



UADY
UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE YUCATÁN

Revista de Economía,

Facultad de Economía, Universidad Autónoma de Yucatán

Heterogeneidad espacial del valor económico del agua en cultivos de fresa en México

Spatial heterogeneity of the economic value of water in strawberry crops in Mexico

Faustino Gómez-Santiz¹, Patricia Ávila-García², Hilda R. Guerrero García Rojas³



Resumen

El presente estudio estima requerimientos hídricos teóricos y el precio sombra del agua en la producción de fresa en México a escalas nacional, estatal y municipal, evaluando la variación espacial para identificar si la rentabilidad hídrica está condicionada por la demanda de agua o la estructura de costos. El precio sombra, expresado como Valor Económico del Agua (VEA), refleja la productividad marginal del recurso, aunque no constituye una medida del valor económico integral, que incorporaría externalidades ambientales, costos de oportunidad e indicadores de disponibilidad en cuencas. Se utilizó el Método del Valor Residual (MVR), integrando datos de producción y estructuras de costos estandarizadas. Los requerimientos hídricos se modelaron con CROPWAT 8.0 y se aplicó descomposición de varianza bajo 20 escenarios por municipio. A escala nacional, los resultados muestran que los costos explican el 63.4 % de la variación del VEA; sin embargo, existe marcada heterogeneidad espacial. En regiones áridas como Ensenada, los requerimientos hídricos determinan más del 57 % de la variación, mientras que en el centro predominan los costos. Las principales limitaciones son el uso de costos estandarizados y requerimientos hídricos teóricos ante la falta de medición volumétrica directa en parcela. El trabajo aporta evidencia original de que la agricultura protegida de exportación no homogeneiza el valor del agua, revelando patrones territoriales contrastantes. Se concluye que la productividad del agua en la fresa está condicionada por configuraciones territoriales específicas donde la escasez física actúa como restricción determinante sólo en clústeres áridos.

Palabras clave: valor económico del agua; método del valor residual; heterogeneidad espacial; producción de fresa; agricultura de alto valor.

Clasificación JEL: Q15, Q25, R12.

1- Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, México,

Correo electrónico: fgomez@cieco.unam.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9441-2713>

2- Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, México,

Correo electrónico: pavila@cieco.unam.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4268-8777>

3- Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Economía, México, Correo electrónico: hilda.guerrero@umich.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4226-8027>



e-ISSN: 2395-8715. Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

RECEPCIÓN: 1 Diciembre 2025 ACEPTACIÓN: 13 Abril 2026

REVISTA DE ECONOMÍA: Vol. 43 - Núm 107 JULIO A DICIEMBRE DE 2026: Págs. 36-66



Abstract

This study estimates theoretical water requirements and the shadow price of water for the production of strawberry in Mexico at national, state, and municipal scales, evaluating spatial variation to identify whether water profitability is conditioned by water demand or cost structures. The shadow price, expressed as the Economic Value of Water (EVW), captures the marginal productivity of the water resource; however, it does not represent the full economic value of water, which would also require accounting for environmental externalities, opportunity costs, and basin-level water availability indicators. The Residual Value Method (RVM) was applied integrating production data and standardized cost structures; water requirements were modeled with CROPWAT 8.0, and a variance decomposition was applied under 20 combined scenarios per municipality. Results show that, at the national scale, costs explain 63.4% of EVW variation; however, marked spatial heterogeneity exists. In arid regions such as Ensenada, water requirements determine more than 57% of the variation, while costs predominate in central Mexico. Limitations include the use of standardized state costs and theoretical water requirements due to the lack of direct volumetric measurements at the plot level. The work provides original evidence that export-oriented protected agriculture does not homogenize the value of water, revealing contrasting territorial patterns. It is concluded that the economic productivity of water in strawberry farming is not uniform, it is conditioned by specific territorial configurations where physical scarcity acts as a determining economic constraint only in certain arid clusters.

Keywords: economic value of water; residual value method; spatial heterogeneity; strawberry production; high-value agriculture.

JEL Classification: Q15, Q25, R12.

1. Introducción

Según los datos del Sistema de información Agroalimentaria y Pesquera, la producción de fresa en México tuvo un crecimiento sostenido en el periodo 2003-2024 al pasar de 146 mil toneladas en 2003 a más de 696 mil toneladas en 2024. En el mismo periodo, de acuerdo con los datos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 2025), las importaciones de fresa mexicana desde Estados Unidos aumentaron de más de 40 mil toneladas en 2003 a más de 259 mil toneladas en 2024.

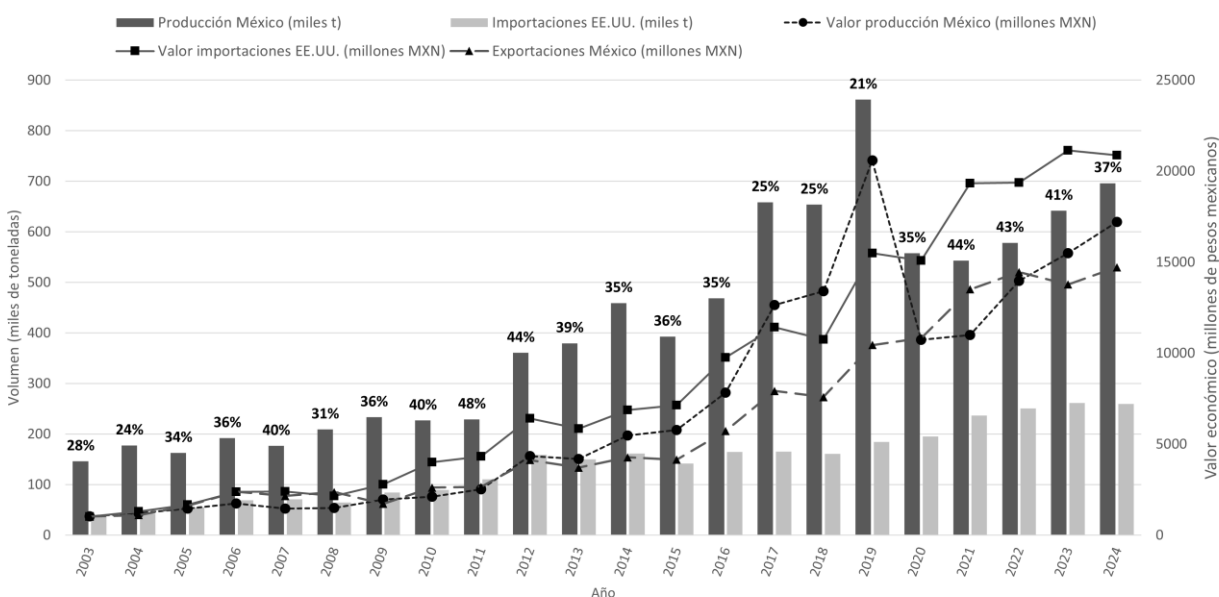
De manera paralela, el valor anual de las exportaciones de fresa reportadas por el Banco de México (2025), revela que la exportación del cultivo ha tenido un crecimiento continuo a lo largo de tres décadas. Por ejemplo, en 1993 el valor de la producción de las exportaciones sumó un total de más de 402 millones de pesos. Para el 2003, este valor había alcanzado un monto total de más de 1 014 millones de pesos. En los años posteriores este incremento se ensancharía aún más al alcanzar en 2019 un valor de las exportaciones de más de 10 437 millones de pesos, llegando así a más de 14 713 millones de pesos en 2024. Estos datos muestran de manera conjunta

el crecimiento de la producción interna de fresa, la intensificación de la demanda del mercado estadounidense, y la creciente valorización comercial del cultivo en el mercado internacional.

La articulación de estas tendencias sugiere que el cultivo de fresa se ha consolidado como un componente estratégico de la economía agrícola mexicana en la provisión de este cultivo al mercado internacional (González-Ramírez *et al.*, 2020; Rocha-Ibarra *et al.*, 2024). No obstante, dicha consolidación no es neutra desde las perspectivas territorial, productiva ni socioambiental. El aumento de la oferta y la intensidad exportadora implican, de manera directa, una mayor superficie cultivada, una demanda creciente de insumos productivos, en particular, de agua para riego, y una exposición creciente de las regiones productoras al agotamiento del recurso, a la competencia entre usos del agua y a tensiones locales vinculadas a la gestión del riego (Labra-Concha, 2022; Peniche Camps y Ávila García, 2012).

Un aspecto relevante en la exportación y producción de la fresa es que sigue un patrón claramente estacional. Estos alcanzan máximos entre enero y abril de cada año, coincidiendo con la ventana del 16 de septiembre al 14 de junio que permite el abastecimiento al mercado estadounidense precisamente cuando la producción de California está en declive. En cambio, entre junio y septiembre las exportaciones disminuyen drásticamente cuando la oferta de California domina el mercado (U.S. International Trade Commission [USITC], 2025). Esta secuencia establece una sincronización entre la estacionalidad de la producción en México, la demanda estadounidense y el régimen arancelario preferencial bajo el Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (USMCA o TMEC) que privilegia las importaciones de *berries* en ese periodo. Este patrón no sólo refleja una ventaja competitiva para México sino también una dependencia relativa del modelo exportador frente al mercado norteamericano.

Dentro de este marco, el porcentaje de la producción nacional que se exporta (o más precisamente, que es importada por EE.UU. desde México) ha mostrado variaciones, con picos que han superado el 40 % en años como 2007, 2011-2012 y desde 2021 en adelante (Gráfica 1). Esta tendencia al alza indica que no sólo está creciendo la producción y las exportaciones absolutas, sino que México está destinando una mayor fracción de su cosecha al mercado externo. Esta tendencia se alinea con estudios que documentan la expansión del modelo agroexportador de *berries* en varias entidades mexicanas (Michoacán, Guanajuato, Baja California) y la consolidación logística que lo sustenta (cultivos protegidos, cámaras de frío, infraestructuras de empaque) (González-Ramírez *et al.*, 2020; Rocha-Ibarra *et al.*, 2024).

Gráfica 1. Tendencias de la producción e importación de fresa (2003-2024)

Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2025) y USDA (2025)

Las implicaciones socioambientales de este proceso son numerosas. En regiones productoras como el valle de Zamora, Michoacán, la expansión de la fresa ha venido acompañada de incrementos en la extracción de agua del subsuelo y de conflictos crecientes por el uso del recurso hídrico. Por ejemplo, en el estudio de Peniche Camps y Ávila García (2012) se emplea el concepto de “agua virtual” para explorar la cantidad de agua incorporada al producto exportado, mostrando cómo la fresa mexicana contribuye a la exportación de agua en forma virtual, lo cual puede comprometer la sustentabilidad a mediano plazo del acuífero local (Peniche Camps y Ávila García, 2012). Este enfoque resulta útil para comprender que el crecimiento exportador no sólo es un fenómeno económico, sino también hidrológico y geográfico. Desde otra perspectiva, Olmos *et al.* (2021) han documentado que el cultivo de fresa bajo fertirrigación y acolchado plástico en regiones semiáridas puede generar mayor ganancia por unidad de agua aplicada, lo que sugiere que la innovación tecnológica puede atenuar las tensiones hídricas asociadas a la intensificación del cultivo.

Además, investigaciones en temas sobre huella hídrica y comercio internacional señalan que los flujos de agua virtual pueden imponer tensiones crecientes en regiones agrícolas exportadoras del Sur global, especialmente cuando la expansión se da en contextos de escasez hídrica o de regulación débil del uso del agua. (Hoekstra, 2003; Schubert, 2011). En el caso mexicano, la revaloración del producto, la intensidad exportadora y la concentración geográfica de los cultivos agrupados en clústeres agroindustriales implican que los requerimientos de riego se incrementan, que las exigencias de calidad (y por tanto de agua de buena calidad) aumentan, y que la competencia por agua puede surgir tanto entre productores agrícolas como entre otros usos humanos o ambientales.

Desde una perspectiva territorial, estas dinámicas revelan que la expansión de la fresa mexicana no es un fenómeno neutral para el paisaje rural. Esto implica intensificación productiva, concentración de infraestructura, externalidades ambientales (uso del agua, agroquímicos,

monocultivo) y cambios en los patrones tradicionales de cultivo (Labra-Concha, 2022). Esto coloca a las regiones de producción de fresa en una encrucijada. Por un lado, la oportunidad de inserción global y generación de divisas y oportunidades de empleo local, y por el otro, la importancia de gestionar sosteniblemente los recursos hídricos, territoriales y sociales que son afectados por el dinamismo que genera el sector agroindustrial.

