Banco Interamericano de Desarrollo

Agricultura protegida en México

Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado

Autores:

Lawrence Pratt
Juan Manuel Ortega

Editores:

Enrique Nieto
Isabelle Braly-Cartillier

Sector de Instituciones para el Desarrollo

División de Conectividad, Mercados y Finanzas

NOTA TÉCNICA Nº IDB-TN-1668

Mayo de 2019

Agricultura protegida en México

Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado

Autores:

Lawrence Pratt
Juan Manuel Ortega

Editores:

Enrique Nieto
Isabelle Braly-Cartillier

Mayo de 2019

BID
Banco Interamericano de Desarrollo

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo

Pratt, Lawrence.
Agricultura protegida en México: elaboración de la metodología para el primer bono de verde agrícola certificado / Lawrence Pratt y Juan Manuel Ortega; editores, Enrique Nieto, Isabelle Braly-Cartillier.
p. cm. — (Nota técnica del BID ; 1668)
Incluye referencias bibliográficas.
1. Crops and climate-Economic aspects-Mexico. 2. Greenhouse plants-Economic aspects-Mexico. 3. Agricultural productivity-Environmental aspects-Mexico. 4. Agricultural productivity-Economic aspects-Mexico.
I. Ortega, Juan Manuel. II. Nieto, Enrique, editor. III. Braly-Cartillier, Isabelle, editora. IV. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Conectividad, Mercados y Finanzas. V. Título. VI. Serie.
IDB-TN-1668

http://www.iadb.org

Copyright © 2019 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

Resumen

La emisión de bonos verdes ha crecido rápidamente en los últimos años. Sin embargo, los bonos verdes agrícolas han quedado muy rezagados, debido a las dificultades para desarrollar certificaciones internacionales, como las de la Iniciativa de Bonos Climáticos (CBI, por sus siglas en inglés). Estas certificaciones son esenciales, pero exigen la creación de criterios comparables y un enfoque de certificación aplicable a varias clases de activos financieros. En el caso de los bonos verdes agrícolas, esto ha resultado ser complejo desde el punto de vista metodológico y analítico debido a dificultades a la hora de evaluar los beneficios ambientales y sociales de las diferentes tecnologías en las distintas regiones geográficas y climáticas. Este documento describe el enfoque, la metodología, el análisis y las recomendaciones utilizadas para apoyar un bono verde agrícola para tecnologías agrícolas protegidas específicas en cultivos seleccionados en México. El documento concluye con recomendaciones para definir criterios tecnológicos mínimos que brinden una garantía razonable a las partes interesadas de que se lograrán los beneficios ambientales y sociales esperados.

Códigos JEL: O13, Q12, Q18, Q15, Q54 y Q56

Palabras clave: agricultura protegida, agroindustria, BID, cambio climático, calentamiento global, carbono, certificación, clima, crecimiento verde, cultivos protegidos, desertificación, eficiencia de materiales, eficiencia energética, emisiones, finanzas agrícolas, FIRA, gases de efecto invernadero, invernaderos, medio ambiente y desarrollo, medio ambiente y crecimiento, medio ambiente y comercio, México, política agrícola, producción de alimentos, recursos renovables, sequía

Índice

Acerca del proyecto vii
Agradecimientos ix
Siglas y abreviaturas xi

Alcance de las actividades y metodología 1
Alcance de las actividades 1
Metodología 2
Fuentes de datos 2
Revisión de la literatura 3
Otras fuentes de datos 4

Antecedentes 5
Escala y distribución 5
Factores impulsores de carácter comercial 6
Factores impulsores de las políticas nacionales 6

Caracterización de la tecnología de agricultura protegida en México 9
Diferencias entre los sistemas de invernadero de México y el norte de Europa 11
Cultivos y diferencias pertinentes 12

Criterios comparativos 13
Principales resultados 13

Análisis de los resultados 15
Productividad 15
Variables relacionadas con la tierra 16
Consumo de agua 17
Vulnerabilidades 17
Productos agroquímicos 19
Energía para las operaciones 22
Residuos 22
Mano de obra 23
Huella de GEI 24

Discusión de los resultados 29

Conclusiones 35

Recomendaciones acerca de los criterios de inversión 37
Prácticas preferidas recomendadas para niveles más altos de impacto transformador 41

Bibliografía 43

Anexo 1. **Factores de emisión utilizados para el cálculo de los GEI** 47

Anexo 2. **Cálculos de GEI para la infraestructura de la agricultura protegida** 49

Anexo 3. **Emisiones del riego** 53

Anexo 4. **Factores de emisión utilizados para los fertilizantes** 55

Anexo 5. **Resumen de los GEI totales** 57

Acerca del proyecto

En 2017, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), a través de su División de Conectividad, Mercados y Finanzas, lanzó un nuevo programa técnico para apoyar a los bancos nacionales de desarrollo en sus esfuerzos por recaudar fondos privados a plazos adecuados en los mercados de capital locales e internacionales mediante la emisión de bonos verdes o bonos sostenibles. Los bonos verdes se utilizan para recaudar capital para la financiación de proyectos con beneficios para el medio ambiente. A nivel mundial, el mercado de bonos verdes despegó en 2014 con US$36.600 millones emitidos, el triple del monto emitido en 2013 (US$11.000 millones). Desde entonces, ha crecido de manera constante, alcanzando una emisión total de US$167.300 millones en bonos verdes en 2018. Como los bonos verdes atraen a inversores institucionales y de impacto a nivel nacional e internacional, afectan la capacidad del emisor para diversificar las fuentes de financiación, a la vez que promueven las inversiones con bajas emisiones de carbono u otros tipos de inversiones con impactos ambientales o sociales demostrables y significativos. A finales de 2018, el programa estaba trabajando con 10 instituciones y había apoyado 4 emisiones.

El sector del uso de la tierra (agricultura y silvicultura) sigue representando una parte muy pequeña del universo de bonos climáticos, algo más de 3% en 2018, según la Iniciativa de Bonos Climáticos (CBI). Los proyectos de agricultura con beneficios para el medio ambiente han demostrado ser un reto para los emisores y certificadores de bonos verdes, ya que existen pocas metodologías sistemáticas disponibles para caracterizar las inversiones agrícolas “verdes” y otras inversiones relacionadas con el uso de la tierra. Este estudio desarrolla y aplica una de estas metodologías para identificar inversiones verdes para que la producción de tomates (y, por extensión, de cultivos con características similares) se transforme de cultivos de campo abierto a cultivos en un esquema de agricultura protegida.

Este esfuerzo se está llevando a cabo para apoyar a Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA) —uno de los beneficiarios del programa de asistencia técnica del BID— en la emisión de su primer bono verde. Fundado en 1954 por el Gobierno Federal de México, FIRA es una institución financiera de desarrollo de segundo nivel que ofrece créditos y garantías, capacitación, asistencia técnica y apoyo a la transferencia de tecnología a los sectores agrícola, ganadero, pesquero, forestal y rural de México. El BID respaldó el desarrollo de una metodología para evaluar los impactos ambientales de la agricultura protegida en México. Basándose en esta iniciativa, FIRA emitió su primer bono verde certificado internacionalmente en octubre de 2018.

Los bonos de FIRA fueron los primeros bonos agrícolas en recibir la certificación de la CBI. También fueron examinados por Sustainalytics, que emitió una segunda opinión positiva con respecto al cumplimiento de los Principios de Bonos Verdes del International Capital Market Association (ICMA). Ambas organizaciones revisaron y consideraron la metodología propuesta en este documento y su aplicación a la agricultura protegida en México. Este documento presenta los resultados de este trabajo y la metodología desarrollada.

Agradecimientos

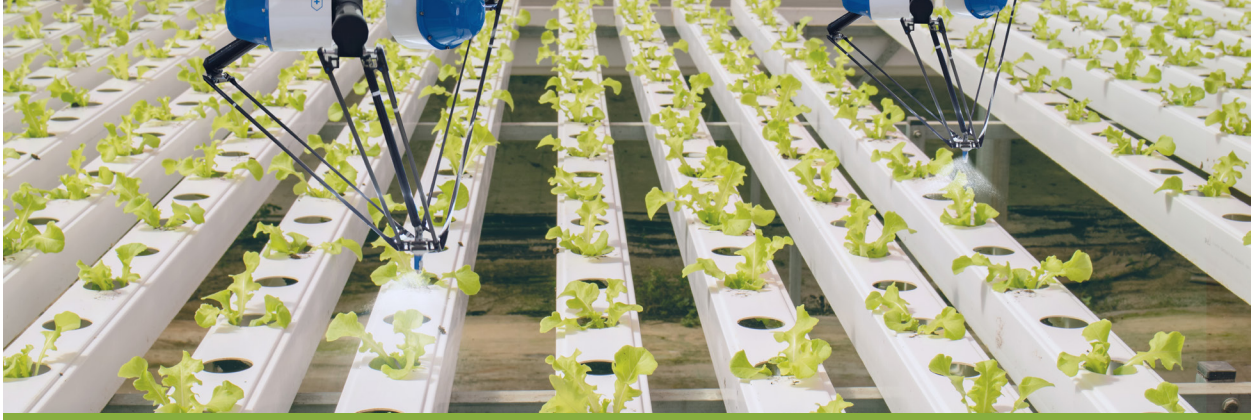
Este informe requirió el aporte de muchas personas de diferentes organizaciones y áreas de especialización, a quienes agradecemos sus valiosas contribuciones y puntos de vista. Los autores y editores desean expresar su agradecimiento a Carmen Fernández Díez y María Netto, del BID, así como al equipo de FIRA, en particular a Erick Rodríguez Maldonado, Artemio Vásquez Aguilar, Ernesto Fernández Arias, José Renato Navarrete Pérez y Nancy Lorena Flores Garcilazo. Mario Steta, de Driscoll Strawberries y presidente de la Asociación Mexicana de Horticultura Protegida (AMHPAC); Mario Alvarado Chávez, presidente de la Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos, y José Ignacio Moreno, de AGROS S.A. de C.V., ofrecieron una orientación fundamental sobre la industria agrícola protegida en México.

Los autores también extienden un agradecimiento especial a Andrew Seidl (Colorado State University), Francisco Alpizar (CATIE), Salvador González (consultor independiente) y Christine Negra (Versant Vision LLC) por sus valiosas revisiones y comentarios sobre los aspectos técnicos del informe.

Este trabajo se realizó como parte de un programa de asistencia técnica ejecutado por el BID con el apoyo de la Iniciativa Internacional para el Clima (IKI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear (BMUB) de la República Federal de Alemania.

Siglas y abreviaturas

ACV	Análisis del ciclo de vida
AP	Agricultura protegida
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CBI	Iniciativa de Bonos Climáticos
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
Conagua	Comisión Nacional de Agua
EPA	Agencia de Protección Ambiental
ENOS	Oscilación del Sur de El Niño
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FDA	Administración de Alimentos y Medicamentos
FIRA	Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura
GEI	Gases de efecto invernadero
SERMANAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
USDA	Departamento de Agricultura de Estados Unidos



Alcance de las actividades y metodología

Los autores se encargaron de diseñar una metodología para evaluar los beneficios ambientales y de otro tipo de la agricultura protegida (AP), considerando la necesidad de cumplir con los criterios de elegibilidad de los emisores de bonos verdes o bonos climáticos. Los bonos verdes se utilizan con la intención de recaudar capital para financiar proyectos con beneficios para el medio ambiente.

A nivel mundial, el mercado de bonos verdes despegó en 2014 con la emisión de US$36.600 millones, el triple de la cantidad emitida en 2013 (US$11.000 millones). Desde entonces, ha crecido de manera constante, alcanzando los US$167.300 millones en emisiones totales de bonos verdes en 2018. El sector del uso de la tierra (agricultura y silvicultura) sigue representando una parte muy pequeña del universo de bonos climáticos, algo más de 3% en 2018, según la Iniciativa de Bonos Climáticos (CBI). Los proyectos con beneficios para el medio ambiente en la agricultura han demostrado ser un reto para los emisores y certificadores de bonos verdes, ya que existen pocas metodologías sistemáticas disponibles para definir qué es “verde” en el sector agrícola.

Alcance de las actividades

Este estudio desarrolla y aplica una metodología para identificar inversiones ecológicas en la transformación de la producción de tomates (y, por extensión, de cultivos con características similares) de cultivos de campo abierto a cultivos en un esquema de agricultura protegida. Los autores procuraron entender y documentar las diferencias entre la hipótesis de mantenimiento del Escenario sin cambios (ESC), definido como la agricultura de campo abierto a los efectos de este estudio, y la agricultura protegida (utilizando varias tecnologías) para diversos criterios ambientales y sociales relevantes.

El objetivo de esta iniciativa era comprender, y en la medida de lo posible cuantificar, la diferencia entre ambos escenarios en relación con una serie de variables ambientales y sociales relevantes. Los autores no procuraron realizar un análisis del ciclo de vida (ACV) de los diferentes escenarios, pues no era un requisito. Más bien, estudiaron los cambios en un conjunto selecto de variables que son de mayor interés y relevancia para el Gobierno mexicano, los bancos de desarrollo nacionales y regionales, y las certificadoras

y emisoras de bonos de orientación ambiental y social.

Metodología

Este enfoque no es estrictamente nuevo desde el punto de vista metodológico, puesto que compara diferentes sistemas de producción. Es similar a los enfoques generalmente adoptados para los bonos climáticos o en los criterios de inversión ecológica para determinar las diferencias marginales entre los diferentes enfoques (por ejemplo, comparar una inversión en energía renovable con una inversión de referencia en combustibles fósiles). Las principales diferencias en el enfoque empleado por los autores en este trabajo radican en la selección de los criterios comparativos (particularmente, el rango), el enfoque de normalización de la capacidad de producción (que, como norma, en la agricultura depende de la tierra) y la gama de tecnologías alternativas.

Se trata de un enfoque considerado apropiado para este análisis. En primer lugar, los sistemas biológicos para plantar, cultivar y cosechar son prácticamente idénticos, ya que se basan en el mismo producto agrícola en todos los escenarios (con diferencias relativamente menores entre variedades). En segundo lugar, toda la producción está en el mismo país. Aunque puede haber diferencias geográficas importantes, están limitadas por la biología de la planta. Sin embargo, todos los escenarios se enmarcan en el mismo contexto normativo y tienen la misma combinación energética; a su vez, los tipos de insumos y costos son prácticamente idénticos, los materiales y tecnologías de construcción son muy similares, los agrónomos tienen una formación afín, etc. Las condiciones biológicas y el contexto del país controlan sustancialmente una amplia gama de factores exógenos, permitiendo que el estudio se centre en las diferencias entre los escenarios de los sistemas de producción.

La metodología se dividió en dos pasos. El primero consistió en determinar el conjunto apropiado de criterios ambientales y sociales sobre los cuales comparar las diferentes tecnologías de producción. Para este primer paso, los autores establecieron criterios ambientales y sociales basados en las variables más comunes de interés o preocupación en la agricultura, incorporando los criterios propuestos por la CBI para los impactos del cambio climático relacionados con el uso de la tierra (mitigación y adaptación), a fin de aumentar la alineación con los criterios emergentes de los bonos climáticos y bonos verdes (un punto de referencia fundamental) en los documentos de criterios preliminares establecidos. Se agregaron criterios adicionales basados en estándares ampliamente utilizados por las organizaciones de certificación agrícola y los programas de préstamos ecológicos de las instituciones financieras de desarrollo, así como los sugeridos en la escasa literatura publicada en relación con este tema. La lista de criterios fue distribuida para que el BID, la CBI y varios expertos en la materia hicieran comentarios para validar su relevancia.

El segundo paso consistió en examinar las características específicas de las distintas tecnologías de producción aplicadas a cada uno de los criterios ambientales y sociales para generar datos comparativos para cada criterio. Los datos recogidos y analizados se utilizaron para completar una matriz comparativa, lo que permitió realizar comparaciones directas. Se estandarizaron los datos para facilitar una comparación más directa, generalmente con respecto a las variables de producción (kilogramos o toneladas de producción). En la medida de lo posible, se utilizaron datos cuantitativos y se agregaron datos cualitativos para complementar o aclarar los puntos de datos.

Fuentes de datos

El principal desafío para esta iniciativa fue la escasez de literatura publicada que compara la agricultura protegida con la agricultura convencional de campo abierto teniendo en cuenta consideraciones ambientales y sociales. Las publicaciones existentes suelen centrarse en los factores agronómicos, particularmente en las variables relacionadas con la productividad, y por lo general

Agricultura protegida de tecnología alta: Nave de producción.

no son específicas de México. En consecuencia, la metodología buscó obtener información de las siguientes fuentes:

- Revisión de la literatura para obtener información directamente relevante.
- Revisión de la literatura para obtener datos potencialmente relevantes que puedan extrapolarse (por ejemplo, la productividad y los costos de producción e incluso la huella ambiental) o utilizarse para validar puntos de medida de expertos locales, específicamente de México.
- Entrevistas con personas en México con experiencia en agricultura protegida (agrónomos investigadores y expertos técnicos sobre el terreno involucrados en la financiación).
- Documentos de FIRA relacionados con la financiación de la agricultura protegida.
- Directivos de empresas productoras orientadas a la agricultura protegida.
- Fuentes oficiales de información sobre políticas y datos de campo.

