

Clasificación de regiones para la producción agrícola bajo invernadero en Hidalgo, México

Classification of regions for greenhouse agricultural production in Hidalgo, Mexico

Antonio Aguilar-López¹, Salvador González-Andrade^{2*}, Luis Manuel Valenzuela-Nuñez³

¹ División de Ingeniería en Gestión Empresarial del Tecnológico Nacional de México/ITS de Huichapan. aaguilar@iteshu.edu.mx

² Departamento de Estudios Económicos de El Colegio de la Frontera Norte. CP. 22560, Tijuana, Baja California, México.

Tel. (664) 6316300 ext. 3423. salvador@colef.mx

³ Universidad Juárez del Estado de Durango. Facultad de Ciencias Biológicas. luisvn70@hotmail.com

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Agricultura
protegida;
aprendizaje
automático; políticas
públicas; superficie
cultivada.

La producción agrícola bajo invernadero es viable en diversas condiciones ambientales y geográficas mediante adaptaciones tecnológicas. Sin embargo, las condiciones externas determinan el nivel de intervención requerido, lo que permite segmentar el territorio según su impacto sobre las necesidades tecnológicas y de capital. El objetivo de este documento es clasificar los municipios de Hidalgo, México, según tres variables clave para la producción en invernadero: la altura sobre el nivel del mar, la proporción de superficie cultivada total con riego y la temperatura. Para lograrlo, se emplearon dos técnicas de aprendizaje automático: K-medias y K-medoides. Las variables consideradas ofrecen segmentaciones útiles para analizar la idoneidad de los municipios en el establecimiento de nuevas unidades. Adicionalmente, se encontraron relaciones significativas entre dichas variables y la superficie bajo invernadero en 2023. Se concluye que estos factores podrían emplearse en el diseño de futuras políticas públicas dirigidas a incrementar dicha superficie.

Abstract

Keywords:

Protected agriculture;
machine learning;
public policies;
cultivated areas.

Greenhouse agriculture is viable under various environmental and geographical conditions through technological adaptations. However, external conditions determine the level of intervention required, allowing for territorial segmentation based on their impact on technological and capital needs. The objective of this research is to classify the municipalities of Hidalgo, Mexico, according to three key variables for greenhouse production: altitude above sea level, the proportion of total cultivated land with irrigation, and temperature. To achieve this, two machine learning techniques were employed: K-means and K-medoids. The selected variables provide useful segmentations to assess the suitability of municipalities for establishing new production units. Additionally, significant relationships were found between these variables and the cultivated greenhouse area in 2023. This paper concludes that these factors could be used in the design of future public policies aimed at expanding greenhouse-cultivated land.

Recibido: 27 de agosto de 2024

Aceptado: 11 de noviembre de 2024

Publicado: 11 de junio de 2025

Cómo citar: Aguilar-López, A., González-Andrade, S., & Valenzuela-Nuñez, L. M. (2025). Clasificación de regiones para la producción agrícola bajo invernadero en Hidalgo, México. *Acta Universitaria* 35, e4443. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2025.4443>

Introducción

México cuenta con una ventaja comparativa histórica en la producción de frutas y verduras sustentada en: un clima favorable, los bajos costos de producción y una posición geográfica estratégica (Canales *et al.*, 2019). Este potencial, sumado a la demanda del mercado norteamericano, las ventajas técnicas de la agricultura protegida sobre los cultivos a cielo abierto y el apoyo del gobierno, dio lugar a un crecimiento del sector durante las primeras décadas del siglo XXI (Wu *et al.*, 2022). De hecho, el crecimiento de las variantes de agricultura protegida se convirtió en uno de los objetivos de política pública durante esos años (Hernández-Suárez, 2020). En este sentido, se alcanzó un máximo de 17 686.85 ha sembradas bajo invernadero en 2012. Pese a la reducción experimentada a partir de entonces, la tasa de crecimiento promedio anual fue de 39.31% entre 2003 y 2023, al pasar de 132.40 ha a 15 573.74 ha de acuerdo con el Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (Siacon) que publica el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2024).

La política de impulso a la agricultura protegida en México, implementada como una estrategia para modernizar el sector agroalimentario y aumentar la productividad, fue objeto de críticas por su diseño. Concretamente, Hernández-Suárez (2021) señala que no se consideraron las diferencias en las condiciones ambientales, sociales y económicas del país. Esta omisión derivó en unidades abandonadas o infrautilizadas, especialmente en regiones con escasez de agua. Aunado a lo anterior, la política de crecimiento, promovida desde el gobierno federal, se abandonó a partir del 2020.