Por ello, el presente estudio se propone, en primer lugar, estimar los requerimientos hídricos teóricos de los cultivos de fresa mediante modelación agroclimática (enfoque FAO CROPWAT); a partir de ello, estimar el precio sombra del agua mediante el Método del Valor Residual (MVR) en la producción de fresa a escalas nacional, estatal y municipal. Conviene precisar que el precio sombra del agua, definido como el excedente económico atribuible al recurso hídrico una vez descontados los costos de los demás insumos, mide la productividad marginal del agua en un contexto productivo dado, pero no equivale al valor económico integral del recurso. Siguiendo la taxonomía propuesta por Bierkens *et al.* (2019), el precio sombra derivado de la valuación residual (definición 3 en su clasificación) captura la eficiencia del uso del agua en el sistema productivo, mientras que el valor económico integral (definición 2) incorporaría además externalidades ambientales, valores de existencia, costos de oportunidad frente a usos alternativos y la disponibilidad del recurso en las cuencas (Young y Loomis, 2014; Godínez-Montoya *et al.*, 2007). Esta distinción es relevante porque el MVR supone que los mercados de todos los insumos distintos del agua operan en condiciones competitivas; cualquier imperfección en dichos mercados puede sesgar la estimación del precio sombra, generalmente al alza (De Brito y de Azevedo, 2022; Ziolkowska, 2015). A partir de esta estimación, se evalúa cómo el precio sombra varía espacialmente en función de los costos de producción y la demanda hídrica, con el fin de identificar territorios donde la rentabilidad está condicionada principalmente por el factor hídrico, distinguiéndolos de aquellos dominados por la estructura de costos.

Para cumplir estos objetivos, el estudio articula tres componentes metodológicos. Primero, construye una serie histórica del VEA (entendido como precio sombra del agua derivado del MVR) a precios constantes, integrando estadísticas oficiales de producción con la modelación agronómica de requerimientos hídricos mediante el software CROPWAT 8.0. Segundo, desarrolla un análisis de sensibilidad basado en múltiples escenarios que combina cuatro estructuras de costos y cinco condiciones climáticas, lo que permite evaluar la robustez del indicador ante la incertidumbre de estas variables a escala municipal. Tercero, aplica un método de descomposición de varianza que permite aislar y cuantificar qué proporción de la heterogeneidad territorial del VEA es atribuible a los costos operativos y cuál a las restricciones hídricas.

Este estudio contribuye a la literatura sobre economía del agua en al menos tres sentidos. Primero, es el primer análisis que estima el precio sombra del agua en la producción de fresa a escala municipal para el conjunto del territorio mexicano, a diferencia de estudios previos centrados en un solo estado o región (Godínez-Montoya *et al.*, 2007; Olmos *et al.*, 2021). Segundo, aplica una descomposición de varianza sobre escenarios combinados de costos y requerimientos hídricos que permite cuantificar, municipio a municipio, qué factor condiciona más la rentabilidad hídrica; este tipo de análisis no se había aplicado al cultivo de fresa en México. Tercero, integra modelación agroclimática (CROPWAT), estadísticas oficiales de producción (SIAP) y estructuras de costos estandarizadas (FIRA, 2024) en un marco metodológico replicable para otros cultivos de alto valor con orientación exportadora.

2. Marco analítico

El análisis del valor económico del agua en sistemas agrícolas intensivos requiere articular perspectivas provenientes de la economía del agua, de la economía ecológica y de la geografía agraria. Desde la economía del agua, el principio central es que el recurso tiene un valor económico derivado de su contribución marginal a la producción, es decir, el incremento en el valor de la producción que se obtiene al utilizar una unidad adicional de agua (Young y Loomis, 2014).

Es importante distinguir entre el precio sombra del agua y el valor económico del agua en sentido amplio. Bierkens *et al.* (2019) identifican al menos tres acepciones del concepto de precio sombra, que son (1) la eficiencia intertemporal, entendida como el valor marginal del agua que permanece en el acuífero; (2) una definición extensa que incorpora todos los costos asociados al recurso (eficiencia intertemporal, costos de oportunidad y externalidades ambientales y económicas), equivalente al concepto de valor económico total (Young y Loomis, 2014); y (3) la valuación residual, que estima el precio sombra como el cociente entre los retornos netos de la producción y el volumen de agua utilizado (Berbel *et al.*, 2011; Ziolkowska, 2015). El presente estudio se inscribe en la tercera acepción. En tal sentido, el VEA aquí estimado mide la productividad marginal del agua en el sistema productivo de la fresa, bajo el supuesto de que los demás insumos se remuneran a precios de mercado. Esta medida captura la eficiencia económica del uso del agua, pero no incorpora el valor intrínseco del recurso como soporte biológico y ambiental, las externalidades asociadas a su extracción, ni el costo de oportunidad frente a usos alternativos como el abastecimiento urbano o la conservación de ecosistemas (Godínez-Montoya *et al.*, 2007; Turner *et al.*, 2004). Desde la economía ecológica, esta distinción resulta fundamental, porque asignar un precio sombra al agua no captura su función ecosistémica ni la irreversibilidad de su agotamiento (Costanza *et al.*, 1997; Martínez-Alier, 2002). En consecuencia, a lo largo de este estudio el VEA se interpreta estrictamente como el precio sombra del agua (o productividad económica marginal del recurso), sin pretender agotar la complejidad que entraña la valoración económica integral del agua. Adicionalmente, como señalan Ziolkowska (2015) y De Brito y de Azevedo (2022), el MVR tiende a generar estimaciones que constituyen un valor máximo del precio sombra, ya que cualquier insumo no contabilizado en los costos, como el trabajo familiar, la renta de la tierra propia o los costos de oportunidad del capital, se atribuye implícitamente al agua.

No obstante, la literatura señala que el precio sombra del agua, derivado del método del valor residual, no es una propiedad intrínseca del recurso sino que depende de su interacción con factores tecnológicos, productivos y territoriales.

Desde la Economía Ecológica, se entiende que el agua es un recurso biofísicamente limitado (Costanza *et al.*, 1997; Daly, 1996) cuya disponibilidad depende de funciones ecosistémicas (De Groot *et al.*, 2002; Corvalan *et al.*, 2005), ciclos hidrológicos, calidad del agua, clima, suelo y patrón de uso del territorio (Fischer-Kowalski y Haberl, 2007; Martínez-Alier, 2002). Simultáneamente, los estudios de geografía agraria muestran que la expansión de cultivos intensivos genera configuraciones territoriales desiguales, en las que la rentabilidad agrícola depende de arreglos específicos de infraestructura, tecnología, disponibilidad de agua subterránea, costos de extracción y logística (Ramírez Barraza, 2019). En el caso mexicano, esta expansión ha implicado la transformación de zonas tradicionalmente dedicadas a cultivos básicos

hacia monocultivos de carácter exportador, reconfigurando los paisajes rurales y las relaciones productivas en los territorios afectados (Labra-Concha, 2022).

En tal sentido, la valoración económica del agua debe situarse dentro de un enfoque territorial que reconozca la heterogeneidad agroclimática, social, productiva y tecnológica de los productores. En esta línea, los enfoques de agua virtual (Hoekstra, 2003) y huella hídrica (Vázquez del Mercado y Lambarri, 2017) han mostrado cómo los cultivos intensivos pueden trasladar presiones hídricas desde regiones productoras hacia mercados globales, lo cual es particularmente relevante en sistemas agrícolas de exportación. Para el caso mexicano, Vázquez del Mercado y Lambarri (2017) reportaron una huella hídrica azul de 4,414 m³ por tonelada de fresa. Sin embargo, dichos enfoques no abordan directamente la rentabilidad económica del agua ni cómo esta varía entre unidades territoriales (Deng y Li, 2024).

La estimación del precio sombra del agua mediante el MVR y métodos afines ha generado evidencia empírica que confirma la amplia variabilidad del indicador según contexto territorial y productivo. En España, Berbel *et al.* (2011) reportaron un promedio de 4.7 MXN/m³ para la cuenca del Guadalquivir, mientras que Calatrava y Martínez-Granados (2012) obtuvieron valores marginales de hasta 8.8 MXN/m³ en la cuenca del Segura, donde cultivos hortícolas de exportación elevan significativamente la productividad del agua frente a cereales de secano. En Estados Unidos, Ziolkowska (2015) documentó un rango de 0.05 a 8.8 MXN/m³ entre cultivos y estados de los High Plains, y Bierkens *et al.* (2019), en un análisis global de 11 países con sobreexplotación de acuíferos, mostraron que los cítricos alcanzan los precios sombra más elevados en la mayoría de los países, mientras que el arroz y el trigo registran los más bajos. En México, Godínez-Montoya *et al.* (2007) estimaron precios sombra de 0.58 a 0.65 MXN/m³ en la Comarca Lagunera, muy por encima de las tarifas pagadas por los productores. Estos antecedentes evidencian que el precio sombra responde a la interacción entre condiciones agroclimáticas, tipo de cultivo y estructura de costos, pero aún no ha sido estimado de manera sistemática para la fresa mexicana a escala municipal.

En ese sentido, la incorporación de una perspectiva territorial al análisis de la rentabilidad ofrece elementos clave para comprender esto, donde el valor económico del agua dependerá tanto de los requerimientos hídricos (determinados por clima, suelo y tecnología), como de la estructura de costos (determinada por insumos, logística, nivel de tecnificación y organización del trabajo).

Bajo esta lógica, la descomposición de varianza aplicada en sistemas agrícolas posibilita cuantificar la contribución relativa de estos factores, permitiendo identificar qué componente domina la variabilidad del valor del agua y explicar así las desigualdades territoriales observadas.

3. Datos y métodos

3.1. Fuentes de información

El análisis integra tres conjuntos principales de datos:

1. Producción agrícola: valores de la producción, volúmenes y superficie cosechada de fresa por municipio (SIAP, 2025).
2. Costos de producción: estimaciones del sistema Agrocostos de FIRA (2024) para fresa bajo agricultura protegida. Los datos disponibles corresponden a tres entidades: Michoacán

(agricultura protegida, incluyendo cobertura de seguros agrícolas), Guanajuato (agricultura protegida) y Baja California (riego por goteo), con registros para los años 2007, 2012-2013 y 2016-2024. Es importante señalar que estas estimaciones provienen de un número reducido de observaciones y no deben considerarse estadísticamente representativas de los costos de producción a nivel nacional, estatal o por ciclo productivo. Las diferencias en los paquetes tecnológicos reflejados en cada entidad (alta tecnificación en Baja California, transición tecnológica en Guanajuato y mayor diversidad de esquemas en Michoacán) introducen heterogeneidad en las estructuras de costos que debe tenerse presente al interpretar los resultados.

3. Información climática: datos de temperatura, precipitación, humedad relativa, viento, insolación y radiación obtenidos de CLIMWAT y normalizados mediante CROPWAT 8.0 para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) y del cultivo (ET_c).

Todos los valores monetarios se transformaron a precios constantes de 2019 mediante el Índice Nacional de Precios al Productor (INPP) del sector agrícola (INEGI, 2025). Para años sin reporte de costos, se aplicó un procedimiento de interpolación por estado, asumiendo estabilidad relativa en la estructura de costos interanuales. Esta interpolación puede introducir sesgos en dos sentidos. Si durante el periodo interpolado hubo transiciones tecnológicas significativas (por ejemplo, adopción de paquetes de mayor tecnificación), se estarían proyectando costos de un periodo hacia años con condiciones productivas distintas; y si los precios de insumos específicos (fertilizantes, energía eléctrica, salarios regionales) evolucionaron de manera diferenciada, el deflactor general del INPP agrícola podría no capturar esos movimientos asimétricos. Un refinamiento deseable sería la aplicación de deflatores por categoría de insumo, lo cual excede el alcance del presente estudio, pero constituye una línea de mejora para investigaciones futuras. Estas limitaciones se consideran aceptables para los fines del análisis de sensibilidad, donde los costos estandarizados actúan como escenarios alternativos más que como estimaciones puntuales de cada territorio.

La integración de estas tres fuentes es metodológicamente complementaria e indispensable para el objetivo del estudio. Los datos de producción del SIAP aportan los datos sobre producción, valor de la producción y superficie cosechada a escala municipal, pero no contienen información sobre costos ni sobre volúmenes de agua aplicada. Por su parte, los costos estandarizados de FIRA (2024) ofrecen una aproximación a la estructura de insumos bajo distintos paquetes tecnológicos, pero carecen de escala municipal y no incluyen la dimensión biofísica del agua. Los registros climáticos de CLIMWAT y la modelación con CROPWAT 8.0 añaden justo esa dimensión.

3.2. Estimación de requerimientos hídricos

Los requerimientos hídricos del cultivo (RH) se estimaron con el enfoque FAO del Irrigation and Drainage Paper No. 56 (Allen *et al.*, 1998), utilizando el modelo CROPWAT 8.0. La ET_o se calculó mediante el método estándar FAO Penman-Monteith y la ET_c se obtuvo aplicando coeficientes de cultivo (K_c) diferenciados por etapa fenológica: K_c inicial = 0.40, K_c medio = 0.85 y K_c final = 0.75, valores que se mantuvieron constantes para todas las estaciones dentro de los rangos reportados para fresa en sistemas tecnificados (Allen *et al.*, 1998).

