

Fertilización carbónica en invernaderos de media tecnología

Enrique Rico-García^{1,§}
Adrián Esteban Ortega-Torres¹
Adán Mercado-Luna¹
Ramón Gerardo Guevara-González¹
Irineo Torres-Pacheco¹

1 Departamento de Biosistemas-Facultad de Ingeniería-Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México. CP. 76010. Tel. 442 1921200, ext. 6023. (adrianesotorres@gmail.com; adan.mercado@uaq.mx; ramon.guevara@uaq.mx; irineo.torres@uaq.mx).

Autor para correspondencia. ricog@uaq.mx.

Resumen

La fertilización carbónica se empleada en agricultura protegida para el incremento de la productividad en los cultivos. Los invernaderos de media tecnología no tienen equipos de control del clima, más que la apertura, eléctrica o manual, de ventanas. En estos invernaderos; por lo general, los valores de temperatura y humedad relativa del aire no son ideales para la fotosíntesis del cultivo en el periodo diurno entre las 10:00 am hasta el anochecer. El estudio de una base de datos de clima de un invernadero de media tecnología, mostró que por las mañanas se tienen condiciones de clima adecuadas para la fotosíntesis del cultivo. En este trabajo, se realizó un experimento con dos invernaderos de media tecnología de 108 m², se cultivaron jitomate (*Solalum lycopersicum*) y pepino (*Cucumis sativus*) en ambos invernaderos, en uno se realizó fertilización carbónica entre las 7:30 y 9:00 h mientras que el otro se mantuvo en un manejo tradicional, sin inyección de CO₂. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la fertilización carbónica sobre la productividad de los cultivos esperando incrementos significativos. Los resultados mostraron aumentos en la productividad semanal del 28% al 59% en jitomate. No hubo diferencias significativas en productividad para pepino.

Palabras clave:

clima interno adecuado, inyección de CO₂, productividad del cultivo.



De acuerdo con Juárez-López *et al.* (2011) los invernaderos se clasifican como baja, media y alta tecnología de acuerdo a su nivel de tecnificación como sigue: tecnología baja, su clima interno es 100% dependiente del clima externo, hace uso de tecnologías simples similares a las utilizadas en cultivo a cielo abierto; tecnología media, corresponde a invernaderos en batería que están semi-climatizadas, con riegos automáticos y pueden ser en suelo o hidroponía; tecnología alta, son instalaciones que cuentan con control climático automatizado (mayor independencia del clima externo), riegos computarizados por goteo, inyecciones de CO₂, utilizan sensores y dispositivos que operan los sistemas de riego y ventilación, pantallas térmicas, iluminación y cultivo en hidroponía.

La fertilización carbónica en invernaderos es una técnica empleada desde hace mucho tiempo a la fecha en la agricultura protegida (Mortensen, 1987; Xin *et al.*, 2015; Reinoso-Moreno *et al.*, 2024). Esta acción se ha empleado con éxito para poder incrementar la productividad entre 30% a 70% en jitomate (Martzopoulou *et al.*, 2020). Normalmente la inyección de CO₂ se hace en invernaderos de alta tecnología, que cuentan con equipos de control del clima (de Anda y Shear, 2017).

Los invernaderos de media tecnología tienden a ser calientes durante el periodo diurno, lo que origina baja humedad relativa al interior del invernadero, por lo que normalmente la temperatura y humedad en el aire se encuentran fuera de los rangos adecuados para llevar a cabo la fotosíntesis en potencia del cultivo. Schmidt *et al.* (2008) encontraron que para un cultivo de jitomate la eficiencia fotosintética del cultivo aumentaba en el rango 20-24 °C, para la temperatura y de 80 a 90% para la humedad relativa. Normalmente, en los invernaderos de media tecnología, estas condiciones de clima al interior del invernadero no se logran durante el periodo diurno, especialmente durante los meses más calientes (abril a junio).

Datos de clima para un invernadero de media tecnología del *Campus* Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, indicaron que se tienen condiciones favorables para la fotosíntesis durante las primeras horas de la mañana, además, en el manejo cultural de estos invernaderos las ventanas se mantienen cerradas durante el periodo nocturno y primeras horas de la mañana, lo cual llevó a plantear que se puede hacer enriquecimiento carbónico durante las primeras horas del día aprovechando las condiciones naturales del microclima interno del invernadero, con la intención de aumentar la productividad de los cultivos.