Esta investigación se centra en analizar la superficie sembrada bajo invernadero, que es una variante de la agricultura protegida que hace referencia al uso de estructuras y equipo para crear un ambiente controlado que permite desarrollar la producción de cultivos (Badu, 2023). La importancia de estas estructuras procede de su capacidad para abordar desafíos clave para la agricultura contemporánea, tales como: el control del microclima y el ciclo biológico de las plantas (Nicolosi *et al.*, 2017); la aplicación de la tecnología para la optimización de recursos productivos (Aznar-Sánchez *et al.*, 2020); la producción sostenida y rentable durante todo el año (Ahamed *et al.*, 2019); la posibilidad de realizar un manejo integrado de plagas, reduciendo su presencia en los cultivos y su impacto económico (Rathee *et al.*, 2018); así como la posibilidad de mejorar la seguridad alimentaria aun en condiciones climáticas adversas (Karanisa *et al.*, 2022).

La elección del estado de Hidalgo como unidad de análisis se sustenta en su posición y características geográficas. Kipp (2010) señala que el territorio mexicano al sur del paralelo 24°, donde se ubica Hidalgo, presenta temperaturas más constantes a lo largo del año, con variaciones influenciadas principalmente por la altitud, lo que teóricamente lo convierte en una región favorable para la agricultura protegida. De hecho, el autor indica que la llanura central de México es la zona más apropiada para invernaderos de tecnología media. Aunque Hidalgo forma parte de una región teóricamente favorable, enfrenta desafíos específicos como una alta incidencia de heladas (Moreno-Reséndez *et al.*, 2011) y un limitado acceso al agua, factor que históricamente ha condicionado el crecimiento de la superficie sembrada bajo invernadero (De Anda & Shear, 2017). Adicionalmente, la accidentada geografía del estado permite analizar, a partir de una muestra relativamente pequeña, cómo la altitud influye en la viabilidad de los invernaderos, tal como señalan Garza-Alonso *et al.* (2020).

Desde el ámbito productivo, Hidalgo adoptó la agricultura protegida desde 2003¹. Pese a requerir una mayor inversión inicial, la variante que ha despuntado en cuanto a superficie sembrada son los invernaderos, en los que se cultiva principalmente jitomate, chile verde, rosa y nopalitos (SIAP, 2024).

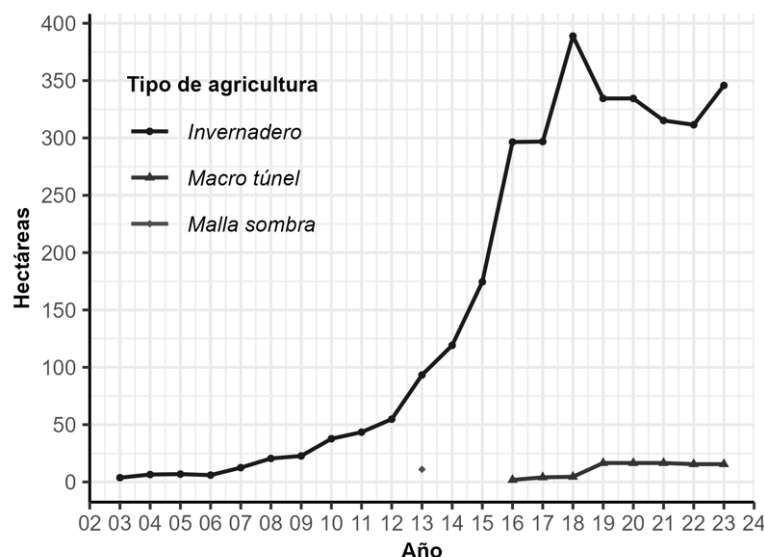


Figura 1. Superficie sembrada (ha) por tipo de agricultura protegida en Hidalgo, 2003-2023.

Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2024).

Aunque el nivel tecnológico de las unidades de agricultura protegida en Hidalgo ha sido históricamente inferior al de los estados del norte del país, este es superior a la media nacional (De Anda & Shear, 2017). En la entidad, estas unidades tienden a concentrarse en determinados municipios, de manera que puede identificarse una correlación espacial positiva estadísticamente significativa, medida por una I de Moran de 0.273, con $p < 0.01$ (con los datos del 2023; estimaciones propias con datos de SIAP, 2024). Esto puede ser indicio de que hay factores que favorecen el establecimiento de estas estructuras en regiones que comparten características similares, tales como las condiciones climáticas y geográficas (Garza-Alonso *et al.*, 2020), el acceso a mercados como Tulancingo (Terrones-Cordero & Sánchez-Torres, 2011) y Pachuca (Terrones-Cordero, 2019), así como la presencia de redes de innovación (Vargas-Canales *et al.*, 2022).

¹ Para el año 2023, Hidalgo participó a nivel nacional con 2.2% de la superficie de la producción agrícola protegida en invernadero, dicha cifra es un tanto similar a su contribución en la superficie a cielo abierto (2.8%).

