

CAPÍTULO 4

AVANCES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN INVESTIGACIÓN AGRÍCOLA: CASOS DE ESTUDIO EN LA REGIÓN DE LA CHONTALPA, TABASCO, MÉXICO



<https://doi.org/10.22533/at.ed.244112527014>

Fecha de presentación: 03/06/2025

Fecha de recepción: 11/06/2025

Sergio Salgado Velázquez

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Campo Experimental Huimanguillo
Huimanguillo, Tabasco, México
<https://orcid.org/0000-0002-8443-3190>

Fabiola Olvera Rincón

Colegio de Postgraduados
Campus Tabasco
Huimanguillo, Tabasco, México
<https://orcid.org/0000-0003-2466-3856>

Diana Rubí Ramos López

Universidad Popular de la Chontalpa
Cárdenas, Tabasco, México
<https://orcid.org/0009-0007-9653-3432>

Pablo Ulises Hernández Lara

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Campo Experimental Huimanguillo
Huimanguillo, Tabasco, México
<https://orcid.org/0009-0000-6976-7574>

Dante Sumano López

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Campo Experimental Huimanguillo
Huimanguillo, Tabasco, México
<https://orcid.org/0000-0002-1947-4949>

Oswaldo Tique de los Santos

Tecnológico Nacional de México de Huimanguillo
Huimanguillo, Tabasco, México
<https://orcid.org/0009-0006-2407-2887>

Vinicio Calderón Bolaina

Tecnológico Nacional de México de Huimanguillo
Huimanguillo, Tabasco, México
<https://orcid.org/0000-0002-9860-8908>

RESUMEN: La agricultura de precisión ha emergido como una estrategia clave para optimizar la producción agrícola mediante el uso eficiente de insumos y la integración de tecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la percepción remota y el análisis geoestadístico. Esta revisión integrativa de literatura reúne los principales avances logrados en la región de la Chontalpa, Tabasco, México, en los últimos diez años, con énfasis en cultivos tropicales como caña de azúcar, cacao, arroz y limón persa. Los estudios revisados destacan la aplicación de sensores remotos, drones e interpolación geoestadística para caracterizar la variabilidad espacial del suelo y diseñar estrategias agronómicas

diferenciadas por zonas. Se han desarrollado mapas de fertilidad, recomendaciones de fertilización sitio-específica y modelos predictivos de rendimiento utilizando imágenes satelitales Sentinel-2 y algoritmos de aprendizaje automático como random forest. Entre los principales logros se encuentran: la zonificación agroecológica basada en propiedades fisicoquímicas del suelo; la estimación remota del contenido de jugo y biomasa en caña de azúcar; y la generación de mapas de dosis de fertilizantes para cítricos según el tipo de suelo. No obstante, también se identificaron retos importantes como la falta de continuidad en proyectos institucionales, limitaciones económicas para pequeños productores, escasa vinculación interinstitucional y poca aplicación de inteligencia artificial a escala local. Se concluye que la agricultura de precisión en la Chontalpa ha demostrado un alto potencial para mejorar la productividad y sostenibilidad agrícola, aunque se requiere mayor integración tecnológica, acceso a datos abiertos y desarrollo de sistemas de soporte a la decisión adaptados al contexto regional. Futuros estudios deben enfocarse en el uso de datos multitemporales, inteligencia artificial y tecnologías accesibles para ampliar el impacto de estas herramientas en la agricultura tabasqueña.

PALABRAS CLAVE: Agricultura de precisión, sistemas de información geográfica (SIG), geoestadística, percepción remota, variabilidad espacial del suelo.

ADVANCES IN PRECISION AGRICULTURE IN AGRICULTURAL RESEARCH: CASE STUDIES IN THE CHONTALPA REGION, TABASCO, MEXICO

ABSTRACT: Precision agriculture has emerged as a key strategy to optimize agricultural production through the efficient use of inputs and the integration of technologies such as Geographic Information Systems (GIS), remote sensing, and geostatistical analysis. This integrative literature review compiles the main advancements achieved in the Chontalpa region of Tabasco, Mexico, over the past ten years, with an emphasis on tropical crops such as sugarcane, cacao, rice, and Persian lime. The reviewed studies highlight the application of remote sensors, drones, and geostatistical interpolation to characterize the spatial variability of soils and to design site-specific agronomic strategies. Fertility maps, site-specific fertilization recommendations, and yield prediction models have been developed using Sentinel-2 satellite imagery and machine learning algorithms such as random forest. Key achievements include agroecological zoning based on the physicochemical properties of soils, remote estimation of juice content and biomass in sugarcane, and the creation of fertilizer dosage maps for citrus crops according to soil type. However, significant challenges were also identified, such as the lack of continuity in institutional projects, economic constraints for small-scale producers, limited interinstitutional collaboration, and the scarce application of artificial intelligence at the local level. It is concluded that precision agriculture in Chontalpa has demonstrated high potential to improve agricultural productivity and sustainability, although greater technological integration, access to open data, and the development of decision-support systems adapted to the regional context are still needed. Future studies should focus on the use of multitemporal data, artificial intelligence, and accessible technologies to expand the impact of these tools in Tabasco's agriculture.