Ubicación

El experimento se llevó a cabo en el *Campus* Amazcala, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Ubicado en el municipio de El Marqués, Querétaro, México. 20° 42' 21" latitud norte; 100° 15' 36" longitud oeste y 1 923 msnm.

Cultivos seleccionados

Se trabajó con dos cultivos: jitomate (*Solanum lycopersicum*) de la variedad Córdoba de la marca Premier seeds y pepino (*Cucumis sativus*) de la variedad Lisboa de la marca Bejo, ambos cultivos fueron plantas francas. Se realizó la selección de estos cultivos por su importancia económica y por su alta demanda en el mercado.

Germinación

Se germinaron las semillas en peatmoss dentro de charolas de 128 cavidades dentro de un invernadero para producción de plántula en el *Campus* Amazcala, las charolas permanecieron cubiertas alrededor de tres días con el fin de retener humedad y acelerar el proceso de germinación, las semillas de jitomate se sembraron el día 09 de febrero de 2018 y las de pepino el 13 de marzo de 2018, dejando este tiempo debido al ciclo más acelerado del pepino en función del jitomate.

Trasplante

El jitomate se trasplantó el 18 de marzo y el pepino el 02 de abril. Usando un sistema hidropónico mediante bolsas de polietileno coextruidas de una capacidad 10 L con una doble capa, negra en su interior para evitar el paso de luz y no dañar la raíz y blanca en su exterior con la finalidad de reflejar la mayor cantidad de radiación y así evitar el calentamiento del sustrato. El sustrato usado fue tezontle con una granulometría desde 1 mm hasta 1 cm.

Nutrición y manejo cultural de los cultivos

Para la nutrición de los cultivos se usó un sistema de riego por goteo con emisores de 4 L h⁻¹. Se tuvo un drenaje del 20 a 30%. La solución nutritiva se definió buscando una que se acoplara a los dos tipos de cultivo, debido a que compartían el mismo sistema de riego (Cuadro 1), pH de 5.5 y CE de 2.82 dS m⁻¹.

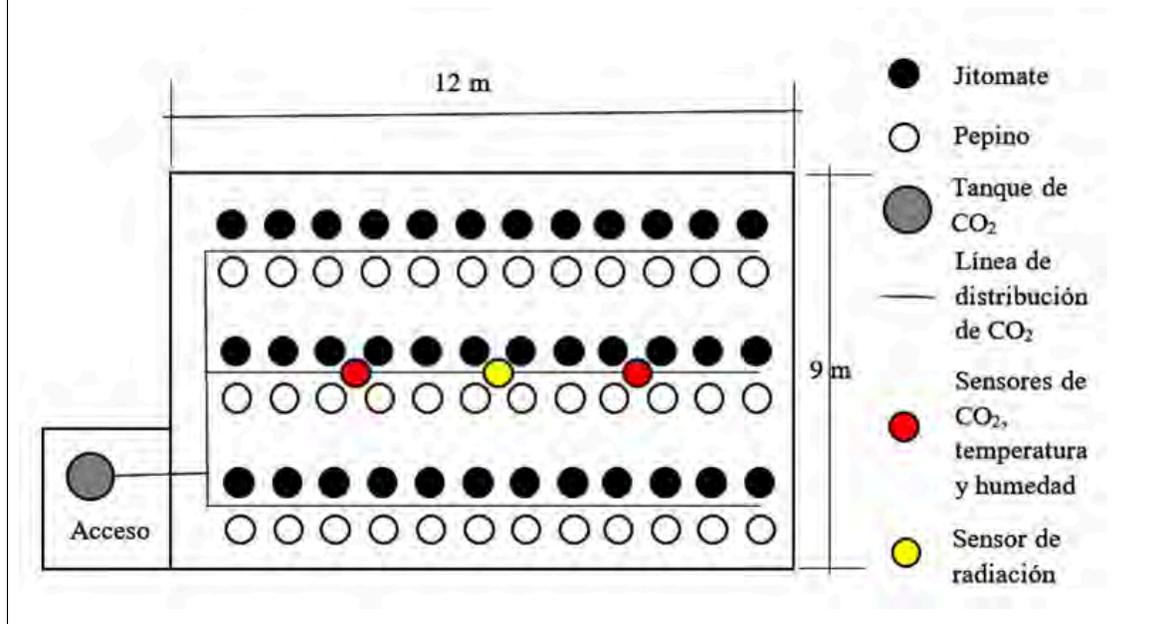
Unidad	-NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
ppm	930	193.94	240.15	200.4	36.45	351.9
	Fe	Cu	Mn	Bo	Zn	
ppm	3	0.02	0.62	0.44	0.11	