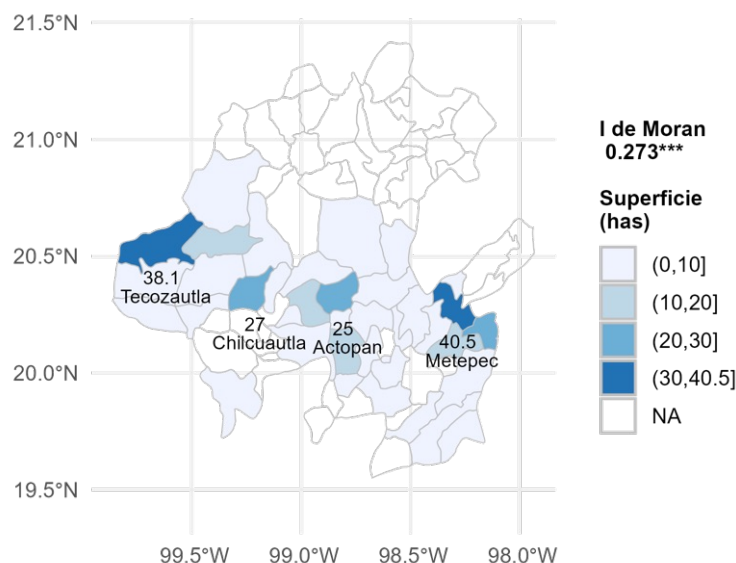


Figura 2. Superficie sembrada (ha) bajo invernadero en Hidalgo por municipio en 2023.
Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2024).

Los resultados de la política de crecimiento de la superficie sembrada bajo invernadero en México ejemplifican un problema estructural en los programas de fomento agropecuario: diseños verticales, desarticulación entre el conocimiento técnico y la toma de decisiones, y subvaloración de las dinámicas territoriales, factores que han comprometido la sostenibilidad de proyectos pese a su viabilidad y bondades teóricas. Frente a este escenario, la presente investigación propone un enfoque técnico para el diseño de futuras políticas dirigidas hacia el crecimiento de la agricultura protegida, basado en la inclusión de tres variables clave: altitud, disponibilidad de riego y temperatura, que permiten segmentar el territorio según su idoneidad para el establecimiento de invernaderos. Este abordaje no sólo responde a las fallas históricas de programas anteriores, sino que ofrece un marco metodológico replicable para futuras intervenciones, que puede extenderse para considerar más variables relevantes y/o para aplicarse a otras regiones del país. O bien, puede aplicarse a un mayor número de observaciones, a partir de datos generados en unidades territoriales más pequeñas.

El estudio se centra en el estado de Hidalgo, México, con el objetivo de clasificar a sus municipios mediante el análisis de las tres variables mencionadas, utilizando algoritmos de aprendizaje automático (K-medias y K-medoides). La elección de estas técnicas busca generar una regionalización objetiva, que priorice datos cuantitativos sobre criterios discrecionales al momento de la elección de sitios para el establecimiento de nuevos proyectos.

Para cumplir este objetivo, el documento se compone de cinco secciones: en la primera se ofrece la introducción, en la segunda se describen el proceso metodológico y los datos, en la tercera se abordan los resultados, en la cuarta se realiza la discusión de los resultados y en la quinta sección se presentan las conclusiones.

Materiales y métodos

En esta investigación, se emplearon dos algoritmos de aprendizaje automático que permiten realizar agrupaciones a partir de la medición de distancias entre dos pares de observaciones: K-medias y K-medoides. Se empleó el método de Euclides para la medición de las distancias en los algoritmos. Para un par de vectores, x y y de longitud n , la distancia euclídeana se obtiene como (Kassambara, 2017):

$$d_{euc}(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

El algoritmo K-medias consiste en definir grupos de manera que la variación dentro de estos sea mínima. En este caso, se empleó el algoritmo Hartigan-Wong, que define la variación total intragrupal, $W(C_k)$, como la suma del cuadrado de las distancias euclídeanas entre las observaciones en el grupo C_k y el centroide correspondiente (Kassambara, 2017):

$$W(C_k) = \sum_{x_i \in C_k} (x_i - \mu_k)^2 \quad (2)$$

donde x_i es una observación que pertenece al grupo C_k , y μ_k es el valor medio de los puntos asignados al grupo C_k . Cada observación se asigna a un grupo, de tal manera que la suma de las distancias al cuadrado de dicha observación al centroide del grupo asignado, μ_k , sea mínima. La variación total intragrupal se define como:

$$WSS = \sum_{k=1}^k W(C_k) = \sum_{k=1}^k \sum_{x_i \in C_k} (x_i - \mu_k)^2 \quad (3)$$

El estadístico WSS indica qué tan compactos son los puntos dentro de cada grupo. Valores bajos significan que los puntos dentro de los grupos están cerca de su centroide, por lo que el grupo es más compacto y homogéneo.

