por segundo por metro cuadrado ($\mu\text{mol/s/m}^2$)
Otras unidades:	microeinsteins por segundo por metro cuadrado ($\mu\text{E/s/m}^2$)
Conversiones:	$1 \mu\text{mol/s/m}^2 = 1 \mu\text{E/s/m}^2$ $1 \text{ W/m}^2 = 4.6 \mu\text{mol/s/m}^2$ $1 \mu\text{mol/s/m}^2 = 51.2 \text{ lx}$
Unidades de radiación	
Unidades preferidas:	watts por metro cuadrado (W/m^2)
Otras unidades:	watts por pie cuadrado (W/ft^2) langleys por día (Ly/d) calorías por centímetro cuadrado (cal/cm^2)
Conversiones*:	$1 \text{ W/m}^2 = 2.07 \text{ Ly/d}$ $1 \text{ Ly/d} = 0.484 \text{ W/m}^2$ $1 \text{ W/m}^2 = 10.8 \text{ W/ft}^2$ $1 \text{ W/ft}^2 = 0.093 \text{ W/m}^2$
Unidades de iluminación	
Unidades preferidas	1 lux (lx) = 1 lumen por metro cuadrado (lumen/m^2)
Conversiones	$1 \text{ lx} = 0.09 \text{ fc}$ $1 \text{ fc} = 10.76 \text{ lx}$

* Las conversiones entre unidades de energía, radiación e iluminación, son muy complicadas y serán diferentes para cada fuente de luz (ver Cuadro 3.3.3). La curva de distribución espectral de la salida radiante de la fuente debe ser conocida para hacer la conversión. Las anteriores conversiones asumen una curva de distribución espectral plana, sobre las longitudes de onda de la RFA.

Fuentes: ASHRAE (1989), Thimijan y Heme (1983), Hanan *et al.* (1978), Hansen y Biggs (1979).

Unidades de energía – micromoles por segundo por metro cuadrado ($\mu\text{mol/s/m}^2$) miden la tasa de energía radiante (densidad del flujo fotónico) por unidad de área. Simplemente dicho, las unidades de energía describen la cantidad de poder (en el caso de la luz solar, poder solar), que es interceptado por un objeto (Bickford y Dunn, 1972). La cantidad de energía por unidad varía inversamente con la longitud de onda: 1 mol de luz roja (670 nm) lleva 47,000 calorías, comparado con 1 mol de luz azul (470 nm), que lleva 60,000 calorías (Reifsnnyder y Lull, 1965). Las unidades de energía siempre están en las longitudes de onda de la RFA, a menos que otra cosa se suponga. Un mol de fotones es denominado también un einstein (ASHRAE, 1989).

Unidades de radiación - watts por metro cuadrado (W/m^2) – también miden la energía radiante por unidad de área, pero deben establecerse unas longitudes de onda específicas e intervalos de tiempo. Las unidades de radiación con frecuencia son usadas por los ecólogos y fisiólogos vegetales para describir la cantidad total de radiación solar que es recibida en una determinada localidad. En horticultura, las unidades de radiación son más útiles para la descripción de la intensidad del alumbrado artificial, pues las lámparas están graduadas en watts.

Unidades de iluminación - lux (lx) - son una medida estándar de luz artificial por unidad de área a una distancia dada de la fuente. Estas cubren la radiación visible, de 380 a 710 nm, con un máximo a 555 nm, correspondiente a la sensibilidad visual del ojo humano (Fig. 3.3.1). La unidad estándar de iluminación es el lumen. Un lumen que está uniformemente distribuido sobre un área de 1 m lineal es definido como 1 lx; un lumen distribuido sobre 1 pie cuadrado es 1 pie-candela (Cuadro 3.3.2). Aunque la sensibilidad del ojo humano al espectro es muy distinta de la necesaria para las plantas, los instrumentos más baratos para medir la luz son calibrados en lux o en pies-candela.

La mejor unidad de luz para ser empleada en horticultura, ha sido objeto de mucho debate. Las mediciones de radiación y las de energía,

están relacionadas con los mismos aspectos de la luz, pero para propósitos hortícolas, el uso de unidades de energía ha sido recomendado como el más apropiado. Cuando las unidades de radiación deben ser usadas, como al trabajar con luz artificial, los factores para la conversión a unidades de energía variarán con el tipo de lámpara (Cuadro 3.3.3). Pueden consultarse unas tablas completas de conversión en Thimijan y Heins (1983).

Existen dos unidades comunes para la medición de la energía, que son iguales numéricamente (Cuadro 3.3.2): los micromoles o microeinsteins por segundo por metro cuadrado ($\mu\text{mol/s/m}^2$ o uE/s/m^2). Aunque los microeinsteins son comúnmente utilizados por los fisiólogos de plantas (Kramer y Kozlowski, 1979), los micromoles son los más ampliamente recomendados (Thimijan y Heins, 1983) y serán usados en este manual. Ya que las unidades de iluminación (lux) son la forma más común de medir la luz en el vivero, las mediciones de la luz serán dadas tanto en unidades de iluminación como en unidades de energía. No obstante, la conversión entre unidades de energía e iluminación, varía con la fuente de luz (Cuadro 3.3.3). **Para evitar confusión y mantener precisión, el valor en micromoles será seguido por su aproximada conversión a luxes entre paréntesis.** Por ejemplo, hay una fuerte cantidad de luz en un día soleado [$2,000 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~108,000 lux)] en comparación con uno muy nublado [$60 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~3,200 lux)] (Cuadro 3.3.3). Para los que usan unidades inglesas de iluminación pies-candela, la conversión es sencilla dado que los valores difieren por un factor de 10 (1 pie candela = 10.8 lx).

Deben considerarse las unidades apropiadas cuando se compra un medidor de luz o cuando esta se mide. Para propósitos operativos, los viveristas deben usar uno que mida las longitudes de onda relevantes. Para medir la cantidad de luz natural o luz artificial que está disponible para la fotosíntesis, debería medirse la RFA. Para la prevención de la dormancia, sólo se requiere medir la luz roja y roja lejana (ver sección 3.3.5, para más información sobre los medidores de luz).

Cuadro 3.3.3 Comparaciones relativas de unidades de luz para radiación solar y lámparas simples de algunos sistemas típicos de alumbrado artificial*.

Fuente de luz	Radiación (W/m ²)	Energía (μmol/s/m ²)	Iluminación (lx)	Conversión aproximada de unidades energía-iluminación
Radiación solar (al nivel del mar)				
Luz plena	450.00	2,000.0	108,000	54
Densamente nublado	15.00	60.0	3,200	54
Luz lunar plena	0.05	0.2	10	54
Alumbrado artificial +				
Incandescente (100 W)	0.20	1.2	59	49
Halógeno metal (400W)	4.00	19.0	1,330	70
Fluorescente - blanca-fría (40W)	0.30	1.3	103	79
Sodio – alta presión (400W)	4.00	20.0	1,670	84
Sodio – baja presión (180W)	2.00	10.0	1,090	109

* Para la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA): 400 a 700 nm.

+ Valores estimados para la lámpara simple montada 2 m sobre una superficie de cultivo de 3m². El espaciamiento puede variar con el tipo de lámpara y objetivos del viverista. Bajo condiciones de operación, las intensidades lumínicas serán mucho mayores, debido al traslape de lámparas adyacentes.

Fuente: modificado de Thimijan y Heins (1983).

3.3.2 Papel de la Luz en el Crecimiento y Desarrollo de Plantas de Especies de Árboles

Son tres las principales propiedades de la luz que afectan el crecimiento de la planta: intensidad, duración, y calidad (Kramery Kozlowski, 1979). Para la acelerada tasa de crecimiento que es deseable en un vivero forestal, la fuente de luz debe proporcionar suficiente energía radiante a la fotosíntesis. La intensidad de la luz es también un factor para prevenir la dormancia, aunque la intensidad requerida es mucho menor. La duración de la luz está primariamente relacionada con la longitud del día (en la actualidad, la longitud del periodo de oscuridad es más importante) que se requiere para prolongar el crecimiento vegetativo. La calidad de la luz se refiere al hecho de que distintas longitudes de onda se relacionan con diferentes funciones en las plantas; sin embargo, dentro del intervalo de la RFA, la calidad de la luz considerada menos importante que su intensidad y duración (ASHRAE, 1989).

Sobre una base fisiológica, los efectos de la luz en el crecimiento de plántulas de especies forestales y su desarrollo, pueden ser agrupadas en dos categorías: los elevados requerimientos en energía por la fotosíntesis, y los efectos de baja energía que son colectivamente conocidos como fotomorfogénesis (Kramer y Kozlowski, 1979). Cada una de estas respuestas es sensitiva a longitudes de onda específicas (Fig. 3.3.1):

- **Fotosíntesis** - La energía radiante (muchas longitudes de onda de la RFA, pero predominantemente la roja) es capturada por los pigmentos caroteno y clorofila, y convertida a energía química necesaria para el crecimiento y metabolismo de la planta, usando dióxido de carbono y agua como materias primas.
- **Fotomorfogénesis** - La energía radiante (longitudes de onda rojo lejano, rojo, y azul) es capturada por el fitocromo y otros pigmentos. El fitocromo es sensible a la porción del rojo al rojo lejano, y actúa como un sensor ambiental que mide la longitud del día. El sistema fitocromo

controla la fenología de la plántula, incluyendo procesos como la germinación de la semilla y la aparición de yemas, y también tiene que ver con otras reacciones morfológicas, como la respuesta a la sombra. La luz azul es importante para un desarrollo morfológico normal, particularmente en relación con la construcción de ramas y parte aérea en general.

3.3.2.1 Fotosíntesis

La fotosíntesis es uno de los procesos químicos más importantes en nuestro planeta. Muchas formas de vida no serían posibles sin este proceso. Las plantas producen los bloques básicos de la vida como carbohidratos, aminoácidos, y grasas, y también generan oxígeno como un bioproducto de la fotosíntesis. El oxígeno es esencial para la respiración de todos los organismos.

La mayoría de la fotosíntesis toma lugar en el follaje; la clorofila, que da a las plantas su color verde, está contenida en los cloroplastos de las hojas. El agua es absorbida en las raíces y transportada a las hojas, donde es combinada con dióxido de carbono, en presencia de luz para sintetizar azúcares. Los productos de la fotosíntesis son transportados a través de la planta y son utilizados en la respiración, que es en esencia una reacción química inversa a la fotosíntesis (Fig. 3.3.5). La respiración, que ocurre en la oscuridad y también en presencia de luz, libera la energía química de los fotosintatos para una amplia variedad de funciones de crecimiento y mantenimiento (Kramer y Kozlowski, 1979).

La fotosíntesis neta es medida determinando la cantidad de dióxido de carbono que es removido del aire alrededor de la hoja o planta. La tasa fotosintética total es calculada sumando la cantidad de dióxido de carbono que es liberada durante la respiración a la absorbida del aire. El crecimiento de la planta está determinado por la cantidad de fotosintatos remanentes de la respiración, y la

tasa de fotosíntesis neta es más relevante para los horticultores que la tasa total (Mastarlez, 1977). La tasa de fotosíntesis neta está afectada por varias variables ambientales (incluyendo la disponibilidad de agua y dióxido de carbono), pero está fuertemente controlada por la temperatura, que determina la tasa con la que un fotosintato es empleado en la respiración (Fig. 3.3.6).

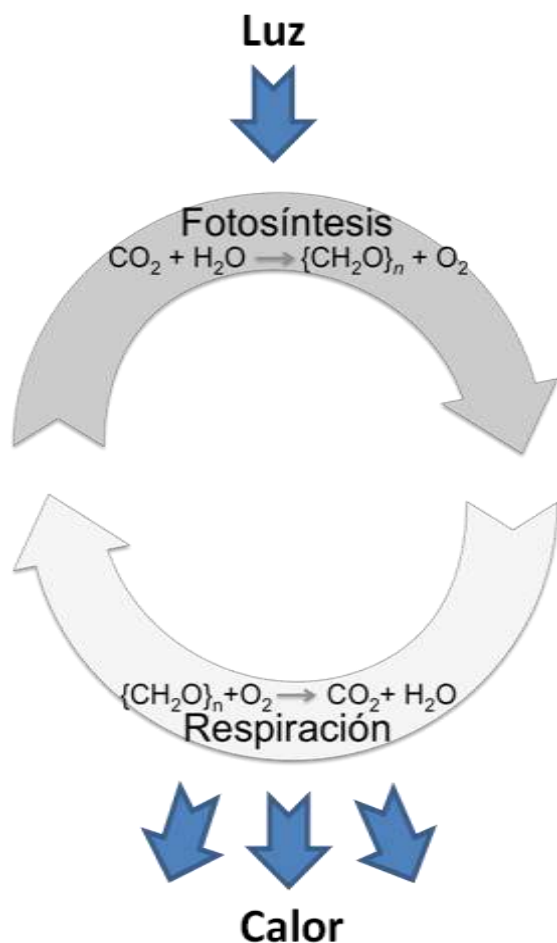


Figura 3.3.5 La fotosíntesis y la respiración son procesos recíprocos. En la fotosíntesis, las plantas verdes usan la energía de la luz para convertir dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) en carbohidratos (CH₂O), liberando oxígeno (O₂) a la atmósfera. Todos los organismos queman estos carbohidratos en presencia de O₂ produciendo energía (calor), dióxido de carbono, y agua (modificado de Gates, 1971).

Efecto de la intensidad de la luz. La fotosíntesis aumenta en forma curvilínea con la intensidad de la luz (Fig. 3.3.7). La respuesta varía entre especies, y está sujeta a los niveles de otros factores limitativos, especialmente temperatura, dióxido de carbono (CO₂), y agua.

Si la intensidad luminosa es muy baja (0 a 20 μmol/s/m², o aproximadamente 0 a 1,100 lx), la tasa fotosintética será menor que la respiración, y habrá una pérdida neta de fotosintatos (A, Fig. 3.3.7). Conforme la luz aumenta de 20 a 50 μmol/s/m² (~1,100 a 2,700 lx), la fotosíntesis igualará a la respiración, y no habrá intercambio neto de CO₂. Este nivel es conocido como punto de compensación por luz (B, Fig. 3.3.7), el cual es importante, pues determina la cantidad mínima absoluta de luz que debe ser provista para mantener vivo el cultivo.

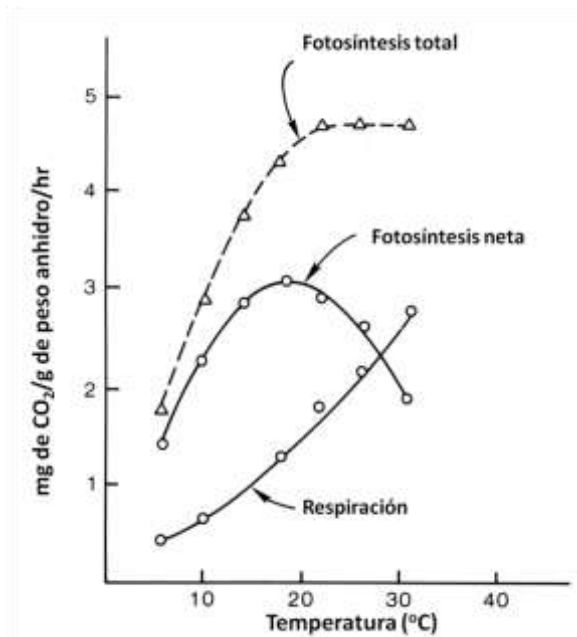


Figura 3.3.6 La fotosíntesis total y la respiración aumentan con la temperatura. La diferencia entre estos procesos, es conocida como fotosíntesis neta, y representa la cantidad de fotosintatos que está disponible para el crecimiento y mantenimiento (Modificado de Mastarlez, 1977).

Conforme la intensidad de la luz es aumentada más allá del punto de compensación, la fotosíntesis aumenta rápidamente hasta aproximadamente 180 μmol/s/m² (~9,700 lx); por encima de este punto (C, Fig. 3.3.7), la fotosíntesis continúa, pero a una menor tasa. Si la intensidad luminosa continúa aumentando, la planta alcanzará un punto donde la curva de respuesta fotosintética sea plana, el punto de saturación por luz (D, Fig. 3.3.7). Más allá de este punto de intensidad lumínica, no resulta útil proporcionar más luz; es más, será detrimental debido al calor adicional que ésta producirá.

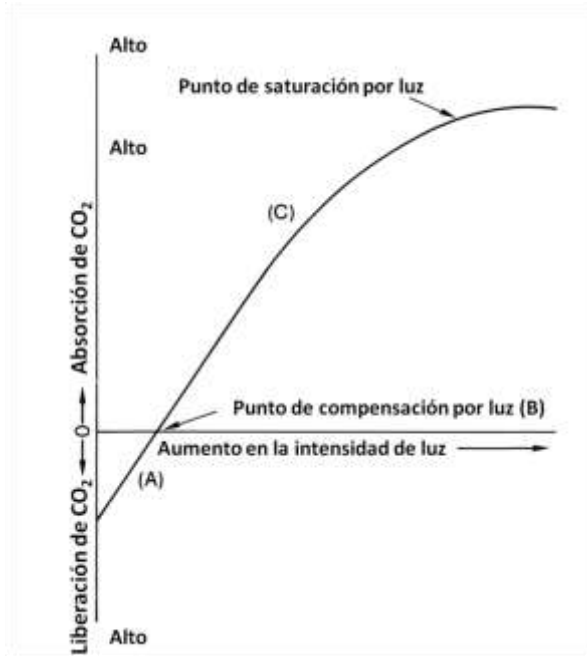


Figura 3.3.7 La intensidad luminosa tiene un fuerte efecto en la fotosíntesis. Con poca luz, la respiración es mayor que la fotosíntesis y hay una pérdida neta en fotosintatos (A). El punto de compensación por luz (B) es donde la fotosíntesis iguala la respiración. Con incremento en la luz, la tasa fotosintética aumenta rápidamente hasta el punto (C), a partir del cual, la respuesta se reduce poco a poco. Después de este punto, la tasa fotosintética gradualmente disminuye, hasta que se alcanza el punto de saturación por luz (D); a partir de este punto, no hay aumento en la fotosíntesis aunque aumente la intensidad luminosa, pudiendo tener un efecto detrimental. Las intensidades luminosas exactas para los diferentes puntos pueden variar con las especies (De Hartmann, Flocker, y Kofranek, 1981. Plant science: growth, development, and utilization of cultivated plants. p. 151. Reimpreso con autorización de Prentice—Hall, Englewood Cliffs, N.J.).

La saturación se presenta a diferentes niveles de luz para distintas especies (Fig. 3.3.8A; Cuadro 3.3.4) y a mayores intensidades de luz bajo elevadas temperaturas y altas concentraciones de CO₂ (Kramer y Kozlowski, 1979). El punto de saturación por luz también varía entre diferentes hojas de la misma planta; las hojas que se desarrollan a la sombra ("hojas de sombra") alcanzan la saturación por luz con intensidades mucho menores que aquellas que se desarrollan a plena luz ("hojas de sol") (Fig. 3.3.8B). Las intensidades de saturación por luz pueden ser tanto como 3 veces superiores para una planta entera que para una hoja individual, debido al sombreado mutuo (Nelson, 1985). Considerando que en los viveros forestales

típicamente se cultivan plántulas a elevadas densidades, la intensidad de saturación por luz puede ser mucho mayor para un bloque de plántulas que para una sola.