El experimento se llevó a cabo en dos invernaderos contiguos, uno funcionó como control (sin fertilización carbónica) mientras que el otro fue el tratamiento (con fertilización carbónica). La dimensión de cada uno de los invernaderos fue de 9 (ancho) x 12 (largo) x 4.5 (altura al canalón) metros, cubriendo una superficie de 108 m², cada invernadero tuvo un total de 162 plantas (81 plantas de jitomate y 81 plantas de pepino) obteniendo una densidad de plantación de 1.5 plantas m⁻².

La disposición de los cultivos fue longitudinal con tres líneas dobles de jitomate-pepino para ambos invernaderos (Figura 1). El desarrollo de los dos cultivos se trabajó a un tallo eliminando los brotes axilares. Durante la etapa de cosecha se cortaron de uno a dos frutos por planta de pepino y un racimo por planta de jitomate, semanalmente.



Figura 1. Esquema de invernadero con fertilización carbónica, distribución del cultivo y sensores de medición.



Inyección de CO₂

Se instaló un sistema de enriquecimiento carbónico en uno de los invernaderos, conformado por un tanque de 25 kg de CO₂ líquido con una electroválvula, manómetro y un arreglo de líneas de distribución hecho de manguera de polietileno de 13 mm perforada cada 50 cm con una broca para metal de 2 mm (Figura 1). El enriquecimiento carbónico comenzó el día 25 de abril de 2018 durante la etapa de floración de los dos cultivos, todos los días hasta el final del experimento, 20 de junio de 2018. El CO₂ se inyectó en el invernadero hasta alcanzar una concentración aproximada de 800 ppm, entre las 7:30 y 9:00 h, de manera general, para mantener el nivel de CO₂ en el tiempo indicado se requirieron hacer de tres a cuatro inyecciones de manera intermitente para acercarse lo más posible a las 800 ppm.

El enriquecimiento carbónico se hizo sólo si se cumplía con las siguientes condiciones de clima al interior del invernadero: radiación mayor que cero, humedad relativa entre el 65 y 90%, temperatura del aire entre de 10 y 28 °C y que las ventanas permanecieran cerradas para minimizar la pérdida de CO₂ por ventilación.

Si alguna de las condiciones no se cumplía, no se inyectaba CO₂ y al rebasar los 28 °C de temperatura en el aire interno, debido a la radiación solar, se abrían las ventanas laterales y cenitales, deteniendo la inyección de CO₂ por el resto del día. Todas estas acciones fueron hechas de manera manual. Las condiciones de clima al interior del invernadero para la fertilización carbónica se definieron tomando en cuenta las condiciones climáticas referidas en Schmidt *et al.*(2008).

Sistema de medición de variables de clima al interior de los invernaderos

Para el sistema de monitoreo de las condiciones climáticas se trabajó con dos sensores de CO₂ modelo FYAD 00 CO2B10 distribuidos equitativamente en el invernadero, dos sensores de temperatura y humedad relativa modelo FHAD462 conectados al datalogger Almemo® 25904AS, todos los equipos de la marca Alhborn, también se instaló un sensor de radiación modelo 36681 junto con el instrumento de medición WatchDog 1000 series de la marca Spectrum®.