Revisión de la literatura

La literatura formal revisada por pares sobre los impactos ambientales de la agricultura de invernadero es extremadamente escasa. La mayoría de las publicaciones sobre agricultura protegida se centran en los aspectos de productividad y en parámetros agrícolas concretos (por ejemplo, fertilización y estrategias de agua o comparaciones de variedades). Entre las publicaciones más relevantes para esta iniciativa se encuentra Torrellas *et al*. (2013), quienes desarrollaron una metodología de insumos/productos para calcular diversas emisiones ambientales considerando los insumos de producción en relación con diferentes cultivos. Torrellas *et al*. basan gran parte de su modelo en herramientas desarrolladas por el proyecto Euphoros,[1] un proyecto agrícola apoyado por la Unión Europea que busca identificar estrategias para reducir en gran medida el impacto del ciclo de vida

[1] https://www.wur.nl/en/Research-Results/Projects-and-programmes/Euphoros.htm.

de la agricultura protegida. Por otro lado, algunos documentos específicos de cada país, como Boulard *et al*. (2011), sobre Francia; Antón *et al*. (2010), sobre los Países Bajos; y Moreno Reséndez *et al*. (2011), sobre México examinan los impactos en las tecnologías empleadas en contexto e impactos ambientales muy específicos. Golaszewski *et al*. (2012) recopilan perfiles energéticos en toda la Unión Europea para diferentes sistemas de producción (incluida una parte de agricultura protegida) a fin de estimar el consumo de energía por unidad de producción del producto. Se encontró un único documento publicado que intenta explícitamente hacer comparaciones entre los sistemas agrícolas de campo abierto y los sistemas agrícolas protegidos en una región de producción, de Muñoz *et al*. (2008), y que examina los perfiles de los gases de efecto invernadero (GEI) de la producción de tomate en el sur del Mediterráneo.

Todas estas fuentes proporcionaron importantes aportes que resultaron instructivos para el enfoque adoptado en este documento. A menudo se utilizaron los resultados de estos estudios para comparar y validar algunos de los resultados de este documento. Los documentos citados presentan ciertas limitaciones, lo que hacía inviable el uso directo o la incorporación de sus metodologías. En particular, tendían a centrarse en un conjunto reducido de parámetros (como los GEI) y analizaban casi exclusivamente geografías y contextos agrícolas diferentes de los de México. Además, el propósito y las necesidades de los clientes establecidos para esta labor requerían una comprensión de alto nivel de una serie de variables y no una comprensión extremadamente detallada de las variables objetivo de gran parte de la literatura técnica.

Otras fuentes de datos

Ante la ausencia de estudios detallados, existen datos cuantitativos reportados por profesionales e investigadores, o presentado en documentos de orientación técnica o fuentes oficiales, que resultan indicativos. La base de datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de México proporcionó datos de campo de alta calidad, recopilados por agentes de extensión en todo el país. Aunque esta base de datos no proporciona información específica sobre variables ambientales, resultó fundamental para comprender la naturaleza, escala, ubicación y selección de productos para la agricultura protegida. Los datos sobre las pérdidas catastróficas de cultivos proporcionaron gran parte de la base para las estimaciones de reducción de la vulnerabilidad.

Los autores entrevistaron a más de 20 expertos en agricultura protegida de México o directamente recibieron sus aportes, incluidos investigadores, agrónomos en ejercicio y gerentes de empresas de agricultura protegida de diferentes partes del país. La expansión de la agricultura protegida y la evolución tecnológica avanzan rápidamente, y de manera mucho más veloz de lo que alcanzan a investigar y reportar los investigadores académicos. En los casos en que no fue posible obtener datos cuantitativos, se presentan datos comparativos y cualitativos para profundizar en la forma en que se comprenden actualmente las variables. Los autores basaron la recopilación y el análisis de datos en las mejores prácticas actuales para cada tecnología.

Antecedentes

"Agricultura protegida" es el término utilizado para describir una serie de técnicas de cultivo que controlan total o parcialmente el microclima que rodea al cuerpo de la planta de acuerdo con las necesidades de la especie durante su período de crecimiento.[2] Específicamente, se refiere a tecnologías y técnicas que pueden utilizarse para proteger los cultivos de ciertos elementos ambientales, biológicos y climatológicos con el objetivo de mejorar la producción. Estas técnicas contrastan con el actual escenario sin cambios de producción de campo abierto, que se refiere a técnicas agrícolas más tradicionales en suelos naturales y con exposición directa a la luz solar, el viento, la lluvia, los patógenos y otros elementos del sistema de producción. Se trata del método convencional de cultivo moderno en México, que se practica en la gran mayoría de las fincas y determina la capacidad de producción de los productos analizados en este documento.

Escala y distribución

La agricultura protegida ha crecido rápidamente en México y se ha extendido geográficamente. En el año 2000, solo había 790 hectáreas en producción. En 2015, el Gobierno reportó 23.251 hectáreas de agricultura protegida, lo que representa una tasa de crecimiento anual compuesta de 25% durante este período. Aproximadamente 80% de la producción se destina a los mercados de exportación (casi exclusivamente a Estados Unidos). La Asociación Mexicana de Agricultura Protegida informa que la producción está muy concentrada en unos pocos productos: 70% de tomate, 16% de pimientos, 10% de pepinos y menos de 2% de bayas. Casi toda la agricultura protegida se concentra en nueve estados (de un total de 31), y algo más de la mitad se da en solo cuatro estados: Sinaloa, Jalisco y los dos estados de Baja California (FIRA, 2016a).

[2] "Agricultura protegida" y "agricultura en un ambiente controlado" son sinónimos. Los economistas utilizan con frecuencia la primera expresión, para dejar en claro que el concepto se refiere al uso de técnicas de producción que implican una protección, y no a mercados agrícolas protegidos por barreras comerciales arancelarias y no arancelarias. Los investigadores utilizan cada vez más la segunda, para describir con mayor precisión la lógica de la tecnología.

Factores impulsores de carácter comercial

El principio subyacente de la agricultura protegida es proporcionar una forma de control sobre las condiciones que son difíciles —cuando no imposibles— de controlar en la agricultura de campo abierto. Las principales condiciones que controla son la naturaleza horizontal de la agricultura de suelo, el agua y la lluvia, la temperatura, las condiciones meteorológicas y climáticas y los patógenos y sus diversos vectores. Cuanto más avanzada es la tecnología, más variables controla la agricultura protegida. Los procesos hidropónicos de invernadero de tecnología más alta se asemejan más a las operaciones de fabricación que a las operaciones agrícolas tradicionales.

Los principales factores comerciales que impulsan la agricultura protegida en México son:

- Productividad más elevada y constante.
- Mayor eficiencia en el uso de la tierra, el agua, los fertilizantes, los pesticidas, la mano de obra y, en muchos casos, la energía.
- Capacidad para satisfacer la demanda de manera rentable durante los meses más fríos en México (menor producción agregada, precios más altos) y particularmente en la temporada de invierno de Estados Unidos para los cultivos de exportación.
- Mejor control de las condiciones sanitarias y fitosanitarias para cumplir con los requisitos del mercado y reducir el riesgo y los daños a los cultivos (los cultivos dañados se traducen en precios y ventas más bajos).
- Reducción de la vulnerabilidad y del riesgo asociado a condiciones meteorológicas adversas (lluvias torrenciales, granizo, sequía) que afectan negativamente a los cultivos, el suelo, la calidad y las condiciones sanitarias y fitosanitarias.
- Mejor capacidad para responder a los requisitos cada vez más exigentes de los consumidores con respecto al uso de pesticidas, condiciones sanitarias y protección de los trabajadores, principalmente en los mercados internacionales, pero cada vez más en los nacionales también.

Factores impulsores de las políticas nacionales

En México, las empresas y el Gobierno han impulsado y promovido la agricultura protegida como estrategia comercial para aumentar la producción de productos de exportación de alto valor y, por extensión, generar más y mejores empleos y mayores ingresos en divisas.

El Gobierno también ha apoyado enérgicamente la agricultura protegida en todo el país, particularmente en sus variantes de tecnología baja, a través de sus instituciones financieras nacionales de desarrollo, como FIRA. El objetivo es ayudar a los agricultores a aumentar la productividad y reducir la vulnerabilidad en comparación con condiciones meteorológicas adversas y numerosos patógenos.

El Gobierno cita específicamente la agricultura protegida en su Programa Especial de Cambio Climático 2014–18 (SEGOB, 2014), donde dice: “Estrategia 2.3: Implementar prácticas agropecuarias, forestales y pesqueras sostenibles que reduzcan emisiones y disminuyan la vulnerabilidad de ecosistemas.” El área de acción 2.3.2 establece: “Tecnificar la superficie agrícola mediante el riego y la agricultura protegida para reducir la vulnerabilidad climática y aumentar la seguridad alimentaria”. Esta estrategia se ajusta plenamente a las recomendaciones y directrices de la FAO sobre la intensificación sostenible de la producción agrícola.[3]

Además, en la planificación de México en el marco de la CMNUCC, el país se compromete a “…construir infraestructura de calidad, emplear las técnicas más avanzadas y fortalecer las operaciones para garantizar la disponibilidad de agua destinada para la agricultura”. Cada vez se reconocen más los beneficios de la respuesta al

[3] Véase, por ejemplo, http://www.fao.org/policy-support/policy-themes/sustainable-intensification-agriculture/en/.

cambio climático, en particular con respecto a la reducción de la vulnerabilidad hídrica (SEMARNAT e INECC, 2016). Gran parte de México se enfrenta a un estrés hídrico crónico, y se cree que buena parte del país está experimentando un aumento en la frecuencia de fenómenos meteorológicos graves (lluvias torrenciales, sequías, tormentas de granizo) que coinciden con los modelos de cambio climático. Un estudio realizado por el Gobierno mexicano en 2011 estimó pérdidas del PIB de entre 3,5% y 4% como consecuencia del impacto del cambio climático, y una parte significativa se da en el sector agrícola (Estrada *et al*., 2013).

Caracterización de la tecnología de agricultura protegida en México

La agricultura protegida en México generalmente se divide en tres categorías: invernaderos de tecnología alta, invernaderos de tecnología baja y casas sombra, y una cuarta categoría intermedia, dependiendo de la tecnología utilizada. Estas tecnologías se utilizan con mayor frecuencia en los cultivos comerciales de alto valor mencionados anteriormente y, cada vez más, en la producción de verdura de hojas verdes, principalmente para el mercado local. Aunque no existe una definición unificada oficial de estas tecnologías, todos los expertos y documentos consultados coincidieron en las definiciones.[4] El anexo 1 presenta imágenes demostrativas de las diferentes tecnologías.

Los autores escogieron basar los datos y el análisis en las mejores prácticas actuales para cada tecnología de agricultura protegida. Esta decisión se tomó para reflejar con mayor precisión los escenarios futuros para la agricultura protegida, y para que fueran más representativos de las solicitudes y la financiación deseada de las instituciones financieras. En consecuencia, algunas de las variables de este informe, en particular la productividad, se basan en la información expresada por expertos y en datos observados, y son considerablemente más elevadas que los promedios reportados por fuentes oficiales.

Tecnología alta. La agricultura protegida de tecnología alta en México utiliza invernaderos completamente cerrados, aislados del suelo y del aire circundante; sustratos inertes[5] en lugar de suelos; riego de precisión por goteo, microaspersión o fertiirrigación, y automatización de las aguas; fertilizantes de precisión y otros productos químicos, con ajuste constante durante el ciclo de cultivo para tener en cuenta los cambios en el clima (a corto y largo plazo). En la mayoría de los cultivos comestibles (tomate, pimiento, pepino y verduras de hojas verdes), los sistemas son hidropónicos (es decir, los nutrientes se proporcionan en solución en el agua de riego). Esta tecnología requiere una inyección considerable de

[4] El SIAP utiliza una nomenclatura ligeramente diferente en sus registros estadísticos, pero las categorías son las mismas.

[5] Los sustratos son diferentes tipos de material orgánico o inorgánico en los que crece la planta de invernadero, en lugar de crecer en el suelo. Entre las ventajas de su uso se cuentan la mejora en el manejo de plagas, el flujo de agua y la transferencia de nutrientes.

Agricultura protegida de tecnología alta.

capital, se basa en adaptaciones a tecnología principalmente holandesa y se utiliza en cultivos destinados mayoritariamente a los mercados de exportación. El argumento comercial es que una mayor productividad de un producto de mejor calidad proporciona mayores ingresos, lo que justifica la inversión.

El principal impulsor es el mercado estadounidense de tomates, pepinos, pimientos, bayas y otros productos, especialmente durante la temporada de invierno, cuando los precios de estos productos aumentan sustancialmente en ese país y las condiciones climáticas en México permiten su producción. El ambiente controlado de alta tecnología también permite a los productores manejar y cumplir con los requisitos sanitarios y fitosanitarios más exigentes de Estados Unidos, como los del Departamento de Agricultura (USDA), los de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y los de la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA), sobre patógenos, plaguicidas y residuos químicos. A diferencia de los sistemas del norte de Europa, en México los espacios de cultivo generalmente no tienen calefacción. En algunas regiones de cultivo, el calor adicional para mantener las condiciones de cultivo se utiliza de forma limitada durante las horas nocturnas de los meses más fríos, generalmente mediante la irradiación de agua circulante calentada con gas natural. El uso de esta calefacción evita pérdidas de cosecha, asegura la producción cuando los precios son más altos y permite garantizar empleo durante todo el año. Contar con empleo durante todo el año es muy beneficioso para los trabajadores y cada vez más importante para los operadores de invernaderos, que necesitan trabajadores altamente calificados y que, en muchas zonas geográficas, compiten para atraerlos y retenerlos.[6]

[6] Los productores de tecnología alta en el estado de Querétaro comentaron que compiten directamente con los trabajadores de la industria automotriz por su fuerza laboral principal.

Nótese que para las medidas de productividad y la posterior normalización de otras variables para la agricultura protegida de tecnología alta, las cifras presentadas corresponden a las "mejores prácticas" de las nuevas tecnologías actuales. Los autores consideran que este es el nivel de producción de referencia relevante, ya que refleja con mayor precisión las inversiones recientes (de algunos años previos) y lo que se está desarrollando en México en la actualidad y, por tanto, con buenas perspectivas de ser objeto de una nueva financiación.

Tecnología baja. La tecnología baja se refiere a estructuras de protección rudimentarias (es decir, túneles de plástico sobre soportes semirrígidos) que protegen los cultivos frente a las lluvias torrenciales, la sequía, el sol y el calor excesivos, y otras condiciones adversas. Los cultivos producidos en terrenos que emplean esta tecnología van destinados, casi sin excepción, al consumo del mercado local. Esta tecnología se ha promovido de manera enérgica para mejorar los ingresos agrícolas mediante el aumento de la productividad y la reducción de la vulnerabilidad, principalmente como mecanismo para mantener la viabilidad de los pequeños agricultores. Los agricultores pueden esperar aumentos significativos de la productividad, pero la ventaja económica radica principalmente en la capacidad de mantener la calidad y los precios.

Casa sombra. Esta categoría es una versión específica de la agricultura protegida de tecnología baja, un enfoque que los productores adoptan cada vez más. Generalmente financiada en operaciones a gran escala, consiste en colocar una cubierta protectora y permeable sobre la tierra, casi siempre en sistemas previos de producción extensiva de campo abierto (escenario sin cambios), para aumentar la productividad y disminuir los diversos riesgos de la producción. Para los productores de campo abierto, esto es un primer paso común en la agricultura protegida. Con una inversión relativamente baja, logran beneficios significativos, en particular menor vulnerabilidad, mayor productividad, mayor eficiencia en el uso del agua y de los insumos químicos, y mayor capacidad para servir al rentable mercado de invierno de Estados Unidos. Junto con a las operaciones de tecnología alta, actualmente es la tecnología de más rápido crecimiento en México (en términos de hectáreas e inversión total). Consiste en la construcción de una estructura que sostiene una malla permeable sobre las tierras de producción existentes de campo abierto (escenario sin cambios), casi siempre con riego por goteo. La estructura reduce el riesgo de la infección por insectos, el viento y el granizo, y permite a los productores utilizar variedades "indeterminadas" más productivas.[7]

Tecnología media. Esta amplia categoría abarca todo lo que se encuentra entre los enfoques de tecnología alta y baja, que son más fáciles de categorizar. En general, la tecnología media se refiere a sistemas de producción que están completamente o casi completamente aislados del aire y protegidos de la lluvia gracias a una cubierta de malla de sombra, donde la producción suele realizarse con sustrato o una combinación de sustrato y suelos. El uso del agua no siempre se controla de forma automatizada, y se aplica una nutrición de precisión, aunque no suele ser hidropónica. Por lo general, los cultivos producidos son para consumo doméstico, pero a veces pueden exportarse a través de agrupadores si cumplen con las normas sanitarias en cuanto a patógenos, tipos de pesticidas y residuos.