Una alternativa robusta al método de K-medias ante la presencia de valores atípicos es el método de K-medoides. Aquí, cada grupo es representado por una de las observaciones que lo integran. El algoritmo requiere del cálculo de una matriz de disimilitud que puede obtenerse mediante la distancia euclídeana. Mientras que K-medias es más eficiente en conjuntos de datos homogéneos, K-medoides ofrece mayor robustez ante datos extremos, permitiendo una clasificación más precisa en escenarios con alta variabilidad ambiental.

Para evitar que la escala de las variables alterara el proceso de formación de grupos, se optó por estandarizarlas. Matemáticamente, para cada variable x se formula la siguiente ecuación:

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

donde z representa el puntaje-z de la i -ésima observación de x , x_i es una observación de x , μ es la media de x y σ es su desviación estándar.

Los datos analizados corresponden a observaciones a nivel municipal de las siguientes variables: 1) altura sobre el nivel del mar, 2) proporción de superficie sembrada que cuenta con riego y 3) temperatura; además, la variable dependiente es la superficie sembrada bajo invernadero. Se utilizó el ancho medio de la silueta como criterio para determinar el número óptimo de grupos (valor de k) para cada variable: los valores más cercanos a 1 indican una mejor separación entre los grupos. Se exploraron valores desde $k = 2$ hasta $k = 5$, se eligieron como los valores óptimos en el número de grupos cuando el ancho medio de la silueta alcanza el máximo.

La proporción de superficie sembrada que cuenta con riego, obtenida a partir del Siacon (SIAP, 2024), se considera un indicador de la disponibilidad de agua. Se asume que el riego es una variable de infraestructura que se desarrolla y expande de manera acumulativa a lo largo del tiempo (con nuevos proyectos que incrementan la cobertura), por lo que se optó por utilizar el dato del último año disponible (2023) en lugar de promedios históricos. Para obtener esta variable, se dividió la superficie con riego a cielo abierto, en invernadero y en macrotúnel entre la superficie sembrada total (las anteriores más la superficie de temporal a cielo abierto). La superficie sembrada bajo invernadero también se considera una variable acumulativa a lo largo del tiempo (Figura 1), por lo que se usaron los valores del 2023.

En cuanto a la temperatura, se emplearon datos de máximas y mínimas por día para el periodo 2010-2023. Se obtuvo la media de estas temperaturas para cada día y después el promedio mensual. Posteriormente, para cada mes del año se obtuvo el promedio de las temperaturas medias mensuales de los 14 años considerados. Con estas temperaturas finales se realizó una clasificación de acuerdo con el criterio de Castilla (2004, citado en Garza-Alonso *et al.*, 2020): 1) mes frío (F) si la temperatura es inferior a 15 °C, 2) mes óptimo (O) si es mayor o igual que 15 °C y menor a 22 °C, 3) mes caliente (C) si es mayor o igual a 22 °C y menor a 27 °C y 4) mes muy caliente (M) si es mayor o igual a 27 °C. Se empleó Python 3.12.4 y la *Application Programming Interface* (API) de Open-Meteo para obtener datos históricos diarios de temperatura, humedad, viento, precipitación, radiación solar y presión atmosférica para los años considerados (Open-Meteo, 2024).

Los datos de altura corresponden a la altura sobre el nivel del mar de las cabeceras municipales y se obtuvieron con Python 3.12.4 y la librería OpenRouteService 2.2.2 (Open Route Services, 2024).

Durante el proceso de agrupamiento por K-medias se empleó la función *kmeans()* del paquete *stats* 4.4.2, mientras que durante el proceso por K-medoides se empleó la función *pam()* del paquete *cluster* 2.2.6, empleando el lenguaje R versión 4.4.2 y R Studio 2024.9.1.394. Para la selección del método de agrupamiento se consideró la presencia de datos atípicos en las variables consideradas. En la determinación del número óptimo de grupos se empleó la función *fviz_nbclust()* del paquete *factoextra* 1.0.7, con un máximo de cinco grupos para cada variable, por el método de la silueta. Si bien se presentan correlaciones de Pearson para los pares de variables examinadas, estas estimaciones son bajas, por lo que se complementan con los resultados de tres modelos de regresión Tobit. Estos modelos son apropiados debido a la presencia de censura en la superficie sembrada bajo invernadero (en 2023 esta variable es igual a 0 en 46 de los 84 municipios, es decir, está censurada a la izquierda). En su formulación, como variable dependiente se tomó a la superficie sembrada bajo invernadero (en ha), y como variables independientes se tomó a la altura sobre el nivel del mar, la proporción de superficie que cuenta con riego y la temperatura (por separado). En la estimación de los modelos Tobit se empleó la función *tobit()* del paquete *AER* 1.2-12.