Variables de respuesta fenológicas

Se hicieron mediciones en tres fechas 06, 13 y 20 de junio de 2018, por triplicado para cada uno de los invernaderos, para productividad, peso seco y área foliar. Para productividad de fruto producido: en pepino se obtuvo el peso por separado de cada fruto y en el jitomate se pesaron los racimos. Los frutos cosechados se limpiaron y se pesaron a temperatura ambiente, se colocaron las muestras en el centro del plato de la báscula para evitar vibraciones al momento de quitar la muestra, se realizó un duplicado de las muestras pesadas y se fueron anotando los valores inmediatamente en bitácora.

Para la materia seca se pesó la muestra fresca y posteriormente se secó a una temperatura constante de 100 °C en una estufa de secado Riossa[®], modelo HCF-41, hasta obtener peso constante. Esto se realizó para la planta sin incluir los frutos; es decir, tallos y hojas por lo que esta medición implicó sacar toda la planta (prueba destructiva). Las mediciones de peso se hicieron en una báscula digital modelo L-EQ marca Torrey[®].

El área foliar de cada planta se determinó vía procesamiento de imágenes digitales. Se cortaron las hojas de los cultivos y se dispusieron sobre una superficie blanca para luego tomar fotografías digitales a una distancia fija para no perder la calibración con un área conocida. Finalmente, el área foliar se determinó con un código de programación en Matlab, el cual correlaciona el número de píxeles con el área conocida para calcular el área de las hojas en la fotografía (Rico-García *et al.*, 2009).

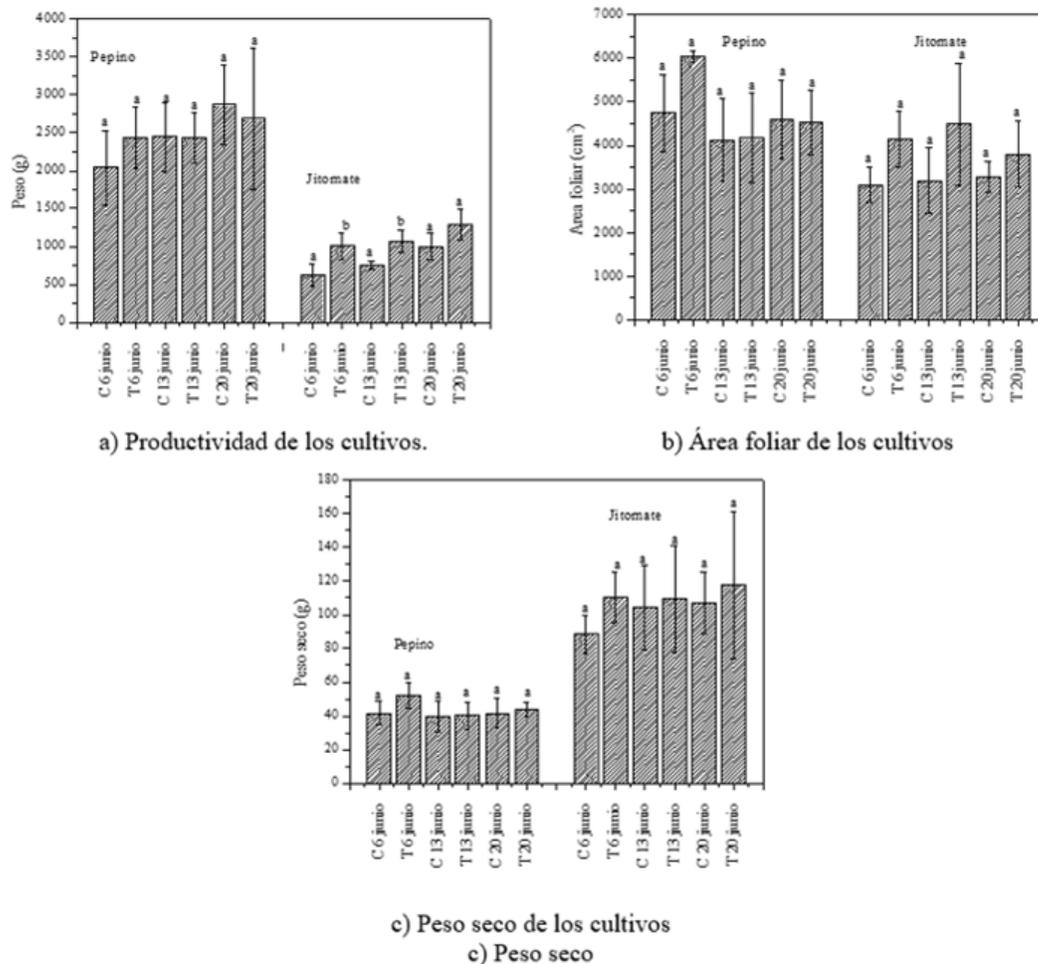
El análisis estadístico se llevó a cabo por medio de Anova de una vía y prueba de comparación de medias, Tukey ($p < 0.05$), comparando cada una de las variables con y sin fertilización carbónica en las mismas fechas de medición. Se utilizó el software OriginPro, tanto para el análisis estadístico como para la elaboración de las gráficas.