KEYWORDS: Precision agriculture, geographic information systems (GIS), geostatistics, remote sensing, spatial variability of soil.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión se ha consolidado como una estrategia innovadora para optimizar la producción agrícola mediante el uso eficiente de recursos y la toma de decisiones basadas en información precisa y localizada. Esta tecnología integra diversas herramientas, entre las que destacan los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la percepción remota, que permiten obtener, analizar y gestionar datos espaciales y temporales de los cultivos y el entorno agrícola (Salgado-Velázquez *et al.*, 2020). Los SIG son plataformas digitales que facilitan la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos georreferenciados, lo cual es fundamental para identificar variabilidad espacial dentro de los campos agrícolas y tomar acciones específicas según las necesidades de cada zona (Li *et al.*, 2019). Por su parte, la percepción remota utiliza sensores aéreos o satelitales para recopilar información sobre la salud de los cultivos, la humedad del suelo, la cobertura vegetal y otros factores críticos, proporcionando datos en tiempo real o casi real, que contribuyen a un manejo más preciso y eficiente (Shamshad *et al.*, 2023). La combinación de estas tecnologías en la agricultura de precisión no solo mejora la productividad y la sostenibilidad, sino que también contribuye a minimizar el impacto ambiental al reducir el uso excesivo de insumos como fertilizantes y pesticidas (Chaudhari *et al.*, 2022). En regiones como la Chontalpa, Tabasco, donde la diversidad agroecológica es amplia, la implementación de estas herramientas representa una oportunidad para mejorar la competitividad y la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a retos como el cambio climático y la variabilidad climática (Salgado-Velázquez *et al.*, 2025). Por otra parte, la agricultura de precisión se fundamenta en la comprensión de la variabilidad espacial de ciertos factores del suelo y su relación con la producción. Este concepto es esencial para desarrollar sistemas de producción más sostenibles y eficientes (Sánchez-Jiménez *et al.*, 2024; Salgado-Velázquez *et al.*, 2021), ya que la variación espacial de estos factores ejerce una influencia significativa en la productividad de los cultivos (Salgado-García *et al.*, 2021). El conocimiento detallado de las propiedades del suelo es de importancia fundamental para la optimización de prácticas de manejo agrícola. Al mismo tiempo, la distribución espacial de las propiedades fisicoquímicas del suelo se considera un insumo esencial en cualquier planificación agrícola sostenible (Salgado-Velázquez *et al.*, 2020). Por ende, puede contribuir significativamente a ahorrar esfuerzo, tiempo y costos en cualquier proceso de desarrollo de cultivos. Además, la recopilación de datos espaciales precisos y continuos es clave para una toma de decisiones fundamentada. Sin embargo, la disponibilidad de estos datos no solo es limitada, sino también costosa. Por ello, la geoestadística desempeña un papel crucial al representar los análisis del suelo de manera espacial y resaltar las variaciones entre diferentes partes de un área de estudio (Khan *et al.*, 2021). La información científica precisa sobre los suelos es esencial para desarrollar técnicas efectivas de manejo del suelo que sostengan la producción agrícola mientras se mantiene la calidad ambiental. Por ello,

con el objetivo de contar con una visión general de las aplicaciones sobre la agricultura de precisión que se han realizado en la región de la Chontalpa, Tabasco, México; se esbozó la presente revisión de literatura de los últimos 10 años.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Revisión de literatura

Este trabajo corresponde a una revisión integrativa de literatura, cuyo propósito es sintetizar y analizar críticamente el conocimiento disponible sobre las aplicaciones realizadas en agricultura de precisión en la región de la Chontalpa, Tabasco en México, con especial atención a cultivos tropicales de importancia como caña de azúcar, cacao, arroz y estudios de suelos para mejorar la toma de decisiones. La revisión integrativa permite examinar, comparar y contextualizar una amplia gama de estudios científicos, técnicos e institucionales, con el fin de construir una visión holística del estado actual del conocimiento (Barbosa *et al.*, 2022).

2.1.1 Definición del objetivo

El objetivo principal fue identificar los trabajos sobre el uso y aplicación de técnicas de agricultura de precisión, los principales retos técnicos y socioeconómicos, y las estrategias o tecnologías propuestas en la última década.

2.1.2 Estrategia de búsqueda documental

Se realizó una búsqueda exhaustiva de información en diversas bases de datos científicas y repositorios institucionales (Martínez *et al.*, 2021). Las fuentes incluyeron:

Bases de datos académicas: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Redalyc, SciELO, Google Scholar.

Repositorios nacionales: CONACYT, INIFAP, SAGARPA (ahora SADER), SIAP, FAO México.

Tesis y disertaciones: UNAM, Colegio de Postgraduados (COLPOS), UJAT, entre otras.

Las palabras clave utilizadas fueron combinaciones en español e inglés, tales como: “Agricultura de precisión en Tabasco”, “Chontalpa agricultura de precisión”, “Sistemas de información geográfica y suelos Tabasco”, “Percepción remota cultivos México”, “Precision agriculture AND GIS AND Tabasco”, “Geoestadística aplicada al manejo agrícola”.

2.1.3 Criterios de selección de documentos

Temporales: publicaciones entre 2014 y 2025. Idioma: español o inglés. Cobertura geográfica: estudios realizados en México o con datos específicos de Tabasco.

Relevancia: estudios aplicados en México con énfasis en Tabasco, que incluyeran temas como SIG, sensores remotos, drones, geoestadística, cartografía digital o manejo de suelos bajo agricultura de precisión.

2.1.4 Revisión y sistematización

Los documentos fueron leídos en su totalidad y organizados en una base de datos con las siguientes variables: autor, año, título, lugar de estudio, enfoque (productivo, tecnológico, ambiental, socioeconómico), metodología utilizada (análisis geoestadístico, imágenes satelitales, drones, SIG, entre otros) y principales hallazgos (Jaishi, 2020).

2.1.5 Análisis

El análisis fue de carácter cualitativo, descriptivo y comparativo, orientado a detectar patrones, identificar vacíos en el conocimiento y proponer líneas de investigación futuras. Se optó por una revisión integrativa debido a la naturaleza emergente y multidisciplinaria de la agricultura de precisión en el sureste mexicano, lo cual requiere integrar evidencia dispersa en distintas disciplinas como la agronomía, la geomática y la ciencia del suelo. Este enfoque permite visibilizar el conocimiento generado en contextos regionales que muchas veces no son captados por los enfoques sistemáticos tradicionales (Mier-Tous *et al.*, 2023).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Revisión de literatura

La revisión de literatura permitió identificar que, en la región de la Chontalpa, Tabasco, el desarrollo e implementación de la agricultura de precisión ha avanzado de forma gradual, pero con notables aplicaciones enfocadas principalmente en:

1. Caracterización y monitoreo de suelos mediante sensores remotos, SIG y análisis geoestadísticos.
2. Manejo diferenciado de cultivos, especialmente en sistemas de arroz, maíz, cacao y pastos, donde se ha evidenciado variabilidad espacial significativa.
3. Aplicación de drones para fotogrametría, estimación de biomasa y monitoreo de estrés hídrico.
4. Zonificación agroecológica y planes de manejo con base en mapas de variabilidad espacial de propiedades fisicoquímicas del suelo.