Las intensidades luminosas extremadamente elevadas pueden causar "quemaduras por insolación" (Fig. 3.3.9), las cuales técnicamente son denominadas foto-daño o solarización (Levitt, 1980). Las plantas normalmente se adaptan a elevadas intensidades luminosas a través de una variedad de ajustes fisiológicos. Bajo condiciones de tensión, estos mecanismos pueden resultar ineficientes, y el follaje resultar foto-dañado. La susceptibilidad al foto-daño varía con la dureza de las plantas: las plantas dormantes son menos susceptibles, y los tejidos jóvenes y suculentos son particularmente sensibles (Gillies y Vidaver, 1990). Pero aún dormantes, las plantas pueden sufrir de foto-daño. Se ha encontrado que una intensidad de luz excesiva origina clorosis en plántulas de *Picea engelmannii* (Mill.), las cuales fueron embarcadas del vivero a sitios de plantación de gran altitud (Ronco, 1970).

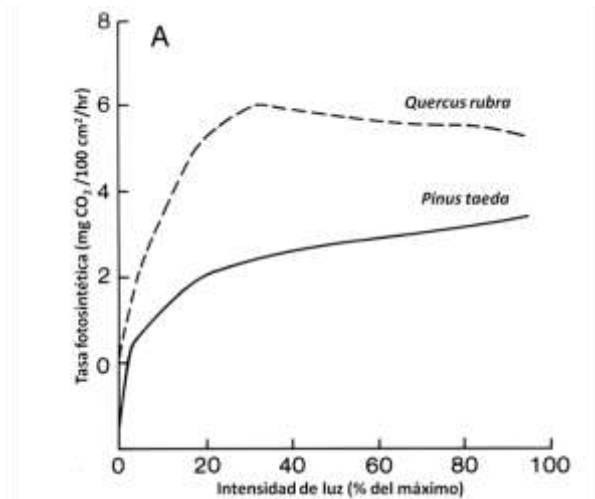


Figura 3.3.8. El punto de saturación por luz (ver Fig. 3.3.7), acontece a menores intensidades luminosas para las especies tolerantes a la sombra, como el *Quercus rubra* L., que en las especies intolerantes a la sombra, como *Pinus taeda* L. (A). La tasa fotosintética para las hojas de sol continúa aumentando con más luz, mientras que las hojas de sombra alcanzan la saturación por luz a niveles de luz relativamente bajos (B). (A, adaptado de Kramer y Decker, 1944; B, de Boysen-Jensen y Muller, 1929; cits. por Hanan et al., 1978).

Uso de luz artificial. Es posible compensar a través de labores de cultivo la falta de luz solar mediante luz suplementaria, pero los sistemas de alumbrado de alta intensidad son caros de instalar y de operar (Fig. 3.3.10A). El alumbrado fotosintético adicional solamente fue utilizado en 5.4% de los viveros forestales encuestados en los Estados Unidos y Canadá. Usualmente se considera que resulta no económico, excepto para las siguientes circunstancias:

- Durante el invierno en latitudes extremas, cuando las intensidades de la luz solar son bajas y los días son breves. En el caso de cultivos hortícolas, se considera práctico el alumbrado fotosintético adicional, en

viveros enclavados en sitios que excedan los 40° de latitud (Nelson, 1985).

- Cuando el cultivo es inusualmente valioso, como aquél obtenido de mejoramiento genético forestal (Bongarten y Hanover, 1985).
- Cuando deban ser cultivadas especies demandantes en luz, en sitios frecuentemente con condiciones nubladas o de neblina.

(Las especificaciones y más información aplicada para el alumbrado fotosintético, se proporcionan en la sección 3.3.4.4).

Cuadro 3.3.4 Intensidades de saturación por luz para varias especies forestales

Especies	Intensidad de saturación de luz		Fuente
	$\mu\text{mol/s/m}^2$	Klx	
<i>Larix siberica</i>	100	ND	Environment Canada (1983)
<i>Picea engelmannii</i> (Engelmann Spruce)	420	50	Ronco (1970)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	550	30	Krueger y Ruth (1969)
<i>Picea sitchensis</i>	550	30	Krueger y Ruth (1969)
<i>Tsuga heterophylla</i>	550	30	Krueger y Ruth (1969)
<i>Quercus alba</i>	270	15	Krueger y Ruth (1969)
<i>Quercus rubra</i>	650	35	Krueger y Ruth (1969)
<i>Cornus</i> spp.	650	35	Krueger y Ruth (1969)
<i>Picea engelmannii</i> (Colorado Blue Spruce)	400-1,500	50-80	Tinus (1970)
<i>Alnus rubra</i>	920	50	Krueger y Ruth (1969)
<i>Pinus taeda</i>	1,800+	100+	Kramer y Decker (1944)
<i>Pinus contorta</i>	2,200+	120+	Ronco (1970)
<i>Pinus ponderosa</i>	2,200+	120+	Tinus (1970)

ND: No disponible



Figura 3.3.9 El follaje de las especies que crecen bajo sombra durante la parte temprana de la estación de cultivo, se adapta a las condiciones de sombra. Si las plantas son removidas a luz solar plena sin un adecuado acondicionamiento, estas resultaran foto-dañadas. El follaje dañado comúnmente se torna clorótico o de un color bronce.



A



B

Figura 3.3.10 La fotosíntesis requiere cantidades relativamente altas de luz, así que las lámparas de alta intensidad deben ser arregladas cercanas entre sí (A). El alumbrado foperiódico (B), solamente requiere intensidad luminosa relativamente baja, por lo que las luces pueden ser colocadas espaciadas entre sí.

3.3.2.2 Fotomorfogénesis

Hay muchas y diferentes respuestas fotomorfogénicas en las plantas, pero con mucho, la más importante es el fotoperiodismo, que es la respuesta de las plantas a la longitud relativa del día y la noche. En horticultura, los términos fotoperiodo y longitud del día significan esencialmente lo

mismo, y se usan indistintamente. La capacidad de percibir la longitud relativa de día, está controlada por un pigmento sensible a la luz, el fitocromo (Smith y Whitelam, 1990).

El sistema fitocromo. El fitocromo es un pigmento azul-verdoso existente en dos formas que responden a la razón de luz roja (R = 660 nm) a roja lejana (RL = 735 nm). La luz roja convierte la forma inactiva de éste a la activa, y la luz roja lejana reinvierte la reacción. La luz de día, que contiene una elevada razón R:RL, convierte el fitocromo a su forma activa; en la oscuridad, la forma activa lentamente se revierte a la forma inactiva. El alumbrado fotoperiódico contiene una elevada razón R:RL, por lo que corta el sistema natural eficientemente (Fig. 3.3.11).

El fitocromo está presente en toda la planta, pero es más abundante en los tejidos meristemáticos, como las semillas y las yemas vegetativas o florales (Kramer y Kozlowski, 1979). Éste funciona en todas las etapas del ciclo de vida, y provee a las plantas con información muy valiosa acerca del factor luz en el ambiente. Además de su sensibilidad a la longitud del día, el sistema del fitocromo controla otras funciones fisiológicas importantes, como la germinación de la semilla, el fototropismo, y las respuestas inducidas por la sombra (Smith y Whitelam, 1990).

Los horticultores han identificado una **longitud de día crítica** para cada una de sus especies comerciales, y tradicionalmente dividen sus cultivos en tipos de día largo, de día corto, y de día neutral. Han sido desarrollados diferentes regímenes de cultivo para cada grupo (Hartmann y Kester, 1983). La situación es más simple para el cultivo de especies forestales en contenedores, pues nosotros no estamos interesados en la floración, solamente en la prolongación o terminación del crecimiento de la parte aérea.

Extendiendo el fotoperiodo. El alumbrado fotoperiódico (Fig.3.3.10B) es el uso más común para la luz artificial en horticultura (Bickford y Dunn, 1972). Los viveristas que producen en contenedores, usan el alumbrado

fotoperiódico para extender la longitud del día en todos los tipos de ambiente de cultivo, desde los complejos a cielo abierto, hasta los invernaderos totalmente controlados. En una investigación reciente el 82% de los viveros forestales en los Estados Unidos y Canadá emplearon alumbrado artificial para regular el fotoperiodo.



Figura 3.3.11 El fitocromo es un pigmento vegetal sensible a la longitud relativa del periodo oscuro, y que regula muchas actividades fenológicas y fisiológicas. En los viveros forestales que producen en contenedores, el alumbrado artificial con una elevada razón de luz roja entre roja lejana, se utiliza durante los días cortos en forma natural, para mantener a las plántulas creciendo activamente (Modificado de Hanan *et al.*, 1978).

La extensión del fotoperiodo es crítica para alcanzar las elevadas tasas de crecimiento que son posibles en los viveros que producen en contenedores, especialmente cuando las plántulas de latitudes más el norte, o de elevadas altitudes, son cultivadas en viveros enclavados más al sur o a menores altitudes (Arnott y Mitchell, 1982). Bajo condiciones naturales, la parte aérea crece sólo durante los largos días de verano, y las yemas aparecen y se mantienen dormantes cuando los días se tornan más cortos, hacia el otoño. La extensión del fotoperiodo es importante desde el punto de vista operativo, cuando las plantas no pueden ser cultivadas hasta el tamaño deseado durante las estaciones naturales de cultivo de primavera hasta el otoño, y se hace particularmente valioso cuando han de ser producidos múltiples cultivos en una estación.

Las especies exhiben respuestas variables a la extensión del fotoperiodo. La necesidad de un alumbrado fotoperiódico dependerá de los siguientes tres principales factores:

Localización del vivero. Los viveros de climas tropicales y subtropicales usualmente no proporcionan alumbrado fotoperiódico, pues la mayor parte de sus cultivos crecen en un año. Sin embargo, a través de experimentos en cámaras de cultivo, se ha demostrado que algunas especies tropicales mostrarán un acelerado crecimiento de la parte aérea cuando son producidas bajo longitudes de día extendidas (Kramer y Kozlowski, 1979). En climas templados, los viveros que producen en contenedores especies de una amplia región geográfica, y específicamente de localidades altas o de elevadas latitudes, deberían planear el proporcionar alumbrado fotoperiódico suplementario (Fig. 3.3.12A).

Especies y ecotipo. Las especies que solamente crecen en sitios de gran altitud, como *Picea engelmannii* (Mill.), requerirán siempre de luz fotoperiódica. El grado de respuesta aumenta con la altitud; por ejemplo, algunas especies subalpinas exhiben aparición prematura de yemas (Fig. 3.3.12B). La respuesta de las plántulas de especies que crecen en una amplia región geográfica (por ejemplo, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), dependerá de la fuente de semilla específica; las plantas procedentes de sitios de poca altitud, costeros, crecerán perfectamente bien sin luces, mientras que las plantas de ecotipos de elevadas altitudes o localidades del interior (de los E.U.A.), no podrán crecer sin ésta. Es prudente el uso del alumbrado fotoperiódico cuando se cultiva una mezcla de especies y de ecotipos, o cuando se desconoce la respuesta de todos los lotes, ya que las especies que no responden no son perjudicadas, y los costos de operación son mínimos. Una vez que las plantas emiten una yema terminal dormante, es difícil y/o tardado conseguir reanudar el crecimiento de la parte aérea.

Ciclo de cultivo. Los viveros, que producen más de un cultivo por año, usualmente necesitarán de luces fotoperiódicas para prevenir que sus cultivos tengan una emisión

prematura de yemas en el otoño; lo cual es aún más importante para los cultivos de fines del otoño o de invierno. Por otro lado, los viveros que no tienen restricciones severas de tiempo, y por tanto no necesitan maximizar sus tasas de crecimiento, pueden cultivar perfectamente plantas de calidad aceptable, sin luces fotoperiódicas. No obstante, los lotes de semilla sensibles pueden exhibir una cantidad inaceptable de variación en altura en sus plantas (Fig. 3.3.12C).

Otros factores. La respuesta al alumbrado fotoperiódico es también función de la edad de la planta. Por ejemplo, el *Pinus sylvestris* L. no mostró respuesta a las 6 semanas, pero exhibió un fuerte requerimiento de fotoperiodo a las 8 semanas de edad (Fig. 3.3.13). Se desconoce la edad precisa a la que diferentes especies se hacen sensibles. En muchos viveros que producen en contenedores se debería comenzar con el control fotoperiódico en la germinación. Unas pocas especies, como *Tsuga mertensiana* (Bong.) Carr., son tan sensibles que tendrán emisión prematura de yemas si sus semillas son germinadas en ausencia de alumbrado fotoperiódico (Arnott, 1991). Inclusive, si las luces fotoperiódicas fallan por tan sólo una noche, algunas especies tendrán emisión prematura de yemas (Arnott y Simmons, 1985). (Fig. 3.3.12D). Cuando las plántulas han sido cultivadas con luz fotoperiódica durante largos periodos, puede requerirse de la ampliación de la longitud crítica del día, para continuar con un crecimiento acelerado. Aún con un fotoperiodo de 24 horas, la mayor parte de las especies templadas cultivadas por un tiempo extremadamente largo, eventualmente emitirán yemas (Kramer y Kozlowski, 1979).

Los efectos de un fotoperiodo extendido son también influenciados por la temperatura. Las plántulas de *Picea* sometidas al mismo alumbrado fotoperiódico, crecieron significativamente más en un invernadero calentado, que en un área protegida sin calentar (Arnott y Mitchell, 1982). Los mismos investigadores encontraron que las frías temperaturas nocturnas produjeron plantas más pequeñas con una formación retrasada de

la yema terminal, aún bajo condiciones de alumbrado fotoperiódico.

El alumbrado artificial para la extensión del fotoperiodo, es diferente del utilizado por la fotosíntesis en tres aspectos: **intensidad, calidad, y duración**. La luz para el control de la dormancia actúa como un estimulante; ésta requiere de muy poca potencia y no necesita ser continua. En contraste, la luz requerida para la fotosíntesis es para potencia, lo que explica el por qué esta luz debe ser de alta intensidad y continua (Cathey y Campbell, 1977). La mayor parte de las especies forestales continuarán su crecimiento cuando se les proporcionan $8 \mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 430 \text{ lx}$) de luz incandescente 3% del tiempo, aunque los requerimientos varían con las especies (Cuadro 3.3.5). Intensidades luminosas fotoperiódicas tan bajas como 0.24 a $0.60 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~ 20 a 50 lx) son electivas con algunas coníferas del norte (Arnott y Mitchell, 1982). Por encima de este **mínimo crítico de intensidad de luz**, la altura de la planta aumenta rápidamente con la intensidad, y parece reducirse después (Figura 3.3.14), y no habrá beneficio adicional proporcionando más luz. El mínimo crítico en la intensidad de la luz varía con la fuente de la semilla: así, cuatro lotes de semilla de *Picea* provenientes del interior de los E.U.A. mostraron mínimos críticos de intensidad de luz oscilando entre 0.24 y $0.96 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~ 20 a 80 lx) (Arnott y Mitchell, 1982). Los límites superiores en los que no se presentó una respuesta de crecimiento adicional, oscilaron de $1.0 \mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 100 \text{ lx}$) para *Picea engelmannii* B.S.P., hasta $8.6 \mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 800 \text{ lx}$) para *Picea glauca* (Moench) Voss (Arnott y Macey, 1985).

En cuanto a la calidad de la luz, el objetivo es mantener al fitocromo en su forma activa, utilizando lámparas que generan una elevada razón de longitudes de onda roja (660 nm) a roja lejana (735 nm) (Fig. 3.3.11) (Ver la sección 3.3.4.5 para aplicaciones operativas de la extensión del fotoperiodo).

Acortando el fotoperiodo. Los tratamientos de día corto, son producidos mediante la exclusión de la luz del sol por varias horas al

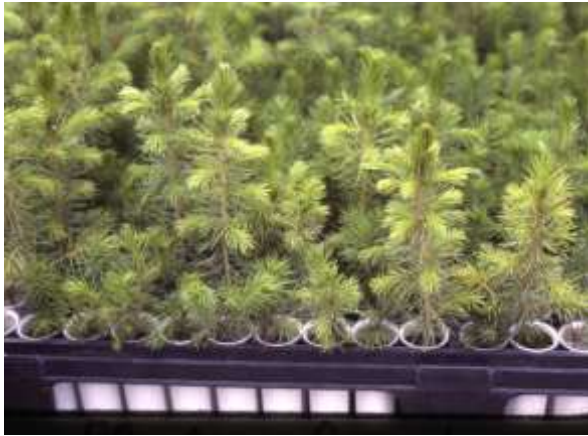
día (Fig. 3.3.15). Esta técnica ha sido utilizada por muchos años en horticultura para inducir la floración en plantas de día corto (Mastarlez, 1977). Durante los largos días de verano a grandes altitudes, los viveristas que producen plantas en contenedores han encontrado efectivo el uso de tratamientos de día corto para detener el crecimiento en altura, inducir el desarrollo de yemas, y promover rusticidad ante el frío en cultivos de coníferas (Colombo *et al.*, 1982). Estos tratamientos de día corto para detener el crecimiento en altura, más de cultivo, ya que los administradores de viveros pueden inducir el desarrollo de yemas de una manera rápida y uniforme en cualquier época del año (Oldum y Colombo, 1988).



A



B



C



D

Figura 3.3.12 En los viveros forestales que cultivan especies o ecotipos de elevadas latitudes o altitudes (A, derecha abajo), se debe proporcionar alumbrado fotoperiódico para estos lotes de semilla, o crecerán mucho más lento que el resto del cultivo (A, izquierda, abajo), o incluso pueden desarrollar una yema terminal prematuramente en la estación (B). Las especies o ecotipos sensibles pueden ser cultivados sin luz fotoperiódica, pero exhibirán variación extrema en las tasas de crecimiento de la parte aérea (C). Cuando se provee alumbrado fotoperiódico, una talla en la energía por sólo una noche, puede facilitar el desarrollo de la yema terminal, originándose así tasas irregulares de crecimiento (D).

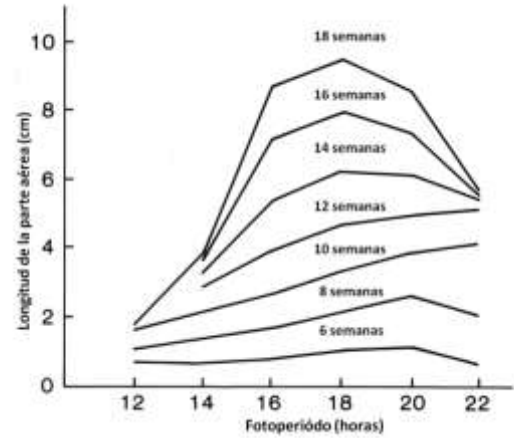


Figura 3.3.13 Aunque algunas especies sensibles requieren de alumbrado fotoperiódico inmediatamente después de la germinación, las plántulas de *Pinus sylvestris* L. no podrán responder sino hasta al cabo de 8 semanas, y la respuesta aumentará con la estación de crecimiento (adaptado de Thompson, 1982).

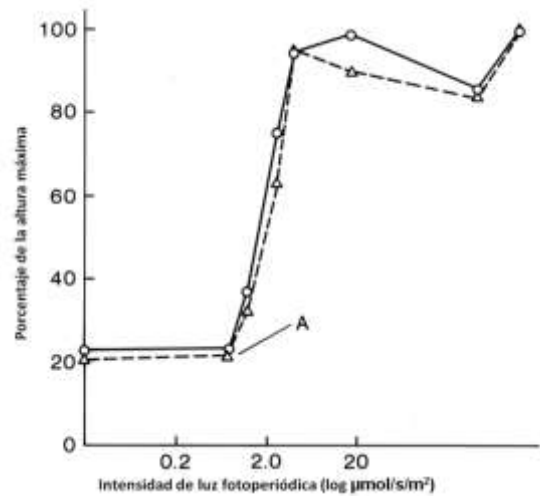


Figura 3.3.14 Los cultivos que son sensibles al fotoperíodo, como estos dos ecotipos de *Picea glauca*, tienen un mínimo crítico de intensidad de luz (A) que debe ser satisfecho; para muchas especies, una respuesta total puede ser obtenida a niveles de luz tan bajos como $8 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~430 lux) (modificado de Tinus, 1976).

