

Inyección carbónica: una forma de optimizar los cultivos agrícolas en invernaderos

Carbon dioxide injection: a way to optimize agricultural crops in greenhouses.

Karla A. Granillo Pineda^a, Karla S. Aldana Reyes^a, Lesly G. Pérez Briseño^a, Rosa G. Calva Martínez^a,
Briseida Ortega Hurtado^a, Maryan M. López León^a, Marcelino Antonio Zúñiga Estrada^b

Abstract:

CO₂ is one of the main gases that harbor in the atmosphere, it originates mainly from anthropogenic processes. At present it has become a point of attention in society, since the saturation of this gas in the atmosphere causes the increase in temperature (global warming), another consequence is the rise in sea level, both problems cause an imbalance in the optimal development of living beings. However, this gas is equally vital to carry out natural processes, as is the case of photosynthesis where plants take advantage of CO₂ from the atmosphere to convert it into their food, therefore society has sought ways to reduce and in turn take advantage of this gas through different methodologies, one of them is the injection of CO₂ in greenhouses where vegetables are grown, thanks to this method environmental and economic benefits are obtained for society.

Keywords:

CO₂, atmosphere, temperature, photosynthesis, environmental benefits

Resumen:

El CO₂ es uno de los principales gases que albergan en la atmósfera, se origina principalmente por procesos antropogénicos. En la actualidad se ha vuelto un punto de atención en la sociedad, ya que la saturación de este gas en la atmósfera ocasiona el aumento de la temperatura (calentamiento global), otra consecuencia es el aumento del nivel de mar, ambas problemáticas causan un desbalance en el desarrollo óptimo de seres vivos. Sin embargo este gas de igual forma es vital para llevar a cabo procesos naturales, como lo es el caso de la fotosíntesis donde las plantas aprovechan el CO₂ de la atmósfera para convertirlo en su alimento, por lo tanto la sociedad ha buscado la manera de disminuir y a su vez aprovechar este gas mediante diferentes metodologías, una de ellas es la inyección de CO₂ en invernaderos donde se desarrollan hortalizas, gracias a este método se obtienen beneficios ambientales como económicos para la sociedad.

Palabras Clave:

CO₂, atmósfera, temperatura, fotosíntesis, beneficios ambientales

Introducción

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas que proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles y de procesos industriales, el cual cobra relevancia por su

efecto sobre las condiciones climáticas del planeta, ya que es un compuesto químico de larga permanencia en la atmósfera, por ende, es incluido dentro de los gases de efecto invernadero (GEI) pues contribuye al calentamiento

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Mineral de la Reforma, Hgo. | México, <https://orcid.org/0009-0003-2476-681X>, Email: gr355050@uaeh.edu.mx

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Mineral de la Reforma, Hgo. | México, <https://orcid.org/0009-0000-5260-4023>, Email: al352416@uaeh.edu.mx

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Mineral de la Reforma, Hgo. | México, <https://orcid.org/0009-0002-4327-7272>, Email: pe351897@uaeh.edu.mx

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Mineral de la Reforma, Hgo. | México, <https://orcid.org/0009-0005-8800-208X>, Email: ca358072@uaeh.edu.mx

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Mineral de la Reforma, Hgo. | México, <https://orcid.org/0009-0001-0732-4310>, Email: or361603@uaeh.edu.mx

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Mineral de la Reforma, Hgo. | México, <https://orcid.org/0009-0000-4279-2673>, Email: lo361434@uaeh.edu.mx

^b Autor de Correspondencia | Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Mineral de la Reforma, Hgo. | México, <https://orcid.org/0000-0003-1040-9670>, Email: marcelino_zuniga@uaeh.edu.mx

global. Por otro lado, su presencia es fundamental en la nutrición y desarrollo de las plantas quienes lo capturan de la atmósfera mediante el proceso de fotosíntesis con el fin de obtener azúcares y otros compuestos que necesitan para tener un normal desarrollo de su ciclo vital. Actualmente las concentraciones de CO₂ en la atmósfera van de 350-400 ppm, sin embargo, estas no son suficientes para llevar a cabo una producción óptima de hortalizas.

De acuerdo a (Intagli, 2017) alrededor del 40% de la materia seca que conforma a las plantas verdes se compone de carbono proveniente del CO₂, el cual es fotosintetizado, por ello es importante que se tenga un abastecimiento controlado de este compuesto.¹ En los invernaderos (construcciones agrícolas) este proceso se puede monitorear dado a que se regulan las condiciones que se tienen dentro, como la temperatura, ventilación y humedad del invernadero, aunque el factor más importante es la radiación solar.