Resultados

La Tabla 1 presenta un resumen de los métodos y el número de grupos para las tres variables consideradas en el estudio. El estadístico WSS muestra que para la variable *Altura* los puntos están más agrupados, mientras que para *Proporción riego* hay una mayor dispersión dentro de los grupos. La columna *Grupos (k)* indica el número de grupos que se eligió mediante el método de la silueta.

Tabla 1. Resumen de la clasificación de regiones de acuerdo con la altura, proporción de riego y temperatura.

Variable	Grupos (k)	WSS	Ancho medio de la silueta	Método
Altura	2	0.42	0.68	K-medoides
Proporción riego	3	4.28	0.77	K-medias
Temperatura	3	0.86	0.54	K-medoides

Nota. WSS (*within cluster sum of squares*) es la suma de las distancias al cuadrado entre cada punto y el centro del grupo asignado.

Fuente: Elaboración propia con R y R studio con base en los datos del Open-Meteo (2024), Open Route Services (2024) y SIAP (2024).

Adicionalmente, la Tabla 2 presenta las estimaciones de modelos de regresión Tobit, para evaluar el efecto de cada una de las variables consideradas en la clasificación.

Tabla 2. Resumen de modelos censurados para superficie sembrada en 2023 (46 municipios sin invernaderos en Hidalgo).

Variable	Coefficiente	SE	Valor z	Valor p	Modelo
Intercepto	-104.448**	44.537	-2.345	0.019	Altura
Altura (dam)	1.050**	0.458	2.295	0.022	Altura
Altura (dam)^2	-0.003**	0.001	-2.209	0.027	Altura
Log(escala)	2.550***	0.124	20.501	0.000	Altura
Intercepto	-6.667**	2.537	-2.628	0.009	Proporción riego
Proporción riego	0.147**	0.047	3.138	0.002	Proporción riego
Log(escala)	2.567***	0.125	20.504	0.000	Proporción riego
Intercepto	27.931**	13.538	2.063	0.039	Temperatura
Temperatura media	-1.794**	0.810	-2.215	0.027	Temperatura
Log(escala)	2.629***	0.126	20.833	0.000	Temperatura

Nota. **, *** indican un nivel de significancia del 5% y 1% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia con R y R studio con base en los datos del Open-Meteo (2024), Open Route Services (2024) y SIAP (2024).

La correlación entre la altura y la superficie bajo invernadero arrojó un coeficiente de Pearson de 0.18 no significativo ($p > 0.05$). Sin embargo, el modelo Tobit muestra que, por cada decámetro (dam) adicional de altura sobre el nivel del mar, la superficie aumenta en 1.050 ha ($p < 0.05$), para los municipios en los que existe producción en tales condiciones (es decir, considerando la censura). Sin embargo, la relación entre estas variables no es lineal, como lo indica el término cuadrático -0.003 significativo ($p < 0.05$). El efecto positivo de la altitud alcanza su máximo en 204.68 dam (o 2 046.8 m. s. n. m.); a partir de este punto, un incremento adicional en la altitud comienza a reducir la superficie bajo invernadero. La transformación a dam se consideró útil debido a la significancia del término cuadrático y para mejorar la interpretación de un coeficiente tan pequeño. La Figura 3 muestra la clasificación de municipios por altura, así como los límites máximo y mínimo como marcadores de grupo.

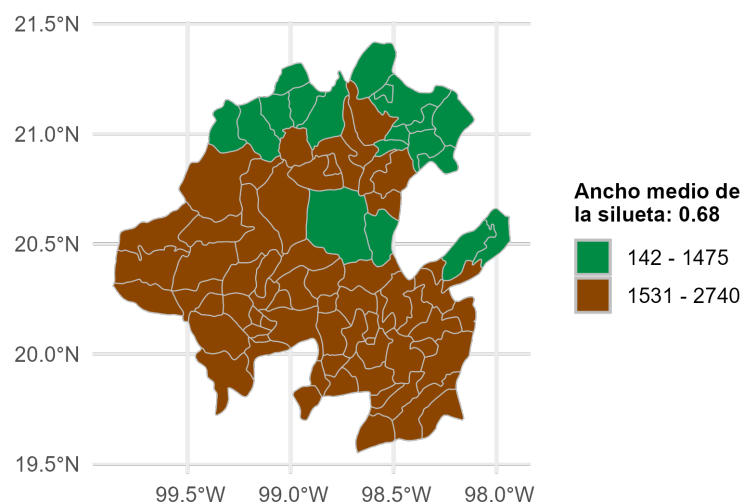


Figura 3. Clasificación de municipios de Hidalgo por altura.

Nota: límites de grupo en metros sobre el nivel del mar.

Fuente: Elaboración propia con datos de Open Route Services (2024).