Esto implica que no se empleó la evapotranspiración bajo condiciones no estándar (ETc adj), la cual incorpora factores de ajuste por estrés hídrico, salinidad del suelo u otras condiciones subóptimas (Allen *et al.*, 1998, cap. 8). La ETc adj habría arrojado valores menores, pero su aplicación requeriría datos de campo sobre el estado real de los cultivos en cada localidad, información no disponible a la escala de este análisis.

Se evaluaron cuatro regiones representativas de la producción nacional con estaciones para las cuales el software CLIMWAT de la FAO tuvo registros, a saber: Morelia (Michoacán), Guanajuato (Guanajuato), Ensenada (Baja California) y La Paz (Baja California Sur). Cabe señalar que los registros de precipitación contenidos en la base CLIMWAT para la estación de Ensenada presentaron valores inconsistentes con el régimen pluviométrico documentado de la región (precipitación anual de 1,894 mm según CLIMWAT, frente a 258.3 mm según la Normal Climatológica 1991-2020 del SMN-CONAGUA, estación Agua Caliente, clave 02001). Por ello, los datos de precipitación de CLIMWAT para esta estación fueron sustituidos por los registros del SMN, aplicando el método de precipitación efectiva USDA Servicio de Conservación de Suelos, consistente con el procedimiento estándar de CROPWAT. Los demás parámetros climáticos de CLIMWAT para Ensenada (temperatura, humedad relativa, viento, insolación y radiación) se mantuvieron sin modificación, ya que son coherentes con los registros observados. Los resultados se expresaron como:

- ETc total ($\text{mm} \cdot \text{ciclo}^{-1}$): consumo fisiológico del cultivo.
- Riego neto ($\text{mm} \cdot \text{ciclo}^{-1}$): ETc menos precipitación efectiva.
- Requerimiento hídrico ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$): convertido mediante la equivalencia $1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

Dado que la fresa comercial en las principales regiones exportadoras se produce predominantemente bajo agricultura protegida (aunque existe heterogeneidad significativa en los paquetes tecnológicos entre entidades, con Baja California operando sistemas de alta tecnificación, Guanajuato en transición tecnológica y Michoacán con una diversidad de esquemas que incluye desde macrotúneles hasta producción en campo abierto), y considerando que bajo los sistemas protegidos la precipitación efectiva no afecta directamente el manejo del riego, se tomó la ETc total como indicador principal del requerimiento hídrico efectivo para los ejercicios de valoración económica. Esta decisión simplifica el análisis al asumir condiciones de agricultura protegida para todas las observaciones, lo que puede sobreestimar ligeramente el requerimiento de riego en zonas donde una fracción de la producción aún se realiza en temporal. No obstante, para los municipios de mayor peso productivo en el análisis, la proporción de superficie bajo agricultura protegida es predominante.

3.3. Método del valor residual

El precio sombra del agua, expresado aquí como Valor Económico del Agua (VEA), se estimó mediante el Método del Valor Residual (MVR), ampliamente utilizado en agricultura de riego cuando no existen precios de mercado del agua o estos no reflejan su costo real debido a subsidios y distorsiones (Berbel *et al.*, 2007; Young y Loomis, 2014; Ziolkowska, 2015). El VEA así definido representa la productividad marginal del agua: el excedente económico atribuible al recurso hídrico por cada metro cúbico utilizado, una vez deducidos los costos de los demás insumos. Esta definición corresponde a la tercera acepción del precio sombra en la clasificación de Bierkens *et*

al. (2019), y no debe confundirse con el valor económico integral del agua, que incluiría además externalidades y costos de oportunidad.

La formulada empleada fue:

$$VEA_{it} = \frac{\frac{VTP_{it}}{SC_{it}} - C_{it}}{RH_{it}}$$

donde:

→ VTP_{it} = Valor total de la producción (MXN) en el municipio i y año t (constantes 2019),

→ SC_{it} = Superficie cosechada (ha),

→ C_{it} = Costos de producción (MXN·ha⁻¹),

→ RH_{it} = Requerimientos hídricos (m³·ha⁻¹).

Los valores estatales se obtuvieron mediante agregación municipal ponderada por superficie.

Una limitación metodológica relevante es la ausencia de indicadores del estado de las cuencas o acuíferos en el modelo. Indicadores como el grado de presión sobre el acuífero (relación extracción/recarga), la condición de veda o el índice de explotación hídrica permitirían ponderar el precio sombra estimado por la escasez física real del recurso en cada territorio, transitando así hacia una medida más próxima al valor económico integral del agua (Bierkens *et al.*, 2019). La fuente que haría posible esta integración es el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de CONAGUA, que contiene los volúmenes concesionados por acuífero, y los balances hídricos por acuífero publicados periódicamente por la misma institución. No obstante, la información del REPDa no está sistematizada a escala municipal con cobertura temporal comparable a la del SIAP, lo que impide su incorporación directa al análisis. Esta extensión se identifica como la principal línea de mejora para versiones futuras del modelo.

3.4. Construcción de escenarios territoriales

La diferenciación territorial del VEA se evaluó mediante un diseño factorial de 20 escenarios por municipio, resultado de combinar cuatro escenarios de costos: correspondientes a las estructuras de costos operativos reportadas por FIRA para Michoacán, Guanajuato y Baja California, más un escenario de costos promedio ponderado por superficie. Cada estructura refleja un paquete tecnológico y una composición de insumos distinta, lo que permite evaluar cómo cambia el VEA cuando un municipio enfrenta diferentes configuraciones de costos, y cinco escenarios de requerimientos hídricos: correspondientes a las ETc estimadas mediante CROPWAT para las cuatro estaciones agroclimáticas representativas (Morelia, Guanajuato, La Paz y Ensenada), más un escenario base derivado de una revisión de literatura sobre consumo hídrico de fresa en sistemas tecnificados dentro y fuera de México (Gómez-Santiz y Ávila-García, 2026). El propósito de este quinto escenario es proporcionar un punto de referencia externo que no dependa exclusivamente de las condiciones locales modeladas con CROPWAT, y que permita evaluar la robustez de los resultados frente a estimaciones independientes.

Conviene precisar que los requerimientos hídricos de las cuatro estaciones representativas se aplicaron directamente como escenarios alternativos para el conjunto de municipios analizados, sin realizar ajustes altitudinales individualizados. Esta decisión obedece a dos razones. Por un lado, la disponibilidad de datos climáticos sistematizados en CLIMWAT se restringe a las

cuatro estaciones seleccionadas, y no existe una red equivalente que permita calibrar la ETo a resolución municipal para los 105 municipios analizados. Por otro lado, la magnitud del sesgo potencial se considera acotada en el contexto del diseño factorial, donde una diferencia altitudinal de 100 m implica un cambio aproximado de 0.6 °C en temperatura (tasa de lapso ambiental estándar), lo que se traduce en una variación de ETo del orden de 2 a 3 % (Allen *et al.*, 1998). Este margen queda ampliamente contenido dentro del rango de variación ya cubierto por los cinco escenarios de ETc (de 5,154 a 9,227 m³·ha⁻¹), que representa una amplitud de 79 % respecto al valor mínimo. En consecuencia, omitir ajustes individuales no altera de forma sustantiva los patrones de heterogeneidad territorial identificados, aunque sí constituye una limitación para la precisión de estimaciones puntuales en municipios con altitudes muy distintas a las de su estación de referencia.

Cada combinación genera un valor de VEA que refleja una configuración plausible del sistema productivo. Este enfoque permite estimar la sensibilidad del VEA ante variaciones en costos y condiciones agroclimáticas, elementos que difieren entre los territorios donde se produce fresa.

3.5. Descomposición de varianza

Para determinar qué factor explica mayor proporción de la variación territorial del VEA, los costos o los requerimientos hídricos, se aplicó un análisis de varianza por municipio.

1. Varianza atribuible a costos: Se fijó un escenario de RH como referencia y se calcularon las variaciones del VEA al modificar únicamente los costos.

$$Var(costo)_i = Var(VEA_{ic_1r_0}, VEA_{ic_2r_0}, \dots, VEA_{ic_4r_0})$$

2. Varianza atribuible a RH: Se fijó un escenario de costos como referencia y se evaluaron las variaciones del VEA al modificar los RH.

$$Var(RH)_i = Var(VEA_{ic_0r_1}, \dots, VEA_{ic_0r_5})$$

3. Proporciones explicativas:

$$S_{costo_i} = \frac{Var(costo)_i}{Var(costo)_i + Var(RH)_i}$$

$$S_{rh_i} = \frac{Var(RH)_i}{Var(costo)_i + Var(RH)_i}$$

Donde:

- i = municipio.
- VEA = Valor Económico del Agua, entendido como el precio sombra estimado mediante el método del valor residual (productividad marginal del recurso hídrico).
- c₀, c₁, ..., c₄ = distintos escenarios de costos de producción de cuatro estados productores principales de fresa.
- r₀, r₁, ..., r₅ = distintos escenarios de requerimientos hídricos de cuatro estados productores principales de fresa.

- $VEA_{\{i(c_j, r_k)\}}$ = valor del VEA para el municipio i bajo el escenario de costos c_j y el escenario de requerimientos hídricos r_k .
- $Var(costo)_i (\sigma_{costo}^2)$ = varianza del VEA en el municipio i causada únicamente por modificar los costos (RH fijo).
- $Var(RH)_i (\sigma_{rh}^2)$ = varianza del VEA en el municipio i causada únicamente por modificar los RH (costos fijos).
- S_{costo_i} = proporción de la varianza total atribuible a los costos.
- S_{rh_i} = proporción de la varianza total atribuible a los requerimientos hídricos.

Estas proporciones permiten identificar si un municipio es más sensible a los costos ($S_{costo} \rightarrow 1$), al agua ($S_{rh} \rightarrow 1$) o si presenta estructuras mixtas. Para obtener una lectura estructural del sistema, los valores municipales se ponderaron por superficie cosechada acumulada en el periodo 2014-2024. La ponderación por superficie enfatiza los territorios que concentran la producción (y que, en general, disponen de series más completas), otorgándoles mayor influencia en los promedios agregados estatales y nacionales.

Cabe señalar que la descomposición de varianza aquí empleada puede ser sensible a valores atípicos y a la presencia de valores faltantes en las series municipales. En municipios con pocas observaciones o con años de producción atípica (por ejemplo, entradas o salidas repentinas de producción), las varianzas estimadas pueden estar sesgadas. La ponderación por superficie mitiga parcialmente este efecto al reducir la influencia de municipios con series incompletas, pero no lo elimina por completo. Adicionalmente, dado que los escenarios de costos y de requerimientos hídricos se aplican de manera uniforme a todos los municipios, la descomposición no captura la variabilidad interna de costos dentro de un mismo estado ni las diferencias microclimáticas dentro de una misma región agroclimática. Estas limitaciones deben considerarse al interpretar los resultados, particularmente para municipios con superficies reducidas o con registros de producción discontinuos. Es pertinente aclarar que el Método del Valor Residual es un procedimiento algebraico de cálculo directo, donde el VEA se obtiene como cociente entre el excedente económico (valor de la producción menos costos) y el volumen de agua utilizado. A diferencia de los modelos de regresión multivariante, el MVR no plantea supuestos de multicolinealidad entre regresores, homocedasticidad de los residuos ni independencia de los errores, dado que no se ajusta ninguna función paramétrica a los datos.

3.6. Enfoque de análisis multiescalar

La metodología integra tres niveles, a saber: (1) Nacional: serie histórica del VEA 2003-2024 y su tendencia macroeconómica. (2) Estatal: comparación agregada de sensibilidad entre costos y RH. (3) Municipal: detección de patrones territoriales y casos extremos (agua dominante vs. costos dominantes).

La combinación de estos niveles permite evaluar de manera rigurosa cómo interactúan factores biofísicos, tecnológicos y económicos en la rentabilidad hídrica de un cultivo intensivo y tecnificado.

4. Resultados

4.1. Condiciones agroclimáticas y requerimientos hídricos de la fresa

Las zonas seleccionadas para caracterizar las condiciones agroclimáticas y estimar los requerimientos hídricos corresponden a los principales enclaves productivos de fresa en México bajo agricultura protegida. Se incluyen regiones del centro-occidente de México (Michoacán, Jalisco y Guanajuato) y zonas áridas y semiáridas del noroeste (San Quintín y Ensenada en Baja California, y La Paz en Baja California Sur). La caracterización climática integra las normales de temperatura y precipitación del SMN-CONAGUA (1991-2020) y los registros de CLIMWAT/CROPWAT 8.0, a partir de los cuales se estimó la evapotranspiración de referencia (ET_o) con el método FAO Penman-Monteith y la evapotranspiración del cultivo (ET_c) mediante coeficientes de cultivo (K_c) por etapa fenológica (Allen *et al.*, 1998).