La inyección del CO₂ consiste en la saturación controlada de este gas. Existen tres métodos principales: 1) técnica de aporte de CO₂ puro. 2) reutilización de los gases ocasionados por la quema de combustibles. 3) aprovechamiento de los gases generados por la industria. Sin embargo, la elección de uno u otro método dependerá de la disponibilidad y distribución local, del grado de control climático y de la rentabilidad económica del sistema.²

Esta es una de las técnicas más rentables para el aprovechamiento de CO₂, aunque presenta ciertas limitantes, dado que algunos de los invernaderos no están diseñados ni equipados para la implementación de esta técnica, además el suministro de CO₂ se limita a las horas centrales del día, cuando la planta presenta mayor actividad fotosintética. Por otra parte, se deben vigilar las concentraciones de CO₂ dentro del invernadero, ya que si se exceden los niveles requeridos podrían perjudicar al cultivo.

Hoy en día la inyección de CO₂ únicamente ha sido implementada en países desarrollados, como Nueva Zelanda, España y Japón, por lo que en este trabajo se busca la implementación a futuro de esta técnica en México.

Historia del CO₂ atmosférico

El dióxido de carbono es un gas incoloro, compuesto por un átomo de carbono y dos de oxígeno. Además, se presenta en aguas termales, volcanes, en la disolución de rocas carbonatadas en agua o en ácidos y en la atmósfera en compañía de otros gases.

Anteriormente este gas era llamado anhídrido carbónico o gas carbónico. Fue identificado por primera vez en 1750

por Joseph Black (químico y médico), además estudio las características del dióxido de carbono. Durante sus experimentos, observó que al calentar una roca caliza o al someterla con ácidos, se generaba un gas al que le denominó "aire fijo".³

El CO₂ es un gas esencial para la vida, ya que está presente en compuestos orgánicos y en el aire que exhalan los seres vivos clasificados como aerobios, además, es importante para la fotosíntesis de las plantas, así como también para la obtención de energía para las cianobacterias.

Desde hace aproximadamente 4.6 millones de años el carbono se incorporó a los materiales que formaron al planeta Tierra, donde la Tierra actúa como una capsula para el carbono, haciendo que este sea constante durante el paso de los años. Las concentraciones de CO₂ en la atmósfera han variado dependiendo del periodo conforme al tiempo geológico, durante el Cámbrico la concentración era de 7000 ppm, mientras que en el Ordovícico - Silúrico fue de 4000-4500 ppm (en este periodo la meteorización ocasiono un aumento de CO₂ en la corteza), en el Carbonífero se tuvo una gran disminución, con una concentración de 500-1000 ppm; posteriormente en el Jurásico-Cretácico se tuvo un incremento de 3000-4000 ppm, y durante el Paleógeno y Neógeno descendió hasta 400 ppm. Actualmente desde el año 1960, el nivel atmosférico de CO₂ ha aumentado constantemente, sin embargo, en el año 2023 los niveles sobrepasaron las 421 ppm, en comparación a las 317 ppm registradas en el año de 1960.⁴

Los gases presentes en la atmósfera actúan como un fenómeno de efecto invernadero, es decir, el CO₂ presente en la atmósfera tiene la función de mantener a la Tierra con calor, de lo contrario esta podría llegar a congelarse, sin embargo, si aumentan las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, se elevará la temperatura en la Tierra produciendo cambios climáticos. En los últimos años, las concentraciones de CO₂ han aumentado gracias a la actividad humana, principalmente debido a los procesos industriales y a la deforestación.

2.1 Implicaciones del CO₂

El ascenso de la temperatura tiene efectos catastróficos sobre el clima ya que altera el balance del ciclo hídrico, las corrientes marinas y la distribución del calor.

Las altas concentraciones de CO₂ aumentan la temperatura, haciendo que en casi todas las zonas del planeta se susciten ondas de calor, lo cual provoca que se incrementen las enfermedades, y que se produzcan incendios con mayor facilidad. De igual forma ocasiona el derretimiento de los polos, provocando el aumento del nivel mar.

La alteración del balance hídrico gracias al cambio climático, hace que la disponibilidad de agua sea más escasa, por lo que la sequía afecta a cultivos y ganado, haciendo que estos puedan volverse menos productivos, de igual forma aumenta la vulnerabilidad de los ecosistemas y provoca limitaciones en las actividades humanas.

Características del CO₂

3.1 ¿Dónde y cómo se genera el CO₂?