Los tratamientos de día corto pueden ser usados para varios propósitos (van Steenis, 1991):

- Inducir el desarrollo de yemas en especies como *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg., *Picea sitchensis* (Hong.) Carr., *Thuja plicata* Donn ex D. Don, y ecotipos como los de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, de bajas elevaciones y climas costeros.

- Forzar un desarrollo prematuro de yemas, en cultivos de estación temprana, que deben ser embarcados o plantados durante el verano.

La técnica de día corto ha probado ser especialmente valiosa a elevadas latitudes, donde la terminación del alumbrado fotoperiódico o de otros tratamientos para originar tensión puede no ser suficiente para facilitar el desarrollo de la yema terminal, e iniciar la tase de endurecimiento. En Canadá, el apagado de las luces fotoperiódicas no es particularmente efectivo, a causa de los largos días naturales. Más aún, la tensión hídrica, que también es usada para detener el crecimiento

de la parte aérea de la planta, reduce significativamente la biomasa de ésta, y afecta adversamente el tamaño de la yema terminal (O'Reilly *et al.*, 1989; Grossnickle *et al.*, 1991).

La técnica de día corto normalmente no es requerida en viveros enclavados a bajas latitudes; el encendido de las luces es normalmente suficiente. Las plantas que han sido cultivadas bajo alumbrado fotoperiódico responden con rapidez a los cambios en el fotoperiodo. Durante la fase de rápido crecimiento, los viveristas pueden generar una condición "relativa" de día corto, una vez que el crecimiento en altura alcanza entre el 85 al 90% del objetivo.

Cuadro 3.3.5 Respuesta de varias especies a tratamientos de alumbrado fotoperiódico.

Especie y fuente de la semilla	Respuesta en crecimiento*		Alumbrado fotoperiódico				Fuente
			Intensidad		Duración	Tipo	
	Altura	Peso	$\mu\text{mol/s/m}^2$	lux			
<i>Abies amabilis</i> (Columbia Británica)	1.9	1.5	C	HPS	2.2	220	Arnott (1979)
<i>Celtis</i> spp. + (Bismark, ND)	1.2	1.8	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Juglans nigra</i> + (Manhattan, KS)	1.1	1.1	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Juniperus scopolorum</i> (Towner, ND)	1.6	2.3	I	INC	16	860	Tinus y McDonald (1979)
<i>Juniperus virginiana</i> (Towner, ND)	1.9	2.4	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Picea engelmannii</i> (Sur de la CB)	5.0	6.6	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Picea engelmannii</i> (Sur de la CB)	1.7	1.7	C	HPS	1.0	100	Arnott y Macey (1985)
<i>Picea glauca</i> (Alberta central)	4.5	>10	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Picea glauca</i> (CB central)	2.3	2.0	C	HPS	8.6	800	Arnott y Macey (1985)
<i>Picea engelmannii</i> (Fort Collins, CO)	1.4	7.7	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Picea engelmannii</i> (Indian Head, SK)	1.4	7.7	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Picea glauca</i> x <i>Picea engelmannii</i> (CB central)	4.0	5.5	I	INC	8	400	Arnott (1982)
<i>Pinus contorta</i> (Alberta central)	2.3	2.6	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Pinus ponderosa</i> (Ruidoso, NM)	1.5	1.8	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Pinus ponderosa</i> (Valentine, NE)	3.1	3.6	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Pinus ponderosa</i> (Colorado Springs, CO)	1.5	2.3	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Quercus macrocarpa</i> + (Devils Lake, ND)	1.2	1.2	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Tsuga heterophylla</i> (Costa de Óregon)	1.7	1.6	I	INC	8	430	Owston y Kozlowski (1978)
<i>Tsuga mertesiana</i> (Columbia Británica)	2.3	1.7	C	HPS	4.0	400	Arnott y Macey (1985)

I: Alumbrado intermitente; C: Alumbrado continuo; HPS: Lámpara de sodio de alta presión; INC: Lámpara incandescente.

* La respuesta iguala el crecimiento bajo el tratamiento de luz recomendado, dividido entre el crecimiento sin luz por la noche.

+ *Celtis* spp. se mantiene creciendo sin extender su fotoperiodo, pero de cualquier manera, éste debería de ser utilizado. *Juglans nigra* responde a largos fotoperiodos solamente con elevada concentración de CO₂, *Quercus macrocarpa* requiere días muy cálidos y noches cálidas para mantener el crecimiento, y el efecto del alumbrado fotoperiódico bajo tales condiciones, es incierto.

ND: Dakota del Norte; KS: Kansas; CB: Columbia Británica (Canadá); CO: Colorado; SK: Saskatchewan (Canadá); NM: Nuevo México; NE: Nebraska.

No obstante, los tratamientos de día corto constituyen una tecnología relativamente nueva en los viveros forestales, y tiene peligros potenciales. Por ejemplo, en algunos viveros tienen problemas para mantener una yema firme una vez que los tratamientos de día corto han terminado (Fig. 3.3.16A). Esto puede ser causado por no aplicar el tratamiento de día corto durante un periodo adecuado de tiempo, o por temperaturas inusualmente cálidas que interfieran con el proceso de dormancia (Odlum, 1991).



Figura 3.3.15 En elevadas latitudes, algunos viveristas utilizan cortinas de oscurecimiento para crear condiciones de día corto durante los largos días de verano. Después de algunas semanas de tratamientos de día corto, las plantas detienen el crecimiento de la parte aérea y desarrollan una yema terminal.

No todas las especies pueden responder favorablemente a estos tratamientos. Investigaciones recientes con *Thuja plicata* Donn ex D. Don han mostrado que los tratamientos día corto deben ser aplicados muy temprano en la estación, para resultar prácticos y pueden resultar detrimentales para el crecimiento radical (Krasoski y Owens, 1991). Los efectos fenológicos de los tratamientos de día corto pueden persistir por al menos 1 año después de la plantación. Las plantas de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. que recibieron tratamientos de día corto, tuvieron un mayor crecimiento en altura que los testigos, durante la primera estación de crecimiento, dado que rompieron su yema más temprano y desarrollaron yemas posteriormente (Oldum y Colombo, 1988). Esta ventaja potencial puede ser una desventaja porque muchas de estas plantas sufrieron daño por frío durante las heladas primaverales. Sin embargo, al término de la

primera estación de cultivo, las plántulas de día corto habían desarrollado nuevos brotes líderes y estaban más altas que las plantas bajo el tratamiento de día natural (Odlum, 1991; Fig. 3.3.16C). Obviamente, se requiere de más investigación sobre los efectos de los tratamientos de día corto y de día largo de esta tecnología (Ver sección 3.3.4.6 para mayor información sobre los tratamientos de día corto).

Fototropismo. Aunque no necesariamente es tan importante culturalmente como la fotosíntesis o el fotoperiodismo, el fototropismo tiene que ver con respuestas morfológicas a diferentes calidades en la luz. Evidencia reciente indica que estas respuestas fototrópicas pueden estar controladas por una respuesta del fitocromo a la razón entre luz roja y luz roja lejana (Smith y Whitelam, 1990). En invernaderos cerrados, algunas especies exhiben una elongación indeseable de la parte aérea (estiramiento) cuando son cultivadas bajo sombra excesiva. Los viveristas de la costa oeste han observado que las plantas de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco se hacen más altas y un poco espiraladas cuando algunas estructuras o equipo del invernadero producen sombras permanentes en el área de cultivo, o cuando la cubierta es vieja o está sucia.

El crecimiento de la parte aérea de muchas especies se orienta en forma natural hacia el sol, o hacia otra fuente predominante de luz, y este tropismo puede ser excesivo en viveros enclavados a grandes latitudes, en el otoño y en el invierno (Fig. 3.3.17).



A



B



C

Figura 3.3.16 Si los tratamientos de día corto son aplicados inadecuadamente, algunas especies o ecotipos pueden romper yemas y desarrollar brotes muy largos, una vez que los tratamientos cesan (A; B, derecha). Los efectos de tratamientos de día corto pueden perdurar hasta la siguiente primavera, cuando las plántulas tratadas (C, derecha) se desarrollan más temprano que el testigo (C, izquierda) (Cortesía de K. Odium).

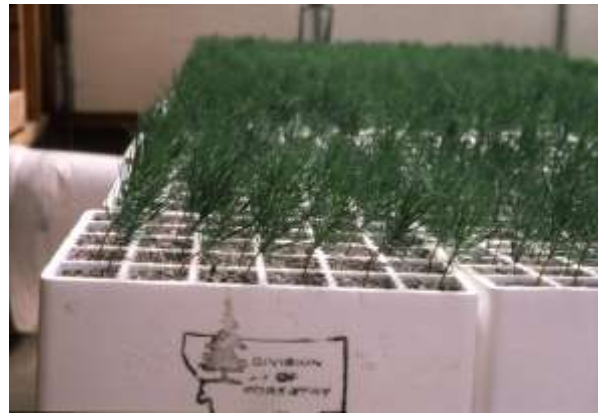


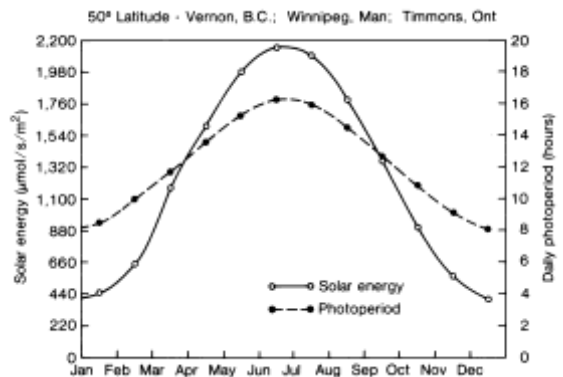
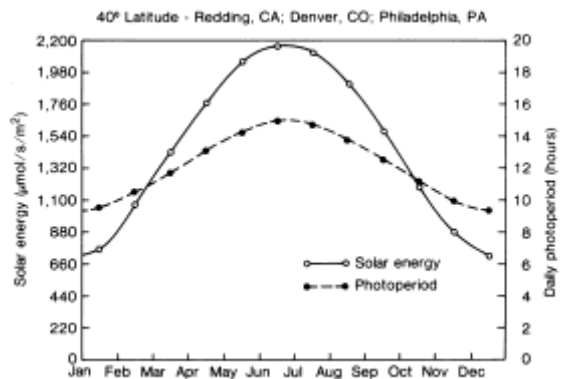
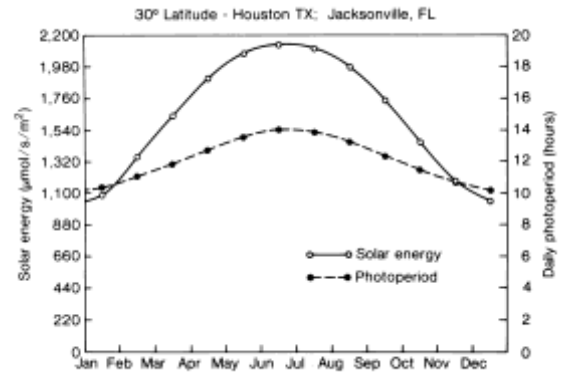
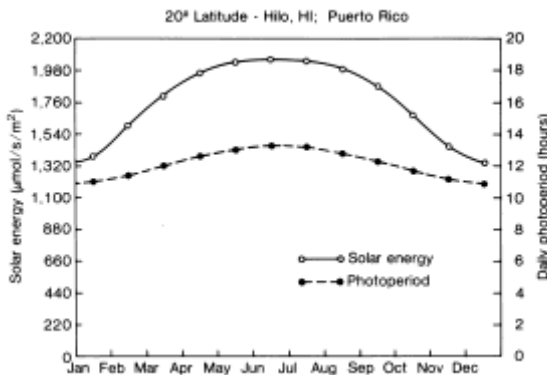
Figura 3.3.17 Las plantas cultivadas durante fines del otoño o principios de la primavera, en viveros ubicados a grandes latitudes, a veces exhiben fototropismo, una respuesta direccional hacia el sol, el cual se encuentra bajo, sobre el horizonte.

3.3.3 Niveles Óptimos de Luz

La luz afecta todas las fases del cultivo de las plantas, y el desarrollo, desde la germinación de la semilla, pasando por el crecimiento acelerado que tipifica a las plantas que son cultivadas en contenedores, hasta el desarrollo de yemas y el endurecimiento, y dicha influencia es particularmente significativa en el ambiente de los viveros que producen en contenedores. La intensidad y la duración de la luz solar disponible, también deberían ser consideradas durante el establecimiento de un vivero, pues tanto la programación del cultivo como el número de cultivos que pueden ser obtenidos cada año, serán afectados.

3.3.3.1 Programación del Cultivo

No únicamente cambia la longitud del día con las estaciones en las grandes latitudes, también cambia la intensidad de la radiación solar. En efecto, a grandes latitudes la variación estacional de la intensidad solar es casi tan extrema como la del fotoperiodo (Fig. 3.3.18). Este cambio estacional en intensidad solar, afecta la programación de la cosecha. En los viveros enclavados en los trópicos, rutinariamente siembran sus cultivos sin importar la época del año. No obstante, el potencial para obtener cosechas múltiples decrece a grandes latitudes.



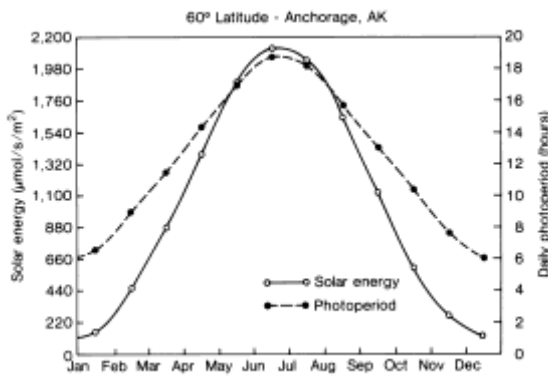


Figura 3.3.18 La variación estacional en la intensidad de la radiación solar, así como la longitud del día, aumenta con la latitud. Aunque no tan aparente como la variación en la longitud del día, la variación en la intensidad solar es muy importante para el cultivo de especies forestales en viveros que producen en contenedores.

En las zonas templadas, los administradores de viveros que desarrollan un cultivo por año deberían programar alrededor del solsticio de verano (junio 21 en el hemisferio norte), para que haya suficiente luz solar para el cultivo de las plantas a través del ciclo de producción (Fig. 3.3.19). Los cultivos múltiples también deberían ser programados alrededor del solsticio. Para los viveros en los que se producen dos cultivos por año, la primera producción debería ser sembrada lo suficientemente temprano para que pueda ser removida del invernadero oportunamente, y el segundo cultivo debería ser sembrado en el solsticio (Fig. 3.3.19). Los cultivos sembrados después en el año tienen una progresiva menor disponibilidad de luz solar para la fotosíntesis, y esto es aún más significativo en los climas muy nublados (Fig. 3.3.4). La reducción de la intensidad solar se refleja en las menores tasas de crecimiento durante el otoño y el invierno (Downs, 1985), y también afecta a otros factores de la producción en el vivero, como la incidencia de enfermedades como el "moho gris" (*Botrytis cinerea*) (Taller y Peterson, 1988). Así que, a menos que las demandas de producción requieran de un segundo cultivo, es más económico obtener un cultivo de "verano" en los viveros de zonas templadas. (La programación del cultivo será discutida en el volumen seis de esta serie).

3.3.3.2 Fase de establecimiento

La germinación de muchas de las semillas de especies forestales no depende de los niveles de intensidad de luz, aunque la calidad de la luz y el fotoperíodo pueden afectar significativamente a algunas especies. Por ejemplo, la luz roja (660 nm) promueve la germinación de la semilla de *Pinus taeda* L., mientras que la roja-lejana (730 nm) la inhibe (McLemore, 1971). Tanto la tasa de germinación como la germinación total son promovidas por longitudes del día de 8 a 12 horas, para muchas especies (Kramer y Kozlowski, 1979). Sin embargo, pueden ocurrir algunas excepciones, como las semillas de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, que germinan mejor con un fotoperíodo de 16 horas, en comparación con uno de 8 horas (Jones, 1961).

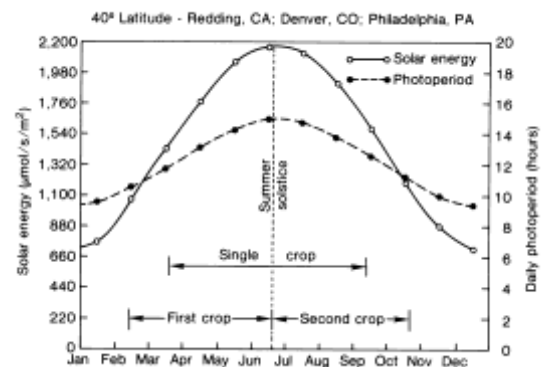


Figura 3.3.19 A causa de que el alumbrado fotosintético suplementario no es nada económico, los viveristas deberían planear sus cosechas alrededor del solsticio de verano, para tomar ventaja de las mayores intensidades de luz. En la zona templada, algunos viveros son capaces de producir dos o aún tres cultivos por año, gracias a una cuidadosa planeación.

Los cotiledones de las plantas de coníferas en germinación, se hacen fotosintéticamente activos tan pronto como emergen del medio de cultivo, y el desarrollo de las acículas primarias depende de los fotosintatos de los cotiledones. La mayoría de las plántulas recién germinadas crecen mejor con intensidades moderadas de luz, alrededor de 55 μmol/s/m² (~3,000 lux), y puede ser necesaria alguna reducción en la intensidad de la luz para alcanzar un óptimo de germinación en ambientes con elevados niveles de energía solar. Se podría obtener la intensidad de luz

deseada con varios tipos de cubiertas, como mallas al 50% en los invernaderos. Una cubierta menos densa (30 a 50%) puede ser necesaria en los climas nublados. Sin embargo, la intensidad de luz apropiada varía con las especies; así, en plantas de *Pinus resinosa* Ait. el desarrollo de las acículas primarias fue retardado severamente cuando los niveles de luz se redujeron por debajo de los 120 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (~6,500 lux) (Kozlowski y Borger, 1971). En los viveros que producen pinos del sur de los E.U.A., cualquier sombra es indeseable, pero la malla es utilizada como protección ante lluvias intensas.

Las plántulas emergen durante la germinación a un ambiente con elevados niveles de energía solar, que las somete a tensión. Las condiciones de luz, temperatura, y humedad, son críticas en este momento, y los viveristas deben vigilar con esmero, para asegurar que todos los factores ambientales estén proporcionados a niveles óptimos. El tipo de sustrato puede también afectar la luz y la temperatura en el microambiente alrededor de la semilla en germinación. La perlita o la arena, de colores claros, reflejan una considerable cantidad de radiación solar. Por otro lado, los “mulches” oscuros absorben radiación solar, y pueden desarrollar temperaturas que originen daños en el tallo suculento (El daño por calor en los viveros forestales se discute con más detalle en el volumen cinco de esta serie).