4.1.1. Contexto climático de regiones productoras

En el centro-occidente, las estaciones analizadas (Jacona, Zamora, Maravatío, Morelia, Ciudad Guzmán e Irapuato) presentan climas templados subhúmedos, con altitudes entre 1,500 y 2,100 m.s.n.m., temperaturas medias anuales de 17.6 a 20.4 °C y precipitaciones de 663 a 790 mm concentradas en verano. El número de días con lluvia varía entre 68 y 110. Aunque esta humedad favorece la vegetación natural, el cultivo comercial de fresa se establece en otoño-invierno, cuando la lluvia disminuye considerablemente. La evaporación anual (1,580 a 1,920 mm) indica un balance hídrico deficitario, de modo que el riego es indispensable para sostener el ciclo productivo, aun en zonas con precipitación moderada. En agricultura protegida, donde se cultiva prácticamente toda la fresa de la región, la dependencia de la lluvia es marginal.

En el noroeste, las estaciones de Ensenada y San Quintín caracterizan climas áridos y mediterráneos secos. Con precipitaciones de apenas 66.7 a 190.5 mm anuales y 13 a 25 días lluviosos por año, estas regiones combinan lluvias escasas, temporadas húmedas muy cortas y evaporaciones superiores a 1,670 mm donde se dispone del dato. Dado que las temperaturas medias (16.0-17.2 °C) no son restrictivas para el cultivo, el factor limitante es el déficit hídrico extremo, lo que hace que la producción dependa casi completamente del agua subterránea (Cuadro 1).

Cuadro 1. Condiciones climáticas de estaciones representativas del centro-occidente y del noroeste (SMN-CONAGUA)

Estación-Municipio-Estado	Altitud (m)	T media anual (°C)	P anual (mm)	Días con lluvia (año ⁻¹)	Evaporación anual (mm)
Jacona, Michoacán	1,580	19.3	786.5	95.3	1,650.4
Zapotlán el Grande, Jalisco	1,515	20.1	762.4	97.9	1,620.7
Maravatío, Michoacán	1,971	18.7	784.3	97.0	1,761.7
Morelia, Michoacán	2,096	17.6	790.1	110.4	1,710.0
Zamora, Michoacán	1,589	19.9	770.0	89.2	1,584.0
Irapuato, Guanajuato	1,729	20.4	663.3	68.1	1,920.2
San Quintín, BC	20	17.2	66.7	13.0	-
San Quintín, BC	28	16.0	166.4	25.0	1,674.4

Ensenada, BC	75	16.7	190.5	23.9	-
--------------	----	------	-------	------	---

Fuente: elaboración propia con datos del SMN-CONAGUA.

4.1.2. Condiciones edafoclimáticas

Además de las diferencias climáticas, se realizó un análisis edafoclimático mediante la superposición de un buffer de 5 km alrededor de cada estación climatológica con la cartografía de unidades de suelo y humedad edáfica de INEGI (Serie III, escala 1:250,000, 2014). Para cada estación se identificaron la humedad dominante (meses con humedad en el perfil) y la unidad edafológica principal (Cuadro 2).

En el centro-occidente predominan Vertisoles pélicos y Feozems lúvicos, suelos profundos, con alta capacidad de retención de agua y aptos para agricultura intensiva bajo manejo adecuado (INEGI, 2014). En contraste, en Baja California se observan Xerosoles lúvicos y Litosoles, suelos típicos de zonas áridas: someros, con baja retención hídrica y alta susceptibilidad al estrés hídrico.

Cuadro 2. Humedad dominante y tipo de suelo en un radio de 5 km alrededor de las estaciones seleccionadas.

Estación (SMN)	Municipio-estado	Humedad dominante	Suelo dominante
Cointzio (16022)	Morelia, Michoacán	9 meses	Vertisol pélico
El Gigante (11166)	Maravatío, Michoacán	7 meses	Feozem lúvico
Irapuato (11028)	Irapuato, Guanajuato	8 meses	Vertisol pélico
Chaparaco (16031)	Zamora, Michoacán	8 meses	Vertisol pélico
Tangancícuaro (16125)	Tangancícuaro, Michoacán	8 meses	Vertisol pélico
Las Escobas (2032)	San Quintín, BC	0 meses	Xerosol lúvico
Ejido Uruapan (2153)	Ensenada, BC	4 meses	Litosol

Fuente: elaboración propia con análisis espacial en QGIS y cartografía edafológica de INEGI.

Estas diferencias edafoclimáticas afectan directamente la demanda de riego. En el centro-occidente, la combinación de mayor precipitación estival, altitudes intermedias y suelos con alta capacidad de retención genera un almacenamiento significativo en el perfil del suelo. En el noroeste, la combinación de suelos someros, baja precipitación y elevadas tasas de evaporación produce un déficit más severo, obligando a reemplazar prácticamente todo el consumo consuntivo mediante riego. Esta interpretación coincide con estudios clásicos sobre la importancia de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para determinar la frecuencia y el volumen de riego (Critchley y Siegert, 1991) y con la cartografía edafológica de INEGI.

4.1.3. Demanda evaporativa (ET_o) y caracterización agroclimática sintetizada

A partir de CLIMWAT se estimó la ET_o diaria media para cuatro estaciones representativas: Ensenada, La Paz, Guanajuato y Morelia. Los valores promedio anuales de temperatura mínima y máxima, humedad relativa, viento, insolación y radiación global se presentan en el Cuadro 3, junto con la ET_o y la precipitación total y efectiva anual (Cuadro 3).

Cuadro 3. Condiciones climáticas sintetizadas y ETo anual (CLIMWAT)

Estación (CLIMWAT)	Ensenada	La Paz	Guanajuato	Morelia
Tmin (°C)	11.6	17.6	11.3	10.8
Tmax (°C)	21.2	30	25.3	25
HR (%)	68	62	51	65
Viento (km·día ⁻¹)	120	120	228	176
Insolación (h·día ⁻¹)	7.2	7.1	7.6	5.8
Rad (MJ·m ⁻² ·día ⁻¹)	17	18	19	16.7
ETo (mm·día ⁻¹)	2.94	4.06	4.64	3.77
P anual (mm)	258.3	156	698	764
P efectiva anual (mm)	241.5	149.2	572.2	611.2

Fuente: elaboración propia. Nota: Los datos de precipitación para Ensenada se obtuvieron de la Normal Climatológica 1991-2020 del SMN-CONAGUA (estación Agua Caliente, clave 02001, 400 msnm), debido a que los registros de precipitación de la base CLIMWAT para esta estación resultaron inconsistentes con las condiciones áridas de la región.

Los mayores valores de ETo corresponden a Guanajuato (4.64 mm·día⁻¹) y La Paz (4.06 mm·día⁻¹), donde confluyen radiación elevada, vientos intensos y humedades relativas bajas. Morelia presenta una ETo intermedia (3.77 mm·día⁻¹), mientras que Ensenada registra la menor (2.94 mm·día⁻¹) por su clima más templado y húmedo.

4.1.4. Evapotranspiración del cultivo (ETc) y requerimiento hídrico teórico

Con la ETo estimada y los coeficientes Kc por fase fenológica, se calcularon los requerimientos hídricos de la fresa mediante CROPWAT 8.0, considerando plantación el 15 de agosto. El ciclo simulado abarca finales de agosto a finales de mayo (Cuadro 4).

En Morelia e Irapuato, la ETc por década aumenta de 9-15 mm en agosto-septiembre a 30-40 mm en diciembre-febrero; en Ensenada, los máximos son menores (≈ 27 mm); en La Paz, más altos (35-39 mm). Esta estacionalidad coincide con la concentración de exportaciones entre enero y abril.

Cuadro 4. ETc total y requerimiento hídrico teórico por ciclo productivo (agosto-mayo), estimados mediante CROPWAT 8.0.

Estación (CROPWAT)	Morelia, Mich.	Guanajuato, Gto.	La Paz, BCS	Ensenada, BC
ETc total (mm·ciclo ⁻¹)	754.7	922.7	709	515.4
ETc (m ³ ·ha ⁻¹ ·ciclo ⁻¹)	7,547	9,227	7,090	5,154
Prec. efectiva (mm)	291	281.4	114.3	232.8
Riego neto (mm·ciclo ⁻¹)	548.6	707.1	596	286.6
Riego neto (m ³ ·ha ⁻¹ ·ciclo ⁻¹)	5,486	7,071	5,960	2,866

Fuente: Elaboración propia. Nota: La precipitación efectiva y el riego neto para Ensenada se recalcularon con datos de precipitación de la Normal Climatológica 1991-2020 del SMN (estación Agua Caliente, clave 02001), en sustitución de los registros de CLIMWAT. Los valores de ETc total no se modifican, ya que dependen de la ETo y los coeficientes Kc, parámetros que son coherentes en ambas fuentes.

La ETc total (equivalente al consumo consuntivo del cultivo) varía entre 5,154 y 9,227 m³·ha⁻¹ por ciclo, con los valores más altos en Guanajuato (donde confluyen elevada radiación,

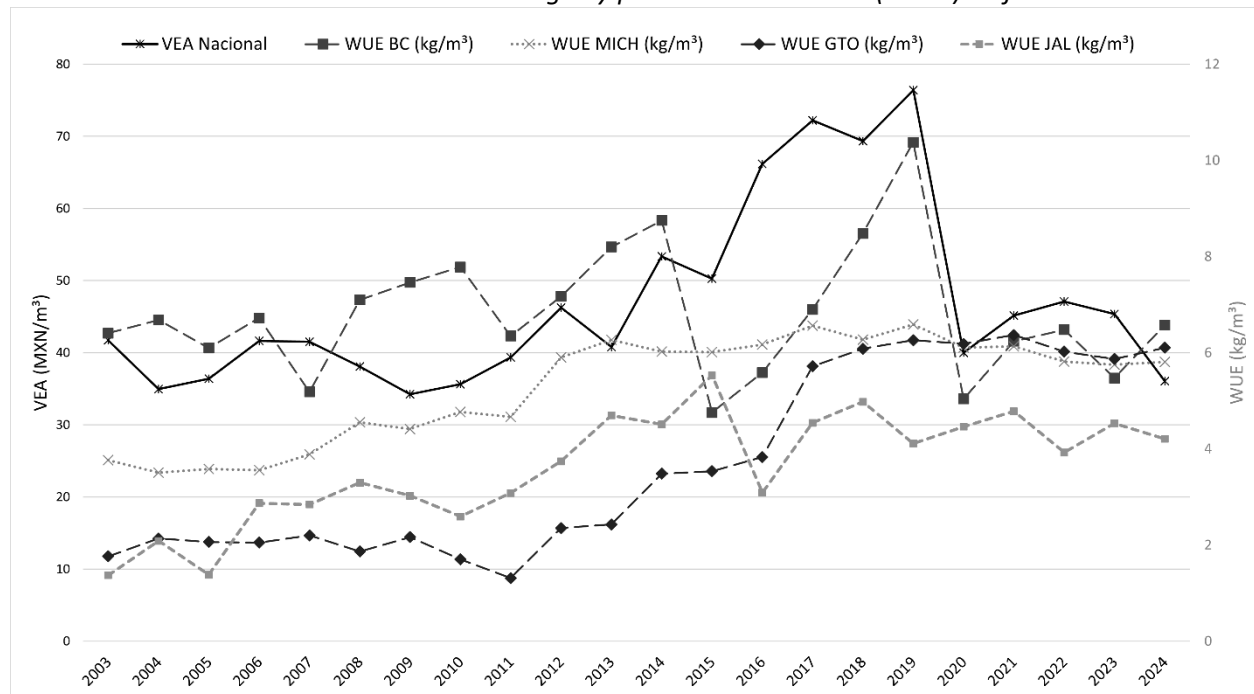
vientos intensos y baja humedad relativa) y los más bajos en Ensenada (cuyo clima templado-mediterráneo reduce la demanda evaporativa). Las diferencias en precipitación efectiva entre estaciones son consistentes con los patrones climáticos regionales: las estaciones del centro-occidente (Morelia y Guanajuato) registran precipitaciones efectivas en torno a 281-291 mm durante el ciclo, aportadas por las lluvias de verano-otoño; La Paz, en el extremo árido, apenas alcanza 114.3 mm; y Ensenada presenta 232.8 mm concentrados en los meses invernales, propios de su régimen mediterráneo. No obstante, dado que la fresa comercial en estas regiones se produce casi en su totalidad bajo macrotúneles y acolchado plástico, la precipitación no contribuye directamente al abastecimiento del cultivo.