El dióxido de carbono es un gas inerte, ya que no es capaz de reaccionar fácilmente con su entorno a condiciones normales de temperatura y presión, el ciclo natural del CO₂ es lento, lo que repercute en que tenga mayor permanencia en las capas de la atmósfera Terrestre, así mismo, la presencia de este gas junto con el vapor de agua serán condicionantes importantes para regular la temperatura de nuestro planeta Tierra, aunque cabe destacar que su gran presencia en la atmósfera ocasiona el aumento progresivo del calentamiento global.⁵

Con respecto a su origen, el CO₂ (Figura 1) se genera primordialmente por procesos de combustión, que se desarrollan cuando se quema toda forma o compuesto de carbono en condiciones saturadas de oxígeno, de manera general se puede emitir a la atmósfera tanto por procesos naturales como por procesos desarrollados por la actividad humana. En procesos naturales, se libera a la atmósfera mediante las erupciones volcánicas, al ocurrir incendios forestales (puesto que los árboles son grandes contenedores de carbono), en el curso de la respiración de los seres vivos, en el caso de los animales que consumen plantas de igual manera se libera este gas mediante la excreción, también en situaciones donde se descomponga la materia orgánica saturada de oxígeno; en cuanto a la retención del elemento carbono, se presenta durante la fotosíntesis de las plantas que pueden mezclar el CO₂ presente en el aire con los nutrientes del suelo y el agua captada para formar diversos azúcares que sirven como su propio alimento, y finalmente durante el ciclo biogeoquímico se ajusta la transferencia entre los océanos, el suelo y la atmósfera. Por otro lado, las emisiones por actividades humanas se relacionan con la extracción y quema de combustibles fósiles (gas natural, petróleo y carbón) llevado a cabo principalmente en los motores de los automóviles, en la industria energética, manufactureras, quema de biomasa, quema de madera en los países que están en desarrollo, la deforestación, la agricultura, en el tratamiento y eliminación de residuos, uso de disolventes, entre otras.⁶

3.2 Ciclo del Carbono

Cabe destacar que la cantidad total de CO₂ en la atmósfera es regulada mediante el ciclo de carbono, en el que la asimilación del gas comienza con la fotosíntesis, donde las plantas durante el día aprovechan la energía solar para poder combinar el CO₂ presente en la atmósfera con más cantidad de agua para obtener los nutrientes suficientes para su desarrollo, posteriormente en el transcurso de la noche sucede la respiración de diferentes seres vivos; por otro lado el CO₂ se libera en el momento de quemar árboles, plantas u otros productos que contengan gran cantidad de materia orgánica como lo es el petróleo, también suele suceder cuando las plantas mueren y se descomponen, lo que ocasiona la liberación de este gas a la atmósfera. En los océanos el CO₂ es tanto consumido por el plancton que realiza la fotosíntesis en este medio, como liberado constantemente debido a que la química de su capa superior se encuentra bien combinada con la química presente en la atmósfera, por lo tanto, este proceso se encuentra en equilibrio. Aunque actualmente los océanos están absorbiendo mayores cantidades de CO₂, lo que genera un desequilibrio en el pH, es decir se acidifica.⁶

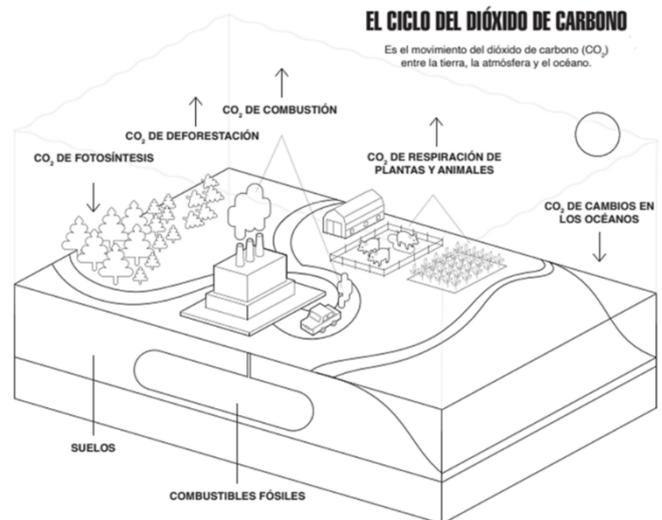


Figura 1. Ciclo del CO₂ modificado de (Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio, 2020).⁷

Invernadero

Un invernadero es una estructura cubierta con materiales transparentes, de al menos 3 m³ de aire por cada m² de superficie cubierta, la cual pone a disposición las condiciones adecuadas para que un cultivo tenga un desarrollo y crecimiento óptimo.⁸ Los agricultores aplican esta técnica de cultivo con el fin de obtener condiciones climáticas que les brinden desarrollo óptimo a sus plantas y así poder adquirir grandes beneficios económicos. México en el 2016 tenía registradas a 25,814 unidades de producción de agricultura protegida, de las cuales el 65%

son invernaderos y producen principalmente jitomate, pepino, pimientos y rosas.⁹

4.1 Construcción

En México el invernadero más utilizado es el “tipo túnel”, éste es económico, adecuado para áreas reducidas, apto para cultivos hortícolas pequeños y permite producir sembradíos de calidad durante todo el año. Para su construcción generalmente se contratan a empresas que suelen cumplir con las normativas establecidas por el gobierno para realizar los invernaderos. En la Tabla 1 se muestra la metodología general a seguir para la construcción de un invernadero tipo túnel.