3.3.3.3 Fase de crecimiento rápido

Después que las plántulas producidas en contenedores se han establecido, la intensidad de la luz debería ser aumentada gradualmente, hasta alcanzar el punto de saturación, a efecto de maximizar la fotosíntesis. Si las plantas estuvieron bajo sombra durante la fase de establecimiento, entonces la cubierta debería ser removida, a menos que las temperaturas diurnas resultaran dañinas sin tal cubierta. Este es con frecuencia el caso en los trópicos o en climas áridos, durante el verano.

El punto de saturación por luz varía entre las especies (Cuadro 3.3.4), por lo que al producir especies con distintos requerimientos de luz, lo mejor es tenerlas en ambientes de cultivo

separados. Si no se cuenta con espacios separados, los viveristas deben diseñar un ambiente de luz que sea adecuado para la mayor parte de las especies en producción. Una opción es el sombreado de alguna sección de una estructura de cultivo para especies tolerantes a la sombra. Resulta más práctico que los invernaderos estén orientados perpendicularmente con respecto al arco solar (esto es, de norte a sur), pero aún así, el área sombreada cambiará gradualmente durante la estación de cultivo.

Idealmente, el sombreado debería ser ajustado a través del día y de un día a otro para optimizar la intensidad de la luz, pero si el sombreado solamente puede ser aplicado y removido manualmente, esto resultaría impráctico. En la actualidad existen sistemas motorizados de sombreado que sí pueden lograr este resultado (Vollebregt, 1990) (ver sección 3.3.4.6).

Dado que la intensidad de la luz es reducida con cualquier tipo de cubierta, algunos viveristas mueven sus cultivos fuera de los invernaderos totalmente cerrados tan pronto como las plantas están establecidas en los contenedores (Fig. 3.3.20A). Desde luego, esto es sólo una opción cuando las temperaturas ambientales son moderadas. Brissette *et al.* (1990) reportaron que aún el 30% de sombra redujo seriamente el crecimiento de plántulas de *Pinus palustris* Mill., y recomiendan el cultivo de éstas en complejos abiertos, a plena luz del sol, durante los meses de verano. Aún tan al norte como en la Columbia Británica, Canadá, los administradores de viveros están removiendo las cubiertas de polietileno de sus invernaderos a mediados del verano, para maximizar la intensidad de la luz (Fig. 3.3.20B). Esta práctica ha demostrado promover la calidad de la planta (Taller y Peterson, 1988) (ver la sección 3.3.4.1 para mayor información).



A



B

Figura 3.3.20 Puesto que cualquier tipo de cubierta de invernadero reduce la intensidad de la luz, en algunos viveros se cultivan las plantas en complejos abiertos, equipados con alumbrado fotosintético (A). Otros viveristas remueven la cubierta tan pronto como las temperaturas del exterior se hacen favorables para el cultivo (B).

La eficiencia fotosintética también varía con el tipo de follaje. Por ejemplo, las acículas primarias de *Pinus taeda* L. alcanzan su máxima fotosíntesis a menores intensidades de luz, en comparación con las acículas secundarias maduras de plantas más viejas (Bormann, 1956). Cuando las plantas comienzan a traslapar su follaje entre sí, se produce un sombreado mutuo que abate la tasa fotosintética: esto puede ocurrir relativamente pronto en la estación de cultivo con especies de hojas largas, o con plántulas cultivadas a grandes densidades. Los árboles grandes desarrollan hojas de sol y de sombra como respuesta a la intensidad de la luz (Kramer y Kozlowski, 1979). Las plantas de las especies tolerantes a la sombra, o cualquiera de las plantas que hayan sido cultivadas bajo sombra, pueden desarrollar follaje no tolerante a elevadas intensidades luminosas. Estas plántulas pueden resultar "quemadas

por el sol" si son expuestas a luz solar plena (ver sección 3.3.2.1).

Muchos viveros mantienen sus plántulas bajo fotoperiodos extendidos durante toda la fase de crecimiento rápido, para promover el crecimiento de la parte aérea y no propiciar el desarrollo de yemas terminales. Aún una interrupción breve durante este periodo puede resultar en el desarrollo de yemas, y tener serias repercusiones económicas (Fig. 3.3.12D). Cuando las plantas alcanzan aproximadamente el 80 a 90% de su altura objetivo, los viveristas quitan las luces fotoperiódicas para iniciar la fase de endurecimiento.

3.3.3.4 Fase de endurecimiento

El objetivo de la fase de endurecimiento es finalizar el crecimiento en altura, producir yemas, y estimular el crecimiento en diámetro y el de la raíz, mientras gradualmente se endurece a la planta para tolerar tensión. El control del fotoperiodo es el estímulo predominante que causa el cese de crecimiento en altura en las plantas, y el desarrollo de la yema terminal. La mayoría de las especies forestales son muy sensibles a los cambios en la longitud del día, aunque las especies y ecotipos de latitudes del sur y de ambientes costeros suaves, resultan menos afectadas (ver sección 3.3.2.2). En los Estados Unidos, la mayoría de los administradores de viveros que producen en contenedores, eliminan las luces fotoperiódicas para iniciar el desarrollo de yemas y para inducir la dormancia. A causa de los largos días de verano, algunos viveristas canadienses utilizan cortinas oscuras para acortar el fotoperiodo (Esta técnica es discutida en la sección 3.3.4.6, y otras técnicas culturales para inducir la dormancia son discutidas a detalle en el volumen seis de esta serie).

Muchos viveros que producen en contenedores comienzan la fase de endurecimiento con la remoción de las plantas del invernadero y exponiéndolas a condiciones ambientales; otros viveros simplemente quitan la cubierta del invernadero. Sin embargo, los viveristas deberían ser cautelosos cuando movilizan especies

tolerantes a la sombra desde un área de cultivo sombreada hacia otra con luz solar plena, pues las plantas pueden resultar "quemadas por el sol" (Fig. 3.3.9). Los viveristas pueden prevenir el foto-daño, minimizando la tensión a la planta, y a través de una gradual aclimatación a la elevada intensidad luminosa. El follaje suculento adquiere endurecimiento conforme madura, desarrollando una cutícula más gruesa, y mediante otros cambios morfológicos en la epidermis (Levitt. 1980). Las especies susceptibles deberían ser movidas gradualmente de la sombra total; primero hacia un área con intensidad de luz intermedia durante varias semanas, para finalmente exponerlas a luz solar plena.

3.3.4 Modificando la Luz en los Viveros Forestales que Producen en Contenedores

La luz es una de las herramientas de cultivo más importantes que tiene a su disposición el administrador de viveros que producen en contenedores, quien puede modificar la intensidad de la luz solar o complementar ésta con luces artificiales. La localización y orientación de la estructura de cultivo es también importante, porque las sombras permanentes pueden causar abatimiento de las tasas de crecimiento de las plántulas (Fig. 3.3.21) (La localización de los viveros se discute con mayor detalle en el volumen uno de esta serie).

3.3.4.1 Efecto de las cubiertas estructurales

La radiación solar es modificada tanto en intensidad como en calidad, al momento en que ésta entra en la atmósfera terrestre. El tipo de invernadero y su localización también afectan la naturaleza de la luz solar incidente. Sin considerar las reducciones debidas al ángulo solar y a la cubierta estacional de nubes, la radiación solar medida dentro de un invernadero (Fig.3.3.22), aún continúa aproximadamente con el modelo de distribución normal para la energía solar a través de la estación de crecimiento (Fig. 3.3.19).

El grado de la modificación solar varía con las características de la estructura de cultivo, y con el tipo, edad y limpieza de la cubierta (Hanan *et al.*, 1978). La radiación solar en las longitudes de onda de la RFA, fue medida dentro de dos invernaderos en la Columbia Británica, Canadá, uno construido con paneles de fibra de vidrio, y otro con película de polietileno. La cubierta de polietileno transmitió todo el espectro medido mejor que la cubierta de fibra de vidrio (Fig. 3.3.23), y la diferencia promedio en todas las longitudes de onda de la RFA fue de 12.2% (Taller y Peterson, 1988). Los dos tipos de cubiertas reflejaron más de las longitudes de onda más cortas, produciendo así un ambiente de luz relativamente alto, en las bandas roja e infrarroja.



Figura 3.3.21 Los viveros que producen en contenedores deberían estar enclavados lejos de árboles o de otras obstrucciones, que pueden bloquear la luz solar durante cualquier parte apreciable del día o de la estación de cultivo. Los manchones de sombra permanente reducirán la fotosíntesis y pueden originar que las plantas crezcan altas y con forma espiralada.

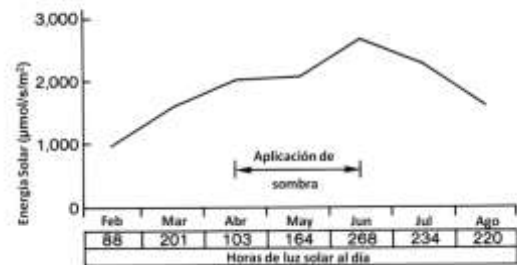


Figura 3.3.22 La cantidad de radiación solar disponible para los cultivos en invernadero, está afectada por la localización, tipo de estructura, y prácticas de cultivo. La luz solar mensual promedio dentro de este invernadero de vidrio en Quebec, Canadá, siguió el modelo anual normal (Fig. 3.3.19), excepto cuando se empleó malla para dar sombra a efecto de reducir las temperaturas en el invernadero, durante la parte temprana de la estación de crecimiento (Modificado de González y D'Aoust, 1988).

McMahon *et al.* (1990), en una investigación detallada de la transmitancia espectral de varias cubiertas de invernadero y materiales de sombreado, encontraron una variación considerable entre los productos (Cuadro 3.3.6). Tanto la intensidad como la calidad de la luz variaron, no sólo entre diferentes cubiertas estructurales o de sombreado, también entre productos similares, como las marcas de películas de polietileno. La transmisión total de luz osciló de 95 a 52% para los materiales estructurales, y de 45 a 21% para los materiales de sombreado. Aunque básicamente las longitudes de onda azul y roja no resultan afectadas por los materiales estructurales, sí lo son por los

materiales de sombreado. Tanto la luz azul como la razón entre luz roja y roja lejana, pueden afectar la morfología de la planta. La luz con una elevada proporción de radiación roja lejana a roja, tiende a producir hojas más largas, y entrenudos largos ("estiramiento") (McMahon *et al.*, 1990).

La condición y limpieza de la cubierta del invernadero, puede tener un profundo efecto en la transmisión de la luz (Fig.3.3.24); Nelson (1985) estima que solamente la acumulación de polvo en la cubierta de un invernadero, puede reducir la transmisión de la luz en un 20%. Las cubiertas de plástico duro o de fibra de vidrio, deberían ser limpiadas regularmente, y aún las de polietileno pueden ser limpiadas con el uso de mangueras. La limpieza o el reemplazamiento de la cubierta afectarán no sólo la intensidad de la luz solar, también el régimen de temperaturas dentro de la estructura, y por tanto, las prácticas de cultivo deben ser ajustadas en correspondencia con estos cambios.

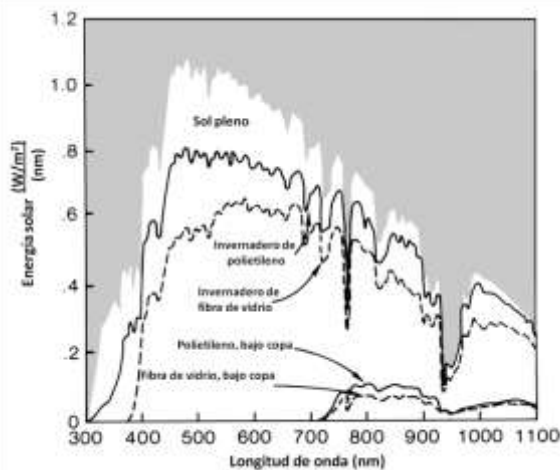


Figura 3.3.23 La distribución espectral de la radiación solar fue proporcionalmente menor en un invernadero de fibra de vidrio, en comparación con uno cubierto con polietileno. La luz solar que fue transmitida a través de las copas de las plantas resultó severamente modificada tanto en intensidad como en calidad (Adaptada de Tuller y Peterson, 1988).



Figura 3.3.24 Algunos tipos de cubiertas de invernadero necesitan ser periódicamente limpiadas o reemplazadas. Esta vieja cubierta de fibra de vidrio se ha tornado amarilla y está cubierta con detritos de una cortina rompe vientos adyacente.

La estación es también un factor, pues la transmisión de la luz a través de las cubiertas de los invernaderos varía con el ángulo del sol. Grazoli (1988) midió la transmisión de la radiación solar a través de una variedad de cubiertas de invernadero, con el sol directamente sobre de ellas y también con un ángulo de 60°, el cual es el máximo ángulo solar a 37° de latitud en el solsticio de invierno, en el hemisferio norte. Bajo estas condiciones simuladas de invierno, la transmisión de la luz decreció entre 8.0 a 14.6% para las cubiertas comunes de invernadero (Las propiedades de las cubiertas de invernadero, son discutidas con más detalle en el volumen uno de esta serie).

3.3.4.2 Sombreado el área de cultivo

El calor se hace un mayor problema durante los meses de verano, y muchos viveristas modifican las características de transmisión de la luz en sus invernaderos mediante la aplicación de materiales o pinturas blancas reflectoras de luz, o instalando telas para sombreado (Fig. 3.1.21). El blanqueado y la tela de sombra son consideradas como sombreadoras "permanentes" porque son dejadas en el sitio durante la mayor parte de la estación de cultivo. La tela de sombreado es preferible al blanqueado, porque esta puede ser removida estacionalmente sin dejar residuos. Las telas de sombreado comerciales pueden producir una sombra de 20 a 90%, y también están disponibles en diferentes colores. La transmisión de la RFA total y de longitudes de onda específicas está afectada por el tipo de material de sombreado (Cuadro 3.3.6), y el filtrado selectivo de algunas telas de sombreado afectará el crecimiento de la planta (McMahon *et al.*, 1990).

La selección adecuada del sombreado es un proceso de mediación, porque la intensidad de la luz cambia durante el día con el ángulo del sol y con el grado de nubosidad. Debido a la labor involucrada, no resulta económico ajustar la tela de sombra manualmente para mantener las condiciones de luz. Sin embargo, con el advenimiento de sistemas de sombreado retráctiles, los viveristas tienen la opción de ajustar la intensidad de la luz dentro del área de cultivo para maximizar la fotosíntesis o para reducir la temperatura varias veces al día (Fig. 3.3.25).

Aunque los sistemas automáticos de sombreado son relativamente caros de instalar, pueden aumentar grandemente la cantidad de luz solar que alcanza al cultivo, y por tanto, afectar las tasas de crecimiento de las plantas. En una prueba operativa de invernadero, un sistema automatizado de sombreado permitió que el cultivo recibiera un 50% más de horas de RFA, en comparación con otro cultivo en un invernadero con sombra permanente (Vollebregt, 1990).

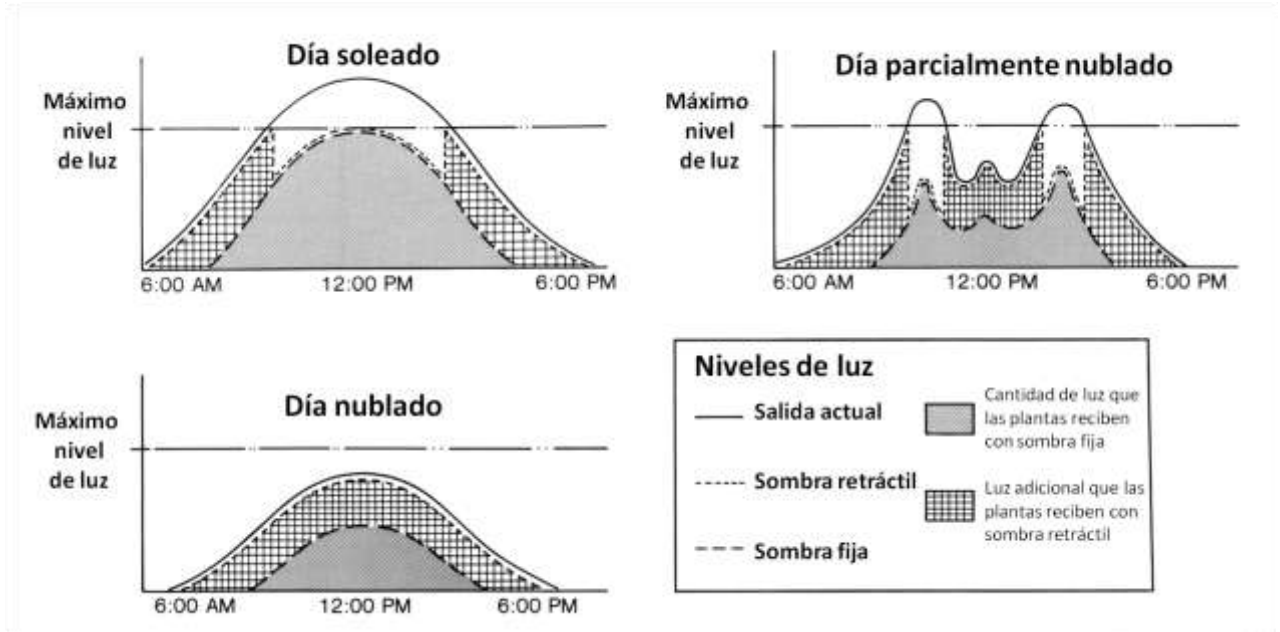


Figura 3.3.25 Los sistemas retráctiles de sombra permiten a las plantas recibir más luz solar que las telas de sombreado "fijas". La cantidad de luz adicional puede ser significativa temprano en la mañana, y tarde durante el día, y a través del día bajo condiciones de nublado parcial (Modificado de Vollebregt, 1990).

Cuadro 3.3.6 Transmitancia espectral de cubiertas de invernadero y de materiales de sombreado.

Material cobertor	Luz fotosintética en 400 – 700 nm (% del sol pleno)	Luz fotomorfogénica	
		Azul en 400 – 500 nm (% de sol pleno)	Razón luz roja lejana a roja en 730-660 nm
Materiales estructurales			
Vidrio	93	93	0.97
Película de polietileno			
Monsanto 602®	88	83	1.01
Monsanto 703®	67	63	1.04
Monsanto Cloud-9®	52	48	1.04
Panel acrílico Exolite®	95	92	1.02
Panel de policarbonato Lexan®	78	75	1.04
Materiales de sombreado			
Pintura de látex blanca	41	39	0.99
Tela negra para sombreado (55% de sombra)	45	44	1.00
Tela verde para sombreado "Saran" (63% de sombra)	35	34	1.04
Tela de poliéster verde para sombreado	21	27	5.58
Tela de poliéster aluminizado para sombreado (80% de sombra)	21	18	1.06

Fuente: modificado de McMahon *et al.* 1990

3.3.4.3 Tipos de lámparas

Los dos factores biológicos más importantes a considerar durante la selección de un sistema de alumbrado hortícola, son la intensidad y la calidad de la luz, conocidos en conjunto como **distribución de energía espectral**, porque éstos determinarán la medida en que el sistema será efectivo. Una vez que estos dos criterios han sido contemplados, entonces han de considerarse otros aspectos operativos: eficiencia de la energía, uniformidad en la distribución de la luz, costo inicial de las lámparas y de la instalación, vida media de las lámparas, costo de reemplazo de éstas, y resistencia a la corrosión. Para aplicaciones hortícolas, el alumbrado artificial puede ser dividido en incandescente, fluorescente y en alumbrado de descarga de alta intensidad:

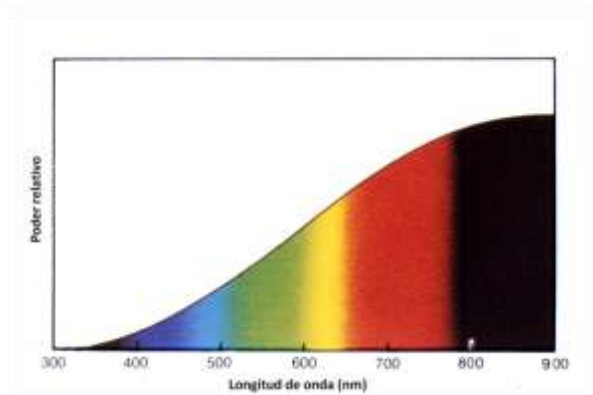
Lámparas incandescentes. Una lámpara incandescente estándar, contiene un filamento de tungsteno encerrado en un bulbo de vidrio, que está lleno con gas nitrógeno, para prevenir la oxidación y la evaporación del tungsteno a elevadas temperaturas (Bickford y Dunn, 1972). Una lámpara incandescente típica produce radiación que alcanza la banda infrarroja (Fig. 3.3.26A), y por tanto genera una cantidad de calor relativamente alta.