5. Los estudios más recientes han demostrado que, mediante la percepción remota y el uso de SIG, es posible lograr una optimización del uso de fertilizantes, reducción de costos de producción y mejora de rendimientos en diversas parcelas de pequeña y mediana escala (Salgado-Velázquez *et al.*, 2025). Sin embargo, persisten desafíos importantes:

- a) Falta de continuidad en proyectos institucionales o académicos, lo que limita la validación y adopción de tecnologías.
- b) Costos asociados al acceso de plataformas satelitales o equipos como drones, que restringen el uso en pequeños productores.
- c) Débil articulación entre centros de investigación, instituciones gubernamentales y productores locales, lo cual fragmenta el desarrollo de soluciones adaptadas al contexto regional.
- d) Asimismo, se evidenció un vacío importante de publicaciones que aborden modelos de predicción o aplicaciones de inteligencia artificial (IA) con datos de la Chontalpa. Solo algunos estudios recientes comienzan a explorar el uso de machine learning para zonificación o predicción de rendimientos.).

3.2 Resumen de principales trabajos sobre aplicación de la agricultura de precisión en la región de la Chontalpa, Tabasco, México.

A continuación, se presentan los principales estudios realizados en la región de la Chontalpa del estado de Tabasco en México.

3.2.1 Estudios sobre la variabilidad espacial de los suelos en cultivos tropicales.

Se encontró que el primer trabajo realizado en estudiar la variabilidad espacial de suelos cañeros usando técnicas geoestadísticas fue el reportado por Salgado-Velázquez *et al.* (2020), quienes tomaron 100 muestras de suelo para determinar propiedades físicas y químicas de un suelo Acrisol cultivado con caña de azúcar (Figura 1). El análisis con el enfoque de la geoestadística permitió determinar que las propiedades del suelo pH, PSA, MO, K, Zn y arena presentaron alta dependencia espacial (<25%); y las propiedades P-Olsen, Ca, Mg, CIC, limo y arcilla presentaron moderada dependencia espacial (25-75%). Con los mapas generados por el método de kriging ordinario fue posible identificar áreas parciales con diferente variabilidad, así como la dirección de mayor variabilidad de la propiedad en función de la distancia. Con estos mapas fue posible realizar recomendaciones de manejo agronómico en función de la necesidad de cada zona de manejo específica cómo fue la recomendación de dosis de fertilizantes, dosis de cal dolomítica y, variedades tolerantes a la acidez sequía y excesos de humedad en el suelo. Por ejemplo, generar clases de P-Olsen (Figura 2).

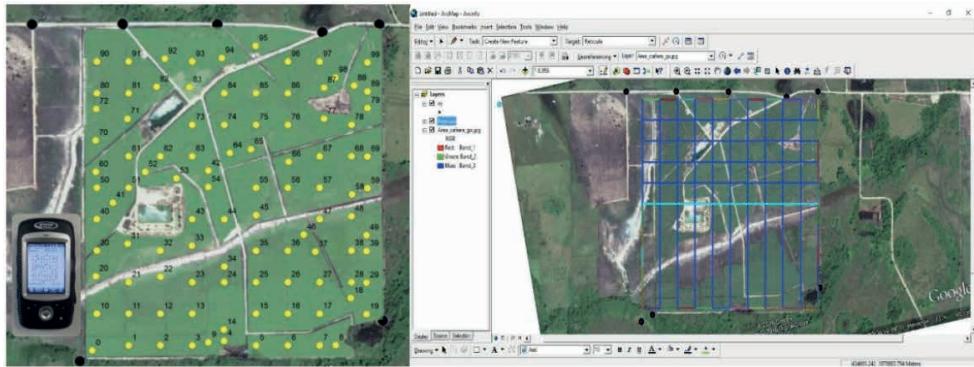


Figura 1. Detalles de trabajo en gabinete sobre el trazado de la grilla a 100 m y la delimitación de los parcelas cañeras y redistribución de los puntos de muestreo para su carga en un equipo GPS.

Fuente: Salgado *et al.* (2020).

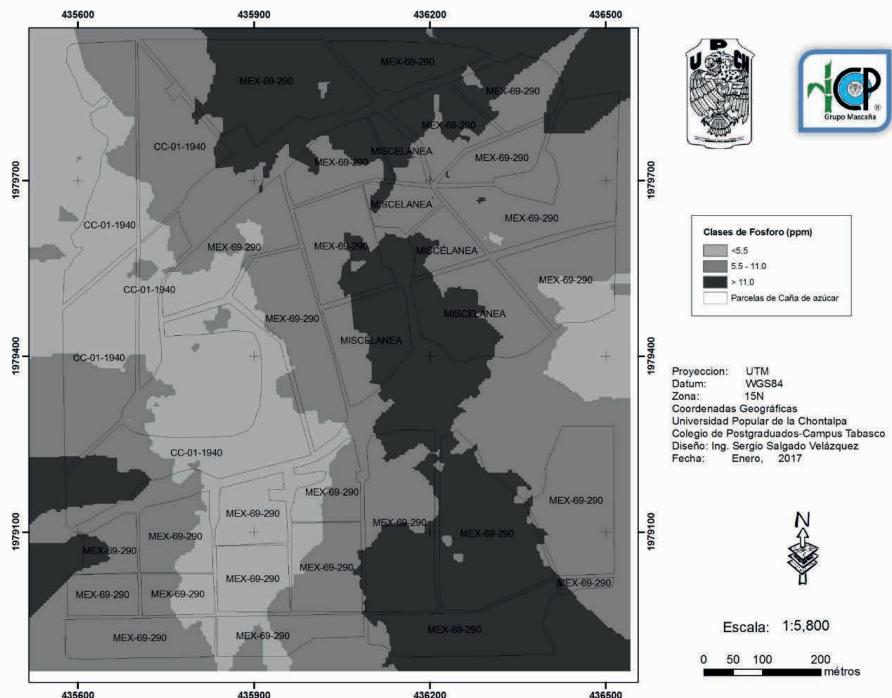


Figura 2. Mapa de la variabilidad espacial del fosforo Olsen (P-Olsen) en parcela cañeras establecidas en un suelo Acrisol de la región de la Chontalpa, Tabasco, México.