El invernadero tipo túnel admite grandes volúmenes de aire y es resistente a la lluvia, permite el uso de maquinaria agrícola, distribuye correctamente la iluminación dentro del invernadero, es apto para controles de clima y sistemas de climatización, y su fabricación es rápida y sencilla a comparación de otros tipos de invernaderos. Sus dimensiones aproximadas son:

- Ancho: 8-9.6 m.
- Alto: 4-5 m.
- Distancia entre los arcos: 2.5 m.

4.2 Equipamiento

Un invernadero tiene que contar con un equipamiento tecnológico de alta calidad, las máquinas que un invernadero debe de tener son:

- Calefacción: pueden ser sistemas de agua o aire caliente que utilicen gas natural, propano, biomasa, aceite combustible y biodisel. Los más usados son los calentadores de aire de combustión directa y la calefacción por tubería radiante, los primeros son rápidos y eficaces, lo que evita que las bajas temperaturas afecten los cultivos; mientras que los segundos están diseñados para temperaturas muy bajas y constantes lo que permite que el sembradío no sufra estrés y alcance una mayor productividad.
- Control de clima: es una gestión de control de los sistemas del invernadero para satisfacer necesidades del cultivo y tener un rendimiento óptimo.
- Iluminación: es importante en el proceso fotosintético de la planta e influye en el rendimiento y calidad de la hortaliza, este es necesario solo en lugares donde la luz solar no es suficiente para el desarrollo de la planta.

- Pantallas: regulan el clima dentro del invernadero y facilitan el ambiente ideal para los cultivos. Estas pueden ser térmicas o de sombreado.
- Sistema de riego: dependerá del tipo de cultivo, pero, generalmente se emplea el sistema de riego por goteo, goteo por tubin o espagueti, riego por micro aspersión, riego por nebulización, e incluso algo más sofisticado como un robot de riego.
- Puertas: pueden ser corredizas, con bisagras, de muro cortina, puertas de garaje y puertas comerciales, este accesorio dependerá del diseño del invernadero.
- Recubrimiento: contribuye en la calidad y características del microclima del invernadero, puede ser de materiales como vidrio, película de polietileno y policarbonato.
- Ventilación: este sistema es fundamental si se quiere llevar a cabo los métodos de inyección de CO₂, ya que se encarga de controlar la temperatura, humedad y distribución uniforme del CO₂ dentro del invernadero.¹⁰

Métodos de inyección de CO₂ en invernaderos

Existen diversos métodos para la inyección de CO₂ en los cultivos de invernaderos, los cuales se exponen a continuación.

5.1 Métodos

5.2 Aporte de CO₂

El método más conveniente para adicionar CO₂ en los invernaderos es el de la inyección pura, debido a que se encuentra disponible en cantidades suficientes, y la única limitante es la capacidad del tanque de almacenamiento. Cuando se comprime, enfría y purifica el gas, éste se convierte en CO₂ líquido y se almacena en tanques criogénicos. Posteriormente, el CO₂ líquido se inyecta cerca del ventilador del sistema central, lo que permite su evaporación y posterior distribución en forma gaseosa; aunque también puede aplicarse mediante una red de conductos o por un sistema de ventiladores.¹¹

La desventaja de este método es que requiere una mayor inversión que cualquier otro método debido al equipo que se necesita para su almacenamiento, transporte y distribución.

Tabla 1. Metodología para la construcción de un invernadero tipo Túnel 1.