Las luces incandescentes no son recomendables como alumbrado fotosintético, ya que generan

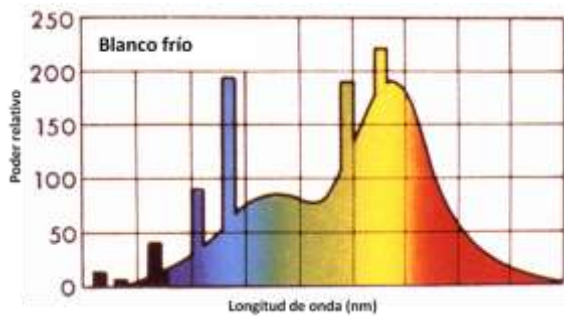
mucho calor y son muy caras de operar a las intensidades requeridas. Estas pueden ser balanceadas con luces fluorescentes, para cubrir mejor las longitudes de onda de la RFA, pero esta combinación es solamente usada en las cámaras de cultivo. Sin embargo, las lámparas incandescentes son el tipo de alumbrado fotosintético más ampliamente utilizado en los viveros de los E.U.A. y del Canadá (Cuadro 3.3.7), pues proporcionan una energía espectral utilizable, son baratas de instalar, y pueden ser apagadas frecuentemente sin pérdida de la vida del bulbo. Las lámparas incandescentes gradualmente depositan tungsteno en el interior del bulbo (un proceso denominado "oscurecimiento"), el cual disminuye la salida de luz y su vida de servicio útil (Aldrich y Bartok, 1989). Los bulbos incandescentes estándar son los menos eficientes y tienen la menor vida promedio de todas las fuentes comunes de luz empleadas como alumbrado hortícola (Cuadro 3.3.8), lo cual significa que los bulbos deben de ser reemplazados con frecuencia.

Una amplia variedad de lámparas incandescentes estándares y especiales, están disponibles para muchas aplicaciones (Kaufman y Christensen, 1984). El bulbo incandescente estándar requiere de un reflector externo para dirigir la luz hacia abajo y proporcionar una distribución más uniforme (Fig. 3.3.27A); no obstante, los reflectores externos

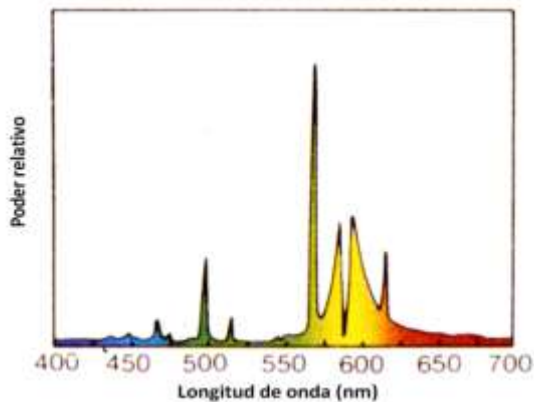
producen sombras, y pueden facilitar la acumulación de humedad. Este problema puede ser evitado con lámparas incandescentes especializadas, que tienen reflectores internos para concentrar la luz y enfocarla (Fig. 3.3.27B-D). Estas lámparas de flujo dirigen todas las longitudes de onda sobre el cultivo. Tanto los reflectores estándar, como los de halógeno-tungsteno pueden ser modificados con una cubierta externa transparente, ligeramente iridiscente, que refleja menos de las longitudes de onda infrarrojas (Fig. 3.3.28). Esto algunas veces representa una ventaja, pues se aumenta la razón de luz roja a roja lejana, y se hace a estas lámparas más eficientes para el alumbrado fotoperiódico.



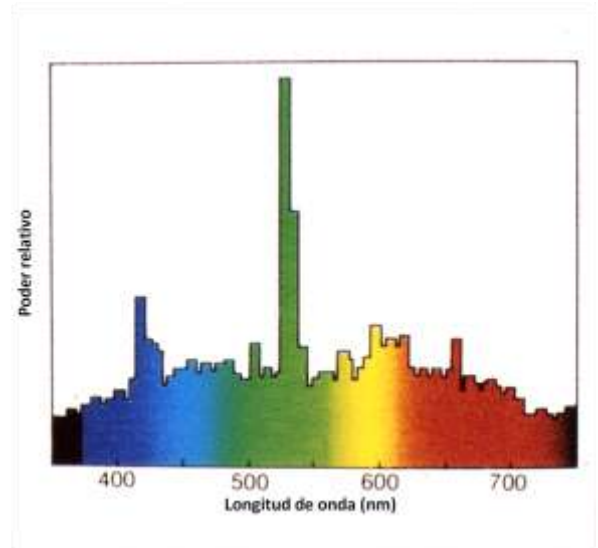
A



B



C



D

Figura 3.3.26 Las curvas de distribución de energía espectral (DEE) varían significativamente en torno a diferentes tipos de alumbrado artificial. Las lámparas incandescentes, incluyendo los tipos halógeno-tungsteno, producen la mayor parte de su luz en las longitudes de onda correspondientes al rojo y al rojo lejano (A). Existen varios tipos de lámparas fluorescentes, pero su DEE tiene una salida más balanceada (B). Las lámparas de sodio de alta presión (C) producen la mayor parte de su luz en las longitudes de onda amarillas, lo que las hace adecuadas para el alumbrado fotosintético. Las curvas de la DEE de lámparas de halógeno metal varían con el tipo de metal usado y producen una luz "blanca" balanceada (D) (Reimpreso de Kauffman y Christensen, 1984: IES lighting handbook, 1984, volumen de referencia, pp. 8-21 y 8-22, con permiso de la "Illumination Engineering Society of North America", New York).

Cuadro 3.3.7 Propósito del alumbrado artificial y tipos de lámparas usadas en los viveros forestales que producen en contenedores en los Estados Unidos y Canadá.

Tipo de lámpara	Intensidad de luz*		Uso (%)	
	$\mu\text{mol/s/m}^2$	lx	Por clase	Total
Alumbrado fotosintético				5
Sodio de alta presión	17.8-77.4	1,500-6,500	80	
Fluorescente	88.6	7,000	20	
Sin lámparas				95
Alumbrado fotoperiódico				82
Incandescente				
Estándar	4.1-10.2	200-500		
Halógeno-Tungsteno	2.0	100		
Fluorescente	1.3-6.3	100-500		
Descarga de alta intensidad				
Halógeno metal	5.7	400		
Sodio a alta presión	1.2-77.4	100-6,500		
Sodio a baja presión	3.7	400		
Sin lámparas				18

* en 39% de las respuestas no hubo seguridad sobre la intensidad de la luz a nivel del cultivo, o solamente conocían las especificaciones de las lámparas

+ Los valores son mayores porque estas luces son también empleadas como alumbrado fotosintético

Fuente: Container Nursery Surveys (1984; 1990).

Cuadro 3.3.8 Comparación de varias fuentes de luz usadas como alumbrado hortícola.

Tipo de lámpara	Poder eléctrico (watts)		Iluminación (lumens)	Eficiencia (lumens/watt)	Vida promedio (h)
	Lámpara	Total*			
Incandescente					
Estándar	100	100	1,680	17	750
	200	200	4,000	20	750
Halógeno - Tungsteno	75	75	1,400	19	2,000
	250	250	5,000	20	2,000
Fluorescente					
"Blanco Frío"	40	48	2,770	66	20,000
"Blanco Frío" VHO+	215	225	11,500	67	10,000
"Gro Lux"	40	46	925	20	12,000
Descarga de alta intensidad					
Sodio a alta presión	400	425	45,000	117	24,000
	1,000	1,060	126,000	132	24,000
Sodio a baja presión	180	230	33,000	143	18,000
Halógeno metal	400	425	31,000	94	15,000
	1,000	1,060	100,000	118	10,000

*Incluye balasto o entrada auxiliar

+ Salida muy alta

Fuentes: Aldrich y Bartok (1989); Kauffman y Christiansen (1984)



A



B

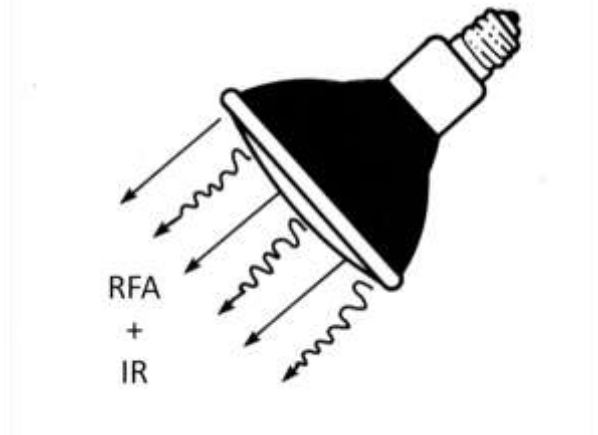


C

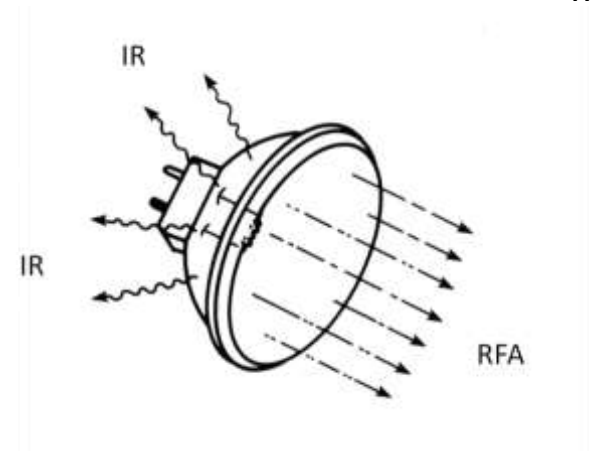


D

Figura 3.3.27 Muchos tipos diferentes de lámparas incandescentes (A-D) han sido utilizados como alumbrado fotosintético en viveros forestales que producen en contenedores. Algunos bulbos tienen reflectores internos (B-D), que dirigen la luz hacia el cultivo de plantas. Las lámparas incandescentes que son montadas típicamente en arreglos fijos en la parte superior, son usadas para proporcionar alumbrado intermitente (C-D).



A



B

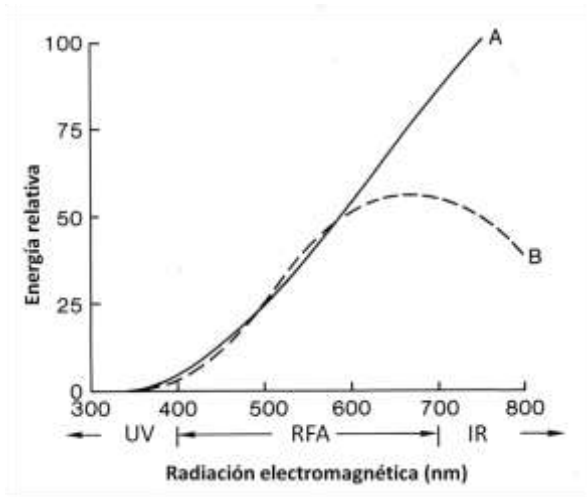


Figura 3.3.28 Las lámparas incandescentes típicas (A) producen un elevado porcentaje de radiación infrarroja (calor), pero pueden ser compradas con una cubierta especial en la parte posterior, la cual refleja la radiación fotosintéticamente activa (RFA) hacia el cultivo, mientras transmite la radiación infrarroja (IR) hacia atrás de la lámpara (B). La gráfica (C) muestra la diferencia en espectro entre las dos lámparas (Modificado de Bickford y Dunn, 1972).

Una adición relativamente nueva a la clase incandescente, es la lámpara de halógeno-tungsteno (también denominada "cuarzo halógeno"), la cual tiene la misma distribución de energía espectral que la lámpara incandescente estándar (Fig. 3.2.26A), pero con varias ventajas distintas, incluyendo una mayor vida del bulbo, y una mayor eficiencia con el mismo consumo de watts (Kaufman y Christensen, 1984; Cuadro 3.3.8). El bulbo, delgado y tubular, está hecho con vidrio de sílice-cuarzo, y un gas halógeno (iodo o bromo) que rodea el filamento de tungsteno y previene el oscurecimiento, que es típico de la lámpara incandescente (Bickford y Dunn, 1972). El tamaño pequeño de las lámparas de halógeno-tungsteno, les permite ser montadas en reflectores fijos más eficientes (Fig. 3.3.29). No obstante, tal como otros bulbos incandescentes, su eficiencia en energía es aún relativamente baja, en

comparación con otros tipos de lámparas (Cuadro 3.3.8).

Lámparas fluorescentes. Las lámparas fluorescentes producen luz cuando un arco de mercurio excita polvos fluorescentes (sustancias que pueden ser estimuladas para emitir luz por radiación incidente) que recubren las paredes internas del bulbo. La corriente eléctrica que fluye entre los electrodos en ambos extremos de la lámpara, produce un arco en el vapor de mercurio, generando radiación ultravioleta y excitando a los polvos para emitir luz (Kaufman y Christensen, 1984). Las lámparas fluorescentes contienen un circuito eléctrico complejo incluyendo un balasto, que proporciona el voltaje suficiente para iniciar la descarga eléctrica. Puesto que el encendedor en el bulbo se afecta con el uso, la vida de la lámpara es acortada si éstas son prendidas y apagadas con frecuencia (Bickford y Dunn, 1972).

Las lámparas fluorescentes están disponibles en una amplia variedad de distribuciones de energía espectral, dependiendo de las cubiertas específicas del bulbo; los bulbos del tipo "blanco-frío" son utilizados para la mayor parte de las aplicaciones hortícolas (Fig. 3.3.26B). El costo inicial de instalación de las lámparas fluorescentes, es el doble que el de las incandescentes, pero son más de tres veces eficientes en la producción de luz visible. Además pueden durar más de 12 veces, que las lámparas incandescentes estándares, cuidando que no sean prendidas y apagadas con frecuencia (Cuadro 3.3.8). Las lámparas fluorescentes son ampliamente usadas en las cámaras de cultivo, pues son una fuente de luz lineal que produce relativamente poca radiación infrarroja, lo cual es importante en un ambiente cerrado (Aldrich y Bartok, 1989). No obstante, las lámparas fluorescentes tienen varias desventajas. La intensidad de la luz por unidad de área generalmente es baja, aunque están a disposición bulbos especiales de salida alta (Cuadro 3.3.8).



Figura 3.3.29 Las lámparas de halógeno-tungsteno ("cuarzo halógeno") son otro tipo de luz incandescente que es utilizada para el alumbrado fotoperiódico continuo en los viveros que producen en contenedores. Los bulbos, relativamente pequeños y de elevada intensidad, son colocados en reflectores especiales que con frecuencia son montados en un modelo oblicuo fijo.

Las estructuras fijas de soporte del alumbrado son relativamente largas (Fig. 3.3.30A-B) y producen sombras indeseables, pero lo anterior puede ser reducido mediante la orientación de éstas de norte a sur, para que sus sombras se muevan. Las estructuras a prueba de agua son recomendables para los invernaderos. A reserva de estas restricciones, las lámparas fluorescentes están siendo usadas tanto para alumbrado fotosintético como para alumbrado fotoperiódico, en los viveros forestales que producen en contenedores, en los Estados Unidos y el Canadá (Cuadro 3.3.7). Si estas lámparas deben ser usadas, estarán mejor montadas sobre una estructura de riego (Fig. 3.3.30B).



A



B

Figura 3.3.30 Las lámparas fluorescentes han sido usadas para el alumbrado fotoperiódico continuo, pero los reflectores largos producen sombras (A). Si éstas son montadas sobre las estructuras de riego, entonces proporcionan alumbrado intermitente cuando la estructura se mueve hacia atrás y adelante (B).

Lámparas de descarga de alta intensidad. Estas lámparas compactas, de alta salida, se están haciendo populares como alumbrado hortícola, pues producen con eficiencia luz en las longitudes de onda de la RFA, y requieren de poco mantenimiento. Las lámparas de descarga de alta intensidad (DAI), generan luz mediante el paso de una corriente eléctrica a través de gas presurizado a elevada temperatura, causando que el gas brille. Para el efecto, son usados varios tipos de gases, incluyendo el sodio y el ioduro de mercurio (halógeno metal), que determinan tanto la intensidad como la calidad de la luz emitida (Fig. 3.3.26C-D). Puesto que toma varios minutos el generar la temperatura y la presión de gas necesarias, pasa algún tiempo antes de que las lámparas estén operando totalmente. Las estructuras para lámparas son relativamente largas porque requieren de un balasto para regular la corriente eléctrica (Fig. 3.3.31); algunos modelos están equipados para un balasteo remoto (Aldrich y Bartok, 1989). Todas las lámparas DAI son significativamente más eficientes energéticamente que otras fuentes de luz artificial (Cuadro 3.3.8).

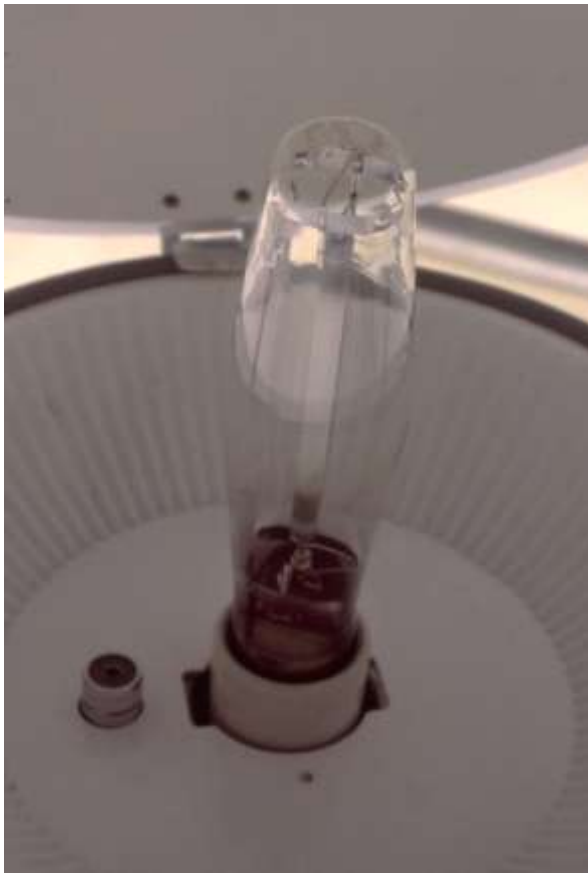
Sodio a alta presión. Las lámparas de sodio a alta presión (SAP) generan luz mediante el paso de una corriente eléctrica a través de vapor de sodio en un tubo arco elongado (Fig. 3.3.31A), el cual contiene un vidrio doble envolviendo para contener el vapor de sodio corrosivo (Kaufman y Christensen, 1984). La distribución de energía espectral se extiende a través del espectro visible, pero asciende abruptamente en las bandas amarillas, muy cerca del óptimo para el alargamiento de la fotosíntesis y del fotoperiodo. Se producen niveles muy bajos de luz infrarroja (Fig. 3.3.26C). Las lámparas DAI

emiten una luz muy intensa, así que las estructuras de soporte pueden estar espaciadas con suficiente amplitud para evitar el bloqueo de parte de la luz solar. Tanto las lámparas de 400W como las de 1,000W son usadas en los viveros. Tanto más grandes las lámparas, mayor su eficiencia, siempre y cuando sean montadas lo suficientemente elevadas en la estructura de cultivo. El desarrollo de un nuevo tubo arco de cerámica ha incrementado la vida de la lámpara sobre 20,000 horas (Cuadro 3.3.8). Las lámparas DAI son excelentes para alumbrado fotosintético y fotoperiódico en los viveros forestales que producen en contenedores (Cuadro 3.3.7).