Por ello, la ETc total se adopta como el indicador principal del requerimiento hídrico que debe cubrirse mediante riego, fundamentalmente subterráneo, en todos los escenarios y regiones analizadas. Los valores de riego neto presentados en el Cuadro 4 se incluyen como referencia del contexto agroclimático regional, pero no se emplean como denominador en la estimación del precio sombra del agua. Estos volúmenes de ETc permiten comparar la intensidad hídrica entre regiones y fundamentan los análisis posteriores sobre la rentabilidad del agua y las diferenciaciones territoriales.

4.2. Evolución nacional del precio sombra del agua (2003-2024)

El VEA, estimado como precio sombra del agua mediante el MVR en su acepción de valuación residual (Bierkens *et al.*, 2019; Young y Loomis, 2014), se presenta aquí a nivel nacional para el periodo 2003-2024. En ese sentido, se estimó el VEA a nivel nacional para el periodo 2003-2024. Para esta serie agregada, el denominador de requerimientos hídricos se obtuvo como el promedio simple de los cinco escenarios de ETc ($7,264 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ciclo}^{-1}$), y el costo se calculó como la media simple de las estructuras estatales disponibles para cada año. Este procedimiento produce una serie de referencia nacional comparable a lo largo del tiempo, a diferencia del análisis de sensibilidad municipal (sección 4.3) donde cada escenario de RH y de costo se aplica de forma individual para estimar la variabilidad territorial. La serie muestra tres etapas diferenciadas tal como se observa en la Gráfica 2.

De 2003 a 2011, el VEA mostró un comportamiento oscilatorio sin una tendencia de crecimiento importante, fluctuando en un rango entre 34.2 y 41.7 MXN/m³. A diferencia de etapas posteriores, en este periodo el crecimiento de la superficie cultivada y los ingresos se mantuvo en un equilibrio relativo con los costos, sosteniendo una rentabilidad hídrica estable. Posteriormente, a partir de 2012, se observa una tendencia ascendente que se acelera notablemente hacia el final de la década. El VEA pasó de 46.2 MXN/m³ en 2012 hasta alcanzar su máximo en 2019 con 76.41 MXN/m³. Este punto representa el nivel más alto de precio sombra o excedente económico generado por metro cúbico en todo el periodo analizado, confirmando que, previo a la pandemia, los sistemas tecnificados de fresa alcanzaron su pico de eficiencia económica.

Gráfica 2. Valor económico del agua y productividad hídrica (PROH) en fresa 2003-2024.

Fuente: elaboración propia con datos de SIAP (2024) y FIRA (2024)

Sin embargo, a partir de 2020, coincidiendo con la coyuntura global, el VEA tuvo una baja importante descendiendo a 39.99 MXN/m³. Durante el periodo 2021-2023 se mantuvo en un promedio cercano a los 46 MXN/m³, para finalmente descender a 36.05 MXN/m³ en 2024. Esto indica que, aunque los márgenes se han reducido significativamente respecto al pico de 2019, el cultivo sigue generando excedentes positivos.

Para evaluar si este ajuste reciente del VEA estuvo asociado a una menor eficiencia física en el uso del agua, se contrastó su trayectoria con la productividad hídrica (PROH), expresada como kilogramos de fresa cosechada por metro cúbico de agua, de los principales estados productores. Los datos revelan que la eficiencia física se ha mantenido o mejorado. Baja California destaca con los valores más altos, alcanzando un pico de 10.37 kg/m³ en 2019; Michoacán muestra una robusta estabilidad, manteniendo su productividad en el rango de 5.8 a 6.6 kg/m³ durante la última década; Guanajuato exhibe el crecimiento más notable a largo plazo, pasando de 1.7 kg/m³ en 2003 a estabilizarse por encima de los 6.0 kg/m³ en los años recientes, mientras que Jalisco mantiene una productividad oscilante entre 4 y 5 kg/m³. Esta evidencia confirma que la caída del VEA desde 2020 no está vinculada con una pérdida de eficiencia física en el uso del agua –porque se produce la misma cantidad de fresa con la misma agua– sino con la reducción de los márgenes económicos.

Finalmente, es importante señalar que el comportamiento observado en el VEA está influido por la metodología de costos estandarizados, deflactados mediante el INPP agrícola general. Un refinamiento deseable sería la aplicación de deflatores diferenciados por categoría de insumo (fertilizantes, energía eléctrica, mano de obra), lo que permitiría capturar con mayor precisión la evolución real de los costos y evitar sesgos derivados de movimientos asimétricos en los precios de sus componentes. Esta mejora excede el alcance del presente estudio, pero los

costos estandarizados siguen siendo útiles para identificar la tendencia macroeconómica, aunque pueden suavizar las diferencias específicas que enfrentan las unidades productivas en cada región.

4.3. Diferenciación territorial del VEA: sensibilidad a costos y requerimientos hídricos

El análisis de sensibilidad combina cuatro estructuras de costos (Guanajuato, Michoacán, Baja California y el costo promedio ponderado nacional) con cinco escenarios de requerimientos hídricos (ETc estimada mediante CROPWAT para Guanajuato, Morelia, La Paz y Ensenada, más un escenario de referencia bibliográfica), generando 20 combinaciones por municipio. Este diseño permite evaluar cómo varía el VEA ante cambios en cada componente de manera independiente. Los escenarios de costos más altos combinados con los mayores requerimientos hídricos producen los VEA más bajos, ya que el excedente residual se comprime y el denominador se amplía de forma simultánea; a la inversa, los escenarios de menor costo relativo con menor demanda hídrica generan los VEA más elevados. La amplitud de esta variabilidad entre escenarios es precisamente donde se deriva la descomposición de varianza que se presenta a continuación, cuyo propósito es identificar cuál de los dos factores, costos o requerimientos hídricos, explica mayor proporción de esa variación a escala municipal.

El Cuadro 5 presenta los valores de VEA resultantes de las 20 combinaciones de escenarios para el año de referencia 2019 (precios constantes), empleando como denominador el valor medio nacional ponderado de la producción. Estos valores constituyen la materia prima de la descomposición de varianza que se desarrolla en los apartados siguientes.

Cuadro 5. VEA estimado (MXN/m^3) bajo los 20 escenarios de sensibilidad: media nacional ponderada, año de referencia 2019, precios constantes

Escenario de costos	ETc Guanajuato (9,227 m^3/ha)	ETc Morelia (7,547 m^3/ha)	ETc La Paz (7,090 m^3/ha)	ETc Bib. (7,300 m^3/ha)	ETc Ensenada (5,154 m^3/ha)	Rango
Costo Guanajuato	26.9	32.9	35.0	34.0	48.2	21.3
Costo Michoacán	29.9	36.5	38.9	37.8	53.5	23.6
Costo Baja California	-5.1	-6.3	-6.7	-6.5	-9.2	4.1
Costo ponderado nacional	78.9	96.5	102.7	99.8	141.3	62.4
Rango	84.0	102.8	109.4	106.3	150.5	

Fuente: elaboración propia con datos de SIAP (2025) y FIRA (2025). Nota: Los valores de VEA se calcularon aplicando el precio medio ponderado de la producción nacional de fresa en 2019 (precios constantes). El "Rango" por fila refleja la variación atribuible a los escenarios de ETc manteniendo fija la estructura de costos; el "Rango" por columna refleja la variación atribuible a las estructuras de costos con ETc fija. ETc Bib. = escenario de revisión bibliográfica (7,300 $\text{m}^3/\text{ha-ciclo}^{-1}$). Los valores negativos del escenario de Costo Baja California indican que esa estructura de costos (la más elevada de las tres disponibles) supera el valor de la producción cuando se aplica sobre el precio medio nacional.

Tres patrones emergen de la inspección del Cuadro 5. Primero, la amplitud de variación entre estructuras de costos (rango promedio por columna de 110.6 MXN/m³) es aproximadamente cuatro veces mayor que la amplitud de variación entre escenarios hídricos (rango promedio por fila de 27.9 MXN/m³), lo que anticipa el resultado de que los costos explican la proporción dominante de la varianza del VEA a escala nacional. Segundo, el escenario de ETc Ensenada (5,154 m³/ha), el de menor requerimiento hídrico y produce sistemáticamente los VEA más altos dentro de cada estructura de costos, mientras que el de ETc Guanajuato (9,227 m³/ha) genera los menores, confirmando la relación inversa entre volumen de agua requerida y precio sombra. Tercero, la estructura de costos de Baja California produce VEA negativos en los cinco escenarios hídricos al aplicarse sobre el precio medio nacional; esto no implica que la fresa en Baja California sea económicamente inviable, sino que esa estructura de costos (la más elevada de las disponibles) sólo genera excedente positivo cuando se enfrenta al precio local estatal, sensiblemente superior al promedio nacional, como efectivamente ocurre en esa entidad.

El análisis de diferenciación espacial revela que el VEA no se distribuye de manera uniforme en el territorio, sino que potencialmente puede responder a configuraciones productivas, climáticas y tecnológicas específicas de cada región.

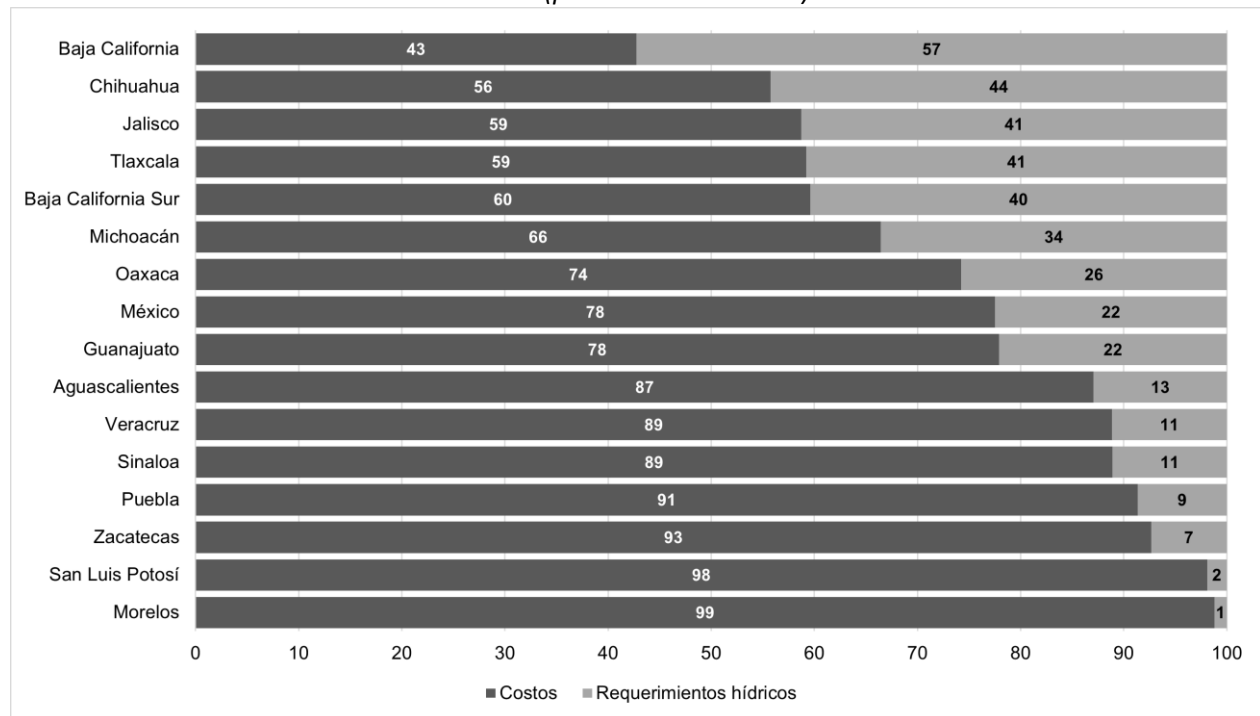
Al desagregar la variación total del VEA en sus dos componentes principales (costos de producción y requerimientos hídricos) es posible identificar patrones territoriales que no se observan en el análisis nacional agregado. Esta aproximación permite distinguir dónde el agua es el factor que más influye en la rentabilidad y dónde lo son los costos, así como reconocer los contrastes entre municipios y estados que conforman la estructura heterogénea del sistema de producción de fresa en México.

Para analizar esta heterogeneidad se emplearon diversos escenarios de costos de producción y de requerimientos hídricos (RH) que, combinados entre sí, generaron múltiples estimaciones del Valor Económico del Agua (VEA) para cada municipio. Es importante señalar que únicamente los estados de Guanajuato, Michoacán y Baja California cuentan con información específica de costos de producción de fresa en el sistema Agrocostos de FIRA. En consecuencia, para los municipios ubicados en otras entidades se aplicaron las estructuras de costos observadas en estos estados como escenarios alternativos. Bajo este enfoque, las estimaciones del VEA para dichos municipios no representan necesariamente sus condiciones productivas específicas, sino la sensibilidad del indicador ante distintas configuraciones plausibles de costos. A partir de estas combinaciones se evaluó la influencia relativa de cada componente mediante medidas de variación, lo que permitió identificar si las diferencias territoriales del VEA se asocian principalmente con los costos de producción o con los volúmenes de agua requeridos.