La razón para incluir a la proporción de riego total se debe a que el análisis de correlación entre esa variable y la superficie bajo invernadero arrojó un coeficiente de Pearson de 0.32 significativo ($p < 0.05$). Este valor indica que a medida que aumenta la proporción de riego en general, también tiende a aumentar la superficie. El modelo Tobit muestra que por cada incremento del 1% en la proporción de riego, la superficie aumenta en 0.147 ha ($p < 0.05$). La Figura 4 muestra la clasificación de municipios por disponibilidad de riego, con el máximo y el mínimo de proporción como marcadores de grupo.

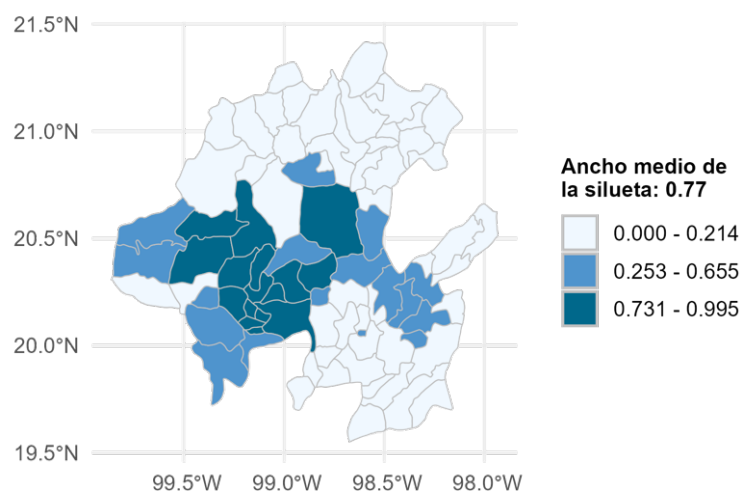


Figura 4. Clasificación de municipios de Hidalgo, por disponibilidad de riego en 2023.

Nota. El color más débil indica prevalencia de superficie de temporal, mientras que el más oscuro indica mayor disponibilidad de riego (con más del 73% de la superficie).

Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2024).

Para la relación entre temperatura y la superficie bajo invernadero en 2023 se obtuvo un coeficiente de correlación de -0.13, pero no es significativo ($p > 0.05$). Sin embargo, el modelo de regresión Tobit muestra que, por cada grado adicional de temperatura, la superficie bajo invernadero en 2023 disminuye en 1.794 ha ($p < 0.05$). La Figura 5 muestra la clasificación de municipios de acuerdo con el criterio de Castilla (2004, citado en Garza-Alonso *et al.*, 2020); los marcadores de grupo muestran el promedio de número de meses fríos (F), óptimos (O), calientes (C) y muy calientes (M) para cada grupo.

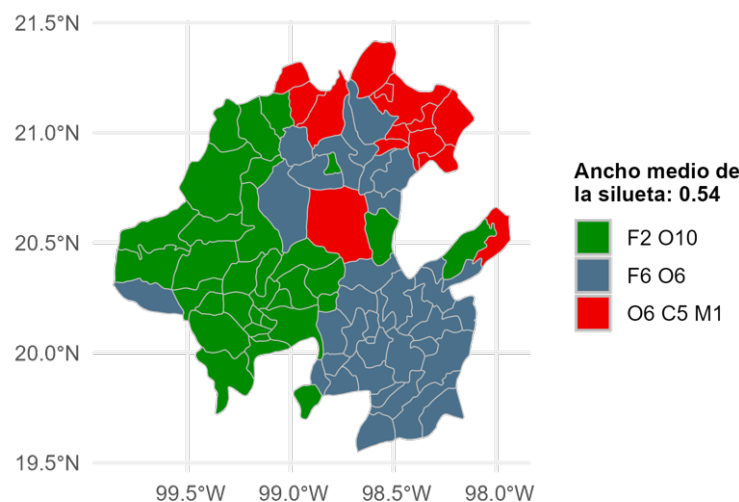


Figura 5. Clasificación de municipios de Hidalgo por temperaturas medias mensuales (periodo de 2010 a 2023).

Nota. Número de meses fríos (F), óptimos (O), calientes (C) y muy calientes (M).

Fuente: Elaboración propia con datos de Open-Meteo (2024).

Discusión

La producción agrícola bajo invernadero es técnicamente factible en un amplio rango de condiciones ambientales y geográficas, debido a que las estructuras y tecnologías pueden adaptarse para ofrecer los rangos óptimos requeridos por los cultivos. Sin embargo, las condiciones externas determinan el grado de intervención necesario, lo cual, a su vez, se traduce en la posibilidad de segmentar el territorio según el impacto que las variables ambientales tendrán sobre los requerimientos tecnológicos y de capital. En este sentido, cuanto más se alejen las condiciones ambientales externas de los rangos ideales para los cultivos, mayor será la inversión requerida en sistemas de regulación térmica, ventilación, humedad y otras tecnologías especializadas para garantizar la productividad.