Diferencias entre los sistemas de invernadero de México y el norte de Europa

Los invernaderos de México, en particular las operaciones de tecnología alta, suelen ser adaptaciones de la tecnología holandesa. Si bien algunos aspectos son muy similares (por ejemplo,

[7] Las variedades "indeterminadas" crecen, florecen y fructifican durante toda la temporada de crecimiento. Las "determinadas" crecen hasta una cierta altura y luego se detienen. También florecen y cuajan todos sus frutos en un período de tiempo relativamente corto.

CUADRO 1. Consumo energético indicativo para la producción de tomate en invernadero

País	Productividad (toneladas/ha)	Entrada de energía GJ/tonelada	kwh/kg
Alemania	200	63,30	17,58
Holanda	640	23,60	6,56
Portugal	200	2,23	0,62
Grecia	230	1,12	0,31
México	500	0,78	0,22

Fuente: Golaszewski *et al*. (2012). Los datos sobre México fueron recopilados por los autores y provienen de distintas fuentes sobre sistemas de agricultura protegida de tecnología alta.

tipo de estructura y materiales, sistemas hídricos, enfoques hidropónicos, manejo de patógenos, etc.), la principal diferencia radica en el consumo de energía. Los sistemas holandeses y alemanes emplean calefacción durante casi todo el año para mantener la temperatura necesaria para cultivar el producto. En México, las temperaturas de crecimiento necesarias se dan de manera natural durante todo el año. Solo se requiere una ventilación sencilla durante los períodos más calurosos y, con mayor frecuencia, calefacción por suelo radiante con circulación de agua, que se utiliza de forma limitada cuando las temperaturas frías amenazan la viabilidad de los cultivos o afectan gravemente el crecimiento (cuadro 1).

Cultivos y diferencias pertinentes

Tanto FIRA como el BID procuraron seleccionar cultivos producidos en grandes volúmenes con sistemas de agricultura protegida que fueran relevantes desde el punto de vista de la financiación así como del impacto en las políticas nacionales. Sin embargo, casi todos los datos publicados y las opiniones de los expertos se centran en la producción de tomate, dada la altísima importancia económica de este cultivo y su preponderancia en la agricultura protegida de México (y, en general, de todo el mundo).

Los expertos en agricultura protegida consultados y la literatura disponible coinciden en que, si bien las cifras absolutas pueden variar —independientemente de si se utiliza el enfoque de mantenimiento del escenario sin cambios o la agricultura protegida para cultivar tomates, pimientos y pepinos—, casi no se observan diferencias en variables tales como productividad, uso del agua, uso de productos químicos, residuos y aspectos laborales, siendo los resultados muy similares para las bayas. Por lo tanto, los autores creen que los resultados de este informe, que se basan sustancialmente en datos sobre la producción de tomate y orientados a la producción de tomate, son igualmente válidos para todos los cultivos citados (que representan al menos 90% de toda la producción de agricultura protegida en México) en cuanto a dirección y potencial del impacto en todas las variables ambientales y sociales. Una excepción notable es la producción de verdura de hojas verdes, como lechuga y espinaca, que tienen perfiles de producción significativamente diferentes y no se consideran en esta iniciativa. Específicamente, estos productos requieren diferentes condiciones de control climático, geografías de producción, escalas, escenarios sin cambios, usos del agua y estrategias químicas, lo que los hace menos comparables. Para caracterizar estos productos se requiere de un estudio separado, incluso si se utiliza la misma metodología.

Criterios comparativos

Los autores incluyeron criterios ambientales y sociales en relación con las variables más comunes de interés en la agricultura e incorporaron los criterios propuestos por la Iniciativa de Bonos Climáticos (CBI) para aumentar la alineación con los bonos climáticos emergentes y otros criterios de los bonos verdes y los bonos sociales.

Se seleccionaron las siguientes variables para la comparación:

- Productividad
- Requisitos de tierra y suelo
- Uso del agua
- Vulnerabilidad
- Productos químicos (fertilizantes y pesticidas)
- Uso de energía
- Residuos
- Temas laborales
- Huella de GEI

En la medida en que las metodologías publicadas y la disponibilidad de datos cuantitativos lo permitan, se utilizan estas variables. En los casos en que no resultó posible obtener datos cuantitativos, se presentan datos comparativos y cualitativos para profundizar la comprensión actual de las variables.

Principales resultados

Todos los datos y opiniones de los expertos apuntan a que la agricultura protegida es una estrategia muy favorable para lograr diversas metas, a saber:

- La mejora de los ingresos agrícolas (mediante aumentos de la productividad, la mejora de los precios en función de la calidad y la estacionalidad y la reducción de daños y pérdidas de las cosechas).
- El aumento de la eficiencia, particularmente en materia de agua, uso de la tierra, fertilizantes y mano de obra.
- La reducción en gran medida de la vulnerabilidad y el aumento de la resiliencia a las condiciones meteorológicas cambiantes y a los impactos físicos y patógenos relacionados (insectos en general y, en el caso de la agricultura protegida de tecnología alta, también bacterias y hongos).

- Oportunidades para reducir el consumo de agua a través de la eficiencia y la recuperación, e incluso para utilizar agua desalinizada (no potable) de menor calidad para la producción de tomate.
- La posibilidad de utilizar una serie de tecnologías nuevas para mejorar aún más el impacto ambiental y social (productos químicos más seguros, menor impacto hídrico y menos residuos).

Para las operaciones de tecnología más avanzada, se observaron los siguientes beneficios adicionales:

- Estabilidad económica de los trabajadores gracias a un empleo mejor remunerado durante todo el año.
- Salarios más altos para los trabajadores agrícolas y mejores condiciones de trabajo (de tecnología media a alta).
- La posibilidad de mejoras futuras mucho mayores en la productividad, la seguridad y la gestión del agua (a diferencia de las estrategias del escenario sin cambios, que tienen pocas perspectivas de mejoras significativas).
- Una huella de GEI por unidad de producción generalmente más baja. Mientras que la agricultura protegida aumenta algunos impactos en comparación con el escenario sin cambios —especialmente los residuos de plástico—, dicho impacto se compensa en otras áreas al examinar todo el sistema de producción, y en particular cuando se consideran las emisiones actuales frente a las emisiones incorporadas.

Todos los expertos consultados y todos los datos identificados son notablemente congruentes en los puntos anteriores. Las diferencias de opinión sobre la interpretación de los datos son relativamente pequeñas. No existe un desacuerdo aparente sobre la dirección de los impactos o la naturaleza y magnitud de los costos y beneficios. Existen notables diferencias contextuales (México con respecto al Mediterráneo y a Europa del Norte) que requieren un análisis cuidadoso. Sin embargo, los resultados en México son consistentes con los de los estudios publicados en otras geografías y, cuando se controla por clima, condiciones de crecimiento y tecnología empleada en México, el nivel de alineación y consistencia es alto.

Los beneficios ambientales y sociales de la agricultura protegida en comparación con el escenario sin cambios están muy correlacionados (y de manera directa) con las variables/opciones tecnológicas y las decisiones de gestión específicas. Esto debería permitir el establecimiento de normas basadas en criterios observables. Por ejemplo, el tipo de infraestructuras y tecnologías empleadas parecen ser satisfactorias como condiciones que determinan un impacto reducido. Esto proporcionaría directrices y criterios de inversión sencillos y solo requeriría una simple verificación.

Análisis de los resultados

Esta sección presenta los principales resultados de las iniciativas de recopilación de datos para cada uno de los criterios de la matriz de impacto.

Productividad

La mayor diferencia entre la agricultura protegida y el escenario sin cambios se refiere a la productividad del sistema de producción. A ello se debe mucho (si no la mayor parte) de la transición hacia la agricultura protegida en México. La productividad se mide en kilogramos de producto al año por hectárea de tierra. Los aumentos de la productividad provienen principalmente de la capacidad productiva pura, pero también del aumento de la producción, ya que se evitan las pérdidas debidas a condiciones meteorológicas adversas y a agentes patógenos. Sin embargo, el aumento de la productividad también se deriva de la eficiencia de los fertilizantes, el agua, la mano de obra y otras variables, que se abordan en otros criterios a continuación.

Para esta comparación se utiliza la productividad del tomate, aunque los expertos confirmaron una fuerza de impacto casi idéntica en el pimiento morrón y los pepinos, y probablemente aún mayor en las bayas debido a su susceptibilidad a los patógenos y a la sensibilidad a la temperatura y los hongos.

Para las medidas de productividad y la posterior normalización de otras variables en el caso de la agricultura protegida de tecnología alta, las cifras presentadas en el cuadro 2 corresponden a las mejores prácticas actuales de nuevas tecnologías. Los autores consideran que este es el nivel de producción de referencia relevante porque refleja con mayor precisión las inversiones recientes (de los últimos años) y lo que se está desarrollando en México en la actualidad.

Las cifras de productividad del cuadro 2 no incluyen las pérdidas esperadas por condiciones climáticas severas experimentadas principalmente en la producción de campo abierto, que se abordarán en la sección sobre vulnerabilidad. Por lo tanto, estas cifras de productividad sobrevaloran la productividad del escenario sin cambios y subestiman la de la agricultura protegida en relación con el valor esperado.

CUADRO 2. Productividad de la tierra (toneladas métricas de tomate por año por hectárea de tierra)

Escenario sin cambios (campo abierto)	Tecnología alta (mejores prácticas actuales)	Tecnología baja	Casa sombra	Tecnología media
22 toneladas/ha de temporal	500–800 toneladas/ha	100 a 300 toneladas/ha	Estacional 120 a 150 toneladas/ha	400 toneladas/ha (mediana estimada)
40 toneladas/ha de riego			Todo el año 250 a 300 toneladas/ha	
	(mejora de 12 a 35 veces respecto del escenario sin cambios)	(mejora de 2,5 a 13 veces respecto del escenario sin cambios)	(mejora de 3 a 14 veces respecto del escenario sin cambios)	(mejora de 10 a 18 veces respecto del escenario sin cambios)

Fuentes: FIRA (2009; 2016b); Carlos Torres Barrera (FIRA), entrevista de septiembre de 2017; Katia Montero, experta en agricultura protegida, entrevista de marzo de 2018.
Nota: Los datos de productividad de la tecnología alta corresponden a las mejores prácticas actuales de una producción anual.

Variables relacionadas con la tierra

Las cuestiones clave relacionadas con la tierra tienen que ver con las necesidades del suelo y la erosión. Las necesidades del suelo están ligadas a los requisitos agronómicos del cultivo específico. El tomate de campo abierto requiere un suelo profundo, limoso (alto contenido orgánico), bastante llano y con buen drenaje, y un pH óptimo entre 6,2 y 6,8. Se trata de tierras agrícolas de primera calidad que se degradan con el uso y que requieren la reposición de nutrientes y materia orgánica. La agricultura protegida de tecnología baja y las casas sombra (y aproximadamente 60% de la agricultura protegida de tecnología media que utilizan suelo natural) requieren las mismas condiciones generales. Las operaciones de tecnología alta y las de tecnología media que utilizan sustratos en lugar de suelos no tienen requisitos en materia de suelos. Estas operaciones de agricultura protegida pueden darse en cualquier tipo de terreno, siempre y cuando no sea en una pendiente superior a 2%. En la práctica, los suelos naturales se cubren con plástico grueso en operaciones de tecnología alta para asegurar que los suelos y los microbios que contengan no penetren en los cultivos. Las condiciones de cultivo se crean bioquímicamente en el sustrato de cultivo. La tendencia en la tecnología media es dejar de lado los suelos y utilizar sustratos para reducir la variabilidad y la exposición a patógenos. Se están realizando investigaciones para mejorar los sustratos, con vistas a mejorar el suministro de nutrientes, la gestión del agua y las condiciones de cultivo.

En cuanto a la erosión, en las fincas de tecnología alta no se producen pérdidas de este tipo debido a que el sistema de producción no está conectado al suelo. En el caso de las operaciones de campo abierto, los autores no pudieron encontrar en la literatura ningún dato específico sobre las pérdidas por erosión, aunque en documentos de FIRA y otros se mencionan entre las principales razones por las que los agricultores deberían considerar migrar hacia sistemas de agricultura protegida. En los sistemas de tecnología media que utilizan sustratos tampoco hay pérdida por erosión. Por su parte, en los sistemas de tecnología media que utilizan suelos naturales, podría haber algo de erosión, aunque sería relativamente mínima y poco frecuente, en particular si se los compara con la agricultura de campo abierto e incluso con la agricultura protegida de tecnología baja. La producción de tecnología baja, incluidas las casas sombra, seguiría estando sujeta a pérdidas por erosión debido a precipitaciones y crecidas de los ríos (si hubiera exposición), pero la erosión por impacto directo de las precipitaciones se reduce considerablemente ya que el cobertor plástico bloquea el impacto directo y las salpicaduras de las lluvias torrenciales (cuadro 3).

CUADRO 3. Variables relacionadas con la tierra

Variable	Escenario sin cambios (campo abierto)	Tecnología alta (mejores prácticas actuales)	Tecnología baja	Casa sombra	Tecnología media
Tipo de terreno	Profundo, limoso, bastante plano, con buen drenaje y pH entre 6,2 y 6,8 (ligeramente ácido para el tomate).	Cualquier terreno que pueda ser cubierto, con menos de 2% de pendiente. El medio de cultivo es el sustrato.	Igual que el escenario sin cambios.	Lo ideal es que el terreno tenga drenaje y una ligera pendiente para evitar plagas.	Aproximadamente 60% en suelos, igual que en el escenario sin cambios. 40% en sustratos, igual que la tecnología alta.
Erosión	A menudo se considera motivo de preocupación.	Ninguna de las operaciones agrícolas.	Considerablemente menor que en el escenario sin cambios, pero representa una preocupación constante.	Considerablemente menor que en el escenario sin cambios, pero representa una preocupación constante.	Fluctúa entre un nivel mucho menor que en el escenario sin cambios y un nivel nulo.

Fuentes: FIRA (2009; 2011); entrevistas con varios expertos.

Consumo de agua

La mejora de la gestión del agua es una de las características más notables de la agricultura protegida. En la producción de campo abierto, la lluvia o el riego (generalmente mediante bombas de gran volumen) satisfacen las necesidades de agua. El riego es periódico y la mayor parte del agua se pierde en el suelo, la escorrentía o la evaporación. En operaciones de tecnología alta y en muchas de tecnología media, el agua se asigna específicamente en función de las necesidades de las plantas en tiempo real mediante sistemas de riego por goteo y microaspersión, a menudo con sensores y controlados por ordenador. La evaporación es mínima y se pierde poca agua. Los sistemas son tan eficientes desde el punto de vista energético que pueden accionarse (cada vez más) mediante motores pequeños de bajo voltaje y amperaje (en cambio, la producción de campo abierto requiere bombas de gasolina o diesel de al menos 2 caballos). Además, las operaciones de tecnología alta y las operaciones de tecnología media más sofisticadas utilizan sistemas hidropónicos en los que los nutrientes se suministran a través del agua. La pérdida de agua significa también la pérdida de nutrientes. Este factor económico fomenta un uso muy eficiente e incentiva la recuperación y la reutilización del agua perdida. Las operaciones de tecnología alta requieren suministros de agua extremadamente confiables, por lo que tienden a utilizar pozos profundos para asegurar la cantidad y calidad necesarias durante todo el año. Los métodos de producción de campo abierto y de tecnología baja utilizan una mezcla de temporal, riego de superficie (con bombas) y ocasionalmente pozos en climas más secos. Sin embargo, las casas sombra que están bien capitalizadas utilizan sistemas de riego de precisión y requieren suministros de agua confiables, al igual que las operaciones de tecnología alta (cuadro 4).

La disposición final del agua usada es muy variable en México, dependiendo de las condiciones locales específicas. Debido a temperaturas generalmente cálidas, hay una evaporación significativa en la producción de campo abierto. Aunque técnicamente gran parte de cualquier exceso de riego se recargará a través del suelo o irá aguas abajo para otros usos, la pérdida por evaporación se considera importante, aunque difícil de cuantificar. Sin embargo, dado que el principal problema relacionado con el agua en México, y el enfoque principal de la política nacional, es la escasez, se considera que su uso eficiente es la principal variable de preocupación.

Vulnerabilidades

Las principales vulnerabilidades de la agricultura mexicana son el estrés hídrico y las condiciones meteorológicas adversas.