Otro estudio fue realizado en el cultivo de cacao establecido sobre un suelo Cambisol reportado por Salgado-Velázquez *et al.* (2021), quienes realizaron un muestreo en 42 puntos georreferenciados equidistantes a 40 m. Se elaboraron mapas de variabilidad geoestadística con los resultados del análisis químico de las propiedades del suelo, utilizando la técnica de interpolación Kriging ordinario. Se ajustaron modelos esféricos y gaussiano con errores muy pequeños <1%. Se encontró que el potencial hidrógeno (pH) (Figura 3a) y el porcentaje de saturación de acidez (PSA) (Figura 3b), mostraron alta variabilidad; el fósforo Olsen (P-Olsen) y los cationes intercambiables K, Ca y Mg presentaron variabilidad media, y el pH, la materia orgánica (MO), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el aluminio (Al) mostraron baja variabilidad. Las propiedades del suelo como el pH, el PSA, el P-Olsen intercambiable, el Ca y el Mg mostraron alta dependencia espacial (<25%), mientras que la MO, el K intercambiable y la CIC presentaron una dependencia espacial moderada (25–75%).

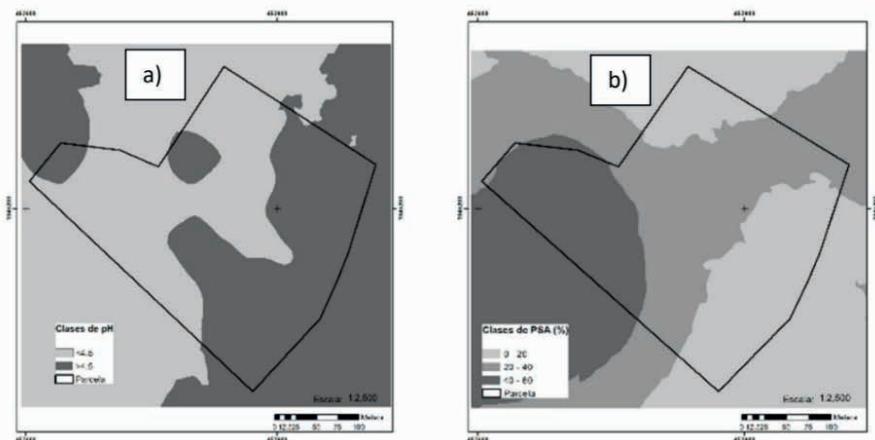


Figura 3. Mapa de la variabilidad espacial: a) potencial hidrogeno (pH) y b) porcentaje de saturación de bases de la región de la Chontalpa, Tabasco, México.

Un estudio realizado por López-Castañeda *et al.* (2022), tuvo como objetivo desarrollar un mapa digital de fertilidad del suelo, considerando el perfil completo, para una mejor gestión de fertilizantes y enmiendas. Se utilizaron un modelo digital de elevación, datos de 44 perfiles de suelo, análisis geoestadístico y SIG. Los mejores modelos espaciales se lograron para CEC, pH, Ca, Mg, Na y K (Figura 4). La clasificación de fertilidad (muy baja a muy alta) se basó en CEC y pH. Este proceso permite traducir la clasificación taxonómica del suelo en información geográfica útil para la agricultura de precisión.

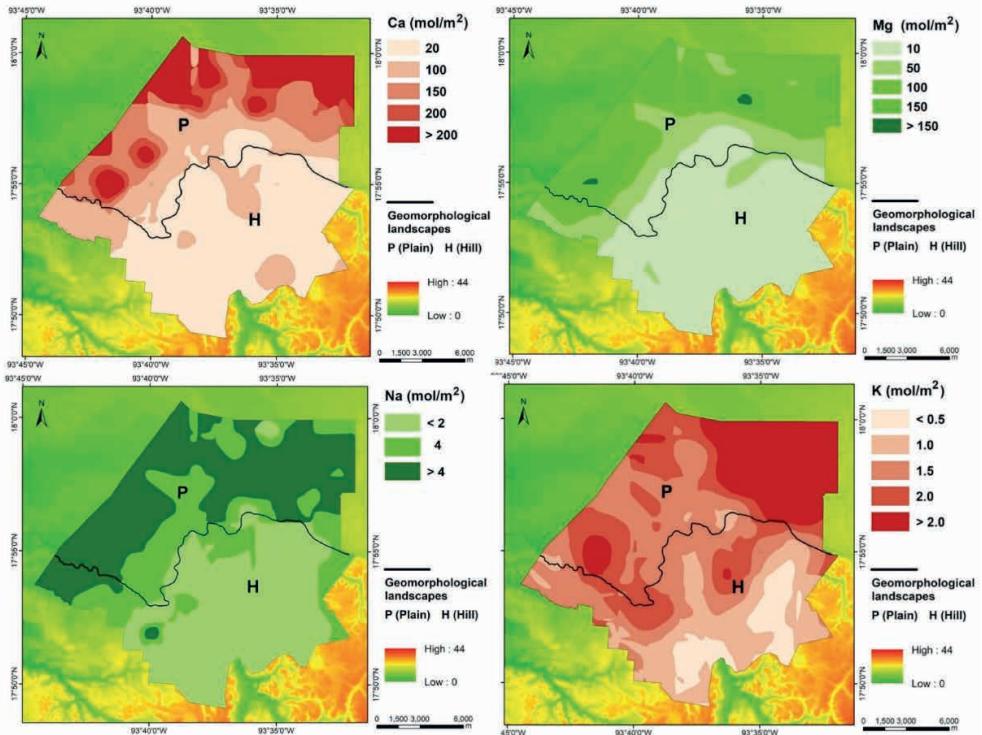


Figura 4. Mapa de la variabilidad espacial de cationes intercambiables en los municipios de Huimanguillo y Cárdenas de la región de la Chontalpa, Tabasco, México.

