



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

VOLUMEN 3

**Condiciones Ambientales
del Vivero**

**Capítulo 4
Dióxido de Carbono**

Contenido

3.4.1 Introducción	X
3.4.1.1 El dióxido de carbono en el ambiente	X
3.4.1.2 Definiciones y unidades	X
3.4.2 Papel del dióxido de carbono en el crecimiento y desarrollo de las plantas	X
3.4.2.1 El dióxido de carbono y la fotosíntesis	X
3.4.2.2 Respuesta del crecimiento al enriquecimiento con dióxido de carbono	X
3.4.2.3 Interacción del dióxido de carbono con otros factores	X
Luz	X
Temperatura	X
Agua y nutrientes minerales	X
3.4.3 Niveles óptimos de dióxido de carbono	X
3.4.3.1 Fase de establecimiento	X
3.4.3.2 Fase de crecimiento rápido	X
3.4.3.3 Fase de endurecimiento	X
Fase de establecimiento	X
Fase de crecimiento rápido	X
Fase de endurecimiento	X
3.4.3.4 Propagación vegetativa	X
3.4.4 Modificando los niveles de dióxido de carbono en los viveros forestales que producen en contenedor	X
3.4.4.1 Aumentando la disponibilidad del dióxido de carbono en la ventilación	X
3.4.4.2 Complementando los niveles de dióxido de carbono	X
Fuentes de dióxido de carbono	X
Diseñando un sistema de enriquecimiento de dióxido de carbono	X
Problemas potenciales con los sistemas de combustión	X
3.4.5 Sistemas de monitoreo y control del dióxido de carbono	X
3.4.5.1 Midiendo los niveles de dióxido de carbono	X
3.4.5.2 Sistemas de control del dióxido de carbono	X
3.4.6 Conclusiones y Recomendaciones	X
3.4.7 Literatura Citada	X

3.4.1 Introducción

El dióxido de Carbono (CO₂) es un gas incoloro y sin olor. Ya que existe en cantidades relativamente pequeñas en el ambiente atmosférico, el CO₂ está considerado como el principal factor limitativo de la fotosíntesis bajo algunas condiciones de cultivo. En horticultura, el dióxido de carbono fue el último de los factores limitativos manejado en el cultivo. Los experimentos iniciales con enriquecimiento de CO₂ resultaron desalentadores, pues los elevados niveles de CO₂ produjeron una respuesta fitotóxica, la cual probablemente se debió a la presencia de contaminantes gaseosos. En 1918 fueron establecidos firmemente los efectos benéficos del enriquecimiento con CO₂ en el cultivo de plantas, pero la aplicación comercial no comenzó a divulgarse sino hasta mediados de los años sesenta (Bauerle *et al.*, 1986; Hicklenton, 1988).

El enriquecimiento con dióxido de carbono no es ampliamente practicado en los viveros que producen en contenedores. Solamente un 17% de los viveros en los Estados Unidos y Canadá, reportaron programas de manejo del CO₂ (Container Nursery Survey). La falta de interés no debería ser interpretada como una falta de importancia de este gas para el cultivo de plantas, puesto que en muchos estudios se ha demostrado que al aumentar los niveles de CO₂, se aceleran las tasas fotosintéticas (Kramer y Kozlowski, 1979).

3.4.1.1 El dióxido de carbono en el ambiente

Dos gases familiares constituyen el 99% en volumen de la atmósfera, el nitrógeno (78%) y el oxígeno (21%), mientras que el dióxido de carbono tiene una concentración promedio de solamente 0.035% (350 ppm). Sin embargo, no siempre ha sido este el caso, pues en la atmósfera primitiva el CO₂ era más común que el oxígeno. El rápido desarrollo de la vida vegetal, implicó la utilización de este CO₂ y la liberación de oxígeno, lo que hizo posible la evolución de organismos más grandes y avanzados. El nivel de CO₂ en la atmósfera terrestre parece haberse estabilizado en su

nivel mínimo (280 ppm) a mediados de los años 1,800. Desde esa época, la revolución industrial ha implicado el gradual aumento en las concentraciones ambientales de CO₂. La deforestación masiva y el consumo de combustibles fósiles, han originado que el nivel del CO₂ atmosférico aumente de 1 a 2 ppm anualmente.

Parece que esta tendencia no cambiará en un futuro cercano (Hicklenton, 1988). La preocupación en relación al "calentamiento global" ha derivado en muchos nuevos estudios sobre los efectos de elevados niveles de CO₂ en el crecimiento de los árboles en años recientes, y mucho de este trabajo ha sido hecho en plantas de especies forestales (ver sección 3.4.2.2).

El nivel ambiental de CO₂ alrededor de un vivero puede variar de 200 a 400 ppm, dependiendo de la localización; los valores más elevados se pueden registrar en las áreas industriales, debido a la combustión de combustibles fósiles, así como en áreas bajas húmedas, como pantanos y lechos de ríos, donde se encuentran materiales vegetales en descomposición (Nelson, 1985). La concentración de dióxido de carbono, medida en peso por unidad de volumen, también disminuye con la altitud, reduciéndose en aproximadamente un 40% a 4 500 msnm (14 800 pies snm), con respecto al nivel del mar (Kramer y Kozlowski, 1979).

3.4.1.2 Definiciones y unidades

Los niveles de dióxido de carbono pueden ser descritos y medidos en varias maneras diferentes. Debido a que es un gas, el CO₂ puede ser descrito en términos de unidades de presión, pero esta opción no es ampliamente utilizada para propósitos hortícolas. Los fisiólogos vegetales miden la fotosíntesis como la cantidad de CO₂ en peso consumida por unidad de volumen, expresada en miligramos por litro (mg/l), o en volumen, en microlitros por litro (μl/l). Pallas (1986) proporciona una completa discusión de las unidades que son usadas en investigación científica. Sin

embargo, para trabajo operativo en vivero, las unidades de concentración en por ciento (%), o en partes por millón (ppm), son las más simples y las más apropiadas para medir este gas.

3.4.2 Papel del Dióxido de Carbono en el Crecimiento y Desarrollo de las Plantas

El dióxido de carbono es uno de los 16 nutrimentos que son esenciales para el cultivo de plantas. Aproximadamente el 40% del peso anhidro de una planta típica está compuesto por carbón. Las plantas obtienen este carbón del CO₂ del aire en torno a los estomas, en las hojas (Fig. 3.1.2). El nivel normal de CO₂ en el ambiente, de aproximadamente 350 ppm, es considerado adecuado para un crecimiento "normal", aunque las plantas tienen la capacidad de utilizar cantidades mucho mayores. Esta capacidad, aparentemente se relaciona con las eras primitivas, cuando los niveles de CO₂ eran 10 a 100 veces mayores que en la actualidad (Nelson, 1985).

3.4.2.1 El dióxido de carbono y la fotosíntesis

Las plantas consumen CO₂ durante la fotosíntesis, y lo liberan a través de la respiración; durante las horas del día estos procesos ocurren simultáneamente (Fig. 3.3.5). Cuando el nivel ambiental de CO₂ alcanza el punto de compensación, el punto en el cual la fotosíntesis y la respiración son iguales, la plántula no crecerá, solamente se mantendrá. En los invernaderos, esta situación solamente ocurre en los días fríos y con sol, cuando las ventilas están cerradas. Con niveles de CO₂ superiores al punto de compensación, es decir con 40 a 60 ppm para la mayoría de las plantas comúnmente cultivadas, la fotosíntesis neta es positiva, siempre que otros factores críticos no sean limitativos (Ludlow y Jarvis, 1971; Hignbotham *et al.*, 1985).

Los niveles de dióxido de carbono siguen un patrón diurno típico, dentro del ambiente cerrado de un invernadero (Fig. 3.4.1). Por la noche, las plantas verdes liberan CO₂ a través de la respiración, de manera que la concentración del gas aumenta hasta unas 400 ppm; sin embargo, al amanecer la fotosíntesis comienza y la concentración se reduce rápidamente. La concentración de CO₂ se hace críticamente baja en un invernadero en los días fríos y nublados, cuando no se requiere de ventilación; en un invernadero con sólo dos intercambios de aire por hora o menos, la

concentración de CO₂ con frecuencia cae bajo las 200 ppm y limita la fotosíntesis (Holley, 1965). Las mediciones ambientales dentro de un invernadero, han demostrado que la concentración diaria promedio de CO₂ varió significativamente durante el mes de febrero y que alcanzó su menor nivel cuando la temperatura exterior era fría y las ventilas se mantuvieron cerradas (Fig. 3.4.2). Bajo condiciones de calma, los niveles de CO₂ pueden ser limitativos en cultivos densos a campo abierto, resultando en una reducción de 10 a 20% en la tasa fotosintética (Chang, 1968).

Conforme las concentraciones de CO₂ son aumentadas por encima de los niveles ambientales, la tasa fotosintética aumenta porque las altas concentraciones aumentan el gradiente de difusión del aire ambiental a través de los estomas, a las células del mesófilo, donde los cloroplastos utilizan el CO₂ en la fotosíntesis. La foto-respiración, que ocurre a elevados niveles de luz y causa pérdida de CO₂, es también suprimida con elevadas concentraciones de CO₂, que después aumentarán la fotosíntesis neta (Tinus, 1975; Pearcy *et al.*, 1987).

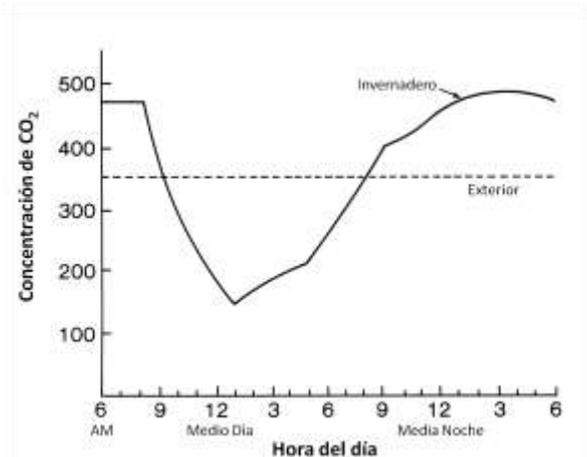


Figura 3.4.1 Los niveles de dióxido de carbono en un invernadero cerrado siguen un patrón diurno típico, elevándose durante la noche gracias a la respiración de las plantas, y posteriormente reduciéndose con rapidez en la mañana, cuando la tasa fotosintética es mayor (modificada de Aldrich y Bartok, 1989).

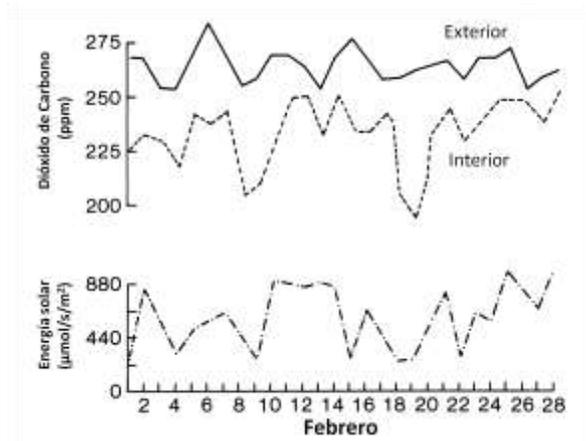


Figura 3.4.2 Durante el invierno, los niveles promedio diarios de CO₂ dentro de un invernadero se mantienen significativamente menores que los niveles ambientales, debido a las relativamente pocas horas de ventilación. Note que los niveles interiores de CO₂ son mayores en los días soleados, cuando las ventilas se mantienen abiertas durante más tiempo (Modificado de Hanan *et al.*, 1978).

3.4.2.2 Respuesta en crecimiento al enriquecimiento con dióxido de carbono.

Las tasas de crecimiento de las plántulas aumentan cuando el fotosintato neto es transportado de las hojas, donde fotosíntesis toma lugar, hacia los meristemos, donde ocurre el crecimiento. Hay numerosos estudios sobre los efectos benéficos de los altos niveles de CO₂ en el crecimiento de plantas de árboles. En *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws., la altura, el diámetro del tallo y el volumen total, aumentaron con incrementos en la concentración de CO₂, aunque en dos fuentes de semilla se hallaron distintos modelos de respuesta de crecimiento (Surano *et al.*, 1986). Tolley y Strain (1984), encontraron aumentos en la altura de la parte aérea, área foliar, y biomasa en plántulas de *Pinus taeda* L. y *Liquidambar styraciflua* L., y reportaron que la respuesta en crecimiento de la última especie, fue mayor que la de la primera. Plantas de *Pinus contorta* Dougl. ex Loud. cultivadas con niveles altos de CO₂, produjeron un mayor crecimiento foliar, y una mayor altura de la parte aérea, con respecto a los testigos. Análisis de biomasa mostraron que el crecimiento de la raíz resultó particularmente estimulado (Fig. 3.4.3). Los autores concluyeron que la combinación de área foliar

aumentada y producción de raíces, pueden acortar el periodo de producción en vivero.

Existe un límite superior para el efecto estimulante de las concentraciones elevadas de CO₂ en muchas plantas. Las altas concentraciones de CO₂ pueden originar cierre estomatal, que automáticamente reduce la cantidad de CO₂ que puede entrar a la hoja. En adición, el más rápido crecimiento causado por una elevada concentración de CO₂, usualmente resulta en una reducción de otro factor que limita la fotosíntesis, y por ende el crecimiento.

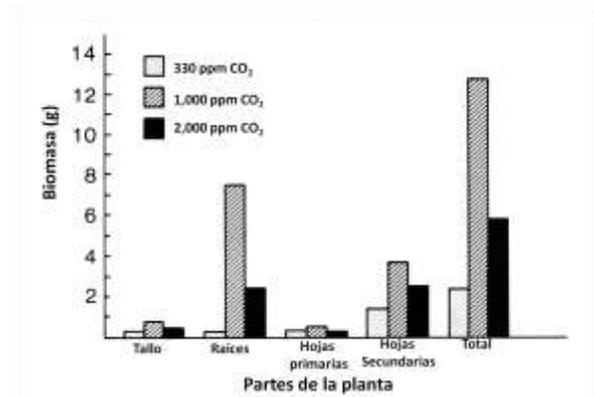


Figura 3.4.3 Después de 5 meses, la biomasa de las plantas enteras de *Pinus contorta* y sus diferentes componentes, fueron mayores en las que recibieron 1,000 ppm de CO₂. La biomasa del sistema radical y la de las hojas secundarias, mostró el mayor incremento como respuesta al enriquecimiento de CO₂ en el ambiente (Adaptado de Higginbotham *et al.*, 1985).

3.4.2.3 Interacción del dióxido de carbono con otros factores.

Los efectos fisiológicos del CO₂ no deben ser considerados en lo individual, puesto que están fuertemente interrelacionados con los efectos de otros factores limitativos en el crecimiento de la planta, especialmente la luz, la temperatura, el agua, y los nutrientes minerales (Blackman, 1905). Conforme la concentración de CO₂ cambia y la tasa fotosintética varía, los niveles óptimos de otros factores ambientales pueden cambiar.

Luz. La fotosíntesis medida como la utilización de CO₂, aumenta linealmente con la luz hasta que se alcanza el punto de saturación por luz. Mientras otros factores no sean limitativos, el

punto de saturación por luz se hace progresivamente mayor conforme las intensidades de luz y la concentración de CO₂ aumentan (Fig. 3.4.4). En efecto, los elevados niveles de CO₂ pueden, en alguna medida, compensar los bajos niveles de luz (Tolley y Strain, 1984), que con frecuencia acontecen en los días nublados de invierno. Cuando tales condiciones ocurren, el alumbrado fotosintético complementario a veces es utilizado para promover el crecimiento del cultivo; el enriquecimiento de CO₂ es esencial para obtener todos los beneficios de la luz adicional (Hicklenton, 1988) (Ver el Capítulo 3 de este volumen para mayor información sobre los efectos de la luz en la fotosíntesis).

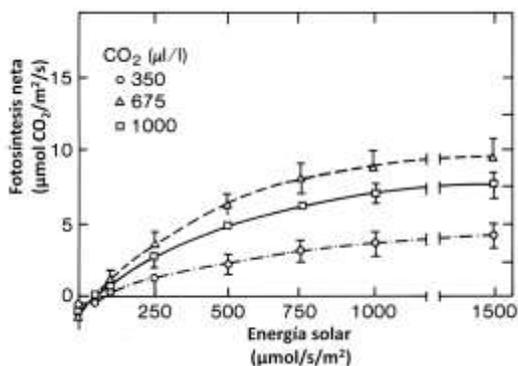


Figura 3.3.4 Los efectos del CO₂ suplementario en la fotosíntesis, son fuertemente dependientes de la intensidad de la luz. Estas plantas de *Liquidambar styraciflua* alcanzaron la saturación por luz a cada vez mayores intensidades de luz, cuando los niveles de CO₂ fueron progresivamente aumentados artificialmente.

La radiación solar también tiene un efecto directo en el régimen térmico en el ambiente de un invernadero cerrado. Debido a que la luz solar es convertida en radiación térmica en un invernadero, la cantidad de luz solar influye directamente la necesidad de enfriamiento por ventilación. Así, el nivel de luz diario promedio está directamente relacionado con la concentración de CO₂ en una estructura de este tipo durante el invierno (Fig. 3.4.2).

Temperatura. Para muchas especies vegetales, la temperatura óptima para la fotosíntesis aumenta cuando la concentración de CO₂ es incrementada. Por tanto, las ventilas del invernadero pueden ser mantenidas cerradas durante mucho tiempo, conservando

la temperatura unos 3 a 6°C (5 a 10°F) más cálida que en el exterior, con lo que a su vez se prolongará la exposición de la planta a altos niveles de CO₂ (Nelson, 1985). Del mismo modo, la tolerancia a elevadas temperaturas significa un menor requerimiento de sombreado. Por tanto, los elevados niveles de CO₂, más luz, y una mayor temperatura, actúan sinérgicamente sobre el punto donde otros problemas limitan el crecimiento.

Cuando los estomas se cierran a elevados niveles de CO₂, la evapotranspiración cesa, y las plantas pueden resultar dañadas por las elevadas temperaturas foliares. Por ejemplo, Surano *et al.* (1986) encontraron en plantas de *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws. que el enfriamiento transpiracional fue muy reducido cuando fueron cultivadas con elevados niveles de CO₂, en cámaras de cultivo especiales, y que la temperatura de las acículas alcanzó 45°C (114°F). La reducción en la transpiración estuvo acompañada por un aumento en la producción de etileno, que puede ser indicador de tensión por calor. La respuesta estomatal a elevados niveles de CO₂ varía entre las especies: por ejemplo, la apertura estomatal en plantas de *Pinus contorta* Dougl. ex Loud. resultó no afectada por concentraciones de CO₂ superiores a 2,000 ppm (Higginbotham *et al.*, 1985). Ya que las plántulas son sensibles al calor, el cierre estomatal puede acarrear daños por calor en viveros con ambiente enriquecido en los niveles de CO₂.

Agua y nutrientes minerales. Las rápidas tasas de crecimiento de las plantas cultivadas en ambientes ricos en CO₂ resultan en un incremento en el consumo de agua y nutrientes minerales (Hicklenton, 1988). El uso del agua por la planta aumentará porque al crecer en tamaño el follaje, éste tendrá una mayor superficie transpiracional. Sin embargo, puesto que los estomas comienzan a cerrarse ante elevados niveles de CO₂, la eficiencia en el uso del agua por las plantas también debería aumentar. Esto fue aparentemente el caso de un experimento con *Pinus radiata* D. Don, donde las plantas bajo tensión hídrica tuvieron una mayor respuesta de crecimiento que aquellas con niveles adecuados de agua (Conroy *et al.*, 1986).

El aumento en el crecimiento, resultante de la elevada tasa fotosintética, también crea demanda de más nutrimentos, pero su absorción no es consistente para todos ellos. En *Pinus virginiana* Mill., la absorción de nitrógeno y calcio aumentó durante el enriquecimiento con CO₂, pero la absorción de fósforo y potasio resultó no afectada (Luxmore *et al.*, 1986). Plantas de *Populus* spp. y de *Picea glauca* (Moench) Voss respondieron diferencialmente al enriquecimiento con CO₂ y a la fertilización con nitrógeno.

Las biomásas de la raíz, el tallo y las hojas de *Populus* spp. fueron mayores tanto a niveles elevados como pobres de nitrógeno, mientras que únicamente la masa foliar de *Picea glauca* (Moench) Voss resultó significativamente incrementada, y solamente con elevados niveles de nitrógeno. Sin embargo, el aumento en la tasa de crecimiento de las plantas de *Populus* spp. no pudo persistir, porque se originaron deficiencias en nutrimentos minerales a causa del rápido crecimiento (Brown y Higginbotham, 1986). Una respuesta similar se notó con plantas de *Castanea sativa* Mill.: las hojas cultivadas en ambiente rico en CO₂ se hicieron prematuramente cloróticas, lo cual fue atribuido a la dilución de nutrimentos resultantes de la rápida tasa de crecimiento (Mousseau y Enoch, 1989).

Los viveristas que proporcionan CO₂ adicional a sus cultivos, tienen que estar conscientes de los problemas potenciales y hacer los ajustes necesarios a sus regímenes de cultivo. En general, los viveristas que fertilizan con cada riego no deberían tener problemas, pero aquellos que fertilizan en forma intermitente, pueden necesitar realizar dicha práctica con mayor frecuencia, o con mayores concentraciones de nutrimentos.

3.4.3 Niveles óptimos de Dióxido de Carbono

El nivel óptimo de CO₂ dependerá de la especie que se esté cultivando y de la etapa de desarrollo de la planta. Muchos invernaderos ornamentales tratan de mantener concentraciones de CO₂ de entre 600 a 1,500 ppm (Freeman, 1985). Pruebas de investigación con plantas de árboles han demostrado respuestas positivas en el crecimiento a 1,000 ppm o menos. Sionit y Kramer (1986) proporcionan una amplia lista de respuestas de las plantas leñosas al enriquecimiento con CO₂. Los niveles de dióxido de carbono a más de 1,500 ppm no han resultado en un crecimiento adicional, aunque mucha investigación ha sido realizada con intensidades de luz equivalentes a 20 - 30% de la luz solar plena, y por tanto, no se puede predecir con precisión qué pasará en un invernadero. La fitotoxicidad puede ocurrir por encima de 2,500 ppm en algunas especies (Cuadro 3.4.1).

Cuadro 3.4.1 Efectos de los niveles de dióxido de carbono en las plantas y trabajadores en los viveros forestales que producen en contenedores.

Respuesta	Concentración de Dióxido de Carbono (ppm)
Efectos en las plantas	
Crecimiento negativo	< 100
Punto de compensación por CO ₂	50 - 100
Reducción de la tasa de crecimiento	100 - 350
Nivel de CO ₂ ambiental	350
Promoción de la tasa de crecimiento	350 - 1,000
Beneficios marginales	1,000 - 2,500
Posibilidad de efectos adversos	2,500
Efectos en el hombre	
Límite de exposición al trabajador	5,000
Dolor de cabeza y apatía	> 5,000
Pérdida de conciencia y muerte	> 80,000

Compilado de diversas fuentes

3.4.3.1 Fase de establecimiento

Está en tela de juicio el que tanto es benéfica la promoción de los niveles de CO₂ durante la germinación de la semilla y el establecimiento temprano. Las plantas jóvenes tienen niveles óptimos ligeramente mayores de CO₂ que las plantas más viejas (Chang, 1968), pero la pequeña superficie de los cotiledones y acículas primarias significa menor capacidad fotosintética. La mayor parte de las pruebas de

investigación han proporcionado el CO₂ durante varias semanas después que las plántulas se han establecido. Sin embargo, Yeatman (1970) halló una respuesta positiva definitiva cuando las germinantes de cuatro especies de coníferas fueron cultivadas bajo ambiente rico en CO₂, con dos niveles distintos de luz (Fig. 3.4.5). En todos los casos se encontró, que el suplemento de CO₂ a 900 ppm que produce plantas más largas dos semanas después de la germinación, pero la respuesta a un mayor nivel de CO₂ fue variable.

3.4.3.2 Fase de crecimiento rápido

Las plántulas muestran la mayor respuesta a altos niveles de CO₂ en la fase de crecimiento rápido, y el tratamiento usualmente comienza alrededor de 1 mes después de la siembra. Campagna y Margolis (1989) proporcionaron niveles elevados de CO₂ a plantas de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. en diferentes estadios de desarrollo, y encontraron una respuesta significativa en crecimiento durante los primeros 3 meses de la estación de crecimiento, cuando las plantas tenían la mayor cantidad de superficie activa fotosintéticamente. Las plantas de *Pinus contorta* Dougl. ex Loud. mostraron una respuesta positiva tanto en la altura de la parte aérea como en la superficie foliar (Fig. 3.4.6), a través de una estación de cultivo de 5 meses (Higginbotham *et al.*, 1985). Un nivel de 1,000 ppm de CO₂ resultó más efectivo que una mayor concentración. Las plantas de *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws. y de *Picea engelmannii* (Mill.) B.S.P. cultivadas durante 1 año a 1,200 ppm de CO₂, fueron de 50 a 70 % más pesadas que aquéllas cultivadas a 325 ppm (Tinus, 1972).

3.4.3.3 Fase de endurecimiento

Los beneficios del enriquecimiento con CO₂ declinan durante la fase de endurecimiento. Unas plantas de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. cultivadas en un ambiente rico en CO₂ durante fines del verano, no aumentaron ni su altura ni su biomasa, aunque las plantas tratadas temprano en la estación de crecimiento, sí

tuvieron respuestas significativas (Campagna y Margolis, 1999). Un ambiente enriquecido con CO₂ puede ser detrimental para el desarrollo de la rusticidad al frío en las plántulas. Unas plantas de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. cultivadas bajo elevados niveles de CO₂, endurecieron más lentamente que las plantas control, y subsecuentemente sufrieron grandes daños por heladas (Margolis y Vezina, 1990). Los niveles enriquecidos de CO₂ prolongan la suculencia de las plantas, lo que

las hace más susceptibles a daños por frío y a otras tensiones. Los niveles elevados de CO₂ retardan la abscisión de la hoja en las latifoliadas deciduas, y pueden estimular el rompimiento de yemas y un reflujó en el crecimiento. Por tanto, los administradores de viveros forestales que producen en contenedores deberían terminar con el tratamiento de CO₂ antes del comienzo de los tratamientos de tensión utilizados para iniciar la dormancia.

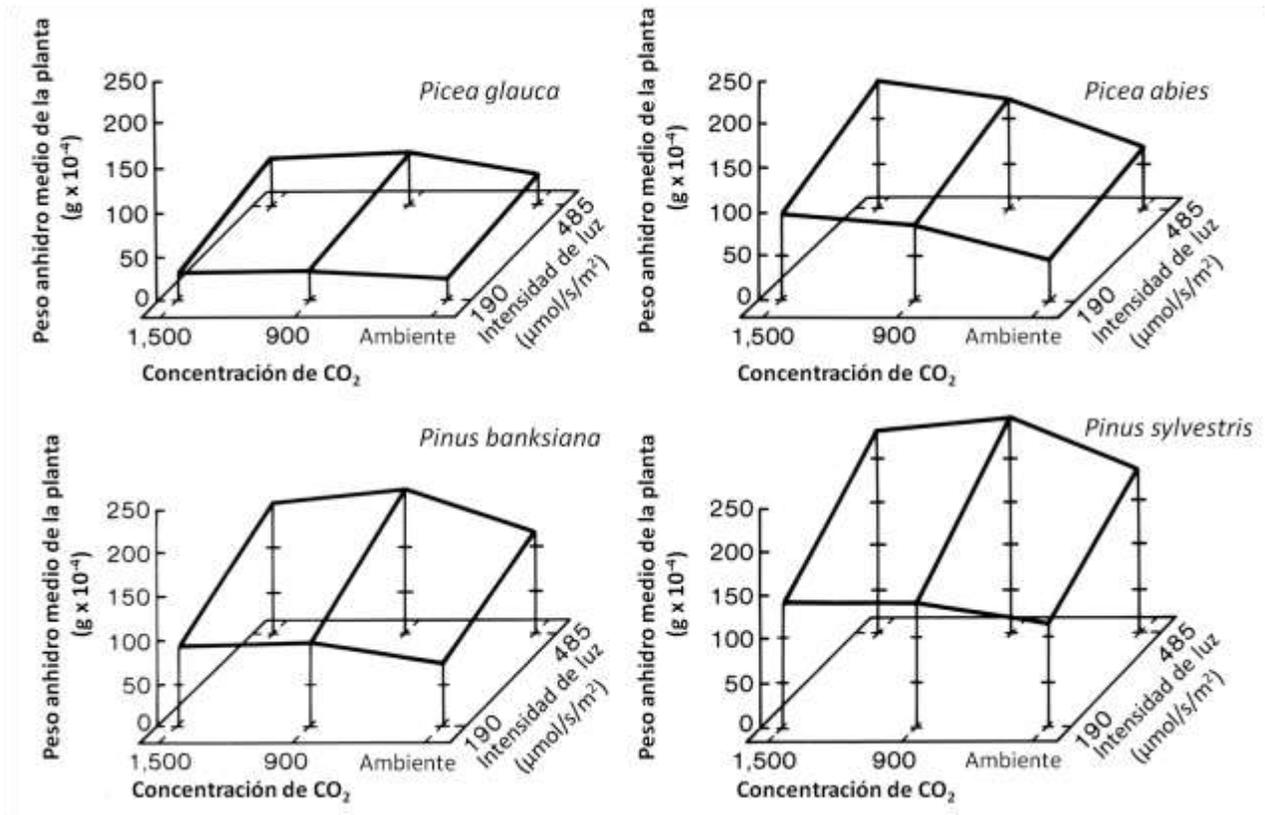


Figura 3.4.5 Aún las plántulas germinantes de 3 semanas de edad mostraron una respuesta positiva al enriquecimiento con CO₂, a pesar de que el mayor nivel de luz probado fue sólo de aproximadamente 27% de la luz solar plena (modificado de Yeatman, 1970).

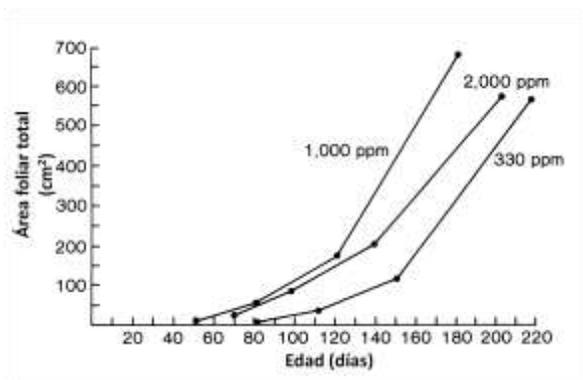


Figura 3.4.6 Los efectos benéficos de los niveles enriquecidos de CO₂ pueden acelerarse durante la estación de cultivo, porque las hojas grandes producen más fotosintatos, que son usados por un crecimiento en aumento (adaptado de Higginbotham *et al.*, 1985).

3.4.4 Modificando el Dióxido de Carbono en los Viveros Forestales que Producen en Contenedores

El primer aspecto a evaluar cuando se considera suplementar CO₂, es el tipo de vivero. Obviamente, no hay potencial para la suplementación en viveros abiertos, mientras que en las estructuras cerradas el aumento racional en los niveles de CO₂ dependerá del tipo de estructura. El enriquecimiento es menos económico en estructuras que no están bien selladas, como son las estructuras de protección en comparación con los invernaderos perfectamente cerrados. Las construcciones cubiertas con una doble capa de polietileno son ideales, pues tienen pocas salidas de aire, en comparación con aquellas cubiertas de vidrio, fibra de vidrio, o paneles plásticos (Nelson, 1985).

3.4.4.1 Aumentando la disponibilidad de dióxido de carbono con la ventilación

Una buena circulación de aire es necesaria para hacer el CO₂ disponible en la superficie foliar. Por lo tanto, los viveristas pueden estimular el crecimiento de las plantas meramente promoviendo una buena ventilación. Cuando el aire está estancado, la concentración de CO₂ en la capa de frontera alrededor de la planta puede ser considerablemente menor que en condiciones ambientales fuera del invernadero, de modo que al aumentar el flujo de aire sobre las hojas, se hace al gas más disponible para la fotosíntesis (Kramer y Kozlowski, 1979; Hicklenton, 1988). En estudios de campo con un cultivo, Gaastra (1963) demostró que el aumentar la velocidad del viento sobre la superficie foliar puede incrementar significativamente la fotosíntesis (Cuadro 3.4.2). En un invernadero, un flujo de aire de 50 cm/s (99 pies por minuto), que es rápido pero factible, se ha encontrado equivalente a un enriquecimiento de 50% en los niveles de CO₂. No obstante, el potencial para incrementar la ventilación es limitado por la máxima velocidad de ventilación, alrededor de 42 cm/s (83 pies por minuto) en un invernadero totalmente cerrado (Hanan *et al.*, 1978).

Ya que los nuevos invernaderos eficientes en energía son mucho más herméticos que los viejos, los viveristas no pueden depender más de las corrientes de aire para reemplazar el CO₂. Los viveristas con áreas de protección deberían estimular la fotosíntesis levantando los lados, siempre que la temperatura del aire lo permita, y aquellos con estructuras deberían usar sistemas de ventilación con ventiladores, que promuevan una buena mezcla de aire en el invernadero. Aún en días en los que la temperatura exterior es baja, puede ser provechoso proporcionar aire del exterior y calentarlo, especialmente temprano en la mañana, cuando las tasas fotosintéticas son las mayores (La ventilación es discutida con más detalle en la sección 3.1.4.3. de este manual).

3.4.4.2 Complementando los niveles de dióxido de carbono

El potencial del enriquecimiento con CO₂ ha sido demostrado en estudios en cámaras de cultivo, donde el crecimiento de las plantas de especies forestales ha sido aumentado de 50 a 100% (Tinus, 1972, 1976). En un invernadero totalmente cerrado, la respuesta será algo menor, pues es necesario ventilar cuando las temperaturas exceden los niveles óptimos, y se hace imposible mantener los niveles de CO₂ superiores a los del aire del exterior. El tipo de estructura de cultivo es también importante; las estructuras corrientes tienen ocho veces la tasa de intercambio de aire, en comparación con los invernaderos bien sellados (Hicklenton, 1988). Por tanto, la factibilidad de enriquecimiento con CO₂ dependerá del tipo y de la condición de la estructura de cultivo, y de la porción de tiempo que las ventanas se mantengan cerradas.

Fuentes de dióxido de carbono. El uso de materia orgánica en descomposición, especialmente estiércol, para calentar los invernaderos y estructuras frías, incidentalmente proporciona CO₂ suplementario (Haberle *et al.*, 1986). La materia orgánica liberará 1.4 veces su peso en CO₂ (Hanan *et al.*, 1986). Aunque estos

materiales son baratos y están relativamente disponibles, rara vez son empleados en las instalaciones modernas de vivero, debido a los problemas sanitarios y de eliminación que representan. Otra seria desventaja es la imposibilidad para controlar la tasa de descomposición, y por tanto la concentración de CO₂ en el invernadero. No obstante, el potencial ha sido demostrado para viveros forestales, pues las plantas de *Abies concolor* (Gold & Glend.) Lindl. ex Hildbr. sobre un mulch de materia orgánica, resultaron significativamente más altas que las plantas testigo (Montano *et al.*, 1977). Hicklenton (1988) proporciona una buena discusión de las posibles aplicaciones para el suplemento de CO₂ a través de la descomposición controlada.

En los viveros forestales modernos que producen en contenedores, se tienen dos opciones realistas para suplementar CO₂: inyección de CO₂ puro, y combustión de combustibles de carbón.

Dióxido de carbono puro. El método más seguro para suplementar CO₂ en los invernaderos, es inyectarlo puro desde tanques, en su estado líquido presurizado (Hicklenton, 1988). El gas presurizado es distribuido a lo largo del invernadero mediante tubería perforada. Hanan *et al.* (1989) estimaron un uso promedio de CO₂ de 10 a 26 Kg/m² (2 a 5 libras por pie cuadrado) de espacio de invernadero para cultivos de flores. Aunque efectivo, la mayor desventaja de este método es lo caro que resulta. Sin embargo, en años recientes los elevados costos y el futuro incierto de los combustibles fósiles, han hecho a la opción del CO₂ puro más atractiva desde un punto de vista económico (Nelson, 1985).

Combustión de combustibles de carbón. La combustión completa de cualquier compuesto con carbono producirá CO₂. El keroseno fue el primer combustible que fue usado en invernaderos para la generación de CO₂, aunque su costo y problemas relacionados con la fitotoxicidad del dióxido de azufre que también produce, le han hecho impopular en muchas partes del mundo. El propano y el gas

natural, comúnmente son utilizados en invernaderos comerciales, y la diferencia está relacionada primariamente con costo y disponibilidad. Ambas fuentes son lo suficientemente puras, de modo que son consideradas generalmente la fuente más económica para la generación de CO₂.

Los generadores de dióxido de carbono que queman propano o gas natural están disponibles comercialmente (Fig. 3.4.7). La tasa de producción de CO₂ está controlada por la modulación del quemador, y aproximadamente 15 quemadores por hectárea (66 por acre) deberían generar 1,000 ppm de CO₂ en un invernadero bien sellado. El consumo de gas de estos generadores es muy bajo, de 2 m³/h (70 pies cúbicos por hora) (Hicklenton, 1988). La combustión completa del gas natural y del propano, requiere de una oxigenación adecuada, y produce CO₂ y agua; el propano produce proporcionalmente menos agua que el gas natural (Sheldrake, 1964). El quemador agrega una cantidad considerable de calor; de 4,000 a 5,000 Kcal/Kg (8,000 a 10,000 Btu por libra) de combustible, dependiendo del tipo de combustibles y de la eficiencia del quemador. Si el calor excesivo representa un problema, los quemadores pueden ser localizados en el exterior del invernadero, y el gas puede ser bombeado hacia el interior.

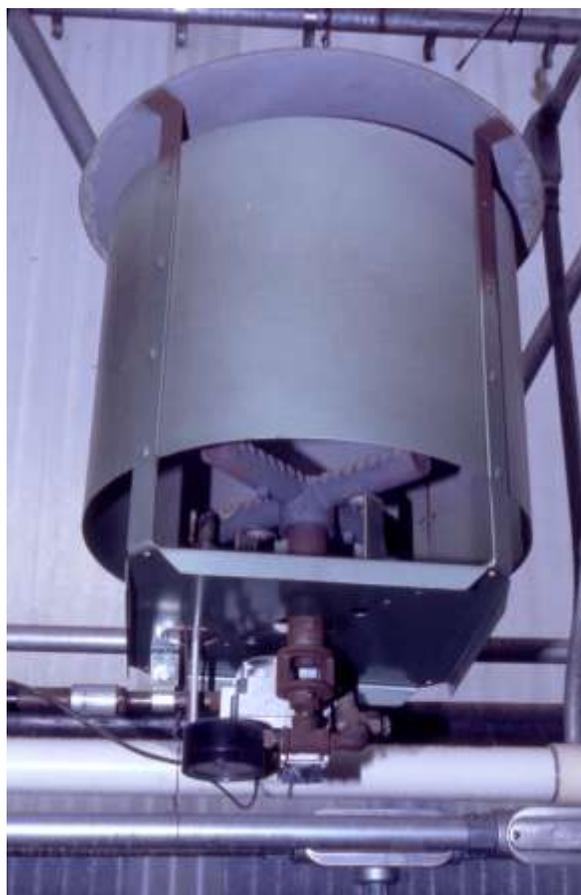
La principal desventaja de estos generadores de CO₂ son las fugas o la combustión incompleta, que pueden liberar gases fitotóxicos hacia dentro del invernadero. El propano, que contiene una cantidad significativa de propileno, representa más de un problema, porque el propileno es capaz de producir un daño similar al del etileno (Abeles, 1973). El gas natural es principalmente una mezcla de metano, etano y propano, pero éste también puede contener contaminantes potencialmente peligrosos, como el sulfuro de hidrógeno, el propileno y el etileno, pero a niveles que generalmente son muy bajos para causar problemas. La flama de quema debería siempre ser ajustada a un color azul; las trazas de color amarillo indican combustión incompleta, que puede liberar gases tóxicos al ambiente del invernadero (Hicklenton, 1988).

El monóxido de carbono es peligroso para el ser humano y para las plantas, y el etileno es una potente hormona en las plantas que promueve la dormancia y la abscisión de la hoja (Abeles, 1973).

El tubo de escape de gases de los sistemas de calentamiento en los invernaderos, que usan propano o gas natural, es otra fuente potencial de CO₂, pero éstos solamente están disponibles cuando los sistemas de calentamiento son requeridos. El gas de chimeneas de industrias o plantas generadoras de electricidad, también contiene CO₂ de desecho, así como las fábricas de fertilizantes, y algunas plantas procesadoras de alimentos. Lo prácticas que sean estas fuentes depende de la localización del invernadero. El mayor beneficio es que éstas son esencialmente gratuitas, y hay también el potencial para la utilización del calor de desecho de la fuente. Los gases de desecho representan los mismos problemas potenciales que el propano o el gas natural, y la combustión incompleta es más común y más difícil de detectar que con las flamas de los generadores de CO₂, fácilmente visibles (Hicklenton, 1988).

Diseñando un sistema de enriquecimiento de dióxido de carbono. Sólo es práctico suplementar CO₂ en invernaderos bien sellados. Aunque piense que el polietileno es permeable al CO₂, los invernaderos cubiertos con una película de polietileno son muy herméticos, en comparación con las estructuras de vidrio o de fibra de vidrio.

Calculando los requerimientos de dióxido de carbono. La cantidad de CO₂ a suplementar, depende de la cantidad usada per el cultivo, más las fugas del invernadero. Cálculos específicos para determinar el tamaño apropiado de un generador, para un tamaño y tipo dados de invernadero, pueden ser consultados en Aldrich y Bartok (1989), pero el Cuadro 3.4.3 proporciona un ejemplo típico. Los cálculos para el uso de combustible y la cantidad de calor generada, también son descritos en la misma referencia.



A



B



C

Figura 3.4.7 los generadores de dióxido de carbono queman propano o gas natural y producen calor y vapor de agua además del CO₂ (A). Algunos modelos (B) contienen ventiladores para incrementar la distribución de CO₂ en el invernadero. Si el generador por sí mismo no puede tener un ventilador, resulta benéfica la operación de un sistema de circulación de aire, como un ventilador a propulsión (C).

Distribución dentro del invernadero. Una vez que el generador de CO₂ ha sido instalado, es necesario mezclar el gas con el aire del invernadero para proporcionar una concentración uniforme a nivel del cultivo. Esto no debería ser un problema durante los días fríos, cuando los sistemas de calentamiento crean corrientes convectivas normales, pero Hicklenton (1988) refiere que los niveles de CO₂ son típicamente mayores en la vecindad inmediata del generador. Los generadores de dióxido de carbono deberían ser montados teniendo en mente la circulación del aire, y la seguridad ante posibles incendios (Fig. 3.4.7C). Algunas marcas contienen ventiladores para asegurar que el CO₂ sea distribuido horizontalmente a través del invernadero (Fig. 3.4.7B). Los sistemas verticales especiales de ventiladores, pueden ser usados para movilizar el CO₂ hacia abajo, a nivel del cultivo.

Si el CO₂ puro es inyectado de una fuente puntual, éste debe ser distribuido a través del invernadero. Algunos viveristas utilizan ventiladores para provocar un flujo horizontal; otros distribuyen el gas presurizado a través de una tubería finamente instalada a lo largo del invernadero, al ras del cultivo. Hicklenton (1988) discute algunas aplicaciones comunes del inyectado de CO₂ puro en invernaderos hortícolas.

Problemas potenciales con los sistemas de combustión. A causa de un mal diseño o un mal mantenimiento en los quemadores de CO₂, varios gases peligrosos pueden ser producidos (Cuadro 3.4.4).

Ciertos compuestos, como el monóxido de carbono y el etileno, son producidos por la combustión incompleta (Scarrat, 1985). Los dióxidos de azufre resultan de la quema de combustibles con elevadas cantidades de azufre. Los siguientes combustibles fueron sugeridos para la generación de CO₂, por su bajo contenido de azufre (Kretchman y Howlett, 1970): propano, 0.01% de azufre; gas natural, 0.02% de azufre; y keroseno, 0.02% de azufre.

Una buena forma de asegurar la combustión completa, es proporcionar una fuente directa de aire exterior al quemador. Una entrada de aire de 1 cm por cada 80 Kcal (1 pulgada cuadrada por cada 2,000 Btu) de capacidad del quemador, debería proporcionar suficiente aire para una combustión completa. El quemador debería ser ajustado apropiadamente. Si la flama es amarilla, y especialmente si ésta es humeante, puede producir productos dañinos de la combustión parcial; si la flama es corta y muy turbulenta, algún gas está escapando al invernadero sin ser quemado. Para una mayor discusión sobre los contaminantes generados en la combustión, que pueden ser producidos por generadores de CO₂, ver Hicklenton (1988) y Hand (1906).

Cuadro 3.4.3 Cálculos para el diseño de un sistema de enriquecimiento de CO₂ para invernaderos.

Supuestos:	
Capa doble de polietileno como cubierta de invernadero (Largo x Ancho x Alto)	= 58.5m X 29.2m X 2.7m (192 ft X 96 ft X 9 ft) =
Fugas de aire	= 0.5 cambios de aire por hora
Nivel de CO ₂ objetivo	= 300 ppm
Tasa de uso de las plantas	= 0.0009 m de CO ₂ por hora por m ² de cultivo (0.003 ft ² de CO ₂ /h/ft ²)
Paso 1. Determine el uso de las plantas en el invernadero	
Uso por plantas = tasa de uso por plantas x área de invernadero	
Uso por plantas = 0.0009 m ³ /h/m ² X 1,708 m ²	
Uso por plantas = 1.5m ³ de CO ₂ /h (55 ft ³ de CO ₂ /h)	
Paso 2. Determine la pérdida por fuga del invernadero	
Pérdida = volumen del invernadero X cambios de aire por hora X 0.000001 X (nivel objetivo de CO ₂ - nivel ambiente)	
Pérdida = 4,610 m ³ X 0.5 X 0.0000001 X 700	
Pérdida = 1.6 m ³ de CO ₂ /h (58 ft ³ de CO ₂ /h)	
Paso 3. Calcule el requerimiento de CO₂	
Requerimiento de CO ₂ = Uso de la planta + pérdida por fuga	
Requerimiento de CO ₂ = 1.5 m ³ de CO ₂ /h + 1.6 m ³ de CO ₂ /h	
Requerimiento de CO ₂ = 3.1 m ³ de CO ₂ /h (113 ft ³ de CO ₂ /h)	

Fuente: Aldrich y Bartok (1989)

Cuadro 3.4.4 Contaminantes químicos producidos por la generación de dióxido de carbono.

Contaminante (símbolo químico)	Máxima concentración permitida (ppm)
Monóxido de carbono (CO)	500
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	20
Amonio (NH ₃)	10
Formaldehido (NCHD)	0.7
Dióxido de Azufre (SO ₂)	0.2
Ozono (O ₃)	0.2
Etileno (C ₂ H ₄)	0.05

Compilado de varias fuentes

3.4.5 Sistemas Monitoreo y Control de Dióxido de Carbono

3.4.5.1 Midiendo los niveles de dióxido de carbono

Una vez que los generadores han sido ajustados para producir los niveles deseados, en la mayor parte de los viveros no se monitorean los niveles de CO₂ continuamente, aunque se verifican ocasionalmente. Unos pequeños monitores que son bombas de CO₂ manuales, con una exactitud razonable, están disponibles por alrededor de U.S. \$200; el aire es bombeado a través de un tubo de vidrio que contiene un producto químico sensible al CO₂, y que cambia de color cuando el aire es empujado a través de éste (Pallas, 1986) (Fig. 3.4.8A).

Un monitor más sofisticado y caro (U.S. \$1,400), el analizador infrarrojo de gas es popular a causa de su precisión y exactitud (Fig. 3.4.8B). Estos analizadores pueden medir el CO₂ continuamente, y pueden conectarse directamente con un sistema computarizado ambiental (Fallas, 1986). Los viveros que no tiene analizadores infrarrojos de gas, deben ser capaces de obtener muestras para ser probadas en alguna universidad o estación de investigación agrícola cercanas. Las muestras pueden ser tomadas mediante el llenado de una cámara limpia con aire del invernadero, usando una bomba para inflado de llantas de bicicleta para el efecto. El butil de caucho es altamente impermeable al CO₂, y tales muestras deberían permanecer en buena condición durante días. No use bolsas de plástico, a menos que las muestras puedan ser analizadas en cuestión de minutos. Esté seguro de que no se mezclen las exhalaciones de la respiración con la muestra.





B
Figura 3.4.8 Probadores de CO₂ tipo bomba manual (A), operados mediante el forzado de aire a través de un tubo de vidrio que está lleno de reactivos químicos. La concentración de CO₂ es medida por la magnitud del cambio de color bajo el tubo. Analizadores infrarrojos de gas, más sofisticados y caros, monitorean con precisión los niveles de CO₂ y proporcionan una retroalimentación constante a los generadores (B).

3.4.5.2 Sistemas de control de dióxido de carbono

Un sistema de control de CO₂ simple y barato, usa una fotocelda o un reloj que se conecta con el termostato que controla la primera etapa de enfriamiento. El generador se prende al amanecer, o aproximadamente una hora antes de éste, promoviendo la concentración de CO₂ dentro del intervalo óptimo al momento de la apertura estomatal y la fotosíntesis comienza. El generador se mantiene prendido hasta que se requiere el enfriamiento. Cuando las ventilas abren y los ventiladores se prenden, los elevados niveles de CO₂ no pueden ser mantenidos más, y el termostato apaga el generador. El sistema puede ser activado de nuevo por la tarde, cuando la ventilación para enfriamiento cesa. Normalmente, el reloj

puede apagar el generador aproximadamente media hora antes del ocaso.

Con estos sistemas, el generador puede estar prendido todo el día en el invierno; pero durante las estaciones cálidas, usualmente es posible aumentar el nivel de CO₂ solamente por unas pocas horas, temprano en la mañana y de nuevo en la tarde. Este periodo relativamente corto con CO₂ suplementario aún resulta efectivo, porque los estomas típicamente se cierran durante el medio día, a causa de la tensión hídrica normal, aunque las plantas estén bien hidratadas. Bajo tales condiciones, la fotosíntesis es más rápida temprano en la mañana, y alcanza un pico secundario avanzada la tarde. En adición, el CO₂ extra mantendrá a los estomas parcialmente cerrados, lo que retrasará la tensión hídrica de medio día, y quizá prevenga la baja en la fotosíntesis (Pettibone *et al.*, 1970).

La mejor manera de controlar la concentración de CO₂, es mediante el uso de un sistema automático de retroalimentación, que mida continuamente la concentración de CO₂ y lo agregue cuando sea necesario. Muchos sistemas de control microcomputarizados, usan analizadores infrarrojos de gas, y un sistema de válvulas selenoides para regular la concentración de CO₂ en el invernadero dentro de las 100 ppm. Estos sistemas son caros (U.S. \$3,000 a 10,000), pero los modelos nuevos son durables y tienen un récord probado en invernaderos operativos. Pallas (1986) y Hicklenton (1988) proporcionan una revisión excelente de las mediciones y sistemas de control de CO₂ así como de los proveedores.

3.2.6 Conclusiones y Recomendaciones

El dióxido de carbono, comúnmente es el mayor factor limitativo para la fotosíntesis en el ambiente natural, y esta situación es exacerbada en los invernaderos, donde la circulación de aire se restringe, especialmente en tiempo frío, cuando las ventilas están cerradas. Aunque los niveles de CO₂ normalmente no son manejados en la mayor parte de los viveros forestales que producen en contenedores, numerosas investigaciones han demostrado los beneficios de hacerlo.

Los viveristas pueden asegurar que sus cultivos tengan suficiente CO₂ en dos formas: primero, promoviendo una adecuada ventilación durante los periodos en que la fotosíntesis es mayor, y segundo, proporcionándolo directamente. Los invernaderos totalmente controlados deberían proporcionar niveles de CO₂ de 1,000 ppm, y aún los viveristas con estructuras de cultivo semicontroladas, pueden aumentar la fotosíntesis y el crecimiento mediante la promoción de un buen intercambio de aire durante el tiempo frío, especialmente durante las horas de la mañana. Los viveros que tienen cultivos durante los meses de invierno, están particularmente bien adaptados para la suplementación de CO₂, especialmente a elevadas latitudes, donde el alumbrado fotosintético complementario es también empleado.

Se ha demostrado que el enriquecimiento con dióxido de carbono incrementa la tasa de crecimiento de muchas plántulas de especies forestales, pero la variación entre especies es de esperarse. El aumento de los niveles de CO₂ dará los mejores resultados temprano en la estación de crecimiento, y puede resultar aún útil durante la fase de establecimiento. Debido a que puede inhibir la dormancia y la rusticidad al frío, la suplementación con CO₂ debería ser cesada al comienzo de la fase de endurecimiento. Las elevadas tasas de crecimiento de las plántulas que se experimentan, originarán un aumento en la demanda de nutrimentos minerales y agua, así que los viveristas deben ajustar sus programas de fertilización y de riego cuando se utiliza CO₂ suplementario.

Del mismo modo, los árboles cultivados bajo elevados niveles de CO₂ pueden tolerar mayores temperaturas, y beneficiarse de elevadas intensidades luminosas. Pueden esperarse rotaciones de cultivo cortas.

Lo práctico y la economía del enriquecimiento con CO₂ deben ser calculados para cada vivero individual que produce en contenedores, pero considerando que los costos anuales de operación son de solamente U.S. \$1 a U.S. \$2 por m² (U.S. \$0.10 a U.S. \$0.15 por ft²), más viveristas deberían considerar esta práctica de cultivo (Freeman, 1985).

3.2.7 Literatura Citada

- Abeles, F.B. 1973. Ethylene in plant biology. New York: Academic Press. 302 p.
- Aldrich, R.A.; Bartok, J.W. Jr. 1989. Greenhouse engineering. Publ. NRAES-33. Ithaca, NY: Cornell University, Northeast Regional Agricultural Engineering Service. 203 p.
- Bauerle, W. L.; Kretchman, D.; Tucker-Kelly, L. 1986. CO₂ enrichment in the U.S. In: Enoch, H.Z.; Kimball, B.A., eds. Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops, vol. 1, status and CO₂ sources. Boca Raton, FL: CRC Press: 49-57.
- Blackman, F.F. 1905. Optima and limiting factors. *Annals of Botany* 19:281.
- Brown, K.; Higginbotham, K.O. 1986. Effects of carbon dioxide enrichment and nitrogen supply on growth of boreal tree seedlings. *Tree Physiology* 2(1-3):223-232.
- Campagna, M.A.; Margolis, H. A. 1989. Influence of short-term atmospheric CO₂ enrichment on growth, allocation patterns, and biochemistry of black spruce seedlings at different stages of development. *Canadian Journal of Forest Research* 19(6):773-782).
- Chang, J. 1968. Climate and agriculture: an ecological survey. Chicago: Aldine Publishing Co. 304 p.
- Conroy, J.; Barloes, E.W.R.; Bevege, D.I. 1986. Response of *Pinus radiata* seedlings to carbon dioxide enrichment at different levels of water and phosphorus: growth, morphology and anatomy. *Annals of Botany* 57:165-177.
- Freeman, R. 1985. The importance of carbon dioxide. In: Ball, V., ed. Ball Red Book, 14th ed. Reston, VA: Reston Publishing Company; 181-193.
- Gaastera, P. 1963. Climatic control of photosynthesis and respiration. In: Evans, L.T., ed. Environmental control of plant growth. New York: Academic Press: 113-140.
- Hanan, J.J.; Holley, W.D.; Goldsberry, K. L. 1978. Greenhouse management. Berlin: Springer-Verlag. 530 p.
- Hand, D.W. 1986. CO₂ sources and problems in burning hydrocarbon fuels for CO₂ enrichment. In: Enoch, H.Z.; Kimball, B.A., eds. 1986. Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops, Vol 1, status and CO₂ sources. Boca Raton, FL: CRC Press: 99- 121.
- 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.
- Hicklenton, P.R. 1988. CO₂ enrichment in the greenhouse: principles and practice. Portland, OR: Timber Press. 58 p.
- Higginbotham, K.O.; Mayo, J.M.; L'Hirondelle, S.; Krystofiak, D.K. 1985. Physiological ecology of lodgepole pine (*Pinus contorta*) in an enriched CO₂ environment. *Canadian Journal of Forest Research* 15:417-421.
- Holley, W.D. 1965. The CO₂ story. In; Ball Red Book, 11th ed. West Chicago, IL: George J. Ball, Inc.: 94-119.
- Kramer, P.J.; Kozlowski, T.T. 1979. Physiology of woody plants. New York: Academic Press. 811 p.
- Kretchman, D.W., Howlett, R.S., 1970. CO₂ enrichment for vegetables. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 13(2):252-256.
- Ludlow, M.M.; Jarvis, P.G. 1971. Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). I. General Characteristics. *Journal of Applied Ecology* 8:925-953.
- Luxmoore, R.J.; O'Neill, E.G.; Ells, J.M.; Rogers, H.H. 1986. Nutrient uptake and growth responses of Virginia pine to elevated atmospheric carbon dioxide. *Journal of Environmental Quality* 15(3):244-251.

- Margolis, H.A.; Vezina, L. 1990. Atmospheric CO₂ enrichment and the development of frost hardiness in containerized black spruce seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 20(9):1392- 1398.
- Montano, J.M.; Fisher, J.T.; Cotter, D.J. 1977. Sawdust for growing containerized forest tree seedlings. *Tree Planter's Notes* 28(2):6-9.
- Mousseau, M.; Enoch, H.Z. 1989. Carbon dioxide enrichment reduces shoot growth in sweet chestnut seedlings (*Castanea sativa* Mill.). *Plant, Cell and Environment* 12(9):927-934.
- Nelson, P.V. 1985. *Greenhouse operation and management*, 3rd. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 598 p.
- Pallas, J.E., Jr. 1986. CO₂ measurement and control. In: Enoch, H.Z.; Kimball, B.A., eds. *Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops*, vol. 1, status and CO₂ sources. Boca Raton, FL: CRC Press: 77-98.
- Pearcy, R.W.; Bjorman, O.; Caldwell, M.M.; Keeley, J.E.; Monson, R.K.; Strain, B.R., 1987. Carbon gain by plants in natural environments: carbon assimilation analysis provides an understanding of how plants function in diverse environments. *BioScience* 37(1):21-29.
- Pettibone, C.A.; Matson, W.R.; Pfeiffer, C.L.; *et al.* 1970. The control and effects of supplemental CO₂ in air-supported plastic greenhouses. *Transactions of American Society of Agricultural-Engineers* 13(2):259-62,268.
- Scarratt, J.B. 1985. Greenhouse managers: beware combustion fumes in container greenhouses. *Forestry Chronicle* 61 (4):308-311.
- Sheldrake, R. 1964. CO₂ and ventilation. *American Vegetable Grower* 12:30.
- Sionit, N.; Kramer, P.J. 1986. Woody plant reactions to CO₂ enrichment. In: Enoch, H.Z.; Kimball, B.A., eds. *Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops*. vol. 2., physiology, yield, and economics. Boca Raton, FL: CRC Press: 69-85.
- Surano, K.A.; Daley, P.F.; Houppis, J.L.J.; Shinn, J.H.; Helms, J.A.; Palassou, R.J.; Costella, M.P. 1986. Growth and physiological responses of *Pinus ponderosa* Dougl. ex P. Lawes. to long-term elevated CO₂ concentrations. *Tree Physiology* 2(1-3): 243-259.
- Tinus, R.W. 1972. Carbon dioxide enriched atmosphere speeds growth of ponderosa pine and blue spruce seedlings. *Tree Planter's Notes* 23(1):12-15.
- Tinus, R.W. 1975. Impact of the CO₂ requirement on plant water use. Stone, J.F., ed. *Plant modification for more efficient water use*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing. 320 p.
- Tinus, R.W. 1976. Photoperiod and atmosphere CO₂ interact to control black walnut (*Juglans nigra* L.) seedling growth. *Plant Physiology* 57(5) (Suppl.): Abstr. 554.
- Tolley, L.C. 1982. The effects of atmospheric carbon dioxide enrichment, irradiance, and water stress on seedling growth and physiology of *Liquidambar styraciflua* and *Pinus taeda* PhD dissertation. Durham, NC: Duke University.
- Tolley, L.C.; Strain, B.R., 1984. Effects of CO₂ enrichment on growth of *Liquidambar styraciflua* and *Pinus taeda* seedlings under different irradiance levels. *Canadian Journal of Forestry Research* 14:343-350.
- Yeatman, C.W. 1970. CO₂ enriched air increased growth of conifer seedlings. *Forestry Chronicle* 46-229-230.

Apéndice

Cuadro A.1. Factores de conversión para un intervalo de temperaturas típicas en viveros que producen en contenedores (Grados Celsius a Grados Fahrenheit).

Celsius a Farenheit (°C X 9/5) + 32 = °F							
°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F
100	212	64	147	28	82	-8	18
98	208	62	144	26	79	-10	14
96	205	60	140	24	75	-12	10
94	201	58	136	22	72	-14	7
92	198	56	133	20	68	-16	3
90	194	54	129	18	64	-18	0
88	190	52	126	16	61	-20	-4
86	187	50	122	14	57	-22	-8
84	183	48	118	12	54	-24	-11
82	180	46	115	10	50	-26	-15
80	176	44	111	8	46	-28	-18
78	172	42	108	6	43	-30	-22
76	169	40	104	4	39	-32	-26
74	165	38	100	2	36	-34	-29
72	162	36	97	0	32	-36	-33
70	158	34	93	-2	28	-38	-36
68	154	32	90	-4	25	-40	-40
66	151	30	86	-6	21	-26	-15

Cuadro A.2. Factores de conversión para un intervalo de temperaturas típicas en viveros que producen en contenedores (Grados Fahrenheit a Grados Celsius).

Farenheit a Celsius (°F - 32) X 5/9 = °C							
°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C
212	100	148	64	84	29	20	-7
210	99	146	63	82	28	18	-8
208	98	144	62	80	27	16	-9
206	97	142	61	78	26	14	-10
204	96	140	60	76	24	12	-11
202	94	138	59	74	23	10	-12
200	93	136	58	72	22	8	-13
198	92	134	57	70	21	6	-14
196	91	132	56	68	20	4	-16
194	90	130	54	66	19	2	-17
192	89	128	53	64	18	0	-18
190	88	126	52	62	17	-2	-19
188	87	124	51	60	16	-4	-20
186	86	122	50	58	14	-6	-21
184	84	120	49	56	13	-8	-22
182	83	118	48	54	12	-10	-23
180	82	116	47	52	11	-12	-24
178	81	114	46	50	10	-14	-26
176	80	112	44	48	9	-16	-27
174	79	110	43	46	8	-18	-28
172	78	108	42	44	7	-20	-29

170	77	106	41	42	6	-22	-30
168	76	104	40	40	4	-24	-31
166	74	102	39	38	3	-26	-32
164	73	100	38	36	2	-28	-33
162	72	98	37	34	1	-30	-34
160	71	96	36	32	0	-32	-36
158	70	94	34	30	-1	-34	-37
156	69	92	33	28	-2	-36	-38
154	68	90	32	26	-3	-38	-39
152	67	88	31	24	-4	-40	-40
150	66	86	30	22	-6		