Sodio a baja presión. Las lámparas de sodio a baja presión (SBP) son las más eficientes en energía, de entre todos los tipos de alumbrado hortícola (Cuadro 3.3.8). Sus distribuciones de energía espectral son más restringidas que las lámparas de SAP (Aldrich y Bartok, 1989), pero esto no representa una desventaja. Estas lámparas son menos intensas y requieren de mayor espacio, creando así más sombras, y han sido utilizadas para el alumbrado fotoperiódico solamente en unos pocos viveros que producen en contenedores (Cuadro 3.3.7).

Halógeno metal. Estas lámparas son una modificación de las viejas lámparas de mercurio; el tubo arco contiene varios haluros metálicos (por ejemplo, disprosio e ioduro de talio, así como vapor de argón-mercurio (Kaufman y Christensen, 1984). En comparación con las lámparas de mercurio, las lámparas de halógeno metal producen un 50% más de salida de luz, en una distribución de energía espectral bien balanceada (Fig. 3.3.26D).

Las lámparas de halógeno metal están disponibles desde los 400W hasta los 1,000W, y tienen una esperanza de vida de 10,000 a 15,000 horas. Estas son poco usadas en los viveros forestales que producen en contenedores (Cuadro 3.3.7), pues las lámparas de SAP son más eficientes y tienen una vida mucho mayor (Cuadro 3.3.8).



A



B



C



D

Figura 3.3.31 Las lámparas de sodio a alta presión (A-D), pueden ser usadas en el alumbrado foteriódico continuo, o en el alumbrado fotosintético suplementario, cuando son montadas en posiciones fijas en la parte superior (B). También son empleadas en montajes fijos oblicuos (C), o sobre las estructuras de riego, para proporcionar un alumbrado foteriódico intermitente (D).

Reflectores. Todos los tipos de lámparas empleadas en horticultura, requieren de algún tipo de reflector para enfocar la luz y distribuirla uniformemente sobre el área de cultivo. Los reflectores externos con frecuencia son comprados como parte de las estructuras de alumbrado (Fig. 3.3.29 a 3.3.31), pero también pueden ser hechizos (Fig.3.3.27A). Los tipos especializados de lámparas incandescentes tienen reflectores construidos dentro, como el caso del reflector parabólico aluminizado (en inglés, el acrónimo establecido PAR es desafortunadamente el mismo que el de la radiación fotosintéticamente activa). De particular interés es el reflector "dichroic", que refleja las longitudes de onda de la RFA hacia adelante, y transmite radiación infrarroja hacia atrás de la lámpara (Fig. 3.3.28).

3.3.4.4. Alumbrado fotosintético

Debido a los costos de la energía, no es práctica común el proveer suficiente luz artificial para incrementar la fotosíntesis en los viveros forestales que producen en contenedores. La excepción se da a grandes latitudes, donde a veces resulta económico el utilizar alumbrado fotosintético como suplemento de la luz natural durante el otoño, el invierno y la primavera (Bickford y Dunn, 1972). En el presente, sólo alrededor del 5% de los viveros forestales en los Estados Unidos y el Canadá proporcionan alumbrado fotosintético (Cuadro 3.3.7).

Intensidad de la luz. Si las luces artificiales son la única fuente de luz, como en una cámara de cultivo, el requerimiento mínimo para la producción comercial de plantas, se considera de aproximadamente $250 \mu\text{mol/s/m}^2$ (-20 Klx), lo cual

es aproximadamente un octavo de la intensidad normal de la luz solar (ASHRAE, 1989). Las luces deben también ser mantenidas prendidas por al menos 12 horas al día, para permitir tasas de crecimiento razonables. Las luces de gran intensidad generan una tremenda cantidad de calor, pero esto representa poco problema cuando el alumbrado fotosintético es usado durante la noche, por lo que el calor puede resultar de utilidad. Estos sistemas de alumbrado son caros de instalar y de operar, a menos que la electricidad sea muy barata.

Sin embargo, experimentos hortícolas recientes con alumbrado fotosintético suplementario, han demostrado que es posible obtener incrementos significativos en el crecimiento de la planta, especialmente en términos de peso anhidro. Al menos alguna de esta ganancia puede ser debida al calentamiento incidental del medio de cultivo (Downs, 1985). El alumbrado suplementario en ocasiones es necesitado para compensar el tiempo atmosférico nublado, o las sombras de la estructura del invernadero, o del equipo, o durante el invierno a grandes latitudes. Cuando se proporcionan 122 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (~10 Klx) de RFA durante 8 a 16 horas por día, las tasas de crecimiento pueden alcanzar las obtenidas en las cámaras de cultivo (ASHRAE, 1989). En Alberta, Canadá, donde la luz solar de diciembre es de solamente 70 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (~3.8 Klx), 12 especies de coníferas respondieron fuertemente al alumbrado suplementario invernal. Dos sistemas de alumbrado fueron efectivos - 60 a 100 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (~4.7 a 7.9 Klx) de alumbrado fluorescente, o 210 a 220 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (~17.6 a 18.4 Klx) de alumbrado de sodio a alta presión, proporcionados por 18 a 24 horas por día (Dymock y Wilson, 1986). En Wisconsin, la adición de entre 18 a 63 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (~1.4 a 5.0 Klx) de RFA durante el invierno, incrementó significativamente el crecimiento de *Picea glauca* (Moench) Voss, *Pinus banisiana* Lamb. y de *Populus* híbridos (Roberts y Zavitkovski, 1981).

Calidad de la luz. Debido a que no todas las longitudes de onda son igualmente efectivas para la fotosíntesis, el alumbrado artificial debería ser alto en las bandas de la RFA (Fig. 3.3.1). Las longitudes de onda más efectivas son de 600 a 700 nm, en la parte roja del espectro visible; las luces azul, verde, y amarilla (400 a 600 nm), tienen solamente de un medio a dos tercios de la eficiencia de la luz roja. La luz infrarroja (>700 nm) no es efectiva para la fotosíntesis, pero es meramente absorbida e incrementa la temperatura foliar. La luz ultravioleta (<400 nm) es también inefectiva y puede ser dañina.

Las luces de sodio a alta presión son recomendables para el alumbrado fotosintético porque son las más efectivas y costo eficientes. Las lámparas de halógeno metal y las fluorescentes, también pueden ser usadas, pero son menos deseables en términos de salida de RFA por watt, y en esperanza de vida (Cuadro 3.3.8).

Ubicación y fijación de lámparas. Debido a la gran intensidad de luz que es necesitada, las lámparas del alumbrado fotosintético deben ser posicionadas cerca del cultivo. El montaje de lámparas fotosintéticas sobre la estructura de riego no puede producir un alumbrado continuo, por lo que éstas deben colocarse en un modelo fijo y regular, sobre el cultivo.

3.3.4.5 Alumbrado fotoperiódico

El mayor uso del alumbrado artificial en horticultura se da para extender el fotoperiodo (Bickford y Dunn, 1972). La mayoría de las plantas cultivadas para propósitos dasonómicos y de conservación, requieren de fotoperiodos extendidos para producir rápidas tasas de crecimiento, y también la mayor parte de las áreas están equipadas con algún tipo de alumbrado para incrementar artificialmente la luz del día (Cuadro 3.3.7). Los viveros en los climas del sur y en las áreas costeras con climas marítimos moderados, que cultivan ecotipos nativos, pueden no necesitar de alumbrado fotoperiódico (Ver la sección 3.3.2.2 para más información acerca de cuándo es necesitado este alumbrado).

La mayor parte de las principales lámparas tienen las longitudes de onda roja deseadas (Fig. 3.3.26) para el control del fotoperiodo, y los tipos de descarga incandescente, fluorescente, y de alta intensidad han sido usados con éxito. La selección de los mejores sistemas de alumbrado, por consiguiente, es de tipo económico, y se consideran también los planes del vivero. Si el área de cultivo está equipada con alumbrado fotosintético, este mismo puede ser empleado normalmente para extender la longitud del día.

Para que el alumbrado fotoperiódico sea totalmente efectivo, otros factores ambientales como la temperatura, la humedad, el agua y la nutrición mineral, deberían ser óptimos. Las plántulas bajo tensión no pueden responder normalmente a estímulos luminosos.

Tipos de alumbrado fotoperiódico. Una variedad de términos han sido utilizados para describir a los sistemas de alumbrado fotoperiódico, y esto ha resultado confuso, pues un término útil debe denotar tanto duración (el tiempo que las luces son dejadas

prendidas), como el momento en el que las luces son activadas.

La duración del alumbrado fotoperiódico ha sido tradicionalmente descrita como continua o intermitente, y los dos tipos han sido empleados con éxito. En el **alumbrado continuo**, las luces son prendidas durante periodos prolongados. Aunque muchos tipos de lámparas pueden ser usadas para el alumbrado continuo, los tipos (DAI) son la única opción costo eficiente, asimismo las lámparas de SAP son recomendadas.

En el alumbrado intermitente, la noche es interrumpida con periodos breves de luz a intervalos regulares de tiempo durante el periodo prescrito. Las luces pueden ser dejadas prendidas durante tan poco como un 3% del tiempo, proporcionando periodos oscuros no mayores de 30 minutos (Tinus y McDonald, 1979). Arnott y Mitchell (1982), reportaron que el proporcionar luz por 2 de cada 30 minutos resultó efectivo. El alumbrado intermitente puede ser obtenido en dos formas, dependiendo del tipo de lámparas usadas. Las luces que toleran un encendido repetido, como las lámparas incandescentes estándares, son montadas en arreglos fijos, mientras que aquellas que requieren balasteo deben ser montadas sobre una estructura de riego móvil, debido a su lento tiempo de encendido. En esta aplicación, las lámparas deben permanecer prendidas continuamente, y el alumbrado intermitente se consigue mediante el movimiento de la estructura hacia atrás y hacia adelante. Obviamente, esta opción de alumbrado sólo es práctica en viveros con estructuras de sistemas de riego.

Todos los tipos de lámparas han sido usados en estructuras de riego; incandescente (Fig. 3.3.27A), fluorescente (Fig. 3.3.30B), y sodio a alta presión (Fig. 3.3.32).

- **La interrupción de la noche**, es una técnica en la que las luces son encendidas durante unas pocas horas en medio de la noche, dividiéndola en dos periodos oscuros más cortos (Vince-Prue, 1975). Este tipo de alumbrado puede ser continuo o intermitente, aunque el primero es el más común.
- **El alumbrado de extensión del día** involucra el dar 2 a 4 horas de luz artificial después del atardecer o antes del amanecer (Nitsch, 1957). El alumbrado continuo es normalmente utilizado para la extensión del día.
- **El alumbrado durante toda la noche**, es una técnica en la cual el sistema de alumbrado es activado toda la noche. El alumbrado intermitente resulta la opción más económica.

Por tanto, para ser completamente precisos, los **sistemas de alumbrado fotoperiódico deberían ser descritos con un término que denote tanto duración como momento**, por ejemplo, "alumbrado temporal nocturno continuo", o "alumbrado intermitente durante toda la noche" (Fig. 3.3.32).

Han sido utilizados muchos tipos de sistemas de alumbrado fotoperiódico en los viveros forestales que producen en contenedores, y el mejor sistema dependerá del tipo de invernadero y del tipo de lámparas que estén disponibles. Cualquiera, el alumbrado continuo o el temporal nocturno, pueden ser tan efectivos como un más largo periodo de luz (Arnott, 1989). A veces es empleada la extensión continua de la longitud del día, pero resulta menos económica que otros sistemas. Se consiguió una reducción del 75% en el consumo eléctrico la vida de las lámparas fue incrementada considerablemente, cuando las lámparas de sodio a alta presión (SAP) fueron usadas para proporcionar un alumbrado temporal nocturno y continuo, en un vivero que produce en contenedores en la Columbia Británica (Forestry Canada, 1991). Las lámparas incandescentes estándares son comúnmente empleadas para producir alumbrado nocturno intermitente durante toda la noche, y los ahorros de energía en este caso han sido de 60 a 80%, en comparación con el alumbrado continuo (Bickford y Dunn, 1972). Independientemente de la economía, el proporcionar luz continua durante toda la noche (esto es, un fotoperiodo de 24 horas) no es deseable, y puede ser detrimental. El alumbrado continuo durante toda la noche puede reducir el crecimiento en altura, de plantas de árboles cultivadas en contenedores, tanto como un 30% (Tinus y McDonald, 1979).

Intensidad y calidad de la luz. Se han determinado en pruebas de investigación las intensidades de alumbrado fotoperiódico para muchas especies y ecotipos (Cuadro 3.3.5), y estas recomendaciones han sido validadas en viveros que producen en contenedores (Cuadro 3.3.7). Para asegurar que el alumbrado fotoperiódico sea efectivo, la intensidad de la luz debería ser de al menos $8 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~430 lx), y debería ser aumentada a $16 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~860 lx) cuando el cultivo tiene un mayor requerimiento de luz. Algunas especies pueden ser cultivadas con menores intensidades de luz (Arnott y Macey, 1985). Si se desconoce la cantidad exacta de luz para una especie o ecotipo dados, siempre es mejor proporcionar más luz que arriesgarse a dar poca. Algunas especies que producen yemas y luego entran en dormancia requieren de frío antes de que puedan iniciar un nuevo crecimiento de la parte

aérea. Esto puede ser económicamente desastroso, porque el cultivo no tendrá las especificaciones de altura acordadas dentro de la programación de cultivo determinada.

Puesto que el fitocromo es estimulado por las cantidades relativas de luz roja-roja lejana, la salida de luz debería ser alta en la banda roja (600 a 700 nm) y baja en la banda roja lejana (700 a 800 nm) (ver sección 3.3.2.2 para más detalles).

Los viveros deberían tener una fuente de electricidad de respaldo para sus sistemas de alumbrado fotoperiódico, puesto que la pérdida de la extensión del día, aún por un breve lapso, puede ser perjudicial. Se ha mostrado en estudios que la falla de la luz durante un periodo de una noche (Arnott, 1984), o de tres noches (Arnott y Simmons, 1985), causa una reducción significativa en la altura de plantas de *Picea glauca* (Moench) Voss y de *Tsuga mertensiana* (Bong.) Carr, respectivamente. Los autores han observado una respuesta similar en *Picea engelmannii* Parry ex Engelm., (Fig. 3.3.12D), *Picea engelmannii* (Mill.), y *Fraxinus pennsylvanica* Marsh.

Fijación y posición de las lámparas. En los viveros que producen en contenedores, el alumbrado fotoperiódico es típicamente instalado en sistemas fijos o móviles. Aunque algunas lámparas pueden ser instaladas de cualquier manera, otras quedan mejor colocadas según un tipo específico.

Sistemas fijos. El alumbrado fotoperiódico, instalado en la parte superior en un modelo cuadrado regular, o montado en un ángulo oblicuo sobre las paredes o postes, puede ser usado como alumbrado intermitente y como alumbrado continuo. Con cualquier tipo de montaje, la ubicación de las lámparas individuales es crítica, pues la intensidad de la luz puede variar en tres dimensiones.

Debido a que las luces pueden ser encendidas y apagadas con facilidad, las luces incandescentes estándar son frecuentemente montadas en modelos fijos en la parte superior, para producir alumbrado intermitente (Fig. 3.3.27C-D). Diferentes líneas o zonas del sistema de alumbrado pueden ser controladas mediante un reloj eléctrico que enciende las lámparas y las apaga a intervalos prescritos. En estructuras de cultivo más pequeñas, todas las lámparas pueden ser programadas para encenderse a la vez. En instalaciones de mayor envergadura, las etapas de alumbrado son designadas para encenderse secuencialmente, a efecto de reducir la demanda eléctrica total. Las lámparas de descarga de alta intensidad, como las

de SAP, también son montadas en modelos fijos en el techo, y su elevada salida de luz permite aumentar el espaciamiento (Fig. 3.3.31). Las lámparas fluorescentes rara vez son usadas de esta manera. Los dos tipos de estas lámparas requieren balastos, lo que significa que tienen tiempos de calentamiento largos, y que su vida útil será reducida por el frecuente encendido y apagado.

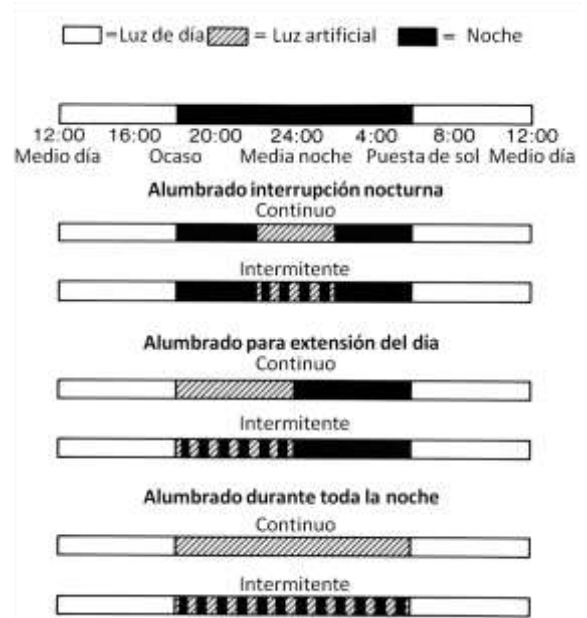


Figura 3.3.32 Los sistemas de alumbrado fotoperiódico deberían ser descritos en términos que denoten tanto la duración (cuánto tiempo serán dejadas encendidas las luces), como el momento (cuándo serán activadas las luces). La duración puede ser continua o intermitente, y las alternativas relativas al momento incluyen interrupción de la noche, extensión del día, o toda la noche. Las combinaciones de estos dos conceptos producen una nomenclatura precisa y descriptiva.

Las lámparas fotoperiódicas también pueden ser montadas oblicuamente alrededor del perímetro de un invernadero, o en el área de cultivo exterior, para producir un alumbrado continuo. Las lámparas de halógeno tungsteno de elevado wattage ("lámparas de flujo") comúnmente son usadas oblicuas en montajes fijos, debido a que sus estructuras contienen reflectores de ángulo amplio y pueden ser montados en cualquier ángulo (Fig. 3.3.29). En la Columbia Británica, en los viveros que producen en contenedores, a veces son montadas lámparas de SAP de 400W en forma oblicua, sobre las paredes de las estructuras de cultivo. En otro sistema único de alumbrado fijo, dos lámparas de SAP están montadas sobre una estructura de riego que es movida desde el sitio medio del área de cultivo y puesta en direcciones opuestas. La estructura es

movida del medio del área de cultivo cada noche (Arnott y Mitchell, 1992). Como resultado de su posicionamiento irregular, la intensidad de las luces fijas oblicuas debería ser cuidadosamente verificada para asegurar que todas las plantas estén recibiendo suficiente luz. Las sombras de las estructuras de soporte verticales pueden también representar un problema.

Sistemas móviles. El segundo tipo de sistemas de alumbrado fotoperiódico, usa lámparas montadas sobre estructuras de riego móviles, que producen alumbrado intermitente mediante el movimiento hacia atrás y adelante. Se requieren pocas lámparas y su modelo de traslape es crítico solamente en una dimensión. El alumbrado móvil es práctico en viveros que cuentan con sistemas de riego móviles, pero probablemente no será costo-eficiente si las estructuras son únicamente usadas para el alumbrado.

Muchos tipos diferentes de lámparas han sido utilizados en sistemas de alumbrado móviles, incluyendo las incandescentes (Fig. 3.3.27A) y las fluorescentes (Fig. 3.3.30B). Arnott (1974, 1976) recomienda la lámpara de sodio a alta presión (Fig. 3.3.31D). En viveros forestales que producen en contenedores de la Columbia Británica, las estructuras de cultivo con lámparas de SAP son pasadas sobre las plantas cada 25 a 30 minutos (Arnott y Mitchell, 1982). En un vivero, donde las estructuras de riego fueron usadas para alumbrado de interrupción nocturna, la estructura fue desplazada una longitud de 60 m (200 pies), en el invernadero, en 8 minutos (Arnott, 1989). Hallett (1982) reportó que los viveros en las Provincias Marítimas también usan alumbrado móvil para extender el fotoperiodo, con los carros de riego desplazándose entre las camas con una velocidad de 4 a 10 m/min (13 a 33 pies por minuto).

Los sistemas de alumbrado móviles tienen la ventaja de requerir solamente unas pocas lámparas para alcanzar el mismo resultado que un arreglo fijo mucho más grande. Sin embargo, los primeros tienen varias desventajas. Si la estructura funcionase mal, incluso durante un breve tiempo, las plantas pueden cesar su crecimiento y desarrollar yemas (Arnott y Mitchell, 1982). La proximidad de las boquillas de riego y de las lámparas fotoperiódicas puede producir problemas, ya que las soluciones de fertilizante líquido son corrosivas para las estructuras y para la maquinaria eléctrica. En los viveros forestales investigados en los Estados Unidos y el Canadá, estaban siendo usados sistemas de alumbrado móvil en alrededor del 20% de éstos.

Un tercer tipo de opción, recientemente desarrollado, utiliza una lámpara montada en el centro de un espejo parabólico oscilante (Fig. 3.3.33A) para recorrer un haz de luz sobre una gran área de cultivo (Fig. 3.3.33B). Este sistema utiliza lámparas de SAP, eficientes en el uso de energía, alumbrando continuamente, para proporcionar alumbrado intermitente.

Cuando se diseña un sistema de alumbrado fotoperiódico, los administradores de viveros deberían consultar con un experto en alumbrado hortícola. El emplear la información de las especificaciones de fábrica acerca del alumbrado, o de otro vivero local puede ser fuente de dificultades, por lo que se recomienda especialmente que los viveristas prueben cualquier arreglo potencial bajo condiciones operativas.

Todos los sistemas de alumbrado fotoperiódico deberían ser verificados inmediatamente después de la instalación para lograr la uniformidad y la intensidad adecuadas. En particular, la intensidad de la luz nunca es completamente uniforme en instalaciones fijas en el techo. Las lámparas puestas fuera en rejilla, producen modelos circulares de intensidad, similares a los modelos de humedecimiento de los sistemas fijos de riego enclavados en el techo. La magnitud no siempre es evidente al ojo humano, pero la variación en la intensidad de la luz medida directamente bajo la lámpara, y entre lámparas, puede ser significativa (Fig. 3.3.24). Las instalaciones oblicuas producen una luz con forma de abanico, cuya intensidad decrece con la distancia. Por tanto, el modelo general de intensidad debería ser cuidadosamente mapeado, para asegurar que no existan áreas con niveles de intensidad de luz menores al mínimo recomendado. Si el alumbrado instalado resulta inadecuado en intensidad, en ocasiones el problema puede ser resuelto dejando las luces prendidas durante más tiempo; existe evidencia de una relación recíproca entre la duración y la intensidad de la luz, al menos para *Picea engelmannii* (Mill.) B.S.P. (Young y Hanover, 1977).



A



B

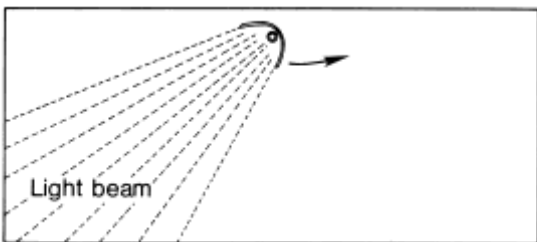
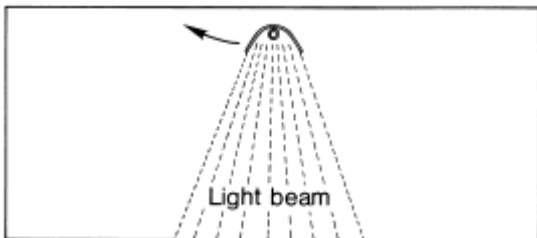
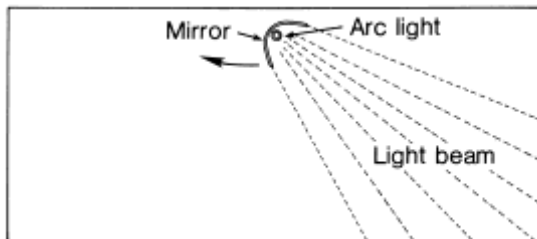


Figura 3.3.33 Un tipo de luz fotoperiódica recientemente desarrollado, tiene una lámpara de sodio a alta presión montada en el centro de un espejo oscilante (A, B). Este sistema produce un alumbrado intermitente, mediante la oscilación del espejo hacia atrás y adelante, a través del área de cultivo (C).

3.3.4.6 Tratamientos de día corto.

Mientras que el acortamiento del periodo oscuro con alumbrado fotoperiódico promueve el crecimiento de la parte aérea e inhibe la dormancia, el alargamiento del periodo oscuro estimula el cese del crecimiento en altura y el desarrollo de yemas. Así como un alumbrado fotoperiódico intermitente es tan efectivo como los mayores periodos con luz, un lapso relativamente corto de oscuridad ha funcionado bien. Estos tratamientos de día corto, o de "exclusión de la oscuridad" han sido empleados durante años en la industria de la floricultura, para promover la floración en plantas de día corto, pero sólo recientemente han sido adaptadas en los viveros forestales. Al principio, los administradores de viveros tenían que instalar y remover las cortinas manualmente cada día o usar sistemas manuales de cortinas hechizas. No obstante, en los últimos 10 años, han sido desarrollados sistemas de cortinas automáticos confiables (Vollebregt, 1989 a, b). Para incrementar su costo-eficiencia, pueden utilizarse cortinas de oscurecimiento con el propósito de reducir la pérdida de calor por las noches (Heacox, 1989) (Ver la sección 3.1.4.4 para una mayor discusión acerca de las cortinas calientes).

Las cortinas de oscurecimiento pueden ser construidas con varios y diferentes materiales. Originalmente, se emplearon telas de algodón negras, o cubiertas de polietileno. Las pruebas iniciales revelaron algunos problemas: la tela oscura absorbe la radiación solar, y las hojas impermeables retardan la ventilación, lo cual puede derivarse en niveles dañinos de calor en estructuras cerradas. Los criterios siguientes deberían ser considerados cuando se compra una cortina de oscurecimiento (Vollebregt, 1990):

- **Superficie reflectiva superior.** Las cortinas con una cubierta blanca o aluminizada (Fig. 3.3.35A), que reflejan tanto la radiación visible como la infrarroja, se mantendrán más frías que las hechas con otros materiales.
- **Porosidad.** Una cortina permeable no permitirá la condensación del agua, o goteo en la estructura. Una exposición prolongada al agua puede dañar la estructura o el sistema mecánico. Un material poroso también promoverá el intercambio de aire y reducirá la humedad del éste bajo la cubierta.
- **Plegabilidad.** Las cortinas de oscurecimiento deberían enrollarse o plegarse fácilmente y en poco espacio, para que no interfieran con la transmisión normal de la luz solar durante el día (Fig. 3.3.35B).



Figura 3.3.34 La intensidad del alumbrado fotoperiódico debería ser verificada en todos los sitios a través del área de cultivo. Con mucha frecuencia, la intensidad de la luz está bajo el mínimo crítico en los bordes. Las plántulas de *Picea engelmannii* a lo largo de la pared del invernadero, pueden no recibir suficiente luz y desarrollar yemas antes que el resto del cultivo.

Las cortinas automáticas de oscurecimiento (Fig. 3.3.75D), están disponibles para ajustarse a muchos tipos de estructuras de cultivo, y es mucho más fácil y más económica incorporar una cortina negra en un diseño original de invernadero, que ajustarse a una estructura ya diseñada. Las estructuras con hastial pueden ser ajustadas mediante cortinas que se enrollen y desenrollen a lo largo de las paredes laterales. Para la porción superior existen dos tipos de instalaciones básicas: los sistemas de canal en canal, que se desdoblzan como un acordeón horizontalmente, a través del invernadero, y los sistemas de armazón en armazón, que se desenvuelven progresivamente, con frecuencia siguiendo la línea del techo. Para la instalación de cualquiera de estos sistemas es importante que no quede maquinaria suspendida, o en vertical, a través del techo (como una tubería de flujo). En los sistemas de canal en canal, la tela se mantiene plana sobre alambres a lo largo del fondo de los armazones. En los sistemas de armazón en armazón este puede ser el caso, pero la tela puede también estar suspendida contra parte de o todo el techo en el sitio más alto. Las cortinas de este tipo son máscaras de instalar, pero tienen la ventaja de que el equipo de control del clima, como el generador de dióxido de carbono, está montado en lo alto y puede ser usado cuando la cortina está colocada. Debido a la carencia de una pared vertical, la tela oscura es difícil de desplegar en algunos invernaderos.



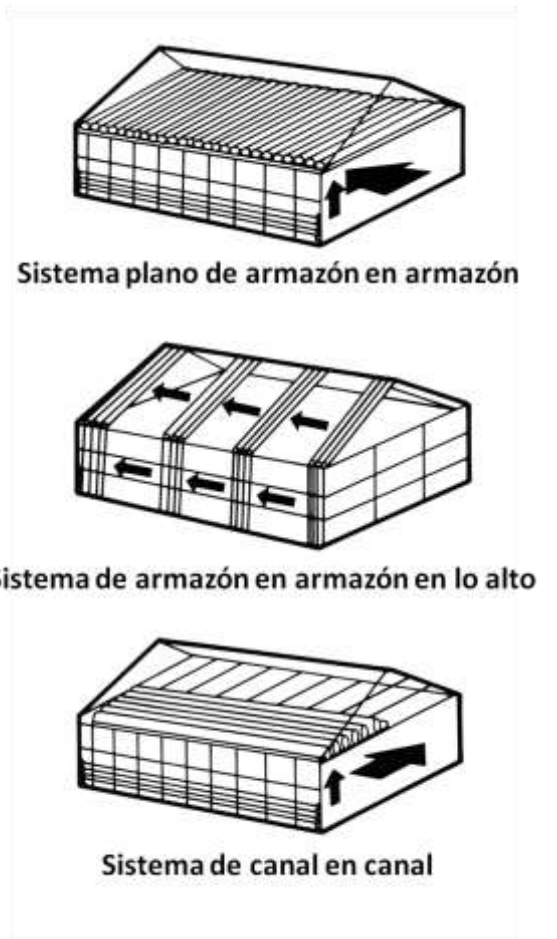
A



B



C



D

Figura 3.3.35 Los viveros que producen en contenedores a grandes latitudes, usan cortinas de oscuramiento para excluir la luz y crear condiciones de día corto durante los largos días de medianos del verano. Algunas cortinas tienen una superficie exterior reflectiva, para eliminar con efectividad luz y calor (A). Los sistemas automáticos de cortinas, están disponibles para la mayoría de los tipos de estructuras de cultivo (B-D) (D, cortesía de Cravo Equipment, Ltd.).

El despliegue puede ser controlado mediante un sistema de relojería o una fotocelda, pero debería también tener un interruptor manual independiente. El control automático es muy útil para reducir los requerimientos de trabajo e incrementar la confiabilidad (Vollebregt, 1989ab, 1990; Weed, 1990).

En viveros canadienses que producen en contenedores, el tratamiento convencional es aplicar eliminación de oscuridad por un periodo de 10 días a 6 semanas, comenzando en julio (Matthews, 1983; Odlum, 1991). La longitud del periodo de día corto dependerá de la especie y ecotipo de las plantas y del objetivo del tratamiento. Periodos cortos de menos de 2 semanas tienden a predisponer el cultivo a fluir de nuevo si las condiciones de cultivo

son ideales, mientras que los tratamientos más largos, como los de 6 semanas, originan una reducción significativa en la acumulación de materia anhidra. Hawkins y Draper (1998) trataron plantas de *Picea* procedentes de 49 a 55° de latitud, con periodos de exclusión de oscuridad "dinámicos" que estimularon en forma natural las longitudes del día en forma decreciente. Aunque los periodos tan cortos como 2 semanas resultaron efectivos, estos investigadores encontraron que la mejor calidad de las plantas se consiguió con un fotoperiodo de 13 horas (Fig.3.3.36).

Debido a que las cortinas relativamente gruesas atrapan calor y humedad elevada alrededor del cultivo, los tratamientos con periodos de día corto deberían ser mantenidos tan brevemente como sea posible. Aplicando los tratamientos de día corto temprano en la mañana, en vez de hacerlo luego durante el día, se puede minimizar este problema (van Steenis, 1991). Un sistema de circulación de aire bajo las camas puede ser de utilidad. Varios viveros han tenido problemas con producción de lama en la parte aérea de la planta al quitar las cortinas de oscuramiento (Fig. 3.3.16A). Es importante estar seguros de la ausencia de fuentes de luz adyacentes, como las de seguridad, que pueden alcanzar al cultivo, o de lo contrario las plantas pueden romper yemas (Colombo y Smith, 1984).

Una investigación reciente ha mostrado que los efectos fenológicos de los tratamientos de día corto pueden persistir durante al menos 1 año después de la plantación (Ver sección 3.3.2.2 para una mayor discusión).

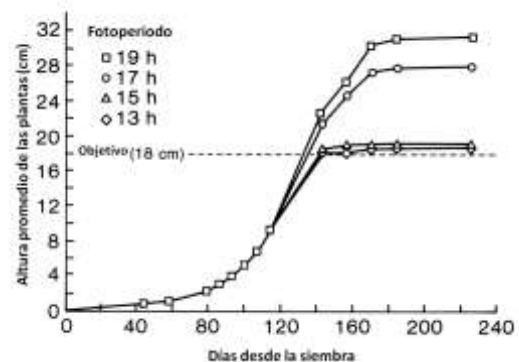


Figura 3.3.36 Los tratamientos de día corto por solamente unas pocas semanas, pueden ser efectivos en especies sensibles. Estas plantas de *Picea* detuvieron su crecimiento en altura y desarrollaron yemas a la altura - objetivo cuando recibieron tratamiento "dinámico" de días cortos, con horas de oscuridad durante 4 semanas (adaptado de Hawkins y Draper, 1988).

3.3.5 Sistemas de Monitoreo y Control de Luz

3.3.5.1 Midiendo los niveles de luz

El equipo apropiado de medición dependerá de los objetivos individuales y de la aplicación particular.

Fotómetros. Los fotómetros miden la energía radiante en el espectro visible; estos incluyen los "medidores de luz" comunes que son vendidos en tiendas fotográficas o en compañías proveedoras de laboratorios (Fig. 3.3.37A). Son portátiles, baratos (de U.S. \$50 a U.S. \$100), y dan lecturas en lux o en pies-candela (Aldrich y Bartok, 1989). Los fotómetros proporcionarán una medida de la intensidad solar, y pueden también ser usados para verificar los modelos de intensidad de las luces fotoperiódicas o fotosintéticas. Debido a que la calidad de las luces varía con el tipo de lámpara, las tablas de conversión deben ser compensadas por la diferencia entre la sensibilidad al espectro del medidor y el espectro de luz de la lámpara (Cuadro 3.3.3). Aún los medidores de luz construidos dentro de las cámaras fotográficas son útiles, porque los valores en lux o pies-candela pueden ser calculados a partir de la velocidad de la película, velocidad de disparo, y la apertura de lentes (Cuadro 3.3.9).



A



B



C

Figura 3.3.37 Los administradores de viveros que producen en contenedores, deberían verificar la intensidad de la luz solar dentro de sus estructuras de cultivo, y los modelos de intensidad de sus sistemas de alumbrado, con fotómetros. Están disponibles fotómetros portátiles y baratos, que dan lecturas en unidades de iluminación (A). Otros fotómetros más precisos dan lecturas digitales (B) y tienen distintos sensores que miden todos los aspectos de la intensidad de la luz en: unidades de energía o de iluminación (C) (B, C, cortesía de Li-Cor, Inc.).

Radiómetros. Los radiómetros miden la energía radiante sobre un amplio intervalo de longitudes de onda. Portátiles, y moderadamente caros (U.S. \$450), estos medidores tienen sensores separados (U.S. \$300) que pueden medir los tres aspectos de la radiación electromagnética: energía ($\mu\text{mol/s/m}^2$), radiación (W/m^2), e iluminación (lx) (Fig. 3.3.37B y C). Los registradores de datos (\$1,100) están disponibles también, y proporcionan lecturas continuas de luz, así como de temperatura y humedad relativa.

Un sensor de luz debe ser apropiadamente usado; éste podría ser puesto a nivel del cultivo, encarando la fuente de luz. Las lecturas deberían ser tomadas sobre un modelo reticular regular, a través de toda el área de cultivo, especialmente en los sitios que parezcan estar sombreados. Cuando se verifique el modelo de intensidad de las luces fotoperiódicas, tome lecturas directamente bajo y entre las lámparas, para determinar la intensidad mínima.

Cuadro 3.3.9 Procedimientos y conversiones en el uso de fotómetros de cámaras fotográficas para medir la intensidad de la luz.

1. Coloque la cámara a una velocidad de película ASA400 y a una velocidad del disparador de 1/30 segundos.
2. Ponga la cámara en la fuente de luz y lea la apertura del lente ("f-stop").
3. Use la tabla de abajo para determinar el brillo

f-stop	lux	Pie-candelas
1.0	16	1.5
1.4	32	3.0
2.0	63	6.0
2.8	125	12.0
4.0	250	23.0
5.6	500	47.0
8.0	1,000	93.0
11.0	2,000	190.0
16.0	4,000	375.0
22.0	6,000	750.0
32.0	16,000	1,500
45.0	32,150	3,000
65.0	64,300	6,000

Fuente: Eastman Kodak Co., Rochester, NY.

