

# Monitoreo regional del estrés hídrico en cultivos de cítricos mediante imágenes hiperespectrales Prisma e Inteligencia Artificial en el centro-norte de Veracruz

**RESUMEN:** El estrés hídrico constituye uno de los principales factores que afectan la productividad y sostenibilidad de los cultivos de cítricos en regiones con alta variabilidad climática. En el centro-norte del estado de Veracruz, México, la disponibilidad irregular de agua ha incrementado la vulnerabilidad de estos sistemas agrícolas, haciendo necesaria la implementación de herramientas de monitoreo más eficientes. En este trabajo se propone una metodología para el análisis del estrés hídrico en cultivos de cítricos mediante el uso de imágenes hiperespectrales del satélite PRISMA y técnicas de inteligencia artificial. La metodología contempla la adquisición de datos hiperespectrales en los rangos VNIR y SWIR, su preprocesamiento, la generación de índices espectrales sensibles al contenido de agua y la aplicación de modelos de aprendizaje profundo para la identificación de patrones asociados al estrés hídrico. Como resultados esperados, se plantea la obtención de mapas temáticos que permitan identificar zonas con distintos niveles de estrés hídrico a escala regional. El enfoque propuesto busca contribuir al desarrollo de herramientas de agricultura de precisión orientadas a una gestión más eficiente del recurso hídrico y al fortalecimiento de la producción citrícola sostenible.

**PALABRAS CLAVE:** Agricultura de precisión, estrés hídrico, cítricos, imágenes hiperespectrales, satélite PRISMA, inteligencia artificial.



## Colaboración

Luis Enrique Gómez Guerrero; Irahan Otoniel José Guzmán; Ojilve Ramón Medrano Pérez; Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Isaías Avendaño Cortes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Huatusco

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

**ABSTRACT:** Water stress is one of the main factors affecting the productivity and sustainability of citrus crops in regions with high climatic variability. In the central-northern region of the state of Veracruz, Mexico, irregular water availability has increased the vulnerability of these agricultural systems, making the implementation of more efficient monitoring tools necessary. This work proposes a methodology for the analysis of water stress in citrus crops using hyperspectral images from the PRISMA satellite and artificial intelligence techniques. The methodology includes the acquisition of hyperspectral data in the VNIR and SWIR ranges, image preprocessing, the generation of spectral indices sensitive to water content, and the application of deep learning models for the identification of patterns associated with water stress. As expected results, the generation of thematic maps is proposed to identify areas with different levels of water stress at a regional scale. The proposed approach aims to contribute to the development of precision agriculture tools oriented toward more efficient water resource management and the strengthening of sustainable citrus production.

**KEYWORDS:** Precision agriculture, water stress, citrus crops, hyperspectral imagery, PRISMA satellite, artificial intelligence.

## INTRODUCCIÓN

El estrés hídrico constituye uno de los principales factores que afectan la productividad y sostenibilidad de los cultivos agrícolas, especialmente en especies perennes como los cítricos, donde la disponibilidad de agua influye directamente en procesos fisiológicos clave como la fotosíntesis, la transpiración y el crecimiento vegetativo [7]. La reducción prolongada del contenido hídrico en las plantas genera alteraciones metabólicas que impactan negativamente el rendimiento y la calidad del fruto. En regiones con alta variabilidad climática, como el centro-norte del estado de Veracruz, la irregularidad en la preci-

pitación y el aumento en la frecuencia de periodos secos han incrementado la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas, haciendo necesaria la implementación de herramientas de monitoreo más oportunas y escalables.

Tradicionalmente, el monitoreo del estado hídrico de los cultivos se ha basado en mediciones puntuales en campo, tales como sensores de humedad del suelo, evaluación visual del follaje o mediciones fisiológicas localizadas. Si bien estas técnicas ofrecen información directa, presentan limitaciones significativas en términos de cobertura espacial, continuidad temporal y capacidad de anticipación ante escenarios de variabilidad climática creciente [8]. En sistemas agrícolas extensivos y heterogéneos, como los del centro-norte de Veracruz, estos métodos resultan insuficientes para capturar patrones regionales de estrés hídrico y para detectar alteraciones fisiológicas tempranas antes de que los síntomas sean visibles.

En este contexto, la percepción remota hiperespectral ha demostrado un alto potencial para identificar variaciones fisiológicas asociadas al contenido de agua en la vegetación, mediante el análisis detallado de la respuesta espectral en múltiples longitudes de onda [3]. En particular, las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta (SWIR) permiten detectar cambios sutiles en la reflectancia relacionados con la absorción de agua en los tejidos vegetales. Índices espectrales como el Normalized Difference Water Index (NDWI) han sido ampliamente utilizados como indicadores sensibles al estado hídrico de la vegetación [5].

La misión satelital PRISMA proporciona imágenes hiperespectrales en los rangos VNIR y SWIR con alta resolución espectral, lo que la convierte en una herramienta adecuada para el monitoreo agrícola a escala regional [1]. Asimismo, los avances recientes en técnicas de aprendizaje profundo han permitido mejorar la clasificación de patrones complejos en datos hiperespectrales, integrando información espectral y espacial de manera simultánea [6].

A pesar de estos avances, existe una brecha técnica en la aplicación sistemática de imágenes hiperespectrales satelitales para el monitoreo regional del estrés hídrico en cultivos perennes bajo condiciones de alta heterogeneidad ambiental, particularmente en regiones citrícolas como el centro-norte del estado de Veracruz. La mayoría de los estudios previos se han centrado en análisis experimentales localizados o en cultivos anuales, sin evaluar de manera integral el potencial de plataformas hiperespectrales satelitales combinadas con inteligencia artificial en contextos regionales.

En este sentido, la pregunta de investigación que guía este estudio es:

¿Puede la combinación de imágenes hiperespectrales del satélite PRISMA y modelos de aprendizaje profun-

do mejorar la detección temprana del estrés hídrico en cultivos de cítricos a escala regional, en comparación con métodos tradicionales basados en mediciones puntuales en campo?

Bajo esta premisa, se plantea como hipótesis que la integración de datos hiperespectrales PRISMA e inteligencia artificial permite identificar patrones espectrales asociados al estrés hídrico con mayor precisión y anticipación que los enfoques convencionales.

El objetivo de este trabajo es proponer y evaluar una metodología cuantitativa para el monitoreo regional del estrés hídrico en cultivos de cítricos mediante el uso de imágenes hiperespectrales del satélite PRISMA y técnicas de inteligencia artificial, orientada al apoyo de prácticas de agricultura de precisión y a la gestión eficiente y sostenible del recurso hídrico.

### Problema de Investigación

El problema científico que motiva esta investigación radica en la ausencia de metodologías regionales basadas en datos hiperespectrales satelitales que permitan el monitoreo temprano y sistemático del estrés hídrico en cultivos perennes bajo condiciones de alta heterogeneidad ambiental.

En el centro-norte del estado de Veracruz, la producción citrícola se desarrolla en un contexto caracterizado por variabilidad climática interanual, diferencias edafológicas y diversidad en prácticas de manejo agrícola. En este entorno, los métodos tradicionales de medición puntual en campo resultan insuficientes para capturar patrones espaciales amplios de estrés hídrico y para anticipar alteraciones fisiológicas antes de que los síntomas sean visibles [8]. Estas limitaciones dificultan la toma de decisiones oportunas relacionadas con el manejo del riego y la gestión eficiente del recurso hídrico.

Si bien la percepción remota multiespectral ha sido utilizada para el monitoreo agrícola, su capacidad para discriminar variaciones sutiles en el contenido de agua vegetal es limitada en comparación con plataformas hiperespectrales que incluyen bandas en el rango SWIR [3], [5]. Asimismo, aunque la inteligencia artificial ha mostrado avances en la clasificación de datos hiperespectrales [6], su aplicación integrada al análisis regional del estrés hídrico en cultivos perennes en México sigue siendo incipiente.

En consecuencia, existe una brecha técnica en la implementación de enfoques que combinen imágenes hiperespectrales satelitales y modelos de aprendizaje profundo para la detección temprana del estrés hídrico en sistemas citrícolas regionales. Atender esta brecha permitiría avanzar hacia esquemas de monitoreo agrícola más precisos, escalables y orientados a la agricultura de precisión.

## Área de estudio

El área de estudio se localiza en la zona centro-norte del estado de Veracruz, particularmente en regiones con alta presencia de cultivos de cítricos, donde la actividad agrícola representa un componente relevante de la economía local. Esta zona (Figura 1) se caracteriza por una marcada variabilidad climática interanual, con periodos de sequía recurrentes que afectan la disponibilidad de agua para riego y el desarrollo fisiológico de los cultivos.

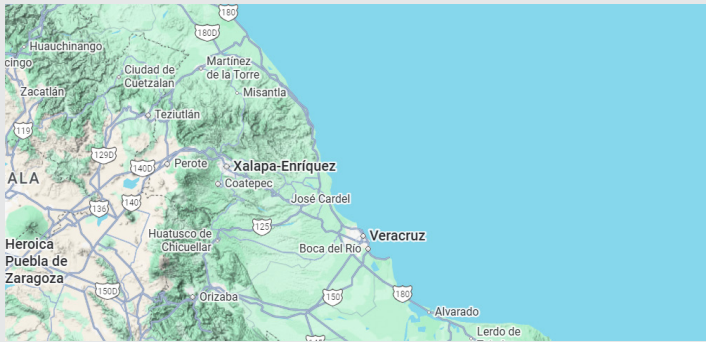


Figura 1. Localización del área de estudio en la región centro-norte del estado de Veracruz, México.

Fuente: Google Maps.

Las condiciones edafológicas, topográficas y de manejo agrícola presentan una alta heterogeneidad espacial, lo que convierte a esta región en un escenario adecuado para evaluar metodologías de monitoreo del estrés hídrico basadas en percepción remota. Asimismo, la escala regional del área de estudio permite analizar la viabilidad del uso de datos hiperespectrales satelitales como alternativa frente a métodos tradicionales de monitoreo puntual en campo [2].

## Contexto de aplicación de la metodología

La región citrícola del centro-norte del estado de Veracruz se selecciona como contexto de aplicación de la metodología propuesta debido a su alta variabilidad en la disponibilidad del recurso hídrico y a la importancia estratégica de los cítricos dentro de la producción agrícola regional. Estas condiciones convierten a la zona en un escenario adecuado para evaluar el potencial de las imágenes hiperespectrales satelitales como herramienta de monitoreo del estrés hídrico a escala regional.

Desde una perspectiva metodológica, este contexto permite analizar la capacidad de los datos hiperespectrales del satélite PRISMA para identificar los patrones espectrales asociados al contenido de agua en la vegetación, sin centrarse exclusivamente en el diagnóstico puntual a nivel de parcela. El enfoque adoptado prioriza la evaluación conceptual y analítica de la metodología, considerando que la resolución espacial de los sensores satelitales es especialmente adecuada para estudios regionales orientados a la agricultura de precisión [1].

Asimismo, la selección de esta región posibilita el análisis del desempeño de índices espectrales sensibles al contenido hídrico y de modelos de inteligencia artificial aplicados a datos hiperespectrales, en un entorno agrícola real con heterogeneidad en el manejo del riego y en las condiciones fisiológicas del cultivo. Este enfoque es consistente con estudios previos que destacan la utilidad de la percepción remota hiperespectral para el monitoreo del estrés hídrico en sistemas agrícolas extensos [3], [7].

De este modo, el contexto de aplicación no busca caracterizar de manera exhaustiva los cultivos de cítricos, sino evaluar la viabilidad del enfoque metodológico propuesto como una herramienta de monitoreo agrícola replicable en otras regiones con condiciones climáticas y productivas similares.

## Fuente de datos hiperespectrales

Para el desarrollo del estudio se consideran entre 4 y 6 escenas satelitales PRISMA correspondientes a periodos críticos de disponibilidad hídrica (temporada seca y transición estacional). Las escenas son seleccionadas bajo los siguientes criterios:

- Cobertura completa del área de estudio
- Nubosidad inferior al 10 %
- Coincidencia temporal con periodos de alta demanda evapotranspirativa
- Calidad radiométrica validada por los metadatos oficiales de la misