

# Las plantas tropicales y el aumento del dióxido de carbono en la atmósfera

*Klaus Winter*



El Dr. K. Winter midiendo el flujo de CO<sub>2</sub> de una planta de teca en una cámara de vidrio

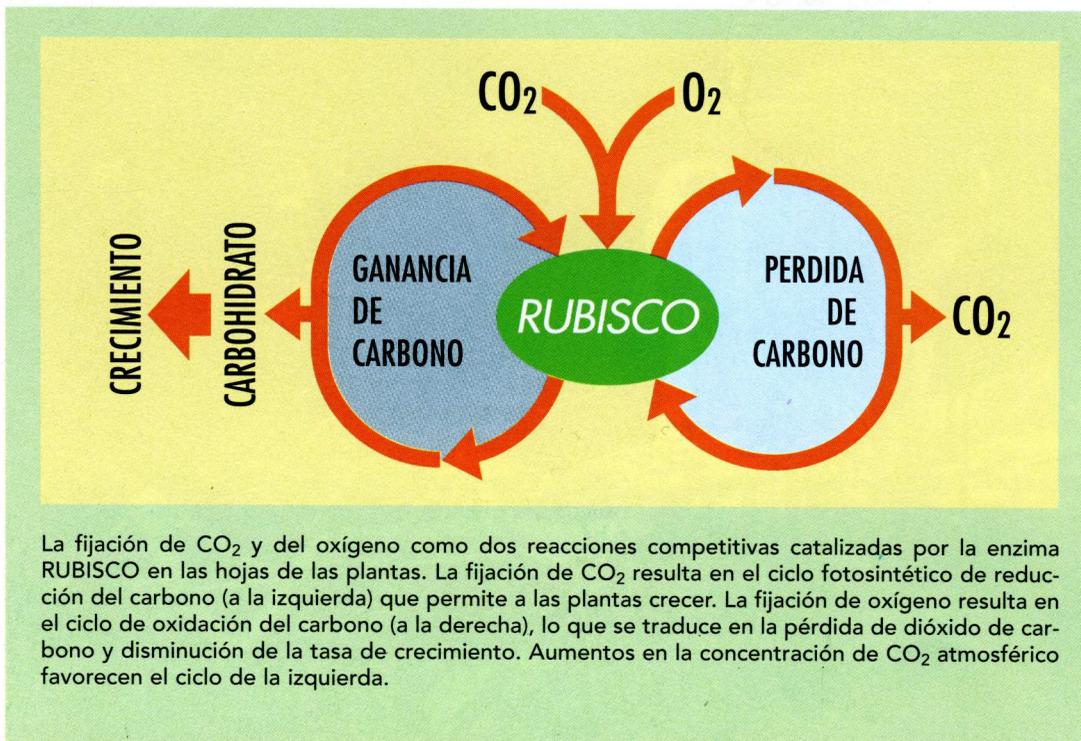
Desde mediados del siglo XIX, los cambios producidos por la Revolución Industrial trajeron un aumento en las concentraciones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera. El creciente consumo de combustibles fósiles, como el carbón y el petróleo, y una mayor deforestación, han incrementado la presencia del dióxido de carbono de 290 partes por millón (ppm) en el siglo XIX a unas 360 ppm actualmente (360 ppm equivale a 0.00036 litros o 360 microlitros de  $\text{CO}_2$  puro en 1 litro de aire). Sólo en los últimos cuarenta años, las concentraciones globales de  $\text{CO}_2$  han aumentado en unos 45 ppm. De continuar esta tendencia es posible que para finales del siglo XXI el  $\text{CO}_2$  sobrepase las 550 partes por millón.

### ¿Por qué es importante el $\text{CO}_2$ para las plantas?

A los seres humanos no nos afecta directamente que aumente el  $\text{CO}_2$ , pero sí nos preocupa el denominado calentamiento global, que es el resultado de mayores concentraciones de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera. Contrariamente, a las plantas sí les afecta directamente una mayor presencia de  $\text{CO}_2$ .

Utilizando energía solar, las plantas verdes tienen la capacidad de tomar el dióxido de carbono de la atmósfera, convirtién-

dolo en materia orgánica, como carbohidratos y celulosa. Este proceso, denominado fotosíntesis, es el que permite a las plantas crecer. El catalizador bioquímico o sustancia clave, que les permite fijar  $\text{CO}_2$ , es una proteína con un nombre complicadísimo: Ribulosa Bifosfato Carboxilasa Oxigenasa, RUBISCO, en breve. Esta proteína tiene dos propiedades claves que nos ayudan a comprender cómo responden las plantas a incrementos en el  $\text{CO}_2$ . Primero, RUBISCO es un catalizador “perezoso”, es decir, en el lenguaje de los bioquímicos, que tiene una baja actividad específica. Debido a su ineficiencia, las plantas necesitan mucho RUBISCO para realizar su fotosíntesis. Por tanto, no es sorprendente que este catalizador sea la proteína más abundante en la tierra: ¡hay más de 10 kilogramos de ella por cada persona en el planeta! Segundo, RUBISCO es un catalizador “promiscuo”, que utiliza tanto al dióxido de carbono como al oxígeno (ver figura abajo). El  $\text{CO}_2$  y el oxígeno compiten, desencadenando dos ciclos bioquímicos distintos aunque relacionados. En la figura, abajo, vemos a la izquierda el ciclo de carboxilación, que promueve el incremento del carbono y el crecimiento de las plantas. A la derecha está el ciclo de oxigenación, que causa la pérdida de algo de dióxido de carbono, disminuyendo la productividad de la planta. Cualquier cambio



en la proporción de dióxido de carbono y de oxígeno en la atmósfera afecta la frecuencia de ambos ciclos. De aumentar el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera, este favorecerá el ciclo de carboxilación, estimulando el crecimiento de las plantas.

### Las tres vías de la fotosíntesis

Las consideraciones hechas arriba se refieren a plantas que según los fisiólogos poseen la vía fotosintética del C3, es decir, la forma en que la mayoría de las especies, incluyendo todos los árboles tropicales (con excepción de ciertas especies de *Clusia*, como el árbol de Copé), adquieren el CO<sub>2</sub>. No incluye a plantas con las otras dos vías fotosintéticas alternas, las cuales son: la fotosíntesis C4 usada por las gramíneas tropicales, y el metabolismo de ácido crasuláceo (CAM) empleado por los cactus, muchas orquídeas y bromelias tropicales. La fotosíntesis C4 y CAM aumentan la concentración del CO<sub>2</sub> dentro de las hojas y alrededor de la proteína RUBISCO, suprimiendo el ciclo de oxigenación. Como consecuencia, las plantas con fotosíntesis

C4 y CAM responden menos a incrementos en el CO<sub>2</sub> atmosférico que las plantas C3.

### Aumentos del CO<sub>2</sub> y los bosques tropicales. Algunas preguntas claves

Cientos de estudios científicos se han enfocado en investigar las respuestas de las plantas de zonas templadas del norte a mayores niveles de CO<sub>2</sub> y es común que los horticultores comerciales de países templados estimulen el desarrollo de las plantas en los invernaderos, aumentando artificialmente las concentraciones de CO<sub>2</sub> como también dotándolas de cantidades óptimas de agua y nutrientes. Sin embargo, poco sabemos acerca de cómo reaccionarán las plantas silvestres a cambios en el CO<sub>2</sub> en su ambiente natural, donde la disponibilidad de agua y nutrientes también son factores importantes en su crecimiento.

Es limitado nuestro conocimiento sobre cómo el incremento de CO<sub>2</sub> afecta a los bosques tropicales, que representan casi 60% de la vegetación boscosa del mundo.

Cámaras en forma de túnel con filme plástico transparente para estudiar el crecimiento de plantas en el sotobosque de isla Barro Colorado en concentraciones de CO<sub>2</sub> actuales y elevadas.





Los Dres. Virgo y Lovelock en la góndola de la grúa del Parque Natural Metropolitano. Al lado de la góndola están dos cámaras, una con CO<sub>2</sub> elevado y la otra con CO<sub>2</sub> bajo condiciones corrientes.

Entre las preguntas que nos hacemos están: ¿Aumentarán en el futuro los bosques tropicales su biomasa, aérea y subterránea, por unidad de área? ¿Madurarán más rápido los árboles tropicales? ¿Serán más altos? ¿Será posible que al incrementar los árboles su asimilación mitigue el alza en el CO<sub>2</sub> atmosférico? ¿Responderán algunas especies mejor que otras? ¿Habrá ganadores y perdedores entre ellas? ¿Cambiará la composición de las especies de plantas del bosque tropical?

### Métodos para aumentar el CO<sub>2</sub>

Para responder a estas interrogantes debemos aumentar experimentalmente la concentración de CO<sub>2</sub> en torno a las plantas. Una manera de hacerlo a gran escala es mediante los llamados sistemas FACE. En inglés, FACE son las siglas de Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment, que traducido al español sería Enriquecimiento del CO<sub>2</sub> en el Aire Libre. Estos sistemas consisten típicamente de terrenos de 30 metros de diámetro, que se rodean con tubos verticales de hasta 15 metros de alto, a través de los cuales se libera el dióxido de carbono que el viento distribuye sobre la parcela experimental. Una computadora controla la tasa de liberación del CO<sub>2</sub>, considerando la velocidad y dirección del viento. Una instalación completa del sistema FACE consiste de varios anillos. Por ejemplo: tres de ellos elevan el dióxido de carbono y otros tres, de control, lo liberan en concentraciones actuales. En el presente no hay estu-

dios con estos sistemas en el trópico. El STRI conjuntamente con la Universidad de McGill, Canadá, el Laboratorio Nacional de Brookhaven, y la participación de universidades de Estados Unidos y Panamá, están tratando de instalar un sistema de anillos FACE en Sardinilla, Panamá. Pero debemos aguardar un tiempo hasta que este sistema esté listo y se inicien las investigaciones.

A continuación explicaré brevemente algunos resultados de experimentos utilizando sistemas experimentales a menor escala para cultivar plantas bajo condiciones altas de dióxido de carbono. En uno de estos estudios en Barro Colorado hemos utilizado cámaras plásticas alargadas, como si fueran un túnel, para investigar las respuestas al CO<sub>2</sub> elevado de las plantas del sotobosque que crecen bajo condiciones de poca luz. En otro proyecto utilizamos una de las dos grúas del STRI para estudiar cómo responden las ramas de los árboles de gran tamaño a condiciones altas de CO<sub>2</sub>, usando cámaras plásticas en forma de anillo con su techo abierto.

La mayoría de los estudios se hicieron en ocho cámaras de techo abierto (*open topped chambers*) en un claro del bosque del Parque Natural Metropolitano. Estas cámaras consisten de marcos de aluminio cubiertos de un plástico transparente con techo descubierto. Las cámaras eran ventiladas continuamente. En cuatro de las ocho cámaras, la concentración de CO<sub>2</sub> se elevó



Cámaras de techo abierto, en un claro del bosque en el Parque Natural Metropolitano, para estudiar el desarrollo de pequeñas comunidades de árboles en concentraciones de CO<sub>2</sub> actuales y elevadas (2 veces la concentración actual). La foto muestra un experimento con una mezcla de plantitas de *Ficus insipida*, una especie pionera, y *Virola surinamensis*, más característica de bosques maduros. Izquierda: CO<sub>2</sub> actual; derecha: CO<sub>2</sub> elevado.

dos veces sobre los niveles actuales, añadiendo CO<sub>2</sub> puro a la corriente de ventilación: Las otras cuatro cámaras sirvieron como controles; las concentraciones de CO<sub>2</sub> se mantuvieron en niveles ambientales corrientes.

#### Algunos resultados de estudios en el Parque Natural Metropolitano

Como un primer paso para aprender más sobre las posibles respuestas de los bosques tropicales a una mayor presencia del dióxido de carbono, estudiamos en estas cámaras a unas “mini” comunidades de plantitas y árboles pequeños. Al inicio de uno de los experimentos, se sembraron en el suelo natural una mezcla de plantitas de varias especies. Después de cuatro a siete meses, cuando las plantas alcanzaron unos 2 metros de alto, concluyeron los experimentos. Sus ramas, hojas y raíces se cosecharon y pesaron para determinar su biomasa. Asimismo, se estudió la superficie de las hojas, pues a mayor la superficie del área foliar, mayor su capacidad de asimilar dióxido de carbono.



Plántulas de diez especies plantadas en suelo natural, en una de las ocho cámaras de techo abierto en el Parque Natural Metropolitano, al inicio del experimento.

## Biomasa y fotosíntesis

La Tabla 1 contiene los resultados de tres experimentos consecutivos mostrando la acumulación de biomasa en las plantas bajo condiciones de CO<sub>2</sub> actuales y elevadas. En el experimento (I) las plantas se cultivaron en el suelo del sitio, pobre en nutrientes, compactado y mal drenado. El aumento en el dióxido de carbono no afectó el crecimiento de las plantas. En un segundo experimento (II), con mejor suelo, observamos un poco más de biomasa con niveles altos de dióxido de carbono, aumento que no fue estadísticamente significativo. Finalmente, en un tercer experimento (III), el suelo fue fertilizado con nitrógeno, fósforo y otros elementos. Bajo estas condiciones, al elevarse el CO<sub>2</sub> la biomasa se incrementó en un 50%. Estos tres experimentos señalan que el CO<sub>2</sub> es apenas uno de varios factores que afectan el crecimiento de las plantas y que evidentemente el aumento de dióxido de carbono sólo estimula marcadamente el desarrollo de las plantas cuando otros factores, como la calidad del suelo y la disponibilidad de agua también son óptimos.

Sugieren los resultados que el crecimiento del bosque tropical puede estar limitado principalmente por factores distintos al CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Necesitamos recordar que nuestros experimentos fueron realizados con plantas jóvenes en un período de hasta siete meses. La fase juvenil es crítica para las plantas. Sin embargo, siete meses constituyen sólo una pequeña fracción en la vida de un árbol y es posible que cambios minúsculos en la biomasa acumulada a corto plazo, como en el segundo experimento (II, Tabla 1), pueden resultar, a largo plazo, en un aumento significativo en la tasa de maduración de los árboles.

Cabe mencionar un segundo punto. En el primer y segundo experimento (I y II, Tabla 1), el CO<sub>2</sub> elevado no hizo que las plantas crecieran más rápido pero las medidas de fotosíntesis muestran que las hojas desarrolladas bajo CO<sub>2</sub> elevado absorben más CO<sub>2</sub> que las que crecen en aire normal. ¿Por qué en estos dos experimentos el incremento en las tasas de fotosíntesis por unidad de área foliar, es decir, por superficie de la hoja, no resultaron en mayor

**Tabla 1.** Aumento de la biomasa de comunidades de árboles jóvenes, expuestas a concentraciones de CO<sub>2</sub> actuales y elevadas. El experimento I fue realizado con una combinación de diez especies (Lovelock et al. 1998). Mientras, los experimentos II y III fueron conducidos con una mezcla de plantas de *Ficus insipida* y *Virola surinamensis* (Winter et al. 2000, 2001).

EXPERIMENTO	DURACION (SEMANAS)	BIOMASA DE LA COMUNIDAD (kg)	
		CO <sub>2</sub> ACTUAL	CO <sub>2</sub> ELEVADO
I SUELO POBRE, MUY COMPACTADO	26	1.5±0.2	1.4±0.2
II SUELO NO COMPACTADO	30	2.3±0.4	2.7±0.5
III SUELO NO COMPACTADO Y FERTILIZADO	16	3.0±0.1	4.5±0.4

crecimiento? Una explicación es que bajo condiciones de CO<sub>2</sub> elevado las plantas disminuyen la producción de su superficie en relación a su biomasa total, es decir, que reducen su “proporción de área foliar” (*leaf area ratio*, LAR) bajo condiciones de dióxido de carbono elevado. Esta “proporción de área foliar” se define como el área foliar total de una planta en relación a su biomasa total (su peso en seco). Otra explicación es que parte del carbono extra fijado bajo condiciones altas de CO<sub>2</sub> es liberado al suelo a través de las raíces. Este y otros estudios indican que las interacciones entre la raíz y el suelo y la captura del carbono por los suelos tropicales en condiciones elevadas de CO<sub>2</sub> son áreas importantes para investigaciones futuras.

La calidad de la hoja es otro aspecto afectado por un elevado CO<sub>2</sub>, particularmente en plantas que crecen en suelos pobres, donde la biomasa total cambia poco en respuesta al CO<sub>2</sub>. Aquellas hojas que crecen bajo CO<sub>2</sub> elevado tienen más almidón y, por tanto, más materia seca por unidad de área que las hojas de la misma especie que crecen en el aire normal (Tabla 2).

**Tabla 2.** Propiedades de las hojas de *Ficus insipida* que crecieron en condiciones de CO<sub>2</sub> actuales y elevadas en cámaras de techo abierto. El experimento se realizó sin fertilizante (Winter et al. 2000).

PARÁMETRO	CO <sub>2</sub> ACTUAL	CO <sub>2</sub> ELEVADO
MASA FOLIAR : ÁREA FOLIAR (MILIGRAMO : CM <sup>2</sup> )	5.7 ± 0.1	7.9 ± 0.3
C : N	16 ± 2	24 ± 2

También disminuye el contenido de nitrógeno de las hojas comparado con el carbono, esto es, aumenta la proporción de carbono en relación al nitrógeno (Tabla 2). Tanto el almidón como las proteínas, que contienen el nitrógeno, son alimento para los animales herbívoros. Por tanto, cambios en la calidad de las hojas pueden tener consecuencias ecológicas importantes, pudiendo influir en las relaciones entre las plantas, insectos y otros herbívoros.

### Biomasa y agua

Al hablar de fotosíntesis y crecimiento de las plantas, no debe olvidarse que estos procesos están muy ligados a las relaciones de las plantas con el agua. Durante la fotosíntesis el CO<sub>2</sub> entra a las hojas a través de pequeños poros microscópicos, llamados estomas. Las plantas regulan el ta-

**Tabla 3.** Efecto del CO<sub>2</sub> elevado en el incremento de la biomasa y cantidad de agua transpirada, por unidad de biomasa producida, en *Ficus insipida*. (K. Winter y colegas, datos no publicados).

TRATAMIENTO	BIOMASA (gramo)	REQUERIMIENTO DE AGUA (gramo agua : gramo biomasa)
SIN FERTILIZANTE	CO <sub>2</sub> ACTUAL	8 ± 1
	CO <sub>2</sub> ELEVADO	10 ± 2
CON FERTILIZANTE	CO <sub>2</sub> ACTUAL	23 ± 5
	CO <sub>2</sub> ELEVADO	42 ± 4

maño de la apertura de estos estomas, porque cada vez que se abren para dejar entrar el CO<sub>2</sub>, grandes cantidades de agua en forma de vapor escapan de la hoja hacia la atmósfera. Este paso del agua, desde la hoja hacia la atmósfera, se llama transpiración. El agua que la planta pierde por transpiración debe reemplazarla absorbiendo agua del suelo a través de sus raíces, transportándola rápidamente por su tallo hasta las hojas.

En una serie de experimentos, cultivamos las plantas en grandes potes para determinar los efectos de los altos niveles de CO<sub>2</sub> en el crecimiento y la transpiración, es decir, para medir la cantidad de agua que las plantas consumen al crecer. La pérdida de agua de las plantas hacia la atmósfera reduce el peso de los potes, lo que se determinó con una balanza. Tomamos estas medidas dos veces por semana, y siempre se agregó agua al suelo para igualar, exactamente, el agua perdida por transpiración.

El CO<sub>2</sub> elevado afecta enormemente el uso de agua de las plantas (Tabla 3). Las plantas de *Ficus insipida*, pertenecientes al grupo de árboles tropicales pioneros, fueron cultivadas en suelos normales y fertilizados y expuestas a niveles de CO<sub>2</sub> actuales y elevados. En dos de los cuatro experimentos en potes, el crecimiento no fue significativamente mayor con dióxido de carbono elevado en las plantas no fertilizadas, pero siempre fue mayor en plantas abonadas y bajo un CO<sub>2</sub> alto. La Tabla 3 muestra un ejemplo en que la biomasa no aumentó con un CO<sub>2</sub> elevado en plantas no abonadas. Bajo ambos regímenes nutricionales, un CO<sub>2</sub> elevado redujo fuertemente la pérdida de agua por transpiración; las plantas fertilizadas en un aire normal utilizaron 262 gramos de agua para producir un gramo de biomasa seca. Mientras, en condiciones de CO<sub>2</sub> elevado, el requerimiento de agua fue 33% menor. Sorprendentemente, en las plantas no fertilizadas, bajo un CO<sub>2</sub> elevado, también se redujo en un 35% la transpiración de agua: de 329 a 213 gramos de agua, por gramo de materia seca. Estos resultados demuestran que si en el futuro los cambios en el CO<sub>2</sub> atmosférico no llegasen a ocasionar cambios mayores en la biomasa de los bosques tropicales, sí podrían disminuir significativa-

mente la tasa de transpiración de los bosques, reduciendo por tanto las nubes y las lluvias.

### Conclusiones

Sugieren nuestros experimentos que las respuestas de crecimiento de los bosques tropicales a futuros incrementos en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera pueden ser fuertemente influidas por las condiciones del suelo. La tendencia de las comunidades boscosas a responder favorablemente en su crecimiento bajo CO<sub>2</sub> elevado, incrementa según mejoran los suelos. La fertilidad de los suelos tropicales cubre un amplio rango, desde los muy pobres en nutrientes, como los arenosos, a los relativamente fértiles, como los suelos volcánicos jóvenes. Es importante notar que el propósito de nuestros experimentos con fertilizantes es comprender mejor la interacción entre los diferentes factores que pueden limitar la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas.

Si las plantas liberan más materia orgánica en el suelo, en condiciones elevadas de CO<sub>2</sub>, los suelos tropicales pueden convertirse en importantes depósitos de carbono. La composición química de las hojas y sus características morfológicas pueden cambiar, afectando potencialmente a los herbívoros que dependen de ellas.

Si las condiciones permiten a las plantas responder positivamente en su producción de biomasa, al aumentar el CO<sub>2</sub>, las especies pioneras tienden a responder más rápido que las especies de sucesión tardía. Esto implica que la composición de especies del bosque puede alterarse y las especies pioneras podrían salir favorecidas.

Aunque no hubiese un gran efecto del CO<sub>2</sub> elevado sobre la biomasa, se evaporaría menos agua de los bosques tropicales, lo que podría influir sobre el clima.

---

### Bibliografía citada

Lovelock CE, Winter K, Mersits R, Popp M (1998) Responses of communities of tropical tree species to elevated CO<sub>2</sub> in a forest clearing. *Oecologia* 116: 207-218

Winter K, García M, Lovelock CE, Gottsberger R, Popp M (2000) Responses of model communities of two tropical tree species to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>: growth on unfertilized soil. *Flora*: 195:289-302

Winter K, García M, Gottsberger R, Popp M (2001) Marked growth response of communities of two tropical tree species to elevated CO<sub>2</sub> when soil nutrient limitation is removed. *Flora*: 196:47-58.



El biólogo Jorge Aranda transporta potes con plantas experimentales de *Ficus insipida* listos para ser pesados en el Parque Natural Metropolitano y determinar la pérdida de agua por transpiración de las plantas en condiciones de CO<sub>2</sub> actuales y elevadas.

Stanley Heckadon-Moreno

# PANAMÁ: PUENTE BIOLÓGICO



Smithsonian Tropical  
Research Institute

Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales

574.5

H355 Heckadon-Moreno, Stanley  
Panamá: Puente Biológico  
Panamá: Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, 2001  
260p. ; il. ; 25cm.

ISBN 9962-614-01-5

1. PANAMA  
2. ECOLOGIA TROPICAL  
3. BIOLOGIA TROPICAL  
I. Título.

Edición: María Eugenia Mann  
Diseño: Ricardo Ledezma Bradley  
Foto de la portada: Marcos Guerra (STRI)  
Ilustraciones de portadillas de capítulos: Melva Olmos

**Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales**  
Apartado 2072  
Balboa, Ancón, República de Panamá

Central de teléfono: (507) 227-6022 / (507) 212-8000  
Fax central: (507) 212-8146  
e-mail: heckados@tivoli.si.edu

Impreso por Imprelibros, S.A.  
Impreso en Colombia - Printed in Colombia