3.3.5.2 Sistemas de control

Los sistemas de alumbrado hortícolas, deben ser regulados con precisión para alcanzar el objetivo de cultivo deseado. La confiabilidad es crucial con el alumbrado fotoperiódico porque el sistema debe operar sin ser atendido durante la noche. Para ciertas especies sensibles, si las luces fallan incluso por una sola noche, la planta puede finalizar su crecimiento en altura. Una falla así puede resultar

desastrosa desde el punto de vista económico, porque algunas especies y ecotipos no reanudarán su crecimiento sino hasta que se haya satisfecho un requerimiento de enfriamiento, o exhibirán rompimiento de yemas a intervalos irregulares (Fig. 3.3.12). Por esta razón, es ventajoso el tener las luces fotosintéticas conectadas con el sistema de alarma del invernadero.

Existen dos tipos básicos de aparatos de control: de relojería y fotoceldas. Los de **relojería** - relojes electromecánicos o micro-procesadores en estado sólido - encienden las luces y las apagan a horas seleccionadas con antelación. En el sistema más simple, un reloj de 24 h enciende las luces al atardecer, y las apaga al amanecer, o durante un periodo menor durante la noche. Esto provee de un día largo, y puede también aumentar la fotosíntesis, dependiendo de la intensidad de la luz. Para el alumbrado fotoperiódico intermitente, un reloj con 60 divisiones con un ciclo de 6 a 30 minutos, puede operar en serie con el reloj de 24 horas, para proporcionar breves periodos de luz durante la noche. Las **fotoceldas** (Fig. 3.3.3.B) responden a cambios en la intensidad de la luz, y pueden ser usadas en conjunto con relojes, eliminando la necesidad de reprogramar el reloj después de cortes de electricidad, o conforme la longitud del día natural cambia a través del año. Para el alumbrado fotosintético, las fotoceldas pueden prender las luces cuando la intensidad de la luz solar descende bajo un nivel crítico (Aldrich y Bartok, 1989).



Figura 3.3.38 Las fotoceldas detectan cambios en la intensidad de la luz, y por tanto, pueden ser usadas para controlar los sistemas de alumbrado en invernaderos.

3.2.6 Conclusiones y Recomendaciones

La luz es el más complejo y variable de los factores limitativos que afectan el cultivo de plantas de especies forestales en contenedores. La luz afecta todas las diferentes fases del crecimiento y desarrollo de la planta, desde la germinación de la semilla, hasta el desarrollo de yemas y endurecimiento. La cantidad y tiempo de radiación solar afecta tanto la programación del cultivo como el número de cosechas que pueden lograrse por año. La localización del vivero y el tipo de estructura de cultivo, afecta la cantidad de luz que puede estar disponible para el cultivo de plantas.

Los administradores de viveros manejan la luz por dos razones: para aumentar la fotosíntesis, y para el control de la dormancia de la planta mediante la modificación del fotoperiodo, o longitud del día. Los viveristas pueden estimular altas tasas fotosintéticas complementando la luz del sol en áreas con una baja intensidad de luz natural. Pero, debido a las grandes intensidades de luz que son requeridas, usualmente no se considera económico el proporcionar suficiente alumbrado artificial para la fotosíntesis, aunque en algunos viveros se complementa la luz natural durante el otoño o el invierno. Si el alumbrado fotosintético es requerido, lámparas de sodio a alta presión deberían ser arregladas para producir aproximadamente $85 \mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 7.0 \text{ Klx}$) a nivel de la planta. Estas deben operar continuamente por varias horas para producir un efecto apreciable en el crecimiento de la planta.

Muchas especies forestales son muy sensibles al fotoperiodo, así que los viveristas pueden extender la estación de cultivo mediante el alumbrado fotoperiódico. Debido a que éste no es ni intenso ni continuo, el alumbrado fotoperiódico es una herramienta de cultivo relativamente barata para la obtención de cosechas uniformes de especies forestales producidas en contenedores. Aunque algunas especies y ecotipos de bajas latitudes y climas moderados no pueden responder a la extensión en el fotoperiodo, los ecotipos de grandes latitudes o elevaciones, o de climas continentales, la requieren. Los sistemas de alumbrado fotoperiódico deberían ser descritos con un término que denote tanto la duración como la medida del tiempo. Muchos diferentes sistemas de alumbrado han sido usados en viveros forestales que producen en contenedores, y el mejor sistema dependerá de muchos factores, incluyendo el tipo de estructura de invernadero, y los tipos de lámparas que están disponibles. Con frecuencia la luz intermitente es más barata, aunque el alumbrado continuo también ha sido utilizado con eficiencia. La intensidad de la luz fotoperiódica debería ser de al menos 8

$\mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 430 \text{ lx}$), y debería ser aumentada a $16 \mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 860 \text{ lx}$) cuando las especies o ecotipos tengan un mayor requerimiento de luz.

El fotoperiodo también puede ser acortado mediante la exclusión de la luz y creando condiciones de día corto. Los tratamientos de día corto son usados para detener el crecimiento en altura, desarrollar yemas completamente, e inducir rusticidad al frío en especies sensibles; esta técnica es usada principalmente en viveros a grandes latitudes. En muchos otros viveros, simplemente el apagar las luces fotoperiódicas resulta efectivo. Debido a que las cortinas de oscurecimiento afectan otras condiciones ambientales, especialmente la temperatura y la humedad, éstas deben ser usadas apropiadamente. Los viveristas deberían utilizar medidores de luz para verificar la cantidad de luz solar transmitida a través, de sus estructuras de cultivo. Las cubiertas con una pobre transmisión de luz deberían ser limpiadas o reemplazadas. Los sistemas de alumbrado fotoperiódico deberían ser revisados regularmente para asegurarse de que la intensidad mínima crítica está excedida en toda el área de cultivo. Las especies sensibles detendrán su crecimiento en altura y desarrollarán una yema terminal si son expuestas aunque sea tan sólo a una breve interrupción del alumbrado fotoperiódico, lo cual puede acarrear consecuencias desastrosas desde el punto de vista económico.

3.2.7 Literatura Citada

- Aldrich, R.A.; Bartok, J.W. Jr. 1989. Greenhouse engineering. Publication NRAES-33. Ithaca, NY: Northeast Regional Agricultural Engineering Service. 203 p.
- ASHRAE, 1989. ASHRAE Handbook: fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc. 792 p.
- Arnott, J.T. 1991. Personal communication. Canadian Forestry Service, Victoria, BC.
- Arnott, J.T. 1989. Regulation of white spruce, Engelmann spruce and mountain hemlock seedling growth by controlling photoperiod. *Forestry (Supplement)* 62:157-168.
- Arnott, J.T. 1984. Photoperiod control of container seedlings. In: Landis, T. D., comp. Proceedings, Western Forest Nursery Council and Intermountain Nurseryman's Association. 1984 August 14-16; Coeur d'Alene, ID. Gen. Tech. Rep. INT-185. Ogden, UT:USDA Forest Service: 9-13.
- Arnott, J.T. 1979. Effect of light intensity during extended photoperiod on growth of amabilis fir, mountain hemlock, and Engelmann spruce seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 9(1):82-89.
- Arnott, J.T. 1976. Container production of high elevation species. In: Proceedings, Joint Meeting of the Western Forest Nursery Council and the Intermountain Nurserymen's Association; 1976 August 10-12; Richmond, BC.
- Arnott, J.T. 1974. Growth response of white Engelmann spruce Provenance to extended photoperiod using continuous and intermittent light. *Canadian Journal of Forest Research* 4(1):69-75.
- Arnott, J.T.; Macey, D.E., 1985. Light intensity effect on white spruce, Engelmann spruce, and mountain hemlock seedlings grown under an extended photoperiod. *Canadian Journal of Forest Research* 15:295-300.
- Arnott, J.T.; Simmons, C.S., 1985. The effect of failure inextended and intermittent lighting on the growth of white spruce container seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 15(4):734-737.
- Arnott, J.T.; Mitchell, A. 1982. Influence of extended photoperiod on growth of white and Engelmann spruce seedlings in coastal British Columbia nurseries. In: Scarratt, J.B.; Glerum, C.; Plexman, C.A., eds. Proceedings, Canadian Containerized Tree Seedling Symposium; 1981 Sept. 14-16; Toronto, ON: Ontario Ministry of Natural Resources. COJFRC Sym. Proc. O-P-10:139-152.
- Bickford, E.D.; Dunn, S. 1972. Lighting for plant growth. Kent, OH: Kent State University Press. 221 p.
- Bongarten, B.C.; Hanover, J.W. 1985. Accelerating seedling growth through photoperiod extension for genetic testing: a case study with blue spruce (*Picea pungens*). *Forest Science* 31(3):631-643.
- Bormann, F.H. 1956. Ecological implications of changes in the photosynthetic response of *P. taeda* seedlings during ontogeny. *Ecology* 37:70-75.
- Brissette, J.C.; Elliott, M. Barnett, J.P. 1990. Producing container longleaf pine seedlings. Proceedings, Symposium on the management of longleaf pine. Gen. Tech. Rep. S0-75. 1989 April 4-6; Long Beach, MI. New Orleans, LA: USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station: 52-70.
- Cathey, H.M.; Campbell, L.E. 1977. Light frequency and color aid plant growth regulation. *American Nurseryman* (October 1977):16.
- Colombo, S.J.; Smith, W.A. 1984. Delayed bud initiation in black spruce container seedlings due to accidental day length extension. For. Res. Note 37. Maple, ON: Ontario Ministry of Natural Resources. 4 p.

- Colombo, S.J.; Webb, D.F.; Glerum, C. 1982. Cold hardiness and bud development under short days in black spruce and white spruce seedlings. In: Scarratt, J.D.; Glerum, C.; Plexman, C.A., eds. Proceedings, Canadian Containerized Tree Seedling Symposium; 1981. Sept. 14-16; Toronto, ON. Toronto: Ontario Ministry of Natural Resources. COJFRC Sym. Proc. O-P-10: 171-176.
- Downs, R.J. 1985. Irradiance and plant growth in greenhouses in winter. *Hortscience* 20(6): 1125-1127.
- Dymock, I.S.; Wilson, S. 1986. Effect of light quality and photoperiod on twelve coniferous species. In: Harvey, E.M. Proceedings, 1984 Prairie Federal-Provincial Nurserymen's Meeting. September 11-12; 1984, Edmonton, AB. Info. Rep. NOR-X-274. Edmonton, AB: Environment Canada, Northern Forestry Centre. 60 p.
- Environment Canada. FRA Nursery Report: optimum light intensity for growth of containerized Siberian larch seedlings. Indian Head, SA: 17-18.
- Forestry Canada. 1991. A better lighting system for container seedling nurseries. *Information Forestry* 17(2):8.
- Garzoli, K. 1988. Greenhouses. Canberra, Australia: Australian Government Publishing Service. 185 p.
- Gates, D.M. 1971. The flow of energy in the biosphere. In: Energy and power. San Francisco: W. H. Freeman and Company: 43-52.
- Gillies, S.L.; Vidaver, W. 1990. Resistance to photo-damage in evergreen conifers. *Physiologia Plantarum* 80(1):148-153.
- Gonzalez, A.; D'Aoust, A. L. 1988. Observations and measurements of containerized black spruce seedlings growing in a greenhouse. Info. Rep. LAU-XC-79E. Sainte-Foy, PQ: Canadian Forestry Service, Laurentian Forestry Centre. 70 p.
- Grossnickle, S.C.; Arnott, J.T.; Major, J.E.; Tschaplinski, T.J. 1991. Influence of dormancy induction treatments on western hemlock seedlings. I. Seedling development and stock quality assessment. *Canadian Journal of Forest Research* 21:164-174.
- Hallett, R.D. 1982. Contrasting approaches to containerized seedling production: 3. The Maritime Provinces. In: Scarratt, J.B.; Glerum, C.; Plexman, C.A., eds. Proceedings, Canadian Containerized Tree Seedling Symposium. COJFRC Proc. O-P-10.1981 September 14-16; Toronto. Sault Ste. Marie, ON: Canadian Forestry Service; Great Lakes Forest Research Centre: 129-138.
- Hanan, J.J.; Holley, W.D.; Goldsberry, K.L. 1978. Greenhouse management. Berlin: Springer-Verlag. 530 p.
- Hansen, M.C.; Biggs, W.W. 1979. Brochure D5-1180. Lincoln, NE:Li-Cor, Inc. 4 p.
- Hartmann, H.T.; Kester, D.E. 1983. Plant Propagation: principles and practices. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 727 p.
- Hartmann, H.T.; Flocker, W.J.; Kofranek, A.M. 1981. Plant Science: growth, development, and utilization of cultivated plants. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 676 p.
- Hawkins, C.D.B.; Draper, D.A. 1988. Height control of interior spruce by means of photoperiodic induction. In: Landis, T.D. tech. coord. Proceedings, combined meeting of the Western Forest Nursery Associations; 1988 August 8-11; Vernon, BC. Gen. Tech. Rep. RM-167. Ft. Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: 45-49.
- Heacox, L.C. 1989. Made in the shade. *Greenhouse Grower* 7(4):26,28-29.
- Jones, L. 1961. Effect of light on germination of forest tree seeds. Proceedings of the International Seed Testing Association 26:437-452.
- Kaufman, J.E.; Christensen, J.F. 1984. IES lighting handbook: reference volume. New

York: Illuminating Engineering Society of North America.

Kozlowski, T.T.; Borger, G.A. 1971. Effect of temperature and light intensity early in ontogeny in growth of *Pinus resinosa* seedlings. Canadian Journal of Forest Research 1:57-65.

Kramer, P.J.; Kozlowski, T.T. 1979. Physiology of woody plants. New York: Academic Press. 811 p.

Kramer, P.J.; Decer, J.F., 1944. Relation between light intensity and rate of photosynthesis of loblolly pine and certain hardwoods. Plant Physiology 19:350-358.

Krasowski, M.J.; Owens, J.N. 1991. Growth and morphology of western redcedar seedlings as affected by photoperiod and moisture stress. Canadian Journal of Forest Research 21:340-352.

Krueger, K.W.; Ruth, R.H., 1969. Comparative photosynthesis of red alder, Douglas-fir, Sitka spruce, and western hemlock seedlings. Canadian Journal of Botany 47:519-527.

Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stresses, volume 2: water, radiation, salt, and other stresses. New York: Academic Press. 606 p.

Mastalerz, J.W. 1977. The greenhouse environment: the effect of environmental factors on the growth and development of flower crops. New York: John Wiley and Sons: 221.

Matthews, R.G. 1981: Seedling production for crown lands in British Columbia: guidelines for commercial container nurseries. Victoria, BC. 45 p.

McLemore, B.F. 1971. Light requirements for germination of loblolly pine seeds. Forest Science 17(3):285-286.

McMahon, M.J.; Kelly, J.W.; Decoteau, D.R. 1990. Spectral transmittance of selected construction and nursery shading material. Journal of Environmental Horticulture 8(3):118-121.

Nelson, P.V. 1985. Greenhouse operation and management, 3rd. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 598 p.

Nitsch, J.P. 1957. Growth responses of woody plants to photoperiodic stimuli. American Society of Horticultural Science Proceedings 70:512-525.

OnReilly, C.; Owens, J.N.; Arnott, J.T. 1989. Bud development in container-grown western hemlock seedlings subjected to different dormancy induction treatments. Forestry 62 (supplement): 169-179.

Odlum, K.D. 1991. Hardening and overwintering container stock in Ontario: practices and research. In: Proceedings, 11th annual conference of the Forest Nursery Association of British Columbia. 1991 September 23-26. Prince George, BC. (In Press)

Odlum, K.D.; Colombo, S.J. 1988. Short day exposure to induce bud break prolongs shoot growth in the following year. In: Landis, T.D., tech. coord. Proceedings, combined meeting of the Western Forest Nursery Associations; 1988 August 8-11; Vernon, BC. Gen. Tech. Rep. RM- 167, Ft. Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: 57-59.

Owston, P.W.; Kozlowski, T.T. 1978. Effects of temperature and photoperiod on growth of western hemlock. In: Atkinson, W.A.; Zasoski, R.J., eds. Contrib. 34. Seattle: University of Washington, Western College of Forest Resources, Institute of Forest Products: 108-117.

Reifsnyder, W.E.; Lull, H.W. 1965. Radiant energy in relation to forests. Tech. Bull. 1344. Washington, DC: USDA Forest Service. 111 p.

Roberts, P.S.; Zavitkovski, J. 1981. Growth of hybrid poplars, white spruce, and jack pine under artificial lights. Res. Pap. NC-206. St. Paul, MN: USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 5 p.

Ronco, R. 1970. Influence of high light intensity on survival of planted Engelmann spruce. *Forest Science* 16:331-339.

Smith, H.; Whitelam, G.C. 1990. Phytochrome, a family of photoreceptors with multiple physiological roles. *Plant, Cell and Environment* 13(7):695-707.

Thimijan, R.W.; Heins, R.D., 1983. Photometric, radiometric, and quantum units of measure: a review of procedures for interconversion. *Hortscience* 18(6):818-822.

Thompson, S. 1982. Environmental control over the shoot growth of pine seedlings. In: Scarratt, J.B.; Glerum, C.; Plexman, C.A., eds. *Proceedings, Canadian Containerized Tree Seedling Symposium*. 1981 September 14-16; Toronto. COJFRC Proc. O-P-10. Sault Ste. Marie, ON: Canadian Forestry Service, Great Lakes Forest Research Centre: 177-181.

Tinus, R.W. 1970. Growing trees in a controlled environment. Western Reforestation Coordinating Committee Proceedings. 1970 December; Vancouver, BC. Portland, OR: Western Forestry and Conservation Association.

Tinus, R.W. 1976. Growth of white spruce and lodgepole pine under various temperature and light conditions. Report: to Alberta Department of Energy and Natural Resources, Edmonton, AB (under cooperative agreement 16-573-CA with USDA Forest Service). 19 p.

Tinus, R.W.; McDonald, S.E. 1979. How to grow tree seedlings in containers in greenhouse. Gen. Tech. Rep. RM-60. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 256 p.

Tuller, S.E.; Peterson, M.J. 1988. The solar radiation environment of greenhouse-grown Douglas-fir seedlings. *Agricultural and Forest Meteorology* 44:49-65.

U.S. Department of Agriculture. 1941. Climate and man: Yearbook of agriculture: 738-739.

Van Steenis, E. 1991. Personal communication. Surrey, BC: British Columbia Ministry of Forests.

Vince-Prue, D. 1975. *Photoperiodism in plants*. London: McGraw-Hill. 444 p.

Vollebregt, R. 1989a. Curtain control: a manufacturer sheds light on environmental control in greenhouses. *American Nurseryman* 170(3):112-115, 118, 120-122.

Vollebregt, R. 1989b. Establishing environmental control: to make your greenhouse a complete environmental control system, you must design a greenhouse with a curtain system in mind. *American Nurseryman* 170(4):53, 55, 57, 59-63.

Vollebregt, R. 1990. Analysis of using curtain systems inside greenhouses for shading, cooling and heat retention. Brantford, ON: Cravo Equipment Co. 56 p.

Weed, J. 1990. A look at automatic curtain systems. *Greenhouse Manager* 8(9): 132-134.

Withrow, R.B.; Withrow, A.P. 1956. Generation, control, and measurement of visible and near visible radiant energy. In: Hollaender, A., ed. *Radiation biology*, vol. 3, visible and near-visible light. New York: McGraw-Hill Book Co.: 125-217.

Young, E.; Hanover, J.W. 1977. Effects of quality, intensity, and duration of light breaks during a long night on dormancy in blue spruce (*Picea pungens* Engelm.) seedlings. *Plant Physiology* 60:271-273.