En la escala nacional, al analizar la variación del VEA, a partir del enfoque expuesto en la sección de datos y métodos, se presenta una estructura relativamente equilibrada donde el 63.4 % de la variación proviene de los costos y 36.6 % de los RH. Esto significa que la variación en el VEA se explica mayormente por los diferenciales en los costos de producción. Este resultado es una agregación ponderada de todos los municipios, lo cual implica que incorpora tanto territorios donde el agua es un factor dominante como territorios donde su contribución es marginal. El nivel nacional condensa, por tanto, un paisaje heterogéneo y no representa el comportamiento típico de los estados o municipios productores de fresa.

Al hacer el análisis de varianza en la escala estatal, se aprecia una brecha. El promedio de los estados indica que 76 % de la variación del VEA se explica por los costos, mientras que 24 % proviene de los RH. El predominio de los costos a escala estatal refleja que, dentro de un mismo estado, las condiciones hídricas suelen ser más homogéneas que entre estados; ello reduce la variación generada por los RH y aumenta la influencia relativa de los costos. Sin embargo, esta tendencia no es uniforme. Baja California constituye la excepción más relevante, ya que en este estado el 57.2 % de la variación del VEA se explica por los requerimientos hídricos, resultado congruente con las condiciones restrictivas de disponibilidad de agua y con la variabilidad interna de los sistemas productivos. En contraste, estados como Morelos muestran una participación mínima del componente hídrico (alrededor de 1 %), indicando que en esos territorios la variación del VEA responde casi exclusivamente a los costos (Gráfica 3).

Gráfica 3. Contribución relativa de los costos y los requerimientos hídricos a la variación del VEA por estado (promedio 2014-2024).



Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2025) y FIRA (2025)

La escala municipal es donde se muestra con mayor claridad la heterogeneidad territorial. Entre los 89 municipios revisados con registro de producción de fresa, la mayoría se ubica en un patrón con predominio de los costos, en los cuales 81 registran un valor de S_{costo} superior a 0.5, lo que indica que más de la mitad de la variación del VEA proviene de diferencias en costos (Cuadro 6). El indicador S_{costo} expresa la proporción de la variación total del VEA que se debe exclusivamente a los costos de producción; en otras palabras, muestra qué tanto cambia el VEA cuando varían sólo los costos, manteniéndose constantes los requerimientos hídricos. Sus valores oscilan entre 0 y 1, de modo que un S_{costo} alto indica que las diferencias territoriales del VEA se explican principalmente por la estructura de costos, mientras que valores bajos señalan una mayor influencia de los requerimientos hídricos.

No obstante, existen ocho municipios donde los requerimientos hídricos son el componente dominante, con valores donde la contribución relativa de los requerimientos hídricos (S_{rh}) es superior a 0.5 y, en cinco de ellos, superior al 0.95. Esta distribución muestra que la influencia del agua puede ser determinante en ciertos contextos locales, especialmente donde existe variabilidad considerable en los requerimientos hídricos entre escenarios o donde las condiciones agroclimáticas hacen que el agua sea un factor crítico para la productividad. Jocotepec (Jalisco) presenta un (S_{rh}) igual a 1, lo que implica que el 100 % de la variación del VEA se explica por los RH y que los costos no generan diferencias entre escenarios, aunque su superficie ponderada total apenas rebasa las 100 hectáreas en el periodo analizado. Ensenada (Baja California), además de su elevada superficie productiva, registra un (S_{rh}) de 0.574, indicando que el agua explica una proporción importante de la variación del indicador. En el extremo opuesto, Coroneo (Guanajuato) muestra un S_{costo} de 0.9998, lo que significa que prácticamente toda la variación del VEA en ese municipio depende de los costos de producción.

Cuadro 6. Municipios con mayor dominio de costos y de requerimientos hídricos en la variación del VEA por mayor superficie ponderada total

Estado	Municipio	Varianza de Costos promedio (σ_{costo}^2)	Varianza Hídrica promedio (σ_{rh}^2)	S_{costo}	S_{rh}	SC_total (2014-2024)
Baja California	Ensenada	1237.20	1903.50	0.43	0.57	25561.53
Michoacán	Zamora	1436.82	898.40	0.58	0.42	23421.41
Michoacán	Tangancícuaro	1381.20	927.51	0.56	0.44	11958.00
Michoacán	Jacona	1354.74	845.30	0.55	0.45	9186.30
Michoacán	Panindícuaro	1281.55	97.99	0.76	0.24	8275.37
Michoacán	Ixtlán	1381.18	725.26	0.60	0.40	6842.96
Michoacán	Maravatío	1301.43	21.21	0.84	0.16	6810.00
Guanajuato	Irapuato	1310.07	223.02	0.73	0.27	5609.50
Michoacán	Lagunillas	1618.59	726.92	0.71	0.29	4984.50
Michoacán	Angamacutiro	1303.84	118.77	0.79	0.21	3083.27
Guanajuato	Tarandacua	1280.25	134.48	0.82	0.18	2907.40
Michoacán	Chilchota	1568.74	1018.18	0.60	0.40	2633.00
Guanajuato	Abasolo	1322.20	146.19	0.78	0.22	1780.00
México	Villa Guerrero	1294.98	88.02	0.78	0.22	1689.77
Jalisco	Tapalpa	1005.47	304.49	0.61	0.39	1660.00
Michoacán	Huiramba	1498.59	129.95	0.91	0.09	1580.00
Baja California Sur	Mulegé	1315.05	699.05	0.58	0.42	1485.00
Michoacán	Chavinda	1293.19	959.05	0.50	0.50	1382.00
Michoacán	Morelia	1493.54	612.98	0.76	0.24	1338.34
Michoacán	Jiquilpan	1530.09	48.89	0.97	0.03	1332.25
Guanajuato	Salamanca	1299.63	33.10	0.82	0.18	1297.00
Michoacán	Puruándiro	1416.93	75.68	0.86	0.14	1215.49
Michoacán	Tuxpan	1304.36	27.21	0.81	0.19	1003.50
México	Zumpahuacán	1167.25	40.90	0.75	0.25	985.27
Michoacán	Pajacuarán	1844.40	79.05	0.91	0.09	932.53

Michoacán	Contepec	1312.40	48.17	0.92	0.08	880.10
Michoacán	José Sixto Verduzco	1372.50	128.29	0.91	0.09	851.06
Michoacán	Hidalgo	1304.25	20.21	0.83	0.17	728.60
Michoacán	Zitácuaro	1335.74	28.59	0.86	0.14	596.90
Michoacán	Tangamandapio	1516.29	866.48	0.60	0.40	537.16
Michoacán	Ecuandureo	1169.34	809.12	0.48	0.52	508.00
Guanajuato	Romita	1318.01	271.58	0.78	0.22	503.00

Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2025) y FIRA (2025). Nota: “Varianza Costos Promedio” y “Varianza RH Promedio” corresponden a la descomposición de la variabilidad del VEA municipal atribuible, respectivamente, a los cambios en los costos reales por hectárea y a los cambios en los requerimientos hídricos del cultivo bajo escenarios alternativos. S_{costo} y S_{rh} indican la proporción relativa de la variación del VEA explicada por los costos o RH (0 = totalmente dominado por RH (o costo); 1 = totalmente dominado por costos (o por rh)). “Superficie Ponderada” corresponde al peso acumulado de la superficie cosechada del municipio en el periodo analizado, utilizada para ponderar su influencia estructural dentro del agregado nacional.

Dentro de este panorama general, el análisis de los municipios con mayor superficie ponderada, es decir, los que más influyen en los promedios estatales y nacionales, muestra un patrón igualmente diverso. Ensenada, con 25561.5 hectáreas de superficie ponderada, es el caso más relevante donde la variación del VEA está dominada por los requerimientos hídricos ($\sigma_{rh}^2 = 1903.5$, $S_{rh} = 0.574$), situación que contrasta con la de la mayoría de los municipios del estado de Michoacán de gran superficie, como Zamora, Tangancícuaro, Jacona e Ixtlán, donde, aun con S_{rh} relevantes, los costos son el componente dominante de la variación (S_{costo} entre 0.545 y 0.600). Otros municipios con mucho peso en la producción, como Panindícuaro, Maravatío, Angamacutiro, Abasolo, Tarandacuao o Villa Guerrero, presentan una dominancia más marcada de los costos, con S_{costo} superiores a 0.75 debido a varianzas hídricas muy bajas. En sentido inverso, casos como Chavinda y Ecuandureo muestran valores donde el agua explica igual o más variación que los costos (S_{rh} de 0.501 y 0.523, respectivamente). Entre ambos extremos se encuentran municipios como Lagunillas, Chilchota o Tapalpa, que exhiben combinaciones más equilibradas, con contribuciones importantes de ambos factores.

En conjunto, estos casos demuestran que, incluso entre los territorios con mayor superficie productiva, no existe un patrón homogéneo. Algunos municipios son altamente sensibles al agua, otros están dominados por los costos y un tercer grupo presenta estructuras mixtas. Esto constata que la variación del VEA responde a configuraciones territoriales específicas y no solamente al tamaño productivo de cada unidad.

5. Discusión

5.1. Determinantes económicos, tecnológicos y territoriales del valor económico del agua

Los resultados muestran de manera consistente que el valor económico del agua (VEA) en la producción de fresa está determinado principalmente por los costos de operación y manejo, y en mucha menor medida por los requerimientos hídricos (RH). La descomposición de varianza confirma que en 81 de los 89 municipios analizados los costos, energía, mano de obra, fertilizantes y manejo tecnológico, explican la mayor parte de la variación del VEA. Este patrón coincide con investigaciones previas en sistemas intensivos donde la rentabilidad hídrica está influida de forma

dominante por la estructura de costos y la gestión operativa (Berbel *et al.*, 2011; Young y Loomis, 2014).

La agricultura protegida, aun cuando incorpora sistemas tecnificados de riego, no produce resultados homogéneos entre territorios. La eficiencia hídrica depende de factores locales como tipo de suelo, condiciones climáticas, calidad de los insumos, nivel de conocimiento técnico y consolidación del sistema productivo en cada región. Por lo tanto, la tecnificación no elimina la heterogeneidad, sino que puede amplificarla cuando los niveles de adopción y manejo difieren entre unidades de producción.

El papel de los subsidios hídricos y energéticos es relevante para interpretar estos resultados. El uso del agua y la tarifa eléctrica agropecuaria en México, que es subsidiada, reduce significativamente el costo marginal del bombeo, lo que incentiva el uso de volúmenes de agua muy por encima de los requerimientos técnicos. El caso documentado por la institución GIZ (2020) en Maravatío es ilustrativo: los productores aplican en promedio 18,674 m³/ha/año, cuando el requerimiento estimado para fresa se encuentra entre 4,000 y 6,000 m³/ha (GIZ, 2020). Además, las condiciones edáficas de baja retención hídrica y tasas elevadas de infiltración aumentan la necesidad de riegos frecuentes, incrementando el volumen total aplicado.

En este contexto, los municipios donde el componente “costo” domina el VEA no son necesariamente más eficientes. La estabilidad relativa de los RH implica que la variación del VEA responde principalmente a fluctuaciones en los precios de energía e insumos, no a la demanda hídrica. Ello explica la caída del VEA a nivel nacional después de 2020, en la que la eficiencia física del uso del agua (PROH) permaneció estable o ligeramente creciente, pero los costos aumentaron más rápido que los ingresos, reduciendo la productividad económica del agua. Este comportamiento ya ha sido documentado en sistemas intensivos dependientes de acuíferos (García-Mollá *et al.*, 2014).

En regiones áridas como Ensenada, el patrón es distinto. Ahí, los RH explican la mayor parte de la variación del VEA, lo cual es consistente con economías agrícolas donde la disponibilidad limitada de agua y la alta demanda evaporativa aumentan de forma significativa el valor marginal del recurso (Dinar y Saleth, 2005; Medellín-Azuara *et al.*, 2015). No obstante, la interpretación del precio sombra en estas regiones requiere cautela, debido a que los costos estandarizados utilizados pueden no incluir rubros como el trabajo familiar no remunerado, la renta de la tierra propia o los costos de oportunidad del capital. La omisión de estos costos imputados implica que una parte del excedente atribuido al agua podría reflejar la remuneración implícita de estos factores, de modo que el precio sombra estimado debe interpretarse como un límite superior de la productividad marginal del recurso.