De lo anterior se infiere que la segmentación del territorio, basada en variables como la altitud, la disponibilidad de riego y la temperatura, no sólo facilita la identificación de zonas con menor dependencia sobre tecnología avanzada, sino que permite, además, la posibilidad de evaluar la viabilidad económica de nuevos proyectos.

Las variables climáticas ya se han empleado en otros estudios para determinar la idoneidad de la producción bajo invernadero. En Turquía, Cemek *et al.* (2017) aplicaron un análisis espacial para identificar los periodos de crecimiento más apropiados. Dichos autores usaron la información meteorológica sobre temperatura externa promedio para determinar los requerimientos de los invernaderos en cuanto a enfriamiento, calefacción, ventilación e iluminación.

Por su parte, Garza-Alonso *et al.* (2020) señalan que la temperatura, tanto interna como externa, es la variable climática clave para determinar la idoneidad de una región para el establecimiento de invernaderos, ya que impacta directamente en el rendimiento de los cultivos. Estos autores descubrieron una correlación negativa entre la altitud y la temperatura media, lo que, además, convierte a la primera en otro factor relevante. A su vez, entre los resultados de la presente investigación se encontró una relación negativa y significativa entre la temperatura media y la superficie sembrada bajo invernadero en los municipios de Hidalgo.

Adicionalmente, Garza-Alonso *et al.* (2020) realizaron un ejercicio de clasificación similar para Nuevo León. Sin embargo, no emplearon un indicador para seleccionar el número de grupos (valor de k). En este artículo se subsana dicha limitación, pues se propone el ancho medio de la silueta para determinar la segmentación óptima del territorio. Además, se plantea la posibilidad de elegir entre dos métodos de agrupamiento, K -medias y K -medoides, dependiendo de la presencia de valores atípicos en las variables analizadas.

Cruz-Ramírez *et al.* (2022) identificaron la disponibilidad de agua como uno de los factores de éxito de los proyectos de agricultura protegida en los Valles Centrales de Oaxaca. Por su relevancia, de igual manera, dicha variable se incorporó en esta investigación a través de la variable de proporción de riego, además de que exhibe una fuerte asociación con el desarrollo de los invernaderos en los municipios céntricos de Hidalgo (Figura 2).

Al analizar el área de invernaderos en la llanura de Guanzhou, Shaanxi, China, Gao *et al.* (2022) identificaron que las nuevas estructuras tienden a establecerse a mayores elevaciones, cerca de caminos rurales y de los principales ríos. Por su parte, los resultados de este trabajo muestran que existe una relación cuadrática significativa entre la altura y la superficie sembrada bajo invernadero en Hidalgo.

Conclusiones

El crecimiento de la superficie sembrada bajo invernadero en México fue impulsado, entre otros factores, por políticas que presentaron deficiencias en su diseño. Como consecuencia, algunas unidades productivas fracasaron a pesar de las bondades teóricas de este tipo de tecnología. Eventualmente, la política de promoción al crecimiento fue abandonada.

Frente al escenario anterior, la presente investigación propone un enfoque para la selección de sitios en los que pudieran establecerse nuevos proyectos, basado en evidencia, a través de la incorporación de tres variables: la altura sobre el nivel del mar, la proporción de superficie cultivada total con riego y la temperatura. Mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático (K -medias y K -medoides) aplicado a estas variables, se generó una regionalización para los municipios de Hidalgo. Además, se encontró que dichas variables explican actualmente la superficie sembrada bajo invernadero en la entidad.

La identificación de regiones idóneas que tienen potencial y condiciones favorables para incrementar la oferta de productos agrícolas obtenidos en condiciones de invernadero, sin fuertes requerimientos de capital –para dotarlos de la tecnología necesaria para calefacción o enfriamiento, por ejemplo– brinda la oportunidad para desarrollar nuevos proyectos que bien pudieran ser sostenibles en el largo plazo.

Las variables geográficas y ambientales aquí propuestas, así como el uso de tecnologías intensivas en datos pueden ser herramientas clave en el diseño de nuevas políticas de promoción de la agricultura protegida.

El enfoque metodológico aquí adoptado no es restrictivo, sino que constituye un marco flexible que puede enriquecerse con otras variables relevantes y aplicarse a otras regiones del país. También pudiera profundizarse incrementando el número de observaciones, con datos de unidades geográficas más pequeñas.

Conflictos de interés

Sin conflicto de intereses.