CUADRO 4. Variables hídricas en la agricultura protegida en comparación con el escenario sin cambios

Variable	Escenario sin cambios (campo abierto)	Tecnología alta (mejores prácticas actuales)	Tecnología baja	Casa sombra	Tecnología media
Metros cúbicos por tonelada de tomate	75 m³/tonelada	16 m³/tonelada (aprox. 80% de mejora respecto del escenario sin cambios).	59 m³/tonelada (aprox. 20% de mejora respecto del escenario sin cambios).	50–70 m³/tonelada (aprox. 7–33% de mejora respecto del escenario sin cambios).	35 m³/tonelada (mediana aprox. 50% de mejora respecto del escenario sin cambios).
Fuente de agua	Lluvia y agua superficial, pozos	Pozos profundos, lo que asegura la disponibilidad de agua en cantidad durante todo el año.	Puede obtenerse de las aguas superficiales o de un pozo, lo que ayuda a garantizar la cantidad y disponibilidad durante todo el año.	Lluvia, agua de pozos profundos, aguas superficiales.	Agua de pozos (subterránea). Esto asegura la disponibilidad de agua en cantidad durante todo el año.
Suministro de agua	Riego tradicional (bomba y aspersor)	Riego por goteo, con sistema de bombeo y dosificación de precisión.	Cultivo de temporal o riego con bomba de alta potencia.	Lluvia, suministro tradicional, riego, riego por goteo.	Riego por goteo, con sistema de bombeo y dosificación. Sistema de temporal durante las estaciones más húmedas.

Fuente: FIRA (2010; 2011); Carlos Torres Barrera (FIRA), entrevista de septiembre de 2017; Katia Montero, experta en agricultura protegida con casas sombra, entrevista de marzo de 2018; consulta a otros expertos.

Estrés hídrico. El agua es uno de los recursos más comprometidos en México y es la principal fuente de preocupación en materia de vulnerabilidad nacional. Una de las principales prioridades del Gobierno mexicano para reducir la vulnerabilidad es avanzar hacia enfoques más técnicos de la gestión del agua en la agricultura y así aumentar la eficiencia hídrica.

Gran parte del país es desértica, semidesértica o árida. Se considera que más de dos tercios del territorio mexicano (que representa más del 80% de la población) está sometido a un estrés hídrico "fuerte" o "muy fuerte" (SEMARNAT, 2012). La agricultura es, por mucho, la mayor fuente de consumo de agua en México y representa 77% del consumo total de este recurso (FAO-Aquastat). Alrededor de una cuarta parte de toda la agricultura es de riego, y la eficiencia hídrica de la mayor parte de esta proporción es extremadamente baja. La agricultura protegida ofrece un mecanismo importante para mitigar el estrés hídrico al tiempo que mantiene o aumenta la producción agrícola.

Condiciones meteorológicas adversas. La agricultura de campo abierto es muy vulnerable a las condiciones meteorológicas adversas. Como la mayor parte de América Latina, se espera que México sufra cambios significativos en las condiciones climáticas debido al cambio climático. Los fuertes impactos del cambio climático, en particular el aumento de la temperatura y el nivel del mar, harán crecer la vulnerabilidad del país. Además, la mayor parte de México es muy vulnerable a los cambios en la Oscilación del Sur de El Niño (ENOS), que podría conducir a una mayor incidencia de sequías, lluvias torrenciales y episodios de inundaciones, y a una alteración de la estacionalidad de las lluvias.[8]

Según datos de la base de datos del SIAP, entre 2008 y 2016, los agricultores de campo abierto sufrieron una pérdida total promedio de cosecha de 4,4% de todas sus tierras cada año. La cifra comparable para la producción de tecnología

[8] Las investigaciones existentes sugieren que un tercio de la variabilidad de la producción agrícola ya es atribuible al cambio climático. Véase Ray *et al*. (2015).

media y alta es inferior a 0,2% en los últimos cinco años, lo que supone una cifra 20 veces mejor para la agricultura protegida que para el escenario sin cambios. Los datos sobre casas sombra en la base de datos del SIAP no son lo suficientemente completos como para estimar una cifra. Sin embargo, es probable que el número real sea algo menor que el de campo abierto, debido a la protección adicional que proporcionan la infraestructura y las técnicas de cultivo. Además, los agricultores de campo abierto experimentan una pérdida importante de calidad cada dos o tres años debido a las condiciones climáticas y a los patógenos (impulsados por las condiciones climáticas), que pueden reducir el precio que reciben por su producto hasta en 50%, o incluso más, para gran parte de su cosecha (entrevistas a Cedillo Portugal y Lamas Nolasco, 2017).

En 2011, fuertes olas de frío afectaron el noroeste de México. Los invernaderos de tecnología alta se vieron muy afectados y los cultivos de tomate sufrieron pérdidas extremas. Puede que hasta 30 % de la cosecha de invierno se haya perdido en esa región, lo que representa casi 10% de toda la producción de tomate de invernadero (base de datos del SIAP y entrevistas a Moreno y Cedillo Portugal, 2017). Los productores respondieron con un mayor uso de la calefacción de emergencia, principalmente a través de calefacción radiante con circulación de agua por suelo.

Productos agroquímicos

Los dos principales productos químicos utilizados en la agricultura son los fertilizantes (nutrientes) y los pesticidas. Los sistemas de agricultura protegida permiten un uso mucho más preciso de ambos, aumentando enormemente la eficiencia del uso de los productos químicos por unidad de producción.

Fertilizantes. En la agricultura de campo abierto y en la agricultura protegida de tecnología muy baja, los fertilizantes se aplican de acuerdo con un calendario y están vinculados con la superficie total de la tierra. La mayoría de los fertilizantes no

Agricultura protegida de tecnología media y baja.

llegan a la planta objetivo, sino que se introducen en el suelo, donde pueden o no ser absorbidos por la planta. A su vez, pueden ser arrastrados por el agua. En los sistemas de tecnología alta y en la mayoría de los sistemas de tecnología media, los nutrientes son suministrados directamente a la planta a través del agua (en forma de solución en las operaciones hidropónicas), o en la bolsa o maceta de cada planta. Esto asegura que un porcentaje mucho mayor del fertilizante llegue a la planta, mejorando la productividad, y disminuyendo residuos así como el nitrógeno disponible que podría convertirse en gases de efecto invernadero. En las casas sombra, los fertilizantes también se aplican directamente a las plantas, pero con mayor precisión. Los principales fertilizantes utilizados en la producción de tomate son el nitrato de calcio, el nitrato de potasio, el sulfato de magnesio y el ácido fosfórico. En la sección sobre la huella de GEI se abordan las emisiones relacionadas con estos fertilizantes.

Pesticidas. Los cultivos de tomate, pimiento, pepino y bayas se ven afectados por docenas (quizás cientos) de patógenos fúngicos y bacterianos, así como por insectos, entre los que se destaca la mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*), particularmente en el noroeste de México. En general, los mismos patógenos afectan a los productos independientemente del sistema de producción. Las casas sombra, las soluciones de tecnología media y de tecnología alta son efectivas para reducir considerablemente la presencia de insectos y los daños. Sin embargo, solo las operaciones de tecnología alta en aislamiento y algunas operaciones de tecnología media más sofisticadas en recintos casi completamente aislados (bolsa de cultivo no permeable) del ambiente exterior reducen drásticamente los vectores de las infecciones que se introducen por el aire, el agua o el calzado o la ropa de los trabajadores. Las instalaciones de producción de tecnología alta se aíslan de los suelos, y allí el agua se controla (o se limpia si es necesario, como en el caso de la reutilización), los trabajadores siguen protocolos específicos en cuanto al calzado y la ropa antes de entrar, y se separa el aire o se presuriza la instalación al momento de abrirla. Sin embargo, en las operaciones de campo abierto y de tecnología baja de agricultura protegida, los patógenos ingresan independientemente de cómo sople el viento, qué contenga el agua o dónde hayan pisado recientemente los trabajadores.

En la agricultura protegida de campo abierto y de tecnología baja, los pesticidas se aplican por regla general (de manera preventiva o sistemática). Debido a que los sistemas de agricultura protegida de tecnología alta se controlan y monitorean muy de cerca, la decisión de usar pesticidas, y la selección del tipo que se va a utilizar, es más precisa y sofisticada. En muchos casos, los brotes se anticipan (por ejemplo, en función de las condiciones meteorológicas) y se emplean estrategias no químicas. Por ejemplo, si el clima ha sido muy húmedo o lluvioso, la acción más eficaz es generar una mayor circulación de aire en el espacio para evitar la proliferación de ciertas enfermedades o bacterias. Un ejemplo de esto es el patógeno *Clavibacter michiganensis*, que ataca agresivamente los cultivos de tomate y es capaz de dañar cultivos enteros en una semana. En la producción de campo abierto, estas bacterias son tratadas con productos químicos agresivos y peligrosos (de banda roja) en toda la explotación. En operaciones de agricultura protegida de tecnología alta, dichas bacterias pueden manejarse casi completamente controlando la temperatura y la humedad mediante la simple ventilación. La estrategia empleada por los agrónomos en estas operaciones de la agricultura protegida consiste en: i) monitorear constantemente la temperatura y la humedad relativa para evitar condiciones que permitan o promuevan el crecimiento de patógenos; ii) proteger contra la entrada de patógenos a través del aire, el agua y los trabajadores, y iii) utilizar productos químicos (productos biológicos, cuando sea posible) de manera temprana en los brotes para prevenir la propagación de la infección.

A su vez, deberían tenerse en cuenta algunos puntos relacionados con la gestión en torno a la selección de pesticidas. En el caso de todas las operaciones de tecnología alta de la agricultura protegida, de muchas de las operaciones de

tecnología media más sofisticadas y de la mayoría de las operaciones de casas sombra a gran escala, que generalmente están orientadas a la producción para la exportación, se seleccionan determinados pesticidas que no suponen ningún impedimento para el ingreso de los productos a Estados Unidos. Se utilizan únicamente productos aprobados por la EPA (para uso en cultivos) y la FDA (para cantidades mínimas en alimentos) y se monitorean y auditan en cuanto a su cumplimiento, ya que la utilización de sustancias no aprobadas podría provocar el rechazo de una empresa e incluso que se le niegue el acceso de toda el área de cultivo al mercado de Estados Unidos. Según varios expertos consultados, cuando el producto está destinado al mercado mexicano, los agricultores y compradores tienden a ser mucho menos selectivos en la elección de productos químicos, y con frecuencia se utilizan productos peligrosos de banda roja. Otra cuestión que plantean los agrónomos consultados y un fabricante es que la agricultura protegida permite un uso mucho mayor de productos de baja (o nula) toxicidad. En la producción de campo abierto, la lluvia lava el producto, haciéndolo mucho menos efectivo (o solo efectivo durante un período de tiempo más corto). En la agricultura protegida, los agentes biológicos y los de contacto con la superficie permanecen más tiempo en las hojas y los frutos, lo que permite que su acción protegida y correctiva continúe, reduciendo la necesidad de pesticidas más peligrosos y sistémicos.

El cuadro 5 resume los datos sobre insumos agroquímicos utilizados en las diferentes tecnologías de agricultura protegida.

CUADRO 5. Insumos agroquímicos (tomate como referencia)

Variable	Escenario sin cambios (campo abierto)	Tecnología alta (mejores prácticas actuales)	Tecnología baja	Casa sombra	Tecnología media
kg de abono por tonelada de tomate	364,5	121,5	243	300	318,5
kg de nitrógeno total por tonelada de tomate	31,1	10,4	20,7	24,88	27,2
Principio activo de pesticida (kg por tonelada de producto)	5,1 kg (24 aplicaciones por ciclo de cuatro meses).	1,7 kg (máximo ocho aplicaciones por ciclo de cuatro meses) (aprox. 65% de mejora respecto del escenario sin cambios).	Probablemente similar al escenario sin cambios según los hábitos de los agricultores.	2 kg (10 aplicaciones, 1 por ciclo mensual) (aprox. 65% de mejora respecto del escenario sin cambios).	Operaciones en recintos cerrados con sustrato, probablemente similares a las de tecnología alta. Sin aislamiento, probablemente más similar al escenario sin cambios.
Tipos de productos químicos	Sin uso selectivo. Alta incidencia de banda roja.	Aprobado por Estados Unidos. Banda verde, ocasionalmente con banda amarilla. Potencial para los productos biológicos.	Sin uso selectivo. Alta incidencia de banda roja.	Aprobado por Estados Unidos para operaciones orientadas a la exportación. Banda verde, ocasionalmente con banda amarilla. Cierto potencial para productos biológicos. Para el mercado local, muy variable.	Tecnología más alta con especificaciones que permiten acceder al mercado de Estados Unidos. Variable de tecnología más baja.

Fuentes: Director de una empresa de agricultura protegida de tecnología alta, entrevista de septiembre de 2017; Eugenio Cedillo Portugal, investigador agrícola de FIRA, entrevistas de septiembre y octubre de 2017; numerosos artículos sobre el uso de pesticidas restringidos en México, corroborado en múltiples entrevistas (por ejemplo, Pérez-Olvera *et al*., 2011).

Energía para las operaciones

En el escenario sin cambios, se utiliza muy poca energía adicional (más allá del sol y el trabajo humano), excepto para el riego. Los principales productos objeto de este estudio utilizan una cantidad muy reducida de equipos en las operaciones de campo abierto. La naturaleza sensible de las plantas, y en particular de sus frutos, requiere un trabajo manual. Las cosechadoras y tractores se usan poco o nada. Los carros motorizados se utilizan para recoger el producto cosechado para su almacenamiento. En las operaciones de campo abierto, donde se emplea el riego, se requiere el bombeo de agua, que requiere un consumo intensivo de energía en forma de gasolina o diesel para alimentar las bombas. En la agricultura protegida de tecnología baja, los agricultores pueden emplear sistemas de riego por goteo más eficientes que los sistemas de campo abierto, los cuales utilizan menos agua y probablemente menos energía.

En la agricultura protegida de tecnología alta, la energía se utiliza para: i) bombear agua de un pozo u otra fuente, alimentando generalmente un riego por goteo muy eficiente desde el punto de vista energético; ii) ventilar para mantener la temperatura y la humedad, y iii) calefaccionar, según sea necesario. Las operaciones de tecnología alta están conectadas a la red eléctrica nacional y utilizan electricidad de la red, diesel para las bombas y generadores de reserva, y gas natural para calentar el agua cuando se necesita. Las casas sombra y las operaciones de tecnología media y baja utilizan la energía principalmente para bombear agua. Cuando se utilizan sistemas de riego de precisión, el consumo de energía es considerablemente menor que con el escenario sin cambios (cuadro 6).

Residuos

El principal residuo producido por los invernaderos, además de la biomasa reutilizable y degradable de las plantas que han concluido su ciclo vital, y el único aumento significativo del impacto ambiental identificado en el caso de la agricultura protegida en comparación con el escenario sin cambios es el cobertor o la malla de plástico, que se utiliza para cubrir las plantas. Su cantidad e impacto son bastante significativos. El plástico debe cambiarse cada tres años en el caso de la mayoría de los plásticos utilizados. Algunos productores consideran que es más rentable comprar películas de mayor calidad que deben cambiarse solo cada cuatro o cinco años. En 2016, el SIAP informó que hay 24.600 hectáreas que operan mediante la utilización de cobertor plástico (tecnología baja, media y alta), únicamente para tomate, pepino y fresa. Suponiendo una vida útil de tres años, esto significa que en 2017 se retiraron casi 8.000 hectáreas de plástico usado de los cobertores empleados en agricultura protegida, sin incluir los cobertores dañados debido a condiciones climáticas adversas o accidentes. A su vez, el cobertor de las casas sombra es de plástico, y tiene una expectativa de vida útil similar, de tres a cinco años, dependiendo de la calidad.

Según tres expertos entrevistados, para las operaciones de tecnología baja y para algunas de tecnología media, los viejos cobertores de plástico suelen reutilizarse como cobertores de suelo y, en particular, como contenedores de cultivo (cubos de plástico) para las plantas. Los agricultores más grandes generalmente descartan el cobertor de la casa sombra cuando aparecen

CUADRO 6. Energía para las operaciones (kWh por tonelada de producto)

Escenario sin cambios (campo abierto)	Tecnología alta (mejores prácticas actuales)	Tecnología baja	Casa sombra	Tecnología media
743[a]	216[b]	600	518–698[b]	385

Fuente: Cálculos de los autores a partir de diversos cuadros y anexos.
[a] Información generada por el análisis del consultor. El anexo 4 incluye los cálculos y supuestos.
[b] Información proporcionada por una empresa de agricultura protegida de tecnología alta.
[c] Cálculo de los autores basado en datos de expertos.

grandes agujeros y se producen desgarros. Los agricultores de pequeña escala luego los reutilizan en trozos más pequeños. A pesar del reciclaje y la reutilización, los expertos de campo confirmaron que casi todas las operaciones de tecnología baja y la mayoría de las operaciones de tecnología media que se encuentran fuera de las principales zonas de producción probablemente no estén descartando los plásticos de manera adecuada.