Un aspecto clave del análisis es que la demanda de agua presenta una elasticidad-precio baja. Cuando el costo del agua se mantiene reducido debido a subsidios, el volumen aplicado no cambia de manera apreciable ante variaciones en precios o en costos energéticos, lo cual coincide con evidencia sobre inelasticidad hídrica en la agricultura (De Fraiture y Perry, 2007). Por lo tanto, el agua no opera como un mecanismo de ajuste económico dentro de la producción de fresa; más bien, las mejoras en la eficiencia hídrica observadas en sistemas productivos intensivos obedecen principalmente a exigencias tecnológicas asociadas a la sanidad e inocuidad y no a señales económicas derivadas del costo del agua (Lei y Yang, 2024). En el caso específico de regiones exportadoras como Baja California (90% de su producción va al mercado externo), el precio

sombra está influido adicionalmente por factores macroeconómicos. Dado que una proporción significativa de la producción se destina al mercado estadounidense, el valor de la producción depende del tipo de cambio y de los precios internacionales de la fresa (USDA-NASS, 2024; Banco de México, 2025). Cuando éstos son favorables, el excedente residual se incrementa y eleva el precio sombra, sin que ello refleje necesariamente una mayor eficiencia en el uso del agua. A la inversa, caídas en los precios de exportación pueden revelar que la estructura de costos resulta insostenible bajo ciertas condiciones de mercado. Esta sensibilidad refuerza la necesidad de interpretar el precio sombra como un indicador condicionado por el contexto de mercado.

5.2. Implicaciones hidrológicas y socioambientales de un sistema intensivo dependiente de acuíferos

Los resultados muestran que el ciclo productivo de fresa bajo agricultura protegida depende casi por completo del riego, aun en regiones del centro-occidente donde la precipitación anual es moderada. La evapotranspiración del cultivo (ETc) estimada mediante CROPWAT oscila entre 5,154 y 9,227 m³·ha⁻¹ por ciclo, mientras que la precipitación efectiva es prácticamente inexistente por las condiciones del sistema protegido. Esto implica que, en todos los escenarios y regiones analizadas, la totalidad del consumo debe satisfacerse mediante agua subterránea, lo cual coincide con la evidencia internacional de que los cultivos intensivos en tales condiciones dependen de manera importante de los acuíferos (Famiglietti *et al.*, 2011; Scanlon *et al.*, 2012).

Las diferencias agroclimáticas y edáficas observadas entre regiones también tienen implicaciones para la sostenibilidad del riego. En el centro-occidente del país, los suelos profundos (vertisoles y feozems) presentan mayor capacidad de retención hídrica, lo que tiende a suavizar temporalmente la demanda de riego (INEGI, 2014). En contraste, las zonas de Baja California y Baja California Sur presentan suelos someros y de baja retención (Xerosoles y Litosoles) (INEGI, 2014), combinados con precipitación extremadamente baja y ETo elevada (hasta 4.06 mm·día⁻¹ en La Paz). Esta combinación obliga a suministrar mediante riego prácticamente todo el consumo del cultivo, lo que explica que en regiones como Ensenada, uno de los enclaves productivos más extensos del país, los requerimientos hídricos sean el factor que explica la mayor parte de la variación del VEA ($S_{rh} = 0.574$). Este patrón es congruente con estudios que señalan que, en regiones áridas, la variabilidad climática y la escasez de agua incrementan la sensibilidad económica del cultivo al volumen aplicado (Giordano, 2009).

Dado que el agua no constituye un determinante principal del VEA, el sistema productivo carece de incentivos económicos para reducir el volumen aplicado. Esto es consistente con la literatura que documenta que, cuando los precios del agua o los costos de bombeo son bajos, la rentabilidad agrícola puede mantenerse incluso bajo prácticas de sobre riego (Molle y Berkoff, 2007; OECD, 2015). En regiones donde los suelos son someros y la ETc es elevada (como las zonas áridas del noroeste) este escenario es todavía más problemático, ya que la expansión del cultivo intensifica la dependencia de acuíferos con balances hídricos ya deficitarios, incrementando la vulnerabilidad hídrica local y reduciendo la disponibilidad para otros usos domésticos, urbanos y agrícolas (Bjornlund *et al.*, 2013; Llamas y Martínez-Santos, 2005).

La presión creciente sobre los acuíferos puede derivar en tensiones sociales, especialmente donde la expansión del sistema de fresa coincide con demanda urbana creciente o restricciones severas de disponibilidad, como ocurre en los municipios del noroeste con RH

elevados y balances hídricos negativos. Aunado a lo anterior, se ha documentado cómo los marcos regulatorios y las políticas de mercado pueden favorecer procesos de apropiación desigual del recurso y aumentar la conflictividad socioambiental, particularmente en territorios campesinos e indígenas, pero también en municipios con competencia en el consumo de agua (Ávila-García, 2016). La literatura sobre territorios hidrosociales enfatiza también que en contextos áridos y de competencia entre diversos sectores en el consumo de agua, la reconfiguración del acceso al agua tiende a desencadenar conflictos distributivos y disputas por el control del recurso (Boelens *et al.*, 2016). En este sentido, los resultados del análisis territorial del VEA no sólo revelan una estructura económica diferenciada, sino también focos hidrológicos y socioambientales de alto riesgo, donde la sostenibilidad del sistema agrícola y la gobernanza del agua enfrentan desafíos importantes. Debe señalarse, no obstante, que la interpretación territorial de estos resultados se ve limitada por la ausencia de dos componentes de información que fortalecerían el análisis: (a) indicadores del estado de los acuíferos por región (como la relación extracción/recarga o el nivel de abatimiento piezométrico), que permitirían contrastar el precio sombra estimado con la disponibilidad real del recurso en cada cuenca; y (b) datos de subsidios a las tarifas eléctricas para bombeo agrícola diferenciados por municipio o distrito de riego. La ausencia de estos indicadores en las fuentes estadísticas disponibles a escala municipal impide su incorporación en las tablas y Gráficas del análisis. Sin embargo, no invalida los resultados, ya que el precio sombra y su descomposición territorial son robustos como indicadores de eficiencia económica del agua en el sistema productivo. Su articulación futura con indicadores de disponibilidad en cuencas y de subsidios energéticos constituye una extensión prioritaria de este trabajo (OECD, 2015).

6. Conclusiones

Este estudio analizó la evolución y la variación territorial del precio sombra del agua, expresado como VEA mediante el Método del Valor Residual, en la producción de fresa en México entre 2003 y 2024, integrando modelación agroclimática y análisis de sensibilidad del VEA en los principales estados productores.

La estimación de los requerimientos hídricos mediante CROPWAT mostró que, aun con diferencias agroclimáticas importantes entre regiones templadas y regiones áridas, la evapotranspiración del cultivo se mantiene dentro del rango de 5,154 a 9,227 m³·ha⁻¹ por ciclo bajo agricultura protegida. Dado que la fresa comercial se cultiva prácticamente en su totalidad bajo macrotúneles y acolchado plástico, la precipitación efectiva no contribuye al suministro real del cultivo. En consecuencia, la demanda consuntiva debe cubrirse casi totalmente mediante riego, lo que significa que el ciclo productivo depende completamente del agua subterránea, incluida la del centro-occidente donde las precipitaciones anuales son moderadas en comparación con zonas áridas.

Además, el ciclo productivo de la fresa en México se programa para abastecer la ventana de exportación de otoño-invierno, cuando la producción de California disminuye. Este calendario exportador coincide justamente con la época del año en la que las lluvias son mínimas en todas las regiones productoras del país, lo que obliga a sostener todo el ciclo mediante extracción de agua subterránea aun en territorios que, climáticamente, no son considerados áridos. Así, la articulación entre estacionalidad productiva, estacionalidad climática y orientación exportadora

intensifica la presión sobre el agua, porque el periodo de mayor actividad del sistema coincide con la fase de mayor déficit hídrico atmosférico y con la menor recarga potencial.

A escala nacional, la serie histórica del VEA exhibe tres etapas distintivas. Un periodo inicial de estabilidad, una fase de crecimiento acelerado hasta 2019 y una caída posterior asociada al aumento de costos más que a cambios en la eficiencia física del uso del agua. El análisis de la productividad hídrica (PROH) en la producción de fresa confirma que mantiene niveles elevados y estables de eficiencia física de agua, lo que indica que las fluctuaciones del VEA responden principalmente a dinámicas económicas externas al manejo del agua.

Por su parte, el análisis territorial revela una estructura heterogénea. La descomposición de varianza muestra que, en la mayoría de los municipios, la variación del VEA está dominada por los costos de producción, mientras que los requerimientos hídricos sólo son determinantes en ciertos enclaves, particularmente en regiones áridas como Baja California, donde la escasez física del recurso y la alta demanda evaporativa incrementan el valor marginal del agua. Entre los territorios de mayor superficie ponderada, coexisten municipios altamente sensibles al agua, municipios dominados casi por completo por los costos y casos intermedios con estructuras mixtas.

Otro aspecto que interviene en el VEA tiene que ver con los subsidios al sector agropecuario. En particular, las subvenciones en el consumo de agua y las tarifas eléctricas para el bombeo de este, que favorece aplicaciones de agua por encima de los requerimientos técnicos y limita la capacidad del mercado para transmitir señales de escasez. En regiones con déficit hídrico estructural, esta situación profundiza la presión sobre los acuíferos, incrementa la vulnerabilidad de los sistemas locales y puede intensificar disputas por el acceso al agua en territorios donde convergen usos agrícolas, urbanos y ambientales.

Estos hallazgos tienen implicaciones para la política pública. En territorios donde el precio sombra está dominado por los requerimientos hídricos, como Ensenada, se requieren instrumentos que internalicen el costo real del agua, tales como la revisión de los esquemas de tarifas eléctricas subsidiadas para bombeo agrícola y el fortalecimiento de la regulación de extracción en acuíferos sobreexplotados. En regiones donde los costos operativos son el factor dominante, las políticas podrían orientarse al fomento de la eficiencia tecnológica y la reducción de costos de insumos estratégicos. La coordinación entre política hídrica, energética y agrícola resulta indispensable para conciliar la competitividad exportadora con la sustentabilidad del recurso. En ese contexto, el Plan Nacional Hídrico 2024-2030 del Gobierno de México y el Acuerdo Nacional por el Derecho Humano al Agua y la Sustentabilidad (Presidencia de la República, 2024), establecen lineamientos que son congruentes con las implicaciones de este estudio. La tecnificación de 200,000 hectáreas de riego agropecuario, la intervención en 13 distritos de riego y el reordenamiento de concesiones de agua subterránea en acuíferos sobreexplotados son acciones que, de implementarse de manera territorialmente diferenciada, podrían contribuir a internalizar el costo hídrico real en regiones donde la escasez física es el factor dominante del precio sombra (CONAGUA, 2025). No obstante, los resultados aquí presentados sugieren que la tecnificación del riego, siendo necesaria en zonas áridas de alta ETc y déficit hídrico estructural como Ensenada, resulta insuficiente por sí sola en municipios donde los costos operativos, y no la demanda de agua, determinan la rentabilidad hídrica. En estos territorios, las señales de política deben orientarse a la eficiencia económica en el uso de insumos, la reducción de costos

energéticos y el acceso equitativo a paquetes tecnológicos, con ello, la eficiencia en el uso del agua puede mejorar.

De forma general, los resultados muestran que el precio sombra del agua en la fresa es el producto de un sistema socio-ecológico complejo que depende del clima, del suelo, de la tecnología, de los costos energéticos, de instrumentos económicos y de la estructura territorial de la producción. Es necesario subrayar que el indicador aquí estimado captura exclusivamente la dimensión de eficiencia del valor del agua, es decir, la productividad marginal en el sistema productivo, pero no agota la complejidad del concepto de valor económico integral, el cual requeriría incorporar indicadores de disponibilidad hídrica en cuencas, externalidades ambientales y costos de oportunidad frente a usos alternativos (Bierkens *et al.*, 2019; Young y Loomis, 2014).

El estudio presenta las siguientes limitaciones: el indicador corresponde al precio sombra y no al valor económico integral del recurso; los costos estandarizados de FIRA provienen de tres entidades y no son representativos a escala nacional; los requerimientos hídricos se estimaron sin estrés hídrico; la interpolación temporal de costos puede introducir sesgos; y no se incorporan datos de subsidios eléctricos ni del estado de los acuíferos por región.

A partir de estas limitaciones, se identifican líneas de investigación futuras, que pueden ser la integración de observaciones directas de volúmenes de riego y series de extracción en acuíferos; la incorporación de variabilidad tecnológica a nivel de parcela; el uso de deflatores diferenciados por categoría de insumo; y la articulación de indicadores de estrés hídrico de cuencas con las estimaciones de productividad marginal del recurso.

Agradecimientos

Agradecimiento al Programa de Becas Posdoctorales de la UNAM por financiar la estancia de investigación, y agradecimiento al proyecto PAPIIT IN223824 “Deterioro socioambiental del agua y el suelo por la expansión de la agricultura de exportación en Michoacán”.

Referencias

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. “Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos”. *Estudio FAO. Riego y Drenaje*, (56). <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Ávila-García, P. 2016. “Hacia una ecología política del agua en Latinoamérica”. *Revista de Estudios Sociales* (55): 18-31. DOI: 10.7440/res55.2016.01
- Banco de México. 2025. *Sistema de Información Económica. Balanza de productos agropecuarios (CE122), Ene 1993-Jun 2025* [Base de datos]. México: Banco de México. <https://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultarCuadroyidCuadro=CE122ylocale=es>
- Berbel, J., J. Calatrava y A. Garrido. 2007. “Irrigation water pricing: a review of the European experience”. En F. Molle y J. Berkoff (eds.). *Irrigation water pricing: the gap between theory and practice*, (pp. 295-327). Oxfordshire: CABI International.
- Berbel, J., M. A. Mesa-Jurado y J. M. Pistón. 2011. “Value of irrigation water in Guadalquivir Basin (Spain) by residual value method”. *Water Resources Management*, 25(6): 1565-1579. DOI: 10.1007/s11269-010-9761-2

- Bierkens, M. F. P., S. Reinhard, J. A. de Bruijn, W. Veninga y Y. Wada. 2019. "The shadow price of irrigation water in major groundwater-depleting countries". *Water Resources Research*, 55(5): 4266-4287. DOI: 10.1029/2018WR023086
- Bjornlund, H., S. Wheeler y P. Rossini. 2013. "Water markets and their environmental, social and economic impacts in Australia". En J. Maestu (ed.). *Water trading and global water scarcity: international experiences*, (pp. 68-93). Oxon, UK: RFF Press.
- Boelens, R., J. Hoogesteger, E. Swyngedouw, J. Vos y P. Wester. 2016. "Hydrosocial territories: a political ecology perspective". *Water International*, 41(1): 1-14. DOI: 10.1080/02508060.2016.1134898
- Calatrava, J. y D. Martínez-Granados. 2012. "El valor de uso del agua en el reg-adío de la cuenca del Segura y en las zonas regables del trasvase Tajo-Segura". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 12(1): 5-32. DOI: 10.7201/earn.2012.01.01
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. 2024. *Conoce el Programa Nacional Hídrico 2024-2030; agua es bienestar*. México: Gobierno de México. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/presenta-conagua-plan-nacional-hidrico-384239>
- Corvalan, C., S. Hales, A. McMichael. 2005. *Ecosystems and human well-being: health synthesis*, a report of the millenium ecosystem assessment. Paris: World Health Organization. <https://acortar.link/OL6kft>
- Costanza, R., J. H. Cumberland, H. E. Daly, R. Goodland y R. B. Norgaard. 1997. *An Introduction to Ecological Economics*. Boca Raton: St. Lucie Press.
- Daly, H. E. 1996. *Beyond growth: the economics of sustainable development*. Boston: Beacon Press.
- De Brito, P. L. C. y J. P. S. de Azevedo. 2022. "Economic value of water for irrigation in São Francisco River Basin, Brazil". *Applied Water Science*, 12(7): 155. DOI: 10.1007/s13201-022-01678-4
- De Fraiture, C. y C. J. Perry. 2007. "Why is agricultural water demand unresponsive at low price ranges?" En: F. Molle, J. Berkoff (eds.). *Irrigation water pricing: the gap between theory and practice*, (pp. 94-107). Oxfordshire: CABI International. (*Comprehensive assessment of water management in agriculture series*; 4). <https://hdl.handle.net/10568/36322>
- De Groot, R. S., M. A. Wilson y R. M. J. Boumans. 2002. "A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services". *Ecological Economics*, 41(3): 393-408. DOI: 10.1016/S0921-8009(02)00089-7
- Deng, G. y K. Li. 2024. "A study of virtual water trade among G20 Countries from the value-added perspective". *Water*, 16(19): 2808. DOI: 10.3390/w16192808
- Dinar, A. y R.M. Saleth. 2005. "Issues in water pricing reforms: from getting correct prices to setting appropriate institutions". En H. Folmer, T. Tietenberg (eds.). *The international yearbook of environmental and resource economics 2005/2006: a survey of current issues*, (pp. 1-51). Cheltenham: Edward Elgar. (*New horizons in environmental economics*)
- Famiglietti, J.S., M. Lo, S.L. Ho, J. Bethune, K. J. Anderson y T. H. Syed. 2011. "Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley". *Geophysical Research Letters*, 38(3): L03403. DOI: 10.1029/2010GL046442
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura [FIRA]. 2024. *Agrocostos Interactivo: Costos de producción agrícola [Dataset]*. México: FIRA. <https://www.fira.gob.mx/agrocostosApp/AgroApp.jsp>
- Fischer-Kowalski, M. y H. Haberl (eds.). 2007. *Socioecological Transitions and Global Change: Trajectories of Social Metabolism and Land Use*. Cheltenham: Edward Elgar. DOI: 10.4337/9781847209436
- García-Mollá, M., M. Ortega-Reig, C. Sanchis-Ibor y L. Avellà-Reus. 2014. "The effects of irrigation modernization on the cost recovery of water in the Valencia Region (Spain)". *Water Science and Technology: Water Supply*, 14(3): 414-420. DOI: 10.2166/ws.2013.215

- Giordano, M. 2009. "Global groundwater? Issues and solutions". *Annual Review of Environment and Resources*, 34: 153-178. DOI: 10.1146/annurev.enviro.030308.100251
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ]. 2020. *Diagnóstico del manejo del agua en unidades productivas de fresa en Maravatío*. México: GIZ México. [Documento inédito]
- Godínez-Montoya, L., J. A. García-Salazar, M. Fortis-Hernández, J. S. Mora-Flores, M. Á. Martínez-Damián, R. Valdivia-Alcalá y J. Hernández-Martínez. 2007. "Valor económico del agua en el sector agrícola de la Comarca Lagunera". *Terra Latinoamericana*, 25(1): 51-59.
<https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1438>
- Gómez-Santiz, F. y P. Ávila-García. 2026. "Valor económico del agua en la producción de fresa en Michoacán, México: un análisis longitudinal y espacial". *Tecnología y Ciencias del Agua*, 17(6).
Publicación anticipada en línea, 9 de abril de 2026. DOI: 10.24850/j-tyca-aop-09
- González-Ramírez, M. G., V. H. Santoyo-Cortés, J. J. Arana-Coronado y M. Muñoz-Rodríguez. 2020. "The insertion of Mexico into the global value chain of berries". *World Development Perspectives*, 20: 100240. DOI: 10.1016/j.wdp.2020.100240
- Hellegers, P. J. G. J. y B. Davidson. 2010. "Determining the disaggregated economic value of irrigation water in the Musi sub-basin in India". *Agricultural Water Management*, 97(6): 933-938. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.01.026
- Hoekstra, A. Y. 2003. *Virtual water trade: proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*. Amsterdam: IHE.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. 2014. *Guía para la interpretación de cartografía: Edafología: Escala 1:250 000: Serie III*. Aguascalientes: INEGI.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825076221.pdf
- INEGI. 2025. *Índice Nacional de Precios Productor (INPP). Año base julio 2019*. Aguascalientes: INEGI.
Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/inpp/2019a/#tabulados>
- Labra-Concha, C. A. 2022. *Expansión del monocultivo de fresa y sus impactos socioambientales en el corredor agrícola "Morelia-Pátzcuaro" en el estado de Michoacán, México* (Tesis de Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ecología. Morelia.
- Lei, X. y D. Yang. 2024. "Research on the impact of water-saving technologies on the agricultural production efficiency of high-quality farmers - taking Jiangxi province and Guangdong province in China as examples". *Frontiers in Environmental Science*, 12: 1355579. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1355579
- Llamas, M. R. y P. Martínez-Santos. 2005. "Intensive groundwater use: silent revolution and potential source of social conflicts". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5): 337-341. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:5(337)
- Martínez-Alier, J. 2002. *The environmentalism of the poor: a study of ecological conflicts and valuation*. Cheltenham: Edward Elgar.
- Medellín-Azuara, J., D. MacEwan, J. R. Lund, R. E. Howitt y D. A. Sumner. 2015. "Agricultural irrigation in this drought: where is the water and where is it going?" *ARE Update*, 18(5): 6-8. University of California Giannini Foundation of Agricultural Economics.
- Molle, F. y J. Berkoff. 2007. *Irrigation water pricing: the gap between theory and practice*, / IWMI, Oxfordshire: CABI. (Comprehensive assessment of water management in agriculture series; 4). DOI: 10.1079/9781845932923.0000
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos [OCDE]. 2015. *Drying wells, rising stakes: towards sustainable agricultural groundwater use*. París. OECD.
https://www.oecd.org/en/publications/drying-wells-rising-stakes_9789264238701-en.html

- Olmos-Oropeza, G., J. F. Martínez-Montoya, A. Gómez-González, V. M. Ruíz-Vera, J. Palacio-Núñez, L.A. Tarango-Arámbula y A. Bravo-Vinaja. 2021. "Adopción del cultivo de fresa (*Fragaria* × *ananassa*) en el centro norte de México". *Agro divulgación*, 1(1): 21-23. DOI: 10.54767/ad.v1i2.29
- Peniche Camps, S. y P. Ávila García. 2012. "Exploración del concepto de exportación de agua virtual: el caso de la fresa mexicana". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(8): 1579-1590. DOI: 10.29312/remexca.v3i8.1322
- Pfeiffer, L. y C. Y. C. Lin. 2014. "Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence". *Journal of Environmental Economics and Management*, 67(2): 189-208. DOI: 10.1016/j.jeem.2013.12.002
- Presidencia de la República. 2024. Acuerdo Nacional por el Derecho Humano al Agua y la Sustentabilidad, *Diario Oficial de la Federación*, dic 19, 2024. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5745669
- Ramírez Barraza, B. A., A. González Estrada, R. Valdivia Alcalá, J. M. Salas González y J. A. García Salazar. 2019. "Efficient rates for water for agricultural use in the Comarca Lagunera". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(3): 539-550. DOI: 10.29312/remexca.v10i3.1295
- Rocha-Ibarra, J. E., A. I. Mireles-Arriaga, J. E. Ruiz-Nieto y G. Maki-Díaz. 2024. "Production and export of berries in Mexico's agricultural development: a study of competitive advantage". *Agrociencia*, 58(5): 595-608. DOI: 10.47163/agrociencia.v58i5.2836
- Scanlon, B. R., C. C. Faunt, L. Longuevergne, R. C. Reedy, W. M. Alley, V. L. McGuire y P. B. McMahon. 2012. "Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(24): 9320-9325. DOI: 10.1073/pnas.1200311109
- Schubert, H. 2011. *The virtual water and the water footprint concepts; statements of the Acatech Project Group 'Georessource Wasser – Herausforderung globaler wandel*. Munich: Acatech; Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. 2025. *Anuario estadístico de la producción agrícola* [Dataset]. México: SADER, Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Raes y E. Fereres. 2009. "AquaCrop: the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles". *Agronomy Journal*, 101(3): 426-437. DOI: 10.2134/agronj2008.0139s
- Turner, K., S. Georgiou, R. Clark, R. Brouwer y J. Burke. 2004. *Economic valuation of water resources in agriculture: from the sectoral to a functional perspective of natural resource management*. Rome: FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/y5582e>
- United States International Trade Commission [USITC]. 2025. *Harmonized Tariff Schedule of the United States Revision 19 (2025): Chapter 8 – Edible fruit and nuts*. Washington, D.C.: U.S. International Trade Commission <https://hts.usitc.gov/reststop/file?release=currentRelease&filename=Chapter%208>
- United States Department of Agriculture [USDA]. 2025. *Global Agricultural Trade System (GATS): Standard query: U.S. Trade data, imports from Mexico*. Washington, D.C. USDA. <https://apps.fas.usda.gov/gats/default.aspx>
- United States Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service [USDA-NASS]. 2024. *Noncitrus fruits and Nuts: 2023 Summary*. United States Department of Agriculture, , Washington D.C. Disponible en: https://www.nass.usda.gov/Publications/Todays_Reports/reports/ncit0624.pdf

Vázquez del Mercado Arribas, R. y Lambarri Beléndez, J. (eds.). 2017. *Huella hídrica en México: análisis y perspectivas*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. ISBN: 978-607-9368-69-2. <https://www.imta.gob.mx/biblioteca/download/?key=962781>

Young, R. A. y J. B. Loomis. 2014. *Determining the economic value of water: concepts and methods*. 2 ed. New York: RFF Press/Routledge.

Ziolkowska, J. R. 2015. "Shadow price of water for irrigation: a case of the High Plains". *Agricultural Water Management*, 153: 20-31. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.01.024