Fuente: López-Castañeda *et al.* (2022).

3.2.2 Estudios sobre la zonificación de suelos.

Los estudios de suelos a escala media permiten generar información confiable para planificar el uso agropecuario. Como una alternativa para acelerar la cartografía semi-detalizada de suelos, Zavala-Cruz *et al.* (2014), analizaron un transecto para conocer la distribución geográfica, la relación con el relieve y sus características físicas y químicas. Con base en la geomorfología de un área de 71,895.5 ha en Huimanguillo, Tabasco, y considerando la pendiente, altitud y uso citrícola, se describieron ocho perfiles en un transecto de 32 km de longitud, complementando con 21 perfiles en diferentes relieves. La clasificación y caracterización se fundamentaron en la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo y la NOM-021-RECNAT-2000. Los grupos de suelos representativos fueron los Acrisoles y Cambisoles, y se identificaron ocho subunidades que cubrían el 89.4 % de la superficie total. La posición baja de la terraza 1 (10–20 msnm) determinó el desarrollo de subunidades con problemas de drenaje interno como el Cambisol Ferrali-Glénico en llanuras aluviales y valles, y el Acrisol Umbri-Glénico en depresiones y cimas planas. La altura de la terraza 2 (20–60 msnm) y el relieve de lomeríos ligera a moderadamente

inclinados propiciaron la formación de Acrisoles Hiperdistri-Férricos, Umbri-Plínticos, Humi-Úmbrios, Humi-Plínticos y Ferri-Úmbrios, todos bien drenados (Figura 5). Los suelos son profundos y pobres en bases intercambiables; sin embargo, los Acrisoles Umbri-Plínticos, Humi-Plínticos y Humi-Úmbrios, que coinciden con las mayores áreas citrícolas, mostraron horizontes Ap más gruesos, mayor contenido de materia orgánica y menor acidez, lo cual indica un mejor estado de conservación del suelo.

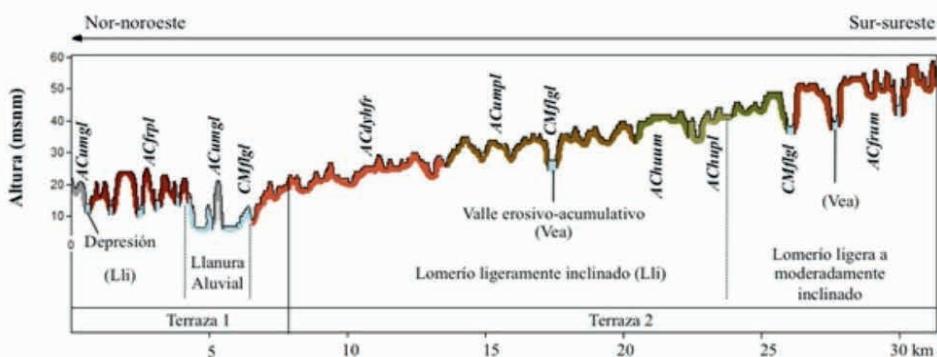


Figura 5. Transecto de suelos en la Terraza de Huimanguillo, Tabasco.

Fuente: Zavala-Cruz et al. (2014).

Un estudio para generar dosis de fertilizantes con base a las propiedades del suelo en el cultivo de limón persa fue realizado por Salgado-García *et al.* (2016), quienes emplearon el Sistema Integrado para Recomendar Dosis de Fertilización (SIRDF) con el fin de diseñar un programa de fertilización sostenible para plantaciones de cítricos en la Sabana de Huimanguillo, Tabasco, México. Para la implementación del SIRDF, se recopilaron datos climáticos locales, se analizaron las propiedades físicas y químicas del suelo, y se estimó la demanda de nutrientes del limón Persa y la naranja Valencia para diez elementos, considerando su potencial productivo. Las dosis de fertilizantes para nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) fueron definidas para cada subunidad de suelo. Los resultados indicaron que las temperaturas locales son favorables para el cultivo de cítricos; sin embargo, la baja precipitación registrada entre febrero y mayo limita su producción. Se identificaron dos principales grupos de suelo, Acrisoles y Cambisoles, ambos con disponibilidad restringida de nutrientes para los cultivos. Según el SIRDF, las recomendaciones de fertilización para el limón Persa fueron: 207-69-240 para Acrisoles Distri-Hiperféricos; 207-69-300 para Acrisoles Ferri-Plínticos; 184-69-240 para Acrisoles Humi-Plínticos, Humi-Úmbrios y Umbri-Plínticos; y 230-92-300 para Acrisoles Umbri-Gléyicos. Para la naranja Valencia, las dosis sugeridas fueron: 115-46-120 para Acrisoles Distri-Hiperféricos; 138-46-180 para Acrisoles Ferri-Plínticos, Humi-Plínticos y Humi-Úmbrios; 138-46-150 para Acrisoles Ferri-Úmbrios y Umbri-Gléyicos; 115-46-180 para Acrisoles Gleyi-Plínticos; y 115-46-150 para Acrisoles Umbri-Plínticos (Figura 6).