El Gobierno es muy consciente del impacto potencial. Según se informa, ha aprobado un requisito legal que establece que el plástico debe recuperarse para su reutilización o reciclado. El cumplimiento de esa norma está aumentando, pero sigue siendo limitado. Todos los expertos consultados informaron que en la actualidad existen empresas de reciclaje en las principales zonas de cultivo (se citó específicamente el caso de Sinaloa, Jalisco y Querétaro) especializadas en la recuperación de plástico. Otras fuentes también señalaron que a las empresas que venden cobertores plásticos nuevos se les está solicitando cada vez más, y lo están cumpliendo, lo mismo que se les pide a las empresas de agricultura protegida: recuperar el plástico viejo como una condición para la venta (según se informó en Querétaro). Estas empresas están impulsando el negocio de los recicladores. En el caso de las casas sombra en Sinaloa, los expertos consultados afirmaron que es probable que se esté llevando a cabo un proceso de reciclaje, ya que la Secretaría de Agricultura ha puesto en marcha centros de recolección de residuos de envases de pesticidas y otros residuos, en particular el material cobertor. Diversas fuentes informan que el reciclaje de plástico está creciendo muy rápidamente.

Aunque no hay datos concretos sobre la cantidad de plástico recuperado, no es realista suponer que actualmente se recicle o reutilice más de la mitad. Además, existen otros materiales plásticos de desecho —como tuberías, cintas de goteo y botellas de plástico de insumos agroquímicos— que pueden ser significativos pero son relativamente menores en comparación con el revestimiento plástico.

Los otros residuos que genera la agricultura protegida son los residuos líquidos. En comparación con el escenario sin cambios, se pierde una cantidad mucho menor de residuos de agua y productos químicos. Muchas operaciones de tecnología alta recuperan activamente el agua residual y los nutrientes que contiene. El agua se filtra, se somete a rayos de luz ultravioleta para eliminar las bacterias y se reinyecta en el proceso. Las informaciones reportadas indican que las aguas residuales en estas operaciones suelen limitarse al agua utilizada para la limpieza y las reparaciones.

En el caso de las operaciones con tecnología media, puede haber aguas residuales que pasan a través de algún tipo de filtro o decantador, aunque no se dispone de información que ofrezca una explicación más detallada. En las de tecnología baja, los residuos líquidos finales se vierten directamente al suelo. Los desechos líquidos de las casas sombra son similares a los del escenario sin cambios, salvo por el uso más eficiente de los fertilizantes, que se traduce en una reducción proporcional de la escorrentía de los fertilizantes. Otros residuos de producción de todas las tecnologías es la materia orgánica proveniente de la poda o de la renovación de las plantas, que puede colocarse en cámaras de compostaje, o de campo abierto sin tratamiento adicional.

El cuadro 7 resume los resultados sobre los perfiles de residuos para las diferentes tecnologías de agricultura protegida.

Mano de obra

La agricultura protegida puede ofrecer ventajas significativas de mano de obra con respecto al escenario sin cambios, particularmente en las aplicaciones de tecnología alta. Sin embargo, conforme la agricultura protegida emplea una tecnología más avanzada, se requieren menos trabajadores por hectárea, y los tipos de trabajadores requeridos son muy diferentes al pasar a operaciones de tecnología media y alta. Esto plantea un reto en el sentido de que habrá menos labores manuales, por lo general trabajos

CUADRO 7. Flujos de residuos

Variable	Escenario sin cambios (campo abierto)	Tecnología alta	Tecnología baja	Casas sombra	Tecnología media
Residuos anuales provenientes del cobertor plástico	0,0/ha	0,33 ha/ha	0,33 ha/ha	0,33 ha/ha	0,33 ha/ha
Aguas residuales	Pérdida de la mayor parte del agua	Pérdida de menos de 5%	Pérdida de la mayor parte del agua	Pérdida de la mayor parte del agua	n.d.

Fuentes: Diversas fuentes de empresas operadoras e investigadores.
Nota: n. d.= no disponible.

estacionales para los trabajadores de campo (de los que casi 100% son no calificados). Sin embargo, los puestos de trabajo creados son mucho mejor remunerados, igualmente adecuados para las mujeres según la mayoría de las descripciones del puesto, permanentes y anuales, y considerablemente más seguros.

La tecnología alta, la mayor parte de la tecnología media y algunas operaciones de casas sombra operan 12 meses al año. Las operaciones de tecnología alta y la mayoría de las de media requieren trabajadores confiables que sepan leer y escribir y que puedan seguir los protocolos técnicos. Las compañías deben invertir recursos significativos en la capacitación de personal para las operaciones de cultivo, cosecha, mantenimiento, supervisión, control de calidad, mantenimiento de registros y otras áreas especializadas. Por lo tanto, la rotación de los trabajadores es costosa, y las empresas deben ofrecer salarios y beneficios competitivos para retener a los buenos empleados. En el estado de Querétaro, el director general de una importante empresa de tecnología alta de agricultura protegida afirmó: “Es difícil y costoso atraer y mantener a buenos trabajadores aquí. Estamos compitiendo cara a cara con una industria automotriz en auge. Podemos encontrar buenos trabajadores, pero les da igual trabajar en nuestros invernaderos o en el sector del automóvil, puesto que el trabajo es más o menos el mismo”. Los informes señalan que las mujeres constituyen una parte significativa y creciente de la mano de obra en operaciones de tecnología alta en algunas zonas de cultivo.

El cuadro 8 resume los resultados sobre variables laborales para las diferentes tecnologías de agricultura protegida.

Huella de GEI

Los autores han calculado estimaciones relevantes de las emisiones de GEI y normalizaron estas estimaciones a $kgCO_2e$ por kilogramo de producción de tomate. Los factores de emisión se basan en las normas de la industria (anexo 2) y, cuando es posible, en las condiciones reales del suelo reportadas en México (más notablemente para los fertilizantes).

La huella se ha desglosado entre la infraestructura (huella incorporada) en la construcción de las estructuras de la agricultura protegida y el cultivo. Para cada una de ellas se abordan las principales fuentes de GEI. Aunque existen otras fuentes menores de emisiones de GEI, se cree que las categorías indicadas representan casi todas las fuentes de emisiones relevantes. Los anexos 2 y 3 proporcionan más detalles sobre cómo se calcularon estas estimaciones.

Los elementos descritos anteriormente son variables fijas o de medio plazo (en el caso del plástico). A continuación se presenta la huella de GEI de las operaciones agrícolas.

Es probable que las reducciones estimadas que se muestran para los GEI de los fertilizantes en la producción de tecnología alta y media y en

CUADRO 8. Variables de mano de obra

Variable	Escenario sin cambios (campo abierto)	Tecnología alta	Tecnología baja	Casa sombra	Tecnología media
Trabajadores por hectárea en pleno funcionamiento	21–30	10	21	21	14
Tipo de trabajo	Pesado, manual. Mano de obra poco calificada.	Se asemeja al de las industrias; semicalificado.	Igual que en el escenario sin cambios.	Igual que en el escenario sin cambios. En la producción durante todo el año. Requiere ciertas habilidades.	Se asemeja al de las industrias. Requiere ciertas habilidades.
Período de trabajo	No todo el año, no permanente. Normalmente a diario o a destajo.	Permanente, durante todo el año. Por lo general, beneficios sociales incluidos.	Igual que en el escenario sin cambios.	Estacional o durante todo el año.	Frecuentemente todo el año y permanente.
Seguridad	Baja tasa de lesiones debido a la falta de maquinaria. Amplia exposición a agroquímicos de alto riesgo.	Baja tasa de lesiones debido a la falta de maquinaria. Trabajo a cubierto. Exposición limitada a productos químicos de toxicidad relativamente baja.	Baja tasa de lesiones debido a la falta de maquinaria. Amplia exposición a agroquímicos de alto riesgo.	Baja tasa de lesiones debido a la falta de maquinaria. La exposición a los productos químicos puede ser alta o baja dependiendo del mercado objetivo.	Baja tasa de lesiones debido a la falta de maquinaria. La mayoría de las tareas se realizan a cubierto. La exposición a los productos químicos puede ser alta o baja dependiendo del mercado objetivo.
Género	Trabajo apto principalmente para hombres.	La mayoría de las tareas son apropiadas para mujeres.	Trabajo apto principalmente para hombres.	Trabajo apto principalmente para hombres.	Más trabajo para las mujeres que en el escenario sin cambios.

Fuentes: Eugenio Cedillo Portugal, investigador agrícola de FIRA, entrevistas de septiembre y octubre de 2017. Otras fuentes, por ejemplo, entrevistas a expertos y gerentes de compañías operadoras.

las casas sombra sean muy conservadoras: es posible que las reducciones reales sean notablemente más favorables. En la producción de campo abierto y de tecnología baja, el fertilizante se aplica ampliamente en toda la finca. Esto significa que solo una pequeña porción realmente llega a la planta, mientras que hay una cantidad mucho mayor que acaba en el suelo, el agua, el aire y la escorrentía. Todo esto hace que un porcentaje mucho mayor de nitrógeno de los fertilizantes esté disponible para convertirse en óxidos nitrosos (NOx). En operaciones de tecnología alta (particularmente hidropónicas), casi 100% del fertilizante llega a la planta, ya sea en la aplicación inicial o después de la captura. En consecuencia, se libera mucho menos nitrógeno al medio ambiente para que se convierta en NOx. En términos técnicos, el factor de conversión de nitrógeno del IPCC que se expone en el anexo 4 es probable que sea considerablemente menor en las operaciones de agricultura protegida. Sin embargo, al no haber estudios disponibles sobre los factores de conversión en la agricultura protegida, los autores han utilizado la cifra del IPCC aceptada a fin de que estas estimaciones presenten claramente una cifra conservadora.

CUADRO 9A. Huella de GEI estimada para la infraestructura de la agricultura protegida

	Concreto	Metal	Plástico	kg de CO_2e por tonelada de tomate
Campo abierto	0,00	0	0	0
Alta	0,87	10,88	63,78	75,52
Media	1,73	21,75	127,56	151,04
Casa sombra (todo el año)	2,31	29,00	10,05	41,36
Casa sombra (estacional)	4,62	58,00	14,98	77,6
Baja	6,93	87,02	30,16	124,11

Fuente: Cálculos de los autores basados en los factores de emisión que figuran en el anexo 2 y en los factores de uso que figuran en el anexo 3.

CUADRO 9B. Huella de GEI estimada para el cultivo de tomate en México

	Riego	Fertilizantes[a]	kg de CO_2e por tonelada de tomate
Campo abierto	337,32	0,39	337,71
Alta	98,06	0,13	98,19
Media	174,79	0,26	175,05
Casa sombra (todo el año)	235,63	0,31	235,94
Casa sombra (estacional)	316,89	0,31	317,20
Baja	272,40	0,34	272,74

Fuente: Cálculos de los autores sobre la base del cuadro 9a.

[a] El anexo 5 proporciona más información sobre los factores y el cálculo de las emisiones de CO_2 de los fertilizantes.

CUADRO 9C. Huella de GEI total estimada para el caso del tomate (tres escenarios)

	Total (Cultivo más infraestructura)		Total alternativo (Cultivo más plástico solamente)		Cultivo solamente	
	kg de CO_2e por tonelada de tomate	Diferencia frente al escenario sin cambios	kg de CO_2e por tonelada de tomate	Diferencia frente al escenario sin cambios	kg de CO_2e por tonelada de tomate	Diferencia frente al escenario sin cambios
Campo abierto	337,71		337,71		337,71	
Alta	173,71	–49%	161,97	–52%	98,19	–71%
Media	326,09	–3%	302,61	–10%	175,05	–48%
Casa sombra (todo el año)	277,30	–18%	245,99	–27%	235,94	–30%
Casa sombra (estacional)	394,80	17%	332,18	–2%	317,20	–6%
Baja	396,85	18%	302,90	–10%	272,74	–19%

Fuente: Elaboración de los autores con los datos de las fuentes que figuran en los anexos.

Las estimaciones muestran que la agricultura protegida de tecnología media y alta producen huellas de GEI considerablemente más bajas, incluso si se incluyen los plásticos. Las casas sombra también muestran una clara reducción en la producción durante todo el año y una modesta reducción de la producción estacional. Existen argumentos para considerar el plástico como una infraestructura incorporada, ya que es una pieza integral de la estructura física y no está directamente relacionada con el cultivo de la planta. Sin embargo, a diferencia de los componentes de acero y concreto, el plástico requiere un reemplazo dentro de los tres a cinco años, y es un costo recurrente que podría considerarse de manera fundada como parte de las operaciones. En consecuencia, los autores presentan diferentes escenarios para que se consideren con mayor precisión, dependiendo de las metodologías preferidas por los diferentes inversores. Como en la mayoría de los aspectos de la agricultura protegida, son las ganancias extraordinarias en términos de eficiencia las que proporcionan los beneficios en materia de GEI. Un uso más eficiente de la energía, el agua y los productos químicos conduce a un perfil de GEI más ventajoso que el escenario sin cambios.

Discusión de los resultados

Existen razones de peso para promover la agricultura protegida como una alternativa preferible a la agricultura de campo abierto desde el punto de vista ambiental y social. En casi todas las variables económicas, ambientales y sociales, la tecnología de la agricultura protegida muestra mejoras con respecto a los escenarios sin cambios.

Productividad. El principal factor económico para que productores agrícolas migren de un escenario sin cambios a la agricultura protegida es el aumento de la productividad en la explotación. El aumento de la eficiencia en la producción, la prolongación o ampliación de las temporadas de cultivo y la disminución notable de las pérdidas en las cosechas conducen a un mayor rendimiento por unidad de producción. Este resultado parece ser cierto para todos los niveles tecnológicos de la agricultura protegida, independientemente de la geografía. También es coherente con estudios de otros países (véase, por ejemplo, Abukari y Tok, 2010). Los aumentos de la productividad crecen significativamente a medida que aumenta el nivel de la tecnología.

Requisitos de tierra y suelo. El escenario sin cambios requiere tierras y suelos de alto valor para ser productivo. El aumento de los niveles de protección permite a los agricultores utilizar tierras y suelos de menor calidad. Incluso la producción de tecnología baja permite utilizar el sombreado para obtener temperaturas menos elevadas y una mayor retención de la humedad. Con métodos de tecnología alta, la producción puede llevarse a cabo prácticamente en cualquier lugar, ya que no hay requisitos de tierra o suelo, solo se requiere que el terreno sea llano.

Uso del agua. El aumento de la eficiencia en el uso del agua es una prioridad fundamental para el Gobierno mexicano debido a la escasez moderada o extrema de agua en la mayor parte del país. El agua es el factor limitante esencial para aumentar la producción agrícola, sobre todo en las zonas más pobres del país, donde la agricultura compite directamente con el consumo humano. El aumento de la eficiencia en la productividad del agua es una condición necesaria tanto para aumentar la producción como para mejorar la viabilidad a largo plazo de las reservas locales.

La agricultura protegida usa menos agua y pierde mucho menos por la evaporación y el riego excesivo. Además, la inversión en el aumento de la eficiencia hídrica aporta beneficios secundarios, como la eficiencia energética (menos agua que bombear) y permite una gestión más sofisticada de los productos químicos, como la fertiirrigación y la optimización de los tiempos de aplicación de los pesticidas.

Un ámbito de preocupación latente es que en las áreas donde la agricultura protegida está muy concentrada, los efectos acumulativos del aumento de la producción en la cuenca podrían contrarrestar las ganancias logradas en materia de eficiencia hídrica. Si bien el proceso de concesión de permisos de agua del Gobierno mexicano es bastante riguroso, los efectos acumulativos potenciales deben ser considerados y evaluados en áreas de muy alta concentración de la producción.

Vulnerabilidad. Esta variable es la más concluyente. La reducción de las pérdidas catastróficas de cultivos por el uso de estrategias de agricultura protegida en México es asombrosa, incluso para las tecnologías más rudimentarias. Todos los niveles tecnológicos de la agricultura protegida parecen reducir significativamente la vulnerabilidad a los daños causados por factores climáticos y biológicos. Las barreras físicas utilizadas en la agricultura protegida protegen los cultivos y los suelos de las lluvias torrenciales, ayudan a retener la humedad y proporcionan protección contra los patógenos. Las tecnologías utilizadas en la agricultura protegida reducen las pérdidas de cultivos a corto plazo y ayudan a aumentar la viabilidad a largo plazo de la explotación. Si bien las ventajas son significativas para todas las tecnologías, los enfoques de tecnología alta controlan más variables de producción, aislando en mayor medida las operaciones de producción de las fuentes de daño potencial.

Conforme las tecnologías de la agricultura protegida mejoran la eficiencia hídrica por unidad de producción, contribuyen positivamente a reducir la vulnerabilidad. La tecnología de la agricultura protegida no es mejor que la producción del escenario sin cambios si esta última es totalmente en secano. Sin embargo, para el tomate y otros cultivos primarios de la agricultura protegida y en la mayoría de las regiones productoras mexicanas, la producción en temporal suele ser viable solo en determinadas épocas del año. Los cultivos que se cultivan la mayor parte del año o durante todo el año requieren riego con agua superficial o pozos. Se puede suponer con seguridad que los enfoques de agricultura protegida que utilizan métodos de precisión (goteo, aspersión, fertiirrigación) son mejores que cualquier otro sistema de riego tradicional.

Productos químicos (fertilizantes y pesticidas)

- ***Fertilizantes.*** La capacidad de aplicar la fertilización de manera más precisa y controlada es uno de los principales factores que mejoran los ingresos de los agricultores y que les hacen migrar a la agricultura protegida. Se pierden menos fertilizantes por lluvia o erosión, y la misma cantidad de fertilizante tiene un mayor beneficio sobre el producto, debido a la mayor concentración de producto en el sistema de cultivo y a la menor pérdida de cosechas. El beneficio se observa en todos los niveles tecnológicos, pero aumenta sustancialmente con la tecnología más avanzada. En sistemas de tecnología alta e hidropónicos, prácticamente todo el fertilizante llega a la planta, ya sea al inicio o cuando el agua se recupera y se recicla. Cuanto más fertilizante llega a la planta y penetra en ella, menos contribuye a la eutrofización, la degradación del suelo y la desgasificación (en el caso del nitrógeno en los fertilizantes, la desgasificación crea un gas de efecto invernadero). En términos agronómicos técnicos, la cantidad y el tipo de fertilizante es una variable de la gestión de la explotación. En teoría, un agricultor podría aplicar más fertilizante del necesario, reduciendo o negando los beneficios. Sin embargo, en realidad, esto es extremadamente improbable porque uno de los beneficios fundamentales que justifican la inversión en agricultura protegida es una fertilización

Producción en casas sombra de tecnología alta (Foto: Hortalizas.com).

más eficiente. Los productores tendrían que actuar contra todas las orientaciones técnicas disponibles y contra sus propios intereses financieros en una de las partidas más costosas de su presupuesto operativo.

Una cuestión que surgió en el proceso de revisión merece una investigación adicional que va más allá del alcance de este documento. En la producción de sombra y de tecnología media, donde el medio de cultivo es el suelo natural, el uso de fertilizantes por hectárea aumenta drásticamente, aunque el uso por tonelada de producción disminuye de forma considerable. En teoría, es posible que las fugas (fertilizantes que llegan a lugares que no son el ambiente objetivo de cultivo de la planta) puedan presentar un aumento en términos de hectáreas, con posibles implicaciones locales adversas, tales como el impacto en las fuentes locales de agua en áreas con una gran concentración de esta producción.

- ***Pesticidas.*** Las dos dimensiones más importantes en cuanto a los pesticidas son su selección y su uso. En la agricultura protegida de tecnología baja a media, el uso de pesticidas presenta condiciones y factores impulsores similares a los de los fertilizantes. Hay importantes eficiencias en su aplicación que pueden llevar a un uso significativamente menor por unidad de producto. Con un mayor control sobre las condiciones de cultivo que se encuentran en la producción de tecnología alta (y algunas de las más sofisticadas de tecnología media), se dan ganancias adicionales. Las barreras no permeables y los sistemas de ventilación de la tecnología alta, debido a su diseño, hacen mucho más difícil que los patógenos lleguen a las plantas o se establezcan en ellas. Esto permite utilizar menos pesticidas y emplear pesticidas mucho menos nocivos de forma más eficaz (incluido el control biológico). Dado que los pesticidas son insumos costosos (tanto el producto en sí como los costos relacionados con la protección de los trabajadores, el almacenamiento y la eliminación), los productores tienen incentivos de

peso para reducir su aplicación. La selección de productos químicos presenta desafíos. Las sustancias más tóxicas, denominadas de "banda roja" en la nomenclatura de la Organización Mundial de la Salud (OMS), son altamente efectivas, en general de bajo costo y fácilmente disponibles. A pesar de los esfuerzos para prohibir y eliminar estos productos químicos en todo el mundo, muchos de ellos siguen estando disponibles y se utilizan de manera más amplia de lo que indica su registro legal. Estas sustancias de banda roja no se utilizan en el sector de exportación en México porque los compradores de Estados Unidos, los principales importadores de productos mexicanos, no las aceptan. Estados Unidos requiere que los productos importados cumplan con las normas estadounidenses en materia de uso de pesticidas y presencia de rastros. Los compradores estadounidenses insisten en que solo se apliquen a los cultivos los productos registrados en Estados Unidos, para evitar que los productos sean rechazados en la frontera o por los clientes, e incluso realizan auditorías de control. Por lo tanto, es seguro suponer que los exportadores están utilizando sustancias que cumplen los requisitos internacionales. La preocupación al considerar a México es que el desempeño ambiental de los pesticidas puede no mejorar (aunque probablemente tampoco se debilitaría) como resultado de una transición a la agricultura protegida si los productores no toman la decisión de usar productos químicos menos dañinos, ya sea por propia voluntad o en respuesta a requisitos más exigentes de los compradores nacionales[9] o extranjeros.

Uso de energía. El uso de energía es la variable más problemática para este análisis. La agricultura usa relativamente poca energía adicional (más allá de la luz solar y la energía potencial almacenada en los fertilizantes). La tecnología agrícola más rudimentaria no utiliza prácticamente ninguna energía adicional aparte del trabajo manual y los animales de tiro. El desarrollo tecnológico también ha traído consigo la utilización de bombas de agua y máquinas, como los tractores. En el caso extremo (como la agricultura protegida del norte de Europa), se da un uso extremadamente alto de energía, pues se utilizan fuentes de energía externas para crear las condiciones de crecimiento necesarias para los cultivos. Para este análisis, los autores recibieron información detallada sobre el consumo de energía observado y real de parte de los productores e investigadores en el campo de la agricultura protegida en México. En el caso de la agricultura protegida, la electricidad se utiliza principalmente para la ventilación (en las operaciones de tecnología alta y en el extremo superior de la tecnología media), la circulación de agua y la calefacción para la protección contra las olas de frío. El escenario sin cambios asume que un productor está bombeando agua con equipos de bombeo convencionales para obtener producción adicional en temporadas no lluviosas. Los autores creen que esta comparación es válida, ya que lo que se está comparando con la agricultura protegida son unidades de producción adicionales marginales. En este caso del escenario sin cambios, se trata de la producción resultante de la intensificación de la explotación existente mediante la ampliación de la producción a las temporadas no lluviosas. Se utilizó como referencia el tamaño estándar de bomba y el tiempo de funcionamiento observado en condiciones de cultivo semiáridas en Costa Rica.

Este análisis es muy sensible a los supuestos del escenario sin cambios. Por ejemplo, una región hipotética de cultivo que tuviera lluvias y temperaturas de crecimiento óptimas durante todo el año probablemente no mostraría mucha mejora —o incluso ninguna— en su perfil energético por unidad de producción. No obstante, hay algunas regiones productoras con estas características, y uno de los objetivos nacionales es expandir la producción agrícola en zonas más difíciles.

[9] Varios de los entrevistados comentaron que recientemente han surgido nuevos requisitos con respecto al uso de productos químicos por parte de algunos compradores nacionales.

Residuos. La agricultura protegida consume más materiales que la agricultura de campo abierto. En el sistema se introduce infraestructura (desde postes de madera y revestimientos plásticos simples de tecnología baja hasta acero y concreto con revestimientos de vidrio o plástico de tecnología alta) para controlar las condiciones de cultivo. Lo mismo sucede con los residuos orgánicos de las plantas. Los desechos líquidos (es decir, el agua que contiene suelo o productos químicos) se reducen significativamente en la agricultura protegida de tecnología alta, aunque se deben investigar enfoques de tecnología baja y media para validar la mejora. El principal flujo de desechos que preocupa en la agricultura protegida es el uso de cubiertas de plástico. Ya sea que la malla permeable se encuentre en casas sombra, instalaciones de tecnología baja y algunas de tecnología media, o en revestimientos no permeables y cubiertas del suelo, la agricultura protegida produce una cantidad significativa de desechos plásticos. La huella en materia de residuos es considerable. Todas las fuentes consultadas con conocimiento de la situación local declararon que el plástico en buenas condiciones que se utiliza en casas sombra y operaciones de tecnología alta se reutiliza para otros propósitos o en otras explotaciones, una vez finalizada su vida útil. Además, varios expertos entrevistados informaron de un aumento de las tasas de reciclado, especialmente en las zonas con altas concentraciones de cultivadores. Un elemento importante de la gestión de residuos es garantizar un uso razonable y racional de los revestimientos de plástico después de su tratamiento.

Mano de obra. El aumento de los niveles tecnológicos conduce a la mejora de las condiciones laborales. Estos efectos tienen múltiples dimensiones. En primer lugar, es más probable que la tecnología superior de la agricultura protegida proporcione empleo durante todo el año. En segundo lugar, una tecnología superior está asociada a un menor uso de agroquímicos y la utilización de sustancias menos dañinas. Como las operaciones de tecnología alta orientadas a la exportación se auditan con mayor regularidad, es razonable asumir que probablemente se respeten los protocolos de seguridad. Las tecnologías más avanzadas requieren niveles de habilidades más elevados, que conllevan salarios sustancialmente más altos que las opciones de tecnología más baja o del escenario sin cambios. Por último, las operaciones de tecnología alta de la agricultura protegida crean más oportunidades para el empleo de mujeres, ya que los puestos de trabajo requieren aptitudes para las que las mujeres están igual o mejor calificadas; en cambio, en el escenario sin cambios, la fuerza física y la resistencia son la base principal para el empleo.

Huella de GEI. Este parámetro es el más complejo de interpretar. La huella de GEI está determinada de manera significativa por dos variables: las emisiones asociadas a la huella incorporada de la infraestructura de la agricultura protegida (concreto, plástico, metal, caucho) y los niveles de productividad del sistema de producción. Los niveles más altos de tecnología requieren más infraestructura, con la correspondiente huella. Sin embargo, los aumentos de la productividad de esta tecnología más avanzada, en conjunto, compensan con creces el aumento de la huella de la infraestructura. Existe una decisión política intrínseca en la contabilidad de las emisiones con respecto a la medida en que las emisiones incorporadas en la infraestructura de producción deben incluirse o excluirse, así como al período de tiempo durante el cual deben amortizarse si es que de hecho se incluyen.

El cuadro 9C resume la comparación de diferentes niveles de agricultura protegida, con distintos supuestos de inclusión de infraestructura. Todos los supuestos de infraestructura son bastante conservadores en el sentido que se presupone que la infraestructura de concreto, acero y caucho sobrevivirá durante un tiempo considerablemente menor que el que se observa en la práctica. Además, como ya se señaló, es probable que las emisiones de NOx de los fertilizantes estén sobreestimadas en todos los escenarios de agricultura protegida. Los supuestos de vida útil del revestimiento de plástico son moderadamente conservadores, ya que asumen el rango mínimo proporcionado por los fabricantes y productores.

Además, no se tiene en cuenta el reciclaje o la reutilización de ninguno de los materiales.

La productividad del sistema de producción está determinada por el nivel tecnológico (mayor o menor tecnología) y la estacionalidad de la producción. Los beneficios en materia de GEI son menores cuando la producción es estacional, lo que significa que la productividad total anual del sistema de producción es menor.

La otra variable clave que debe considerarse es el valor de referencia del escenario sin cambios, que supone un bombeo de agua sustancial. Esta variable determina fundamentalmente los beneficios de los GEI, en particular para las casas sombra. Como se discutió antes, la comparación relevante para la huella de GEI de la agricultura protegida es el aumento de la producción del escenario sin cambios. Dado que la frontera agrícola marginal en México tiene severas restricciones de agua, el movimiento de agua sustancial (a través del bombeo directo por parte del agricultor o de las autoridades locales) es el escenario más realista y, por lo tanto, la comparación resulta relevante.

Considerando todos estos puntos, los únicos escenarios que no conducen a una disminución de la huella de GEI son la producción de tecnología baja y las casas sombra estacionales cuando se incluyen todas las emisiones incorporadas en la infraestructura. Todos los demás escenarios parecen oscilar entre los más o menos neutros y los más o menos beneficiosos. Los mayores beneficios en materia de GEI se dan con una mayor productividad, ya sea a través de mayores niveles de tecnología, una temporada de cultivo más larga o alguna combinación de ambas (los mayores beneficios se derivan de la producción de tecnología alta a lo largo de todo el año).

Conclusiones

Hay razones de peso para promocionar la agricultura protegida como una alternativa preferible a la agricultura de campo abierto desde el punto de vista ambiental y social para un número significativo de cultivos comerciales en México. En casi todas las variables ambientales y sociales, la tecnología de la agricultura protegida muestra una gran mejora positiva con respecto a los escenarios sin cambios. Solo el aumento de los residuos sólidos (plásticos) muestra un menor rendimiento, y los aumentos de la productividad compensan el aumento de la huella de GEI en casi todos los sistemas, en particular en las tecnologías más desarrolladas. Además, hay iniciativas normativas e incentivos comerciales significativos para mejorar la recuperación y reutilización del plástico.

Las mejoras observadas y previstas en materia de productividad, eficiencia hídrica, reducción de la vulnerabilidad, uso de productos químicos y condiciones laborales son convincentes en todos los escenarios y con todas las tecnologías. Los beneficios en materia de GEI son muy favorables con las tecnologías más avanzadas, y entre neutros y positivos en casi todos los demás escenarios.

Las oportunidades de mejora continua de la tecnología resultan prometedoras. La agricultura protegida, incluso en su forma de tecnología alta, ofrece un potencial adicional de grandes mejoras en la productividad y el uso de energía, particularmente en la selección y estrategia del uso de pesticidas. En comparación, el escenario sin cambios supone en buena medida un callejón sin salida en términos tecnológicos, y apenas se consideran posibles mejoras marginales.

Existen datos confiables para defender la agricultura protegida. Aunque la literatura publicada y revisada por colegas sobre los impactos ambientales de este tipo de sistema es escasa, y no existe literatura específica sobre México o que compare la agricultura protegida y el escenario sin cambios, contamos con mucha experiencia y literatura gris que es coherente y basada en datos. Cabe también señalar que toda la literatura revisada por colegas que se consultó con respecto a las áreas específicas de interés es coherente con la opinión de los expertos y la literatura gris. Los autores no encontraron ninguna referencia en la literatura que contradijera la dirección o la intensidad del impacto de ninguna de las variables.

Los beneficios ambientales y sociales de la agricultura protegida en comparación con el escenario sin cambios están directa y altamente correlacionados con variables u opciones tecnológicas y decisiones de gestión concretas. Esto debería permitir el establecimiento de normas basadas en criterios observables. Por ejemplo, el tipo de infraestructura y tecnología empleadas parecen ser satisfactorias como condiciones que determinan la reducción del impacto. Esto proporcionaría directrices y criterios de inversión sencillos, que solo requerirían una simple verificación.

Recomendaciones acerca de los criterios de inversión

Hay razones de peso para defender la agricultura protegida en prácticamente todas las variables y para distintas plataformas tecnológicas. En general, los datos justifican que se considere a la agricultura protegida como una inversión orientada a la sostenibilidad.

La fuerza de los argumentos a favor de la agricultura protegida como estrategia favorable de sostenibilidad en México es abrumadora. Todas las tecnologías consideradas son transformadoras para los productores agrícolas, los trabajadores, la reducción de la vulnerabilidad y los recursos hídricos. Desde una perspectiva política, el Gobierno mexicano debe considerar la expansión rápida y a gran escala de la agricultura protegida en el marco de sus mandatos de políticas existentes para la agricultura, los recursos hídricos y la mitigación y adaptación al cambio climático. Los beneficios sociales más amplios (más allá de los que obtienen los actores privados) son lo suficientemente significativos como para justificar intervenciones de política, incluidos subsidios y otros mecanismos para promover la adopción más amplia de la agricultura protegida.

Con respecto a la financiación climática, las tecnologías de la agricultura protegida parecen cumplir con todos los criterios conceptuales considerados como tecnología “transformadora” por la Iniciativa de Bonos Climáticos (CBI).[10] En primer lugar, la agricultura protegida proporciona ventajas extraordinarias y convincentes en la reducción de la vulnerabilidad en todas las tecnologías y escenarios. En segundo lugar, en la mayoría de los escenarios, la huella de GEI se reduce en comparación con la del escenario sin cambios, incluso si se consideran las emisiones incorporadas. En tercer lugar, la agricultura protegida se ha establecido como una estrategia explícita prioritaria para México en materia de reducción de GEI y vulnerabilidad. Por último, las estrategias de agricultura protegida son coherentes con la orientación normativa de la FAO sobre la intensificación sostenible como enfoque para garantizar la seguridad alimentaria dentro de las limitaciones climáticas.

[10] La CBI es líder en la certificación de instrumentos financieros en términos del impacto en materia de cambio climático, incluida la reducción de la huella de GEI y la reducción de la vulnerabilidad.

Agricultura de campo abierto.

Si bien es sustancial la diferencia relativa entre la tecnología alta y las otras tecnologías en comparación con el escenario sin cambios, todas las tecnologías analizadas podrían fácilmente considerarse transformadoras. Existe poderosa evidencia de que gran parte de la producción de la tecnología media también cumple con los criterios de la CBI, al igual que la producción en los sistemas de sombra más grandes y sofisticados, sobre todo cuando se dedican a la producción durante la mayor parte del año. Una productividad bastante mayor y un uso más eficiente de los fertilizantes y del agua conducen a una huella de GEI considerablemente menor. Estas tecnologías reducen de manera notable la vulnerabilidad, al igual que las operaciones de tecnología alta.

El reto para las instituciones financieras que financian la agricultura protegida es cómo brindar, durante los procesos de evaluación y aprobación, la seguridad razonable de que el proyecto de agricultura protegida que se va a financiar realmente produzca los beneficios esperados durante un período de tiempo prolongado. Varias características de la agricultura protegida son muy prometedoras al respecto.

En primer lugar, es en gran medida la propia inversión en infraestructura de la agricultura protegida (el objetivo de la financiación y el uso del capital) lo que determina la mejora con respecto a los escenarios sin cambios. En consecuencia, el propósito y los objetivos del proyecto —mayor productividad, mejor acceso a los mercados y mayor eficiencia en el uso del agua y otros insumos— están perfectamente alineados con las metas de las instituciones financieras (probabilidad de reembolso del préstamo y de los intereses) y con las metas ambientales

y sociales potenciales de la institución financiera y de sus socios de capital (reducción de las emisiones de GEI, reducción de la vulnerabilidad y mejoras en otras múltiples variables). En términos prácticos, esto significa que puede asumirse de manera muy razonable que una inversión en agricultura protegida con un conjunto acordado de características de infraestructura, siempre y cuando continúe operando con esa infraestructura, está logrando los objetivos agronómicos deseados, los objetivos de rendimiento financiero y los niveles de desempeño ambiental y social.

En segundo lugar, no hay ningún incentivo para que el propietario deje de utilizar la infraestructura. Por ejemplo, no hay ninguna ventaja en volver a cambiar al escenario sin cambios una vez realizada la inversión. La infraestructura no tiene un valor real de recuperación fuera de la agricultura protegida, y la inversión en tiempo, energía y relaciones comerciales sería una pérdida sin sentido. Esto contrasta con muchas otras inversiones ambientales, como las plantas de tratamiento de aguas residuales, en las que, en teoría, un propietario podría reducir los costos de explotación dejando de operarlas.

En tercer lugar, es relativamente poco lo que podrían hacer los cambios operativos (intencionales, omisiones o errores) para cambiar o disminuir las diferencias positivas esperadas con respecto al escenario sin cambios. Por ejemplo, cambiar la cubierta plástica con más frecuencia (lo que aumentaría las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de los desechos plásticos) es costoso, y todas las grandes compañías de agricultura protegida están constantemente buscando maneras de extender la vida útil del plástico. Del mismo modo, los productores buscan continuamente eficiencias en el uso del agua y los fertilizantes, que se logran precisamente gracias al uso de la infraestructura. Las posibles áreas de incentivos contraproducentes son la selección de pesticidas, las condiciones de trabajo y la gestión de los residuos plásticos después de su uso. Estas podrían plasmarse en convenios, acuerdos complementarios u otros compromisos entre las instituciones financieras y los promotores del proyecto.

Los autores concluyen que si el préstamo está rindiendo en términos financieros según las condiciones adecuadas aprobadas, resulta sensato suponer que está rindiendo en términos agronómicos, ambientales y sociales. Solo bastaría realizar visitas anuales para verificar que las operaciones se llevan a cabo de acuerdo con la inversión en la infraestructura.

Desde el punto de vista del Gobierno mexicano, toda inversión en cualquier tipo de agricultura protegida puede producir importantes beneficios ambientales y sociales de alta prioridad definidos a nivel nacional, y debe promoverse como una inversión sostenible. Sin embargo, desde la perspectiva de FIRA, con su objetivo de apoyar los préstamos en curso, principalmente a través de intermediarios financieros en todo el país, los criterios de viabilidad financiera son una consideración fundamental. Como tal, FIRA debe enfocar sus criterios de inversión en el tipo de agricultura protegida que haya demostrado viabilidad financiera. Entre ellos se incluyen operaciones de casas sombra de escala moderada a grande, y operaciones de tecnología media y alta de prácticamente cualquier escala. Si el acuerdo de financiación es viable, existe la certeza casi total de que se lograrán múltiples beneficios sin ningún riesgo de daño significativo. La gestión de los residuos plásticos es una variable para tener en cuenta en todos los sistemas de producción. El uso y selección de pesticidas también es una variable que debe considerarse cuando la operación se destina a la producción nacional. Estos puntos podrían incluirse en las cláusulas del contrato de préstamo.

Más allá de sus propios criterios de préstamo alineados con las metas y prioridades del Gobierno mexicano, FIRA desea que la mayoría (si no toda) de su cartera de préstamos se ajuste a los criterios de la CBI, que aún no han sido establecidos para ningún tipo de agricultura. Actualmente, la CBI está analizando los criterios para definir

una norma específica de agricultura protegida en México basada en sus marcos establecidos. Los autores recomiendan los criterios de inversión a fin de alinear los amplios beneficios de la agricultura protegida en México con los criterios más específicos de cambio climático requeridos por la CBI. Los requisitos de infraestructura proporcionarían en sus programas de certificación un alto grado de certeza con respecto a los beneficios en materia de cambio climático que persigue la CBI, al mismo tiempo que ofrecerían beneficios más amplios a México y una base de préstamos significativa para que FIRA logre aumentar su escala e impacto (cuadro 10A).

Estos puntos pueden verificarse fácilmente antes de una operación de préstamo durante las fases de revisión técnica y diligencia debida con un mínimo de capacidad técnica. Pueden estipularse y documentarse en el contrato de préstamo y corroborarse fácilmente después de la construcción y en revisiones periódicas.

CUADRO 10A. Recomendación de requisitos de infraestructura para alinear las prioridades de la CBI, FIRA y el Gobierno mexicano

Requisito	Comentario
1. Operaciones en un recinto completamente cerrado (techo y paredes cerrados) con cámara de aire permeable o no permeable.	Proporciona un control significativo sobre las condiciones de cultivo, permitiendo una mayor productividad, un uso controlado del agua y los productos químicos, y protección contra la erosión y la degradación del suelo.
2. Las operaciones deben ser diseñadas y desarrolladas para la producción durante todo el año (o prácticamente durante todo el año, con varios ciclos).	Proporciona la productividad necesaria para asegurar los beneficios en materia de huella de GEI.
3. Cuando se utilicen fuentes de agua que no sean agua de lluvia directa, el agua deberá suministrarse mediante métodos de riego de precisión (por goteo, microaspersión o fertiirrigación) con control.	Logra la meta principal de reducción de la vulnerabilidad del Gobierno mexicano y minimiza el uso de energía para el movimiento del agua.
4. La calefacción solo debe utilizarse contra el frío en los meses de invierno. La calefacción no puede utilizarse para proporcionar condiciones de crecimiento.	Esto garantiza una reducción de la huella de GEI.
5. El enfriamiento solo debe ser pasivo. La ventilación activa solo está permitida para la gestión del calor y la humedad relativa.	Aunque es extremadamente improbable que las operaciones utilicen refrigerantes debido a consideraciones de costo, en este punto se trata esta cuestión para evitar cualquier posible huella de GEI ya sea por el aumento del uso de energía o de refrigerantes.

Prácticas preferidas recomendadas para niveles más altos de impacto transformador

Como se mencionó anteriormente, uno de los aspectos más interesantes y prometedores de la agricultura protegida es la oportunidad de mejorar y actualizar las tecnologías de producción. Una tecnología superior se asocia con beneficios en todas las variables ambientales y sociales examinadas. FIRA debería considerar mecanismos para promover la inversión en niveles más altos de tecnología, e incluir su convalidación en sus requisitos de préstamo. Los requisitos de infraestructura de última tecnología proporcionan aún mayores beneficios transformadores (cuadro 10B).

CUADRO 10B. Recomendación de requisitos de infraestructura de punta que brindan mayores beneficios transformadores

Requisito	Comentario
1. Operaciones en situación de aislamiento con cubierta del suelo no permeable y cámara de aire integral (no permeable).	Proporcionan el máximo control sobre las condiciones de cultivo, con una gran reducción de patógenos, uso de productos químicos y agua, y mejores condiciones de trabajo, productividad y huella de GEI.
2. Producción en sustratos.	Permite la producción en áreas donde las condiciones del suelo no lo permiten, aumenta la productividad y reduce el uso del agua y los productos químicos.
3. Sistemas de recuperación y reutilización de agua.	Aumentan la eficiencia hídrica, disminuyen el uso de productos químicos y las emisiones de GEI de los fertilizantes.

En toda operación de financiación de agricultura protegida, las instituciones crediticias deben incluir condiciones o convenios en sus acuerdos de préstamo para promover una mayor alineación con las metas nacionales y dar garantías a las partes interesadas de la prosecución de esas metas (cuadro 10C).

CUADRO 10C. Condiciones de préstamo

Condiciones de préstamo	Comentario
1. El operador de la agricultura protegida deberá tener una política escrita que promueva la reutilización, el reciclaje y la eliminación adecuada de los desechos plásticos, y que mida los avances.	La mejora de la gestión de los residuos plásticos es un objetivo a nivel nacional. Esta cláusula compromete al operador de la agricultura protegida a contemplar explícitamente este punto en la etapa de planificación y a contar con datos medibles para evaluar.
2. Los operadores de la agricultura protegida no utilizarán principios activos que estén incluidos en la clasificación “Ia” o “Ib” recomendada por la OMS en cuanto a los pesticidas y su peligro (la banda roja).	Promueve el uso de productos químicos más inocuos para la seguridad de los trabajadores y la protección del medio ambiente. Esto es coherente con los requisitos de la legislación mexicana actual y fomentaría un mayor cumplimiento.

Bibliografía

Abaza, H. *et al*. 2014. Green Economy Scoping Study: Egypt. UNEP. Nairobi.

Abukari, M. K. y M. E. Tok. 2010. Protected Cultivation as Adaptive Response in Climate Change Policy: The Case of Smallholders in Northern Ghana. *Journal of Emerging Trends in Economics and Management Sciences* (JETEMS), 7(5): 307–21.

Antón, A. *et al*. 2010. Environmental Impact Assessment of Dutch Tomato Crop Production in a Venlo Glasshouse. En: ISHS 28th Int. Horticultural Congress - Science and Horticulture for People (IHC 2010): International Symposium on Greenhouse 2010 and Soilless Cultivation. Lisboa, Portugal: ISHS.

Borja-Vega, C. y A. de la Fuente. 2013. Municipal Vulnerability to Climate Change and Climate-Related Events in Mexico. Policy Research Working Paper No. 6417. Washington, D. C.: Banco Mundial. Disponible en: https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/15560 Licencia: CC BY 3.0 IGO.

Boulard, T. *et al*. 2011. Environmental impact of greenhouse tomato production in France. *Agronomy for Sustainable Development*. Springer Verlag/EDP Sciences/INRA 31(4): 757–77.

Cedillo Portugal, E. Entrevista de septiembre de 2017. Invernaderos y agricultura protegida. (Entrevistador: L. Pratt.)

Chávez Alvarado, M. Entrevista de septiembre de 2017. Invernaderos y agricultura protegida. (Entrevistador: L. Pratt.)

City of Winnipeg. 2012. Emission Factors in kg CO_2-equivalent. Universidad de Winnipeg, Canadá.

Escobar H. y R. Lee (Eds.). 2009. Manual de producción de tomate bajo invernadero. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia.

Estrada, F. *et al*. 2013. The Economics of Climate Change in Mexico: Implications for National/Regional Policy, *Climate Policy* 13(6): 738–50.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2013. Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops: Principles for Mediterranean Climate Areas. En: W. Baudoin *et al*. (Eds). FAO Plant Production and Protection Paper 270. Disponible en: http://www.fao.org/3/a-i3284e.pdf.

FAO-Aquastat Database. Disponible en: http://www.fao.org/aquastat/en/.

FIRA. 2009. Agricultura protegida para pequeños y medianos productores en Michoacán. México, D. F., México: FIRA.

_____. 2010. Oportunidades de negocio en agricultura protegida. *Boletín informativo FIRA.*

_____. 2011a. Consejos prácticos para invertir en invernaderos. *Boletín informativo FIRA.*

_____. 2011b. Oportunidades de inversión en la producción de tomate rojo en México. *Boletín informativo FIRA.*

_____. 2016a. Invernaderos: Protección agroalimentaria. Folleto informativo. México, D. F.: FIRA.

_____. 2016b. Panorama agropecuario “Tomate Rojo”. México, D. F.: FIRA.

Gattinger, A. *et al*. 2011. Mitigating Greenhouse Gases in Agriculture: A Challenge and Opportunity for Agricultural Policies. Stuttgart, Alemania: ActAlliance.

Global CCS Institute. 2013. CCS for Iron and Steel Production. Melbourne, Australia: Global CCS.

Gobierno de México. 2014. Versión de difusión del Programa Especial de Cambio Climático 2014–18 (PECC 2014-18). México, D. F.: Gobierno de México.

_____. 2010. Monografía de cultivos "Jitomates". México, D. F.: Gobierno de México.

Golaszewski, J. *et al*. 2012. State of the Art on Energy Efficiency in Agriculture. AGREE Consortium.

Gómez, N. Entrevista de septiembre de 2017. Invernaderos y agricultura protegida. (Entrevistador: L. Pratt.)

Guzmán, M. Entrevista de septiembre de 2017. Invernaderos y agricultura protegida. (Entrevistador: L. Pratt.)

Guzmán, M. y A. Leiva. Entrevista de marzo de 2018. Agricultura protegida y malla sombra. (Entrevistador: L. Pratt.)

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2014. Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. México D. F., México: INECC.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 1997. Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, revisadas en 1996 (Directrices del IPCC). Metodología para fuentes agrícolas de N2O. Ginebra, Suiza: IPCC.

Lamas Nolasco, M. A. Entrevista de octubre de 2017. Invernadero y agricultura protegida. (Entrevistador: L. Pratt.)

Leyva Morales, J. B. *et al*. 2014. Uso de plaguicidas en un valle agrícola tecnificado en el noroeste de México. En: *Revista internacional de contaminación ambiental* 30(3).

Moreno, I. Entrevista de octubre de 2017. Invernadero y agricultura protegida. (Entrevistador: L. Pratt.)

Moreno, K. Entrevista de marzo de 2018. Agricultura protegida. (Entrevistador y pliego de preguntas: L. Pratt.)

Moreno Reséndez, A., J. Aguilar Durón y A. Luévano González. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 29: 763–74. Sociedad Mexicana de Administración Agropecuaria A.C. Torreón, México.

Mosier, A. *et al*. 1998. Closing the global N2O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* 52: 225–248. Kluwer Academic Publishers.

Muñoz, P. *et al*. 2008a. Comparing the Environmental Impacts of Greenhouse versus Open-field Tomato Production in the Mediterranean Region. *Acta Horticulturae* 801: 1591–1596. Disponible en: https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.197.

_____. 2008b. High Decrease in Nitrate Leaching by Lower N Input without Reducing Greenhouse Tomato Yield. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(4): 489–95.

Pérez-Olvera, M. A. *et al*. 2011. Use of Pesticides for Vegetable Crops in Mexico. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.

Pluimers, J. *et al*. 2001. Biogenic versus Abiogenic Emissions from Agriculture in the Netherlands and Options for Emission Control in Tomato Cultivation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60: 209–18. Kluwer Academic Publishers, Países Bajos.

Ray, D. K., J. S. Gerber, G. K. MacDonald y P. West. 2015. Climate Variation Explains a Third of Global Crop Yield Variety. Nature Communications 6(5989). Disponible en: https://www.nature.com/articles/ncomms6989.

Rebollar, A. Entrevista de 2017. Invernaderos y agricultura protegida. (Entrevistador: L. Pratt.)

Ríos, E. Entrevista de marzo de 2018. Agricultura protegida en malla sombra. (Entrevistador: L. Pratt.)

Russo G. y G. Scarascia-Mugnozza. (s/f). LCA Methodology Applied to Various Typologies of Greenhouses. PROGESA Department, Universidad de Bari, Italia.

SEGOB (Secretaría de Gobernación de México). 2014. Programa Especial de Cambio Climático 2014-18. Ciudad de México, México: SEGOB. Disponible en http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342492&fecha=28/04/2014.

_____. 2015. Factor de Emisión. México D. F., México: SEMARNAT.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) e INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2016. Estrategia Nacional de Cambio Climático, la Estrategia de Medio Siglo. Ciudad de México, México: SEMARNAT e INECC. Disponible en: https://unfccc.int/files/focus/long-term_strategies/application/pdf/mexico_mcs_final_cop22nov16_red.pdf.

Smith, K., L. Bouwman y B. Braatz. 2013. Greenhouse Gas Mitigation Options and Costs for Agricultural Land and Animal Production within the United States. En: IPCC, *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Washington, D. C.: ICF Consulting.

Steta, M. Entrevista de septiembre de 2017. Invernaderos y agricultura protegida. (Entrevistador: L. Pratt.)

Torrellas, M. *et al*. 2011. Estudio del impacto ambiental del cultivo de tomate en un invernadero multitúnel. IRTA de Cabrils, Estación Experimental de la Fundación Cajamar "Las Palmerillas", España.

_____. 2012. Environmental and Economic Assessment of Protected Crops in Four European Scenarios. *Journal of Cleaner Production,* 28: 45–55.

_____. 2013. An Environmental Impact Calculator for Greenhouse Production Systems. *Journal of Environmental Management,* 118C: 186–95.

Torres Barrera, C. Entrevista de septiembre de 2017. Invernaderos y agricultura protegida. (Entrevistador: L. Pratt.)

ANEXO 1

Factores de emisión utilizados para el cálculo de los GEI

Variable	Valor	Unidad	Comentario
Concreto	0,15	kg CO_2/kg de concreto	Norma de la industria[a]
Acero galvanizado	2,90	toneladas de CO_2/tonelada de hierro	Perfil supuesto en EE. UU.[a]
Polietileno (PE)	2,40	kg CO_2/kg de PE	Norma de la industria
Fertilizantes químicos	1,25	kg CO_2/kg de abono N	Directrices del IPCC sobre fertilizantes respecto al nitrógeno[b]
Diesel	2,60	kg CO_2/litro	Criterio basado en la formulación en México[c]
GLP	1,58	kg CO_2/litro GLP	Criterio basado en la formulación en México[c]
Electricidad	0,45	Toneladas de CO_2/MWh	Criterio basado en la formulación en México[d]

Fuentes:
[a] City of Winnipeg (2012).
[b] IPCC (1997); Mosier *et al*. (1998); Smith, Bouwman y Braatz en IPCC (1999).
[c] INECC (2014).
[d] SERMANAT (2015); Instituto Global de CCS (2013).

ANEXO 2

Cálculos de GEI para la infraestructura de la agricultura protegida

Materiales principales para la estructura y el sistema incluidos en el inventario

Materiales	Elementos	Cantidad/ha	Cantidad/t tom.	Unidad
Infraestructura				
Concreto	Cemento, arena y grava	42,00	0,05	m^3
Cobertor de suelo	Cobertor de suelo	10.000,00	12,50	m^2
Mallas	Malla antiáfidos	4.450,00	5,56	m^2
Plástico	Cubiertas plásticas 700 cal.	13.500,00	16,88	m^2
Acero	Pilares, refuerzos, canalones, ejes, perfiles, arcos, ventilación, enturorado	60.000,00	75,00	kg
Motores y electrificación	Operación de ventanas	20,00	0,03	Unidades
Equipo auxiliar				
Bolsa	Bolsas de sustrato	28.000,00	35,00	kg
Perlita	Sustrato	28.000,00	35,00	Litro
Riego	Microtubo	30.000,00	37,50	Pieza
Riego	Estaca	30.000,00	37,50	Pieza
Riego	Gotero	30.000,00	37,50	Pieza
Riego	Distribuidor	15.000,00	18,75	Pieza
Cabezal de riego	Cabezal de riego	28.000,00	35,00	Sistema
PVC	Sistema de distribución	300,00	0,38	m/l

Fuentes: Elaboración de Mario Alvarado Chávez, presidente de la Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos, sobre la base de IRTA, Producción Vegetal, febrero de 2018; Torrellas (2011).
Nota: Se supone que la vida útil del concreto y del acero es de 20 años y la del plástico, de tres años.

Este cuadro muestra la masa (kg) presente en cada categoría tecnológica por hectárea y la composición porcentual de la masa total de la infraestructura:

Peso de los materiales (kg)

Infraestructura	Tecnología alta		Tecnología media		Tecnología baja		Malla sombra – estacional		Malla sombra – anual	
Concreto	92.400,00	43%	92.400,00	43%	92.400,00	59%	92.400,00	60%	92.400,00	59%
Cobertor de suelo	4.000,00	2%	4.000,00	2%		0,0%		0%		0,0%
Mallas	311,50	0%	311,50	0%	311,50	0,2%	311,50	0%	311,50	0,2%
Plástico	2.497,50	1%	2.497,50	1%	2.497,50	1,6%	2.497,50	2%	2.497,50	1,6%
Acero	60.000,00	28%	60.000,00	28%	60.000,00	38%	60.000,00	39%	60.000,00	38%
Motores y electrificación	400,00	0%								
Equipo auxiliar	—		—		—		—		—	
	—		—		—		—		—	
Bolsas de sustrato	28.000,00	13%	28.000,00	13%		0%		0%		0%
Perlita	—		—		—		—		—	
Riego	150,00	0%	150,00	0%	150,00	0%	0,00	0%	150,00	0%
Riego	300,00	0%	300,00	0%	300,00	0%	0,00	0%	300,00	0%
Riego	300,00	0%	300,00	0%	300,00	0%	0,00	0%	300,00	0%
Riego	150,00	0%	150,00	0%	150,00	0%	0,00	0%	150,00	0%
Cabezal de riego	28.000,00	13%	28.000,00	13%		0%		0%		0%
PVC	60,00	0%	60,00	0%	60,00	0%	0,00	0%	60,00	0%
	216.569,00	100,0%	216.169,00	100%	156.169,00	100%	155.209,01	100%	156.169,00	100%

Fuente: Elaboración de los autores sobre la base del cuadro anterior (Chaves, IRTA).

Este cuadro clasifica los tipos de materiales para realizar la conversión a huella de GEI utilizando los factores que se presentan en el presente anexo:

Variable	Escenario sin cambios (campo abierto)	Tecnología alta		Tecnología baja		Casa sombra		Tecnología media	
Intensidad estructural (peso aproximado por m² de construcción)		21,66 kg/m²		15,62 kg/m²		15,62 kg/m²		21,62 kg/m²	
Mezcla de materiales		Plástico Metal Concreto	29,45% 27,70% 42,67%	Plástico Metal Concreto	2,41% 38,42% 59,17%	Plástico Metal Concreto	2,41% 38,42% 59,17%	Plástico Metal Concreto	29,50% 27,76% 42,74%
Masa por componente (kg/m²)		Plástico Metal Concreto	6,38 6,0 9,24	Plástico Metal Concreto	0,38 6,0 9,24	Plástico Metal Concreto	0,38 6,0 9,24	Plástico Metal Concreto	6,38 6,0 9,24
Factores de emisión (Material -kg CO_2/kg)		Plástico Metal Concreto	2,4 2,9 0,15	Plástico Metal Concreto	2,4 2,9 0,15	Plástico Metal Concreto	2,4 2,9 0,15	Plástico Metal Concreto	2,4 2,9 0,15

Fuente: Cálculos de los autores.

Este cuadro presenta las toneladas de emisiones de CO2 incorporadas por hectárea de tomate. Se asume el total de emisiones de CO2 durante la vida útil de cada material (la del concreto y la del acero se supone que es de 20 años; y la del plástico, de tres años):

Toneladas de CO_2/ha		Concreto	Metal	Plástico	Total de toneladas de CO_2/Ha
Escenario sin cambios	Campo abierto	0	0	0	0
Tecnología	Alta	13,86	174,02	153,07	340,95
	Media	13,86	174,02	153,07	340,95
	Casa sombra (anual)	13,86	174,00	9,05	196,91
	Casa sombra (estacional)	13,86	174,00	6,74	194,60
	Baja	13,86	174,03	9,05	196,94

Fuente: Cálculos de los autores.

Este cuadro resume los resultados del análisis de las emisiones de CO2 durante la vida útil de la infraestructura con respecto a la producción anual (toneladas de tomate/ha) por tecnología:

kg de CO_2/tonelada de tomate		Concreto	Metal	Plástico
Escenario sin cambios	Campo abierto	0	0	0
Tecnología	Alta	0,87	10,88	63,78
	Media	1,73	21,75	127,56
	Casa sombra (anual)	2,31	29,00	10,05
	Casa sombra (estacional)	4,62	58,00	14,98
	Baja	6,93	87,02	30,16

Fuente: Cálculos de los autores.

Este cuadro presenta los rendimientos de la producción de tomate asumidos para cada tecnología sobre la base de los resultados del cuadro anterior:

Rendimiento de la producción anual

Tecnología de agricultura protegida		Toneladas de tomate/ha
Escenario sin cambios	Campo abierto	22
Tecnología	Alta	800
	Media	400
	Casa sombra (anual)	300
	Casa sombra (estacional)	150
	Baja	100

Fuente: Cálculos de los autores.

ANEXO 3

Emisiones del riego

La cantidad de emisiones de GEI procedentes del riego está determinada por la cantidad de energía utilizada para las bombas y el equipo general que necesita suministrarse con electricidad en función de la tecnología de agricultura protegida utilizada. En estos análisis de casos, existen dos escenarios:

- Riego de campo abierto: En este contexto, los autores asumieron el uso de una bomba de 5 HP (3,73 kW) de potencia que funciona 12 horas al día durante el año. No resulta adecuado para situaciones o ciclos específicos, sino que es para propósitos generales.

En el siguiente cuadro se resume el escenario:

Bomba	
5	HP
3,73	Kw
Energía (kWh)	
12	Horas por día
16.337	kWh/año
Producción anual de tomate	
22	tonelada/ha
Energía – Producción	
742,6	kwh/tonelada

Fuente: Cálculos de los autores basados en la información del fabricante de la bomba, y el supuesto de necesidades de bombeo de campo abierto, en un clima semiárido.

- Riego de alta tecnología: Para el análisis de este escenario, una empresa de tecnología alta de agricultura protegida proporcionó la siguiente información:

Producción de tomate (Kg/m^2)	63
Producción total (toneladas)	12.600
Superficie total (m^2)	200.000
Consumo de diesel por tonelada (litros)	0,314
Consumo por tonelada (kWh)	212
Energía total (kWh/tonelada de tomate)	216

Fuente: Cálculos de los autores basados en las especificaciones de la bomba y el factor de conversión: 1 litro de diesel = 11 kWh.

En ambos casos, para los datos de agua por tonelada de tomate se utiliza un método de extrapolación simple. Luego se calcula el consumo de energía para la agricultura protegida de tecnología media y baja y para las casas sombra.

Tecnología	kwh/tonelada de tomate
Campo abierto	742,6
Alta	215,68
Media	385,38
Casa sombra (anual)	519,33
Casa sombra (estacional)	697,95
Baja	599,71

Fuente: Cálculos de los autores.

Emisiones de CO_2

Para el cálculo de las emisiones de CO_2, se utiliza el factor CO_2 elaborado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SERMANAT).

Factor de CO_2: 0,45 toneladas de CO_2/MWh

Este factor está relacionado con la red eléctrica de México, que utiliza 25% de energía renovable y 75% de generación de combustibles fósiles. El acceso a la red eléctrica en México es de aproximadamente 99%, según el Banco Mundial y la Comisión Federal de Electricidad de México.

GEI del riego		kg of CO_2/ tonelada de tomate
Escenario sin cambios	Campo abierto	337,32
Tecnología	Alta	98,06
	Media	174,79
	Casa sombra (anual)	235,63
	Casa sombra (estacional)	316,89
	Baja	272,40

Fuente: Cálculos de los autores.

ANEXO 4

Factores de emisión utilizados para los fertilizantes

La principal preocupación sobre los GEI de los fertilizantes se refiere a la creación de óxidos nitrosos (NOx) cuando el nitrógeno de los fertilizantes pasa al aire a través del suelo y el agua y se combina con átomos de oxígeno. El factor de emisión real, es decir, cuánto NOx genera cada gramo de nitrógeno, depende de muchas variables, entre ellas la temperatura, el suelo, los cultivos, y otros, y actualmente es un tema de estudio científico. Los autores han adoptado el factor de emisión por defecto que sugiere el IPCC de 1,25% del N orgánico o sintético aplicado en masa (IPCC, 1997; Mosier *et al*., 1998; Smith, Bouwman y Braatz, s/f).

Para calcular el impacto potencial del fertilizante, los autores calcularon la masa total de nitrógeno en los diversos fertilizantes con uso reportado para el tomate en México, con el fin de obtener un factor de nitrógeno. Los diversos expertos técnicos informaron que los mismos fertilizantes se utilizan generalmente en operaciones de campo abierto y en áreas protegidas, y que aunque el tiempo y las proporciones pueden variar en la práctica, las diferencias son mínimas. Basándose en los registros de especificaciones técnicas cedidos por un cultivador de agricultura protegida de tecnología alta, los consultores calcularon que 8,53% de toda la masa de fertilizante aplicada por tonelada de tomate es nitrógeno elemental. Cabe destacar que los componentes en blanco son elementos confidenciales que no tienen contenido de nitrógeno.

El siguiente cuadro presenta la estructura de los cálculos para llegar a un kilogramo normalizado de CO_2 por tonelada de tomate, basada en el uso de fertilizantes reportado y los niveles de productividad de las diferentes tecnologías analizadas.

Componente fertilizante	g aplicado por tonelada de tomates	% total	% N por masa molecular	N agregado/tonelada de tomates
Nitrato Calcio Bi 12-0-0-23	45.896,13	37,66	17,1	7.835,73
Nitrato de Potasio 12-0-45 NitroK Sul	15.470,49	12,70	13,9	2.143,33
Cloruro cálcico	4.525,67	3,71	0	0,00
Cloruro potásico	4.073,19	3,34	0	0,00
Sulfato de magnesio	20.366,26	16,71	0	0,00
Sulfato de potasio	9.474,86	7,78	0	0,00
Urea	4,57	0,0037	31,8	1,45
Quelato de fierro EDTA13,2% Tradecorp FE	665,18	0,55	1,4	9,58
Fosfato monopotasio	4.256,00	3,49	0	0,00
Micronutriente quelato	850,95	0,70	0	0,00
Molibdato de amonio	7,49	0,01	7,2	0,54
Sulfato de cobre	10,10	0,01	0	0,00
Sulfato de magnesio	68,68	0,06	0	0,00
Sulfato de cinc	61,61	0,05	0	0,00
Boramin Ca	19,75	0,02	4	0,86
Complejo de micronutrientes	25,21	0,02	0	0,00
Compuesto de ácido húmico/ fúlvico	21,94	0,02	0	0,00
Quelato de calcio	14,19	0,01	0	0,00
Ácido bórico	252,83	0,21	0	0,00
Ácido fosfórico verde	11.318,95	9,29	0	0,00
Ácido Nítrico (55%)	1.786,52	1,47	22,2	397,13
Ácido sulfúrico	2.690,12	2,21	0	0,00
TOTAL	121.861	100	8,52	10.389

	Campo abierto	Tecnología alta	Tecnología media	Tecnología baja	Casa sombra (estacional)	Casa sombra (anual)
Sacos de fertilizante reportados	7,29	2,43	4,86	6,37	6	6
kg por saco	50	50	50	50	50	50
Tonelada de tomate/ha por año	40	800	400	100	150	300
kg de fertilizante por tonelada de tomate	364,5	121,5	243	318,5	300,7	300,7
kg de nitrógeno por tonelada de tomate (8,53% N/conversión total)	31,1	10,4	20,7	27,2	24,9	24,9
Factor de emisión CO_2	1,25%	1,25%	1,25%	1,25%	1,25%	1,25%
kg de CO_2 por tonelada de tomate	0,388	0,129	0,259	0,339	0,31	0,31

Fuente: Cálculos de los autores.

ANEXO 5

Resumen de los GEI totales

Rendimiento de producción en toneladas/ ha por año	kg de CO_2 por tonelada de tomate		Infraestructura			Cultivo		Total de kg de CO_2 por tonelada de tomate
			Concreto	Metal	Plástico	Riego	Fertilizantes	
22	Escenario sin cambios	Campo abierto	0	0	0	337,32	0,39	337,71
800	Tecnología	Alta	0,87	10,88	63,78	98,06	0,13	173,71
400		Media	1,73	21,75	127,56	174,79	0,26	326,09
300		Casa sombra (anual)	2,31	29,00	10,05	235,63	0,31	277,30
150		Casa sombra (estacional)	4,62	58,00	14,98	316,89	0,31	394,80
100		Baja	6,93	87,02	30,16	272,40	0,34	396,85
	Vida útil prevista del material (años)		20	20	3			

Fuente: Cálculos de los autores.

BID