Referencias

- Ahamed, M. S., Guo, H., Taylor, L., & Tanino, K. (2019). Heating demand and economic feasibility analysis for year-round vegetable production in Canadian Prairies greenhouses. *Information Processing in Agriculture*, 6(1), 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.08.005>
- Aznar-Sánchez, J. A., Velasco-Muñoz, J. F., López-Felices, B., & Román-Sánchez, I. M. (2020). An analysis of global research trends on greenhouse technology: towards a sustainable agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(2), 664. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020664>
- Badu, P. R. (2023). Greenhouse technology for controlled environment crop production. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 5(5), 1–13. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2023.v05i05.7164>
- Canales, E., Andrango, G., & Williams, A. (2019). Mexico's agricultural sector: production potential and implications for trade. *Choices*, 34(3), 1–12. https://www.choicesmagazine.org/UserFiles/file/cmsarticle_701.pdf
- Cemek, B., Güler, M., & Arslan, H. (2017). Spatial analysis of climate factors used to determine suitability of greenhouse production in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 128(1-2), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1686-5>
- Cruz-Ramírez, Á. S., Martínez-Gutiérrez, G. A., Morales-García, I., & Poblete-Avendaño, A. J. (2022). Factores de éxito en la agricultura protegida en los Valles Centrales de Oaxaca. *Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca*, 6(6), 7–16. <https://web.ciidiroaxaca.ipn.mx/cccto/?q=num/6>
- De Anda, J., & Shear, H. (2017). Potential of vertical hydroponic agriculture in Mexico. *Sustainability*, 9(1), 140. <https://doi.org/10.3390/su9010140>
- Gao, C., Wu, Q., Dyck, M., Lv, J., & He, H. (2022). Greenhouse area detection in Guanzhong Plain, Shaanxi, China: spatio-temporal change and suitability classification. *International Journal of Digital Earth*, 15(1), 226–248. <https://doi.org/10.1080/17538947.2021.2023667>
- Garza-Alonso, C. A., Olivares-Sáenz, E., Vázquez-Alvarado, R. E., & García-Treviño, N. E. (2020). Clasificación de regiones para la producción en invernaderos utilizando análisis multivariado. *Nova Scientia*, 12(24), 1-20. <https://doi.org/10.21640/ns.v12i24.2125>
- Hernández-Suárez, J. L. (2020). El desarrollo de los invernaderos en Zacatecas. Entre el auge y el abandono. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 8(22), 1-16. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2020.22.70248>
- Hernández-Suárez, J. L. (2021). La política pública hacia la agricultura protegida en el gobierno de López Obrador. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(6), 1071–1085. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2776>
- Karanisa, T., Achour, Y., Ouammi, A., & Sayadi, S. (2022). Smart greenhouses as the path towards precision agriculture in the food-energy and water nexus: case study of Qatar. *Environment Systems and Decisions*, 42(4), 521–546. <https://doi.org/10.1007/s10669-022-09862-2>
- Kassambara, A. (2017). *Practical guide to cluster analysis in R: Unsupervised Machine Learning* (1a ed.). STHDA. <https://xsluulab.github.io/Workshop/2021/week10/r-cluster-book.pdf>
- Kipp, J. (2010). *Optimal climate regions in Mexico for greenhouse crop production*. (Rapporte No. GTB-1024). Wageningen UR Greenhouse Horticulture. <https://edepot.wur.nl/144644>
- Moreno-Reséndez, A., Aguilar-Durón, J., & Luévano-González, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 29, 763–774. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.114479>

- Nicolosi, G., Volpe, R., & Messineo, A. (2017). An innovative adaptive control system to regulate microclimatic conditions in a greenhouse. *Energies*, 10(5), 722. <https://doi.org/10.3390/en10050722>
- Open Route Services. (2024). ORS Maps [mapa interactivo]. <https://maps.openrouteservice.org/#/place/@-99.29992675781251,20.4567703089206,6>
- Open-Meteo. (2024). Free Weather API [Servicio web]. <https://open-meteo.com/>
- Rathee, M., Singh, N. V., Dalal, P. K., & Mehra, S. (2018). Integrated pest management under protected cultivation: a review. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(2), 1201–1208. <https://www.entomoljournal.com/archives/?year=2018&vol=6&issue=2&ArticleId=3324>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (27 de junio de 2024) Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) [Servicio web]. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/prensa/sistema-de-informacion-agroalimentaria-de-consulta-siacon?idiom=es>
- Terrones-Cordero, A. (2019). Producción de jitomate en invernadero en San Juan Tilcuaútl, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 44, 170–183. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.292258>
- Terrones-Cordero, A., & Sánchez-Torres, Y. (2011). Análisis de la rentabilidad económica de la producción de jitomate bajo invernadero en Acaxochitlán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 29, 752–761. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.114478>
- Vargas-Canales, J. M., Palacios-Rangel, M. I., García-Cruz, J. C., Camacho-Vera, J. H., Sánchez-Torres, Y., & Simón-Calderón, C. (2022). Analysis of the impact of the regional innovation system of protected agriculture in Hidalgo, Mexico. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 29(2), 269–294. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2022.2039246>
- Wu, F., Guan, Z., & Huang, K. M. (2022). Protected Agriculture in Mexico: FE1124, 12/2022. *EDIS*, (6), 1–7. <https://doi.org/10.32473/edis-fe1124-2022>