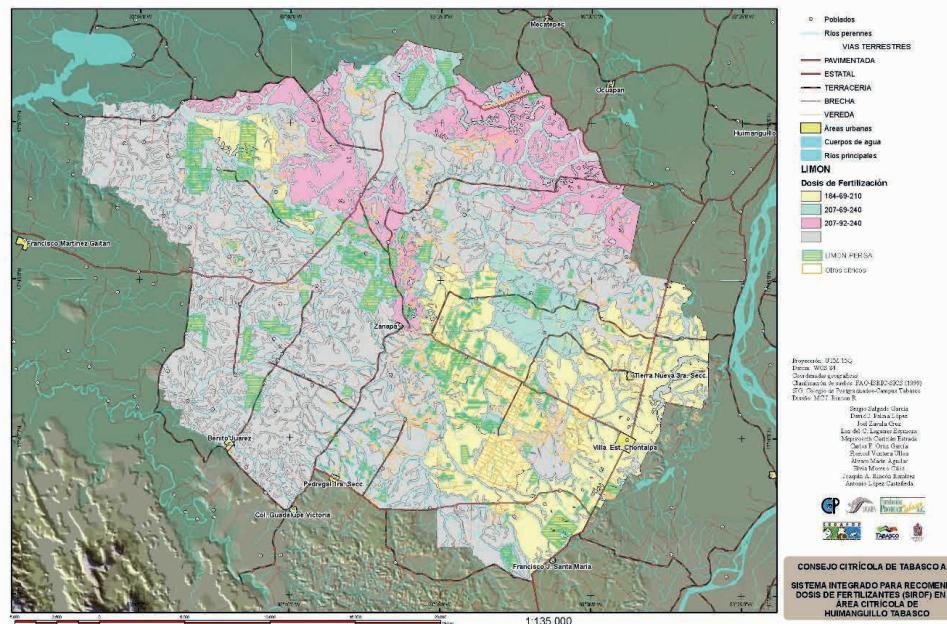


Figura 6. Mapa de dosis de fertilizantes para limón Persa generados en base a perfiles de suelos y SIG para la zona citrícola de Huimanguillo, Tabasco.

Fuente: Salgado-García *et al.* (2016).

3.2.3 Estudios sobre la predicción del rendimiento.

En Tabasco, México, en la región de la Chontalpa, se encuentra el Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ), es el de mayor importancia en el estado; cuenta con una superficie cultivada de 27, 295 hectáreas y con un rendimiento promedio de 43.3 t ha^{-1} , inferior a la media nacional de 58.9 t ha^{-1} (CONADESUCA, 2025). En el IPBJ, el seguimiento de la maduración y el estimado de la producción de la caña de azúcar se realiza a través de muestreos destructivos de los tallos de caña de azúcar, un costo elevado de análisis de laboratorio y mano de obra. En este sentido, los sensores remotos son una herramienta importante para generar datos de los campos agrícolas permitiendo el monitoreo espacial y temporal a grandes y pequeñas escalas. Recientemente, se ha explorado el uso de sensores remotos con imágenes de alta resolución del Sentinel 2 para monitorear y predecir parámetros de calidad de jugos y rendimiento de tallos de caña de azúcar en la zona de la Chontalpa, Tabasco, México, donde Salgado-Velázquez (2024), tuvieron objetivo principal fue estimar parámetros de calidad del jugo y el rendimiento de caña de azúcar a través de los índices de vegetación (IVs) derivados del satélite Sentinel 2 y el modelado con técnicas de machine learning. En la Figura 6, se visualiza el índice de vegetación mejorado (EVI, siglas en inglés).



Figura 7. Mapa del índice de vegetación EVI en diferentes meses del ciclo de caña de azúcar en la región de la Chontalpa, Tabasco, México.

Fuente: Salgado-Velázquez (2024).

Los modelos aplicados a la base de datos para la calidad del jugo y el rendimiento de caña de azúcar fueron random forest (RF), máquina de vector de soporte (SVM) y la regresión lineal múltiple (MLR). Se determinó que las características espectrales ofrecen a las partes interesadas marcadores confiables para monitorear y mapear los °Brix (Figura 8) y la biomasa de tallo (Figura 9).

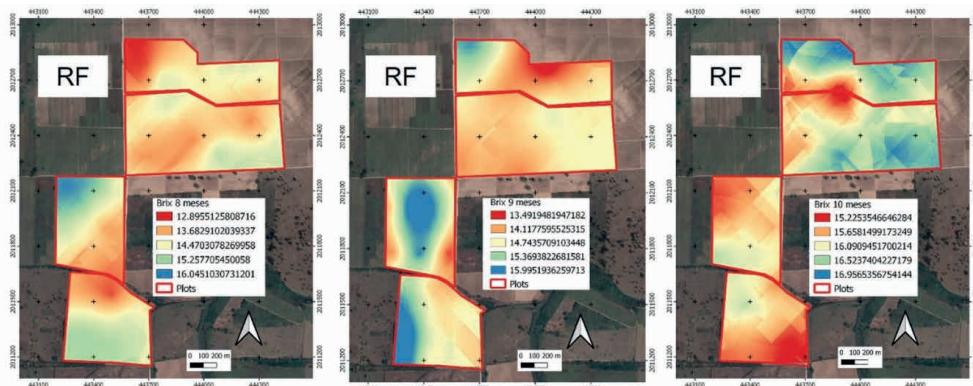


Figura 8. Mapa de estimaciones de los grados brix (°B) de caña de azúcar con el uso de Sentinel 2 y el modelo random forest (RF) en la región de la Chontalpa, Tabasco, México.

Fuente: Salgado-Velázquez (2024).

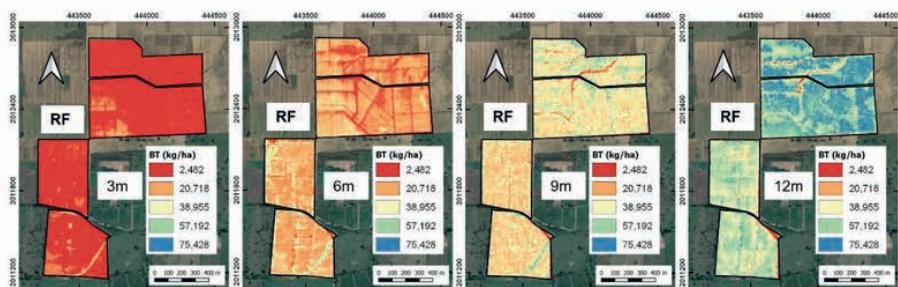


Figura 9. Mapa de predicciones del rendimiento de tallos (BT) de caña de azúcar con el uso de Sentinel 2 y el modelo random forest (RF) en la región de la Chontalpa, Tabasco, México

Fuente: Salgado-Velázquez (2024).

Se encontró que el modelo de random forest presentó el mejor rendimiento con valores de $0.75 < R^2 < 0.95$ y RMSE de 0.71 a 1.28 °Brix y para sacarosa de $0.72 < R^2 < 0.75$ y RMSE de 0.73 a 1.02%. El enfoque de machine learning con el algoritmo de RF permitió el desarrollo de modelos predictivos de los componentes del rendimiento para campos comerciales de caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco, México. El uso de bandas espectrales superó en cuanto a correlaciones y fueron más influyentes en las explicaciones de los modelos que a los IVs derivados del Sentinel-2. Asimismo, se encontró que la temperatura máxima y la radiación solar fueron las variables de mayor importancia en los modelos. Además, la regresión RF mostró una mayor precisión (RMSE más bajo y R^2 más alto) en comparación con un modelo tradicional de MLR. En general, los patrones espaciales se detectaron con éxito a nivel de campo utilizando datos remotos de alta resolución con análisis de series temporales y la técnica ML.

3.2.4 Estudios sobre la zonificación de cultivos.

La zonificación agroecológica puede ser una etapa previa o insumo para la agricultura de precisión, especialmente cuando se usa para seleccionar zonas aptas para aplicar tecnologías de manejo sitio-específico. En estudios como los realizados en la Chontalpa, Tabasco, donde se usan mapas digitales de suelo y análisis SIG para delimitar áreas de manejo diferenciado, la zonificación se convierte en una herramienta aplicada dentro del enfoque de agricultura de precisión. Un trabajo llevado a cabo por González *et al.* (2015) tuvo el objetivo de determinar las zonas aptas con diferentes aptitudes agroecológicas, para establecer el cultivo de Jatropha curcas en el estado de Tabasco. Para ello se definieron cuatro tipos de aptitud: óptima, adecuada, marginal por déficit térmico e hídrico, y marginal por exceso térmico e hídrico. Al realizar el álgebra de mapas entre las aptitudes óptimas climáticas (temperatura, precipitación y periodo de crecimiento) y edafológicas, se obtuvieron 833 181 ha con aptitud agroecológica óptima (Figura 10), por lo que en el estado de Tabasco es factible cultivar esta oleaginosa para producir biocombustibles.

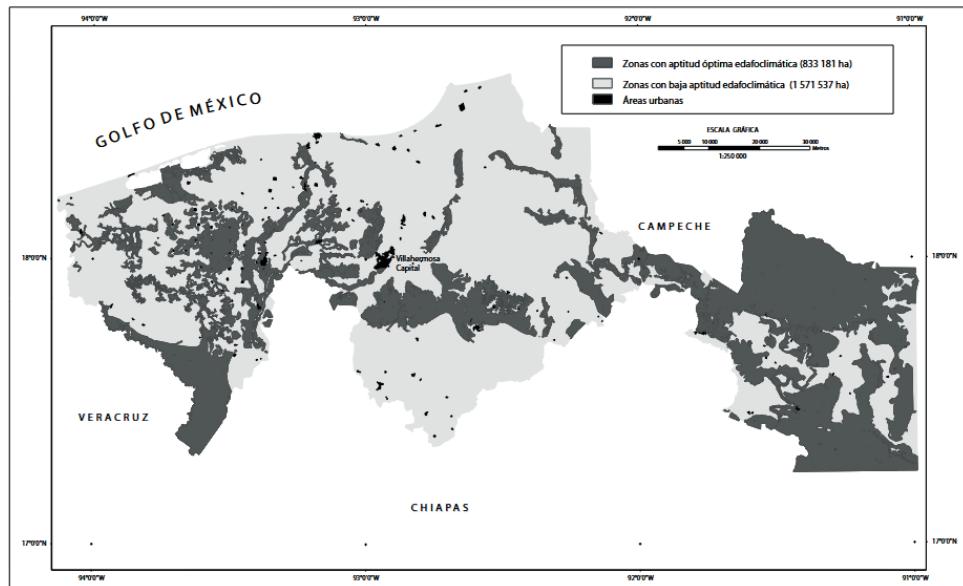


Figura 10. Zonas con aptitud óptima edafoclimática para cultivar *Jatropha curcas L.*, en Tabasco, México.

Fuente: González *et al.* (2015).

Otro estudio desarrollado por Salgado-Velázquez *et al.* (2025), tuvo el de evaluar la idoneidad del cultivo comercial de arroz en el estado de Tabasco, México, mediante el modelo EcoCrop, con el fin de mejorar las decisiones de manejo en el cultivo. Se realizó un análisis de idoneidad de cultivos utilizando dicho modelo, empleando datos de temperatura, radiación solar, humedad y precipitación provenientes de la base de datos WorldClim (2023) para el período 1960–2010, con una resolución espacial de 1 km². La información edáfica se obtuvo del INEGI (2023), y el modelado se llevó a cabo en R Studio utilizando las librerías terra, geodata y Recocrop. Los resultados mostraron la capacidad de la región para abastecer la demanda nacional de arroz, identificando zonas con alta idoneidad climática para el crecimiento óptimo del cultivo (Figura 11). Se recomienda realizar simulaciones para escenarios futuros en las áreas actualmente identificadas como aptas, con el fin de establecer estrategias de producción más robustas. El estudio resalta el potencial considerable de este enfoque para evaluar problemáticas relacionadas con la seguridad alimentaria a nivel mundial y regional, así como para identificar limitaciones climáticas relevantes.

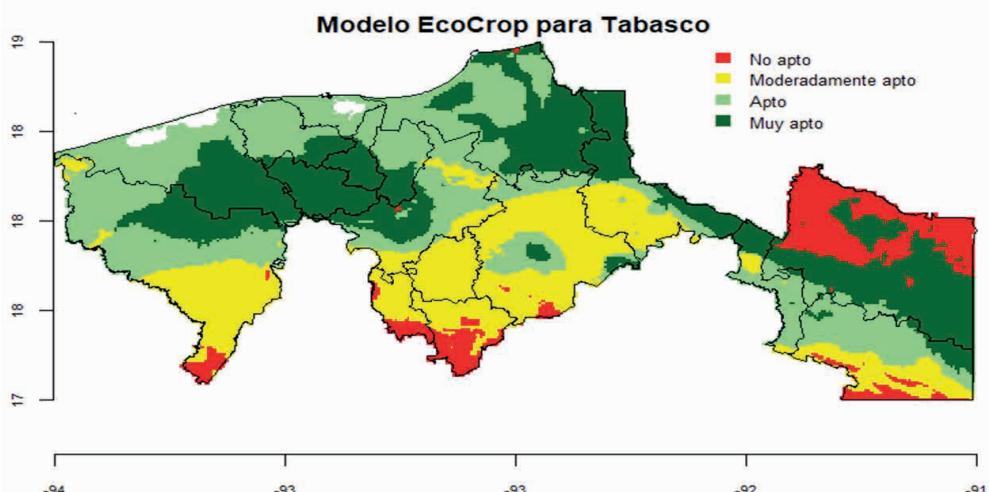


Figura 11. Zonas idóneas para cultivar arroz en Tabasco por medio del modelo Ecocrop.

Fuente: Salgado-Velázquez *et al.* (2024).

4. CONCLUSIÓN

La agricultura de precisión en la región de la Chontalpa ha tenido avances significativos en términos de investigación, principalmente en cartografía de suelos, percepción remota y SIG. Existe una creciente base de conocimiento científico, pero aún es limitada en términos de diversidad de cultivos, validación de tecnologías y escalamiento a nivel comercial. La aplicación de geoestadística y análisis espacial ha demostrado ser fundamental para mejorar la gestión agrícola en zonas con alta variabilidad edafoclimática. Se requiere fortalecer la colaboración entre instituciones académicas, gubernamentales y productores, así como facilitar el acceso a tecnologías. Futuros estudios deben enfocarse en la integración de datos multitemporales, inteligencia artificial y plataformas de código abierto para desarrollar sistemas de soporte a la toma de decisiones agrícolas adaptados a Tabasco.

5. REFERÊNCIAS

Barbosa Júnior, R. G., Monteiro, L. A., Oliveira, R. A. d., Silva, B. M., da Silva, J. D., and da Silva Júnior, C. A. 2022. UAVs to Monitor and Manage Sugarcane: Integrative Review. *Agronomy* 12(3): 661. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030661>

Chaudhari, R., Kothari, R., and More, P. 2022. Role of Remote Sensing and GIS in Sustainable Agriculture: A Review. *International Journal of Environment and Climate Change* 12(11): 3116–3124. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2022/v12i113136>

Li, L., Zhang, Q., and Huang, D. 2019. A Review of Imaging Techniques for Plant Phenotyping. *Sensors* 14(11): 20078–20111. <https://doi.org/10.3390/s141120078>

Martínez, L. E., Gómez, H., and Ramírez, R. 2021. Adaptation and resilience of agricultural systems to local climate change and extreme events: An integrative review. *Revista de Ciencias Ambientales* 55(2): 145–160. <https://www.redalyc.org/journal/2530/253070366040/>

Mier-Tous, J., Ramírez-Sánchez, M. P., and Ríos-Cruz, D. 2023. Una revisión preliminar de la literatura sobre los retos en la agricultura sostenible de América Latina. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones* 3(2): 85–100. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/bilo/article/view/4878>

Salgado-García, S., Palma-López, D. J., Zavala-Cruz, J., Córdova-Sánchez, S., Castelán-Estrada, M., Lagunes-Espinoza, L. D. C., and Rincón-Ramírez, J. A. 2016. Programa de fertilización sustentable para plantaciones de cítricos en Tabasco, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios* 3(9): 345–356.

Salgado-García, S., Salgado-Velázquez, S., Palma-López, D. J., Zavala-Cruz, J., Córdova-Sánchez, S., Rincón-Ramírez, J. A., and Hernández-Nataren, E. 2021. Soil fertility classification for sugarcane in supply areas of a sugar mill. *Agro Productividad*: 14(10). DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i10.1703>

Salgado-Velázquez, S., Acopa Colorado, J., Salgado García, S., Córdova Sánchez, S., Palma López, D., Rincón Ramírez, J. A., and López Castañeda, A. 2021. Spatial variability of some chemical properties of a Cambisol soil with cocoa (*Theobroma cacao L.*) cultivation. *Agro Productividad* 14(1): 43-49. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i1.1706>

Salgado-Velázquez, S., Olvera-Rincón, F., Ramos-López, D. R., Hernández-Lara, P. U., Inurreta-Aguirre, H. D., and Palma-Cancino, D. J. 2025. EcoCrop model approach for agroclimatic suitability of rice (*Oryza sativa L.*) cultivation. *Agro Productividad*.

Salgado-Velázquez, S., Salgado-García, S., Rincón-Ramírez, J. A., Ro-drigues Jr, F. A., Palma-López, D. J., Córdova-Sánchez, S., and López-Castañeda, A. 2020. Spatial variability of soil physicochemical properties in agricultural fields cultivated with sugarcane (*Saccharum officinarum L.*) in Southeastern Mexico. *Sugar Tech* 22(1): 65–75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00742-9>

Salgado-Velázquez, Sergio. 2024. Índices de vegetación para determinar la calidad del jugo y rendimiento de caña de azúcar. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Cárdenas, Tabasco, México.

Sánchez-Jiménez, M., Espinoza, L. D. C. L., López, D. J. P., Sánchez, S. C., Pech, R. G. A., and Salgado-Velázquez, S. 2024. Producción de biomasa e índices fisiológicos de cultivares de caña de azúcar en diferentes subunidades de suelos. *Acta Agrícola y Pecuaria* 10(1):6. DOI: <https://doi.org/10.30973/aap/2024.10.0101007>

Shamshad, A., Akram, W., Shahid, M., and Sulaiman, S. 2023. GIS-Based Precision Agriculture for Efficient Crop Monitoring: A Case Study. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering (IJISAE)* 11(3): 542–548. <https://doi.org/10.18201/ijisae.2023.316>

Zavala Cruz, J., Salgado García, S., Marín Aguilar, Á., Palma López, D. J., Castelán Estrada, M., and Ramos Reyes, R. 2014. Transecto de suelos en terrazas con plantaciones de cítricos en Tabasco. *Ecosistemas y recursos agropecuarios* 1(2): 123-137.