Paso	Nombre	¿Qué hace?
1	Movimiento de tierra y nivelado de la superficie.	<p>Mueve la tierra de acuerdo a los criterios de evacuación de agua e inclinaciones. Se lleva a cabo mediante tres etapas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desbroce y explanación: limpia y adecua el terreno a través del movimiento de tierra. • Desmontes y terraplenes: si la superficie del terreno es demasiado irregular, se adecua la superficie a la requerida por el diseño del invernadero. • Nivelación: nivela el terreno según lo indicado en el diseño.
2	Replanteo y preparación de la cimentación.	Indica la parte del terreno donde debe de cimentarse la planta del invernadero, marcando sitios de excavación que se llevaran a cabo mediante barrenas.
3	Recepción de materiales: Premontaje en obra.	<p>Los materiales a ocupar en la construcción del invernadero son apilados en el terreno y posteriormente se realiza lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento anticorrosivo en la superficie que tiene contacto con la zapata de los pilares mediante alquitrán. • Montaje de los capiteles. • Premontaje de arcos de cubierta, barras de cultivo, pendolones y brazos de ventana. • Colocación de perfiles C (estructura de soporte del plástico que recubre el invernadero) en los canales.
4	Montaje del invernadero.	<ul style="list-style-type: none"> • Pilares: la cimentación de los pilares se basa en zapatas cilíndricas de hormigón posteriores a un tratamiento anticorrosivo. Ya colocados se comprueba que no estén inclinados y se deja moldear el hormigón. • Capiteles y canales: ya instalado el pilar, se coloca el capitel y después se montan las canales. • Arcos: listos los canales, se montan las cerchas. Pero, primero se elevan y colocan los arcos de la cubierta previamente montados en la obra. • Perfilería y refuerzos: se coloca la perfilería en superficies de cubierta y laterales, se unen a los pilares laterales del invernadero y los refuerzos estructurales. • Revestimiento: listo el montaje de la estructura se instala el material de cubierta y se procede a terminar os remates que montan las instalaciones auxiliares, como el sistema de apertura de ventanas, puertas de invernadero y otros.

5.1.2. Inyección del CO₂ por combustión

El proceso de combustión para generar CO₂ se puede realizar de dos formas: 1) Mediante quemadores distribuidos dentro del invernadero, donde los gases deben estar libres de compuestos nocivos, por lo que generalmente se queman combustibles con bajo contenido de azufre (gas natural, parafina o propano). Es de gran importancia tener en cuenta el contenido de oxígeno dentro del invernadero, ya que niveles insuficientes propician la producción de gases tóxicos, como el CO, NOx y SO₂. Esto conlleva a que el uso de quemadores sea poco preciso, debido a que si se usan

para calentar el aire, ocasionaran niveles muy altos e indeseables de CO₂.¹ 2) A través de una caldera central, donde se queman combustibles fósiles, principalmente el propano y el gas natural, ya que ambas fuentes son suficientemente puras y económicas para la generación de CO₂. La combustión completa de gas natural y propano requiere de una buena oxigenación, además, como subproducto se obtiene CO₂ y vapor de agua, donde el vapor de agua se puede extraer de los gases de combustión para evitar que lleguen al invernadero. Poudel & Dunn (2017) mencionan que al quemar 1 libra de combustible se producen 3 libras de CO₂, mientras que una libra de este gas equivale a 8.7 pies cúbicos de gas en condiciones ideales. De igual manera, estos autores

mencionan que la cantidad de CO₂ producido depende del tipo y la pureza del combustible. También se debe de considerar que una incorrecta combustión da origen a atmósferas fitotóxicas es decir que se causara una afección metabólica en las plantas impidiendo su crecimiento y desarrollo e incluso provocando una muerte vegetal.¹³⁻¹⁴

Es importante conocer las dimensiones y necesidades del invernadero, ya que generalmente se recomienda que no se excedan los 20 minutos de enriquecimiento de CO₂, y como mínimo, el ambiente se debe recargar cada una o cuatro horas. La ventaja de emplear este método es la menor inversión en comparación con el aporte de CO₂ puro.¹⁴

5.1.3. Aprovechamiento de los gases generadores en la industria

En la actualidad, la principal actividad antropogénica que emite CO₂ es la quema de combustibles, aunque los procesos industriales también son considerados debido a las reacciones químicas que liberan CO₂, por ejemplo, las producción y consumo de productos minerales como el cemento y metales como hierro y acero.

Por otra parte la Aplicación de CO₂ por aporte de gases emitidos por centrales eléctricas de combustión, es una de la alternativas más utilizadas en la actualidad con el fin de aprovechar los gases de combustión y calor residual de las centrales eléctricas, este método otorga un mayor beneficio a los productores de cultivos permitiendo acceder a una fuente de CO₂ limpia y con un bajo costo, así como también favorece las políticas de adaptación y mitigación temporal al cambio climático, cabe destacar que al ser un método ligado al funcionamiento de la central eléctrica hace que las cantidades de CO₂ puedan ser almacenadas fácilmente, provocando que los gases sean conocidos y controlados ya que presentan una composición constate lo que facilita su manejo posterior. Existen 2 posibilidades para utilizar los gases de combustión una de ellas es el transporte de CO₂ en forma de gas embotellado hasta el lugar de uso sin embargo para este caso sería lo equivalente a usar gas puro no obstante bajarían la concentración de CO₂ al 4.5% dificultando así su usos como gas comprimido, la 2da posibilidad son instalaciones cercanas a la central eléctrica, la cual genera altas expectativas ya que se evitaría cualquier problema de almacenamiento y transporte, así como también se podría combinar el suministro de gas al de calor residual y, en el caso de una producción conjunta, se adquirirían beneficios de adaptación y mitigación temporal al cambio climático.²

5.2. Costos

Los costos del proceso de inyección de dióxido de carbono en invernaderos dependerán de factores como: el tamaño y tipo del invernadero, la fuente y adquisición de CO₂, ubicación geográfica, la tecnología empleada para aportar el gas y la frecuencia de la inyección, todo esto con el fin de aumentar la tasa de crecimiento y el rendimiento de las plantas, especialmente en condiciones de luz limitada. Dentro de la tecnología se debe contemplar el equipamiento necesario para inyectar el gas al invernadero, como tanques de almacenamiento de CO₂ comprimido; los tanques con una capacidad de 20 libras tienen un costo de 150 a 200 dólares, por otro lado, un generador de CO₂ (el cual se mantiene justo encima de las plantas) que por unidad cubre 445.934 m² cuesta entre 1000 y 2500 dólares, sin tomar en cuenta 1000 dólares extra para la instalación de gas y electricidad. En cuanto al CO₂ generado como subproducto en plantas industriales, puede ser una fuente rentable de CO₂ para invernaderos cercanos, mientras que la compra de CO₂ a proveedores comerciales puede resultar más costosa, sin embargo, aún no se ha puesto a prueba. En general, los costos de la inyección de CO₂ en invernaderos oscilan entre unos cientos a varios miles de dólares por año, dependiendo de los factores mencionados anteriormente.¹³

Importancia del CO₂ para el desarrollo de hortalizas

El dióxido de carbono es esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, éstas utilizan el CO₂ para realizar la fotosíntesis, absorbiéndolo a través de pequeños poros llamados estomas, que se encuentran en las hojas, este gas se combina con el agua y los nutrientes de la luz, convirtiendo la energía de la luz solar en energía química que permite que las plantas crezcan.¹⁵

La cantidad de CO₂ disponible en el aire afecta directamente la tasa de fotosíntesis y, por lo tanto, el desarrollo de las plantas. En condiciones de altas concentraciones de CO₂ las plantas pueden realizar la fotosíntesis de manera más eficiente, aumentando así su crecimiento y producción de biomasa, esto dependiendo del tipo de ruta metabólica C3, C4 y CAM. Las plantas C3 experimentan un aumento significativo en la tasa de fotosíntesis, de al menos un 30%, cuando se eleva el nivel de CO₂ desde 350 ppm a 700 ppm en experimentos a corto plazo. Por otro lado, las plantas C4 tienen una tasa neta de absorción de CO₂ casi saturada en los niveles actuales de CO₂ en la atmósfera, lo que significa que su fotosíntesis solo se ve ligeramente afectada cuando el nivel de CO₂ se eleva experimentalmente al doble de los niveles actuales. El efecto en las plantas CAM varía, ya que pueden absorber CO₂, tanto de día como de noche,

pero, generalmente en cualquier caso el incremento en la captación neta de CO₂ a 700 ppm es igual o superior al incremento mínimo del 30% observado en las plantas C3, y el aumento tiende a durar más tiempo. Cabe resaltar que el efecto de aumento en la fotosíntesis en las plantas C3 y CAM es más significativo que en las plantas C4.¹⁶

No obstante, el incremento plausible de las tasas fotosintéticas que puede darse al haber una mayor cantidad de CO₂ en la atmósfera es solo una parte de las ventajas para las plantas. Esto se debe a que; si la concentración de CO₂ es mayor, las estomas no necesitan abrirse tanto para permitir que el CO₂ necesario se extienda por las hojas y tallos, para que se sostengan los niveles de fotosíntesis. Al reducir la apertura de las estomas, disminuye la pérdida de agua por transpiración, lo que aumenta la eficiencia del uso del agua (WUE, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, el aumento de los niveles de CO₂ atmosférico representa una situación favorable para la WUE de las plantas, ya que eleva la cantidad de CO₂ fijado mediante la fotosíntesis y reduce la cantidad de agua perdida por la transpiración, favoreciendo de esta manera al desarrollo de los cultivos.¹⁶

Es probable que los niveles de CO₂ en la atmósfera se dupliquen durante el siglo XXI y en adelante, lo que ocasionaría un aumento en las temperaturas y alteraciones en los patrones de lluvia. Estos cambios también tendrían un impacto en la captación neta de CO₂, la transpiración y la productividad de otras maneras.¹⁶

6.1. Cultivos aptos para la inyección

Dado que las plantas C3 y CAM responden de manera más productiva al aumento de CO₂, se consideran las más aptas para la inyección carbónica. Las plantas CAM habitan principalmente en zonas cálidas y secas como los desiertos, ejemplos de ellas son las cactáceas, otro tipo de especies son las epífitas de zonas tropicales y subtropicales, en esta categoría también entran las plantas acuáticas. Los cultivos de mayor interés de esta ruta metabólica son: piña, pitahaya y orquídeas. Sin embargo, solo las orquídeas son las más factibles para la producción dentro de un invernadero.¹⁷

Por otro lado, se encuentran las plantas C3, las cuales se caracterizan por contener una enzima llamada Rubisco, la cual funciona como catalizador para la carboxilación. Aproximadamente el 89% de las plantas vasculares del mundo pertenecen a este grupo y la mayoría de los cultivos utilizados en la agricultura emplean este tipo de mecanismo, algunos ejemplos son: arroz, trigo, cebada, soya, papa, pepino, berenjena, pimienta y jitomate. De los tipos de cultivos mencionados anteriormente los que más se adaptan a los invernaderos son los hortícolas, es decir, pepino, berenjena, pimienta y jitomate.¹⁷

El jitomate es una de las hortalizas de gran importancia en México, ya que se encuentra dentro de las cinco principales en términos de valor de producción a nivel nacional, se cultiva tanto para consumo interno como para exportación. El estado de Sinaloa destaca como el principal productor de jitomate en el país, con una participación del 20% en la producción nacional. Por otro lado, en el estado de Hidalgo, aunque ranquea el lugar 15 en términos de superficie sembrada y el lugar 18 en volumen de producción a nivel nacional, sigue siendo un contribuyente significativo con el 1.56% del total nacional.¹⁸ Para su desarrollo se presenta un incremento en su tasa fotosintética al elevar la concentración de CO₂ dentro del invernadero, ya que es un factor climático que permite controlar la fotosíntesis a nivel comercial. Existen otros factores a tomar en cuenta para una buena producción, como: la radiación, temperatura, humedad relativa, y ventilación.¹⁹

6.2. Concentración de CO₂

Actualmente, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera oscila entre 350 y 400 ppm, pero, la tasa de fotosíntesis más alta en las plantas se alcanza en concentraciones que van de 900 a 1000 ppm. Por lo tanto, la tasa de asimilación de carbono potencial se ve limitada por la concentración actual de CO₂. En invernaderos, se ha observado que la concentración de este gas durante gran parte del día se reduce entre un 47% a 55% con base a la concentración atmosférica. Si los niveles de CO₂ descienden por debajo de 200 ppm, la tasa respiratoria supera la tasa de fotosíntesis, lo que limita la producción, por ejemplo; en invernaderos donde solo se utilizó ventilación natural de manera pasiva, la concentración de CO₂ se mantuvo entre 250 y 300 ppm y no se observó un mayor desarrollo, sin embargo, en cultivos donde se duplicó la concentración de CO₂ (700 a 800 ppm) manteniendo las ventanas cerradas, se obtuvo un aumento en la producción. En la Tabla 2 se presentan las cantidades recomendadas para un mejor desarrollo del producto.¹

Tabla 2. Concentraciones de CO₂ máxima recomendada para lograr la mayor tasa fotosintética en algunos cultivos hortícolas.¹

Cultivo	Concentración de CO ₂ ppm
Pepino	1500
Jitomate	1000
Pimienta	1000
Berenjena	700

Conclusiones

La futura implementación de la inyección controlada de CO₂ en invernaderos podrá ofrecer diversos beneficios para México. A pesar de que existen distintos métodos para la inyección, los más efectivos de acuerdo a su descripción previa son; el aporte de CO₂ puro y el aprovechamiento de gases generados en la industria. La concentración óptima de CO₂ para maximizar la tasa de fotosíntesis y la productividad de los cultivos, se encuentra en un rango de 900 y 1000 ppm, lo cual excede notablemente los niveles actuales en la atmósfera, ya que varían entre 350 y 400 ppm.

Las plantas con el tipo de ruta metabólica C3 y CAM, son las más aptas para este método debido a su mayor productividad frente al aumento de CO₂. Los cultivos que mejor responden a la inyección de CO₂ en invernaderos incluyen pepino, jitomate, pimienta y berenjena, siendo el jitomate uno de los más destacados en México, especialmente en regiones como Sinaloa y Hidalgo.

Desde el punto de vista económico, la implementación de estos métodos requiere inversiones significativas en infraestructura y tecnología, Sin embargo, esta metodología de igual manera genera beneficios, aumentando la producción agrícola y mejorando la rentabilidad de los cultivos.

En términos ambientales, el uso efectivo del CO₂ en invernaderos de México podría contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, al mismo tiempo que se aprovecha este subproducto industrial. Esta acción podría orientar las prácticas agrícolas con los objetivos futuros de sostenibilidad ambiental y moderación del cambio climático.

Socialmente, la inyección carbónica podría generar empleo en la industria agrícola, así como contribuir al desarrollo de tecnologías más sostenibles y eficientes en este ámbito. Además, al aumentar la producción de cultivos de forma más eficiente, se podría mejorar la seguridad alimentaria, la disponibilidad de productos frescos y la calidad de alimentos en el mercado.

En resumen, la inyección de CO₂ en invernaderos en México, podría mejorar la productividad agrícola, reducir costos de alimentos, minimizar el impacto ambiental y promover el desarrollo socioeconómico y sustentable en el sector agrícola.

8. Referencias

[1] Intagri. (10 de enero de 2017). Intagri. Obtenido de Inatgri: [https://www.intagri.com/articulos/horticultura-prottegida/inyeccion-de-bioxido-de-carbono-\(CO2\)-en-invernadero](https://www.intagri.com/articulos/horticultura-prottegida/inyeccion-de-bioxido-de-carbono-(CO2)-en-invernadero)

[2] Assumpció Antòn, X. A. (Diciembre de 2011). Manual aplicador de CO₂ en cultivos horticolas. España.

[3] Núñez, A., González, M., Saura, G. (mayo-agosto de 2015). Proceso de recuperación de CO₂. ICIDCA, II, 24. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223143421004.pdf>

[4] Orús, A. (2024). Nivel promedio de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera entre 1959 y 2023. Obtenido de Statista.

[5] Medina, J. (2010). La Dieta del Dióxido de Carbono (CO₂). *Conciencia Tecnológica* (39), 50-53. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/944/94415753009.pdf>

[6] Menéndez, R., Moliner, R. (2011). Energía sin CO₂. España: CSIC.

[7] Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio. (20 de Abril de 2020). NASA. Obtenido de https://climate.nasa.gov/system/downloadable_items/272_Carbon_Cycle_04_20_20_Espanol.pdf

[8] Martínez Ramírez, J. N. (2008). Uso de diferentes cubiertas plásticas en invernaderos para mejorar los efectos de radiación, temperatura y humedad relativa. CIQA, Saltillo, Coahuila, México. Obtenido de <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/593/1/Jose%20Noe%20Martinez%20Ramirez.pdf>

[9] Pesquera, S. d. (29 de abril de 2016). Gobierno de México. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/siap/articulos/en-mexico-existen-25-814-unidades-de-produccion-de-agricultura-prottegida?idiom=es#:~:text=De%20acuerdo%20con%20el%20Atlas,sombra%2C%20techo%20sombra%20o%20pabell%C3%B3n>.

[10] NOVAGRIC. (s.f.). Obtenido de NOVAGRIC: <https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/servicios/construccion-montaje-invernaderos>

[11] Esmeijer, M. (1999). CO₂ in greenhouse horticulture. *Aalsmeer: Applied Plant Research*. Obtenido de <https://edepot.wur.nl/274827>

[12] Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., Barnett, J. P. (s.f.). En MANUAL DE VIVEROS PARA LA PRODUCCIÓN DE ESPECIES FORESTALES EN CONTENEDOR (Vol. 3). Obtenido de <file:///C:/Users/les31/Downloads/Parte%205%20Capitulo%204%20Dióxido%20de%20Carbono.pdf>

[13] Poudel, M. (Marzo de 2017). UNIVERSIDAD ESTATAL DE OKLAHOMA. Recuperado el 2023 de 04 de 23, de <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/greenhouse-carbon-dioxide-supplementation.html>

[14] AGRI nova Science. (s.f.). infoAgro. Obtenido de infoAgro: https://infoagro.com/abonos/fertiliz_carbonic.htm

[15] nutricontrol. (15 de abril de 2020). nutricontrol. Obtenido de nutricontrol: <https://nutricontrol.com/es/como-influye-el-dioxido-de-carbono-co2-en-el-cultivo-en-invernadero/>

[16] Nobel, P. S. (2011). Sabiduría del desierto, agaves y cactus: CO₂, agua, cambio climático. Ciudad de México: bba.

[17] Equipo Editorial INTAGRI. (octubre de 2018). intagri. Obtenido de intagri: https://www.intagri.com/public_files/125_-Plantas-C3-C4-y-CAM.pdf

[18] Herrera, J. L. (24 de enero de 2023). EL ECONOMISTA. Obtenido de EL ECONOMISTA: <https://www.economista.com.mx/opinion/Produccion-de-jitomate-en-invernadero-en-Hidalgo-20230123-0117.html>

[19] Pérez, M., Castro, R. (2011). Jitomate en invernadero. Texcoco: Universidad Autónoma Chapingo.