En la productividad del cultivo de jitomate para la primera y segunda semanas se encontraron diferencias significativas, mientras que para la tercera no las hubo, sin embargo, la tendencia de se mantuvo. La productividad del jitomate se incrementó, con respecto al cultivo sin fertilización carbónica, en 59%, 41% y 28%, para la primera, segunda y tercera semanas de cosecha, respectivamente. Estos resultados coinciden con Martzopoulou *et al.* (2020).

Con respecto a la productividad del pepino no se tuvieron diferencias significativas, tampoco se puede ver una tendencia que demuestre que la inyección de CO₂ aumenta la productividad (Figura 2a), esto no coincide con Sánchez-Guerrero *et al.* (2005) y Martzopoulou *et al.* (2020) donde reportan incrementos del 25% al 50% para pepino. Para las variables de peso seco y área foliar no se tuvieron diferencias significativas en ambos cultivos. Sin embargo, se mantiene una tendencia positiva en ambas variables (Figura 2b y 2c). Esto coincide con lo reportado por Sánchez-Guerrero *et al.* (2005) en que el efecto del enriquecimiento carbónico se expresa en la biomasa del fruto mientras que el área foliar no se ve incrementada.



Figura 2. Variables de respuesta de los cultivos. Compárense solo las mismas fechas. C= control; T= tratamiento.



De acuerdo a los resultados, la fertilización carbónica durante las primeras horas del día incrementó la productividad para el cultivo de jitomate en invernaderos de media tecnología, esto demostró que se pueden aprovechar las condiciones de temperatura y humedad del aire interno, que se presentan manera natural por la mañana en rangos adecuados, para potenciar la fotosíntesis del cultivo. Esto permitiría elevar la productividad de 20 kg m⁻² (de Anda y Shear, 2017) para un invernadero de media tecnología a 28 kg m⁻² de jitomate por ciclo.

Para que la inyección de CO₂ en los invernaderos de media tecnología sea una realidad deben desarrollarse sistemas como los que se describen. Reinoso Moreno *et al.* (2024) estudiaron la producción de jitomate en un invernadero piloto haciendo fertilización carbónica con CO₂ proveniente de la combustión de biomasa, reportaron un incremento en la productividad del 18% con respecto a otro invernadero sin fertilización carbónica, sistemas como este pueden reducir los costos de la fertilización carbónica. Bao *et al.* (2018) apuntan que los sistemas de captura de CO₂ representan una opción que debe desarrollarse, explicando que los mismos invernaderos de producción hortícola pueden funcionar como estructuras secuestradoras de CO₂ y utilizarlo como como insumo en la producción. Oreggioni *et al.* (2019) presentó el uso del CO₂ producido por biodigestores para enriquecimiento carbónico en invernaderos, incluso reporta que esta acción es más eficiente que el almacenamiento del CO₂ en la corteza terrestre, para mitigar los efectos del cambio climático. Hao *et al.* (2020) presentó un escenario similar reportando que la utilización del CO₂ subproducto de la biodigestión de residuos agrícolas incrementa la productividad y calidad de jitomate de invernadero.

Conclusiones

Los resultados de este trabajo indican que la producción de jitomate en invernaderos de media tecnología se incrementa con el enriquecimiento carbónico durante las mañanas entre las 7:30 y 9:00 h. Sin embargo, no se incrementó para el cultivo de pepino.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero a la UAQ. Foper 2022-FIN02720.

Bibliografía

- 1 Bao, J.; Lu, W.; Zhao, J. and Bi, X. T. 2018. Greenhouses for CO₂ sequestration from atmosphere. *Carbon Resources Conversion*. 1(2):183-190. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.08.002>.
- 2 de Anda, J. y Shear, H. 2017. La agricultura protegida en México. *Tecnoagro Núm.* 117. <https://tecnoagro.com.mx/no.-117/la-agricultura-prottegida-en-mexico>.
- 3 Hao, P.; Qiu, C.; Ding, G.; Vincze, E.; Zhang, G.; Zhang, Y. and Wu, F. 2020. Agriculture organic wastes fermentation CO₂ enrichment in greenhouse and the fermentation residues improve growth, yield and fruit quality in tomato. *Journal of Cleaner Production*. 275. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123885>.
- 4 Juárez-López, P.; Bugarín-Montoya, R.; Castro-Brindis, R.; Sánchez-Monteon, A. L.; Cruz-Crespo, E.; Juárez-Rosete, C. R.; Alejo-Santiago, G. y Balois-Morales, R. 2011. Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente* 3(8):21-27. <http://dspace.uan.mx:8080/handle/123456789/567>.
- 5 Martzopoulou, A.; Vafiadis, D. and Fragos, V. P. 2020. Energy gains in passive solar greenhouses due to CO₂ enrichment. *Energies*. 13(5):1-16. <https://doi.org/10.3390/en13051242>.
- 6 Mortensen, L. M. 1987. CO₂ enrichment in greenhouses. *Crop responses. Scientia Horticulturae*. 33(1-2):1-25. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304423887900288>.
- 7 Oreggioni, G. D.; Luberti, M. and Tassou, S. A. 2019. Agricultural greenhouse CO₂ utilization in anaerobic-digestion-based biomethane production plants: a techno-economic and environmental assessment and comparison with CO₂ geological storage. *Applied Energy*. 242(15):1753-1766. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.045>.
- 8 Reinoso-Moreno, J. V.; Pinna-Hernández, M. G.; Sánchez-Molina, J. A.; Fernández-Fernández, M. D.; López-Hernández, J. C. and Ación-Fernández, F. G. 2024. Carbon is captured from biomass flue gases for CO₂ enrichment in greenhouses. *Helyion*. 10(1):e23274. <https://doi.org/10.1016/j.helyion.2023.e23274>.
- 9 Rico-García, E.; Hernández-Hernández, F.; Soto-Zarazúa, G. M. and Herrera-Ruiz, G. 2009. Two new methods for the estimation of leaf area using digital photography. *International Journal of Agriculture and Biology*. 11(4):397-400. <http://www.fspublishers.org/published-papers/26864-pdf>.
- 10 Sánchez-Guerrero, M. C.; Lorenzo, P.; Medrano, E.; Castilla, N.; Soriano, T. and Baille, A. 2005. Effect of variable CO₂ enrichment on greenhouse production in mild winter climates. *Agricultural and Forest Meteorology*. 132(2-4):244-252. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.014>.
- 11 Schmidt, U.; Huber, C. and Rocks, T. 2008. Evaluation of combined application of fog system and CO₂ enrichment in greenhouses by using phytomonitoring data. *Acta Horticulturae*. 801:1301-1308. <https://www.actahort.org/books/801/801-159.htm>.
- 12 Xin, M. L.; Shuang, L.; Yue, L. and Qinzhu, G. 2015. Effectiveness of gaseous CO₂ fertilizer application in China's greenhouses between 1982 and 2010. *Journal of CO₂ utilization*. 11:63-66. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2015.01.005>.

Fertilización carbónica en invernaderos de media tecnología

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 January 2025
Date accepted: 01 February 2025
Publication date: 22 March 2025
Publication date: Jan-Feb 2025
Volume: 16
Issue: 1
Electronic Location Identifier: e3314
DOI: 10.29312/remexca.v16i1.3314
Funded by: UAQ
Award ID: Foper 2022-FIN02720

Categories

Subject: Nota de investigación

Palabras clave:

Palabras clave:

clima interno adecuado
inyección de CO₂
productividad del cultivo

Counts

Figures: 2
Tables: 1
Equations: 0
References: 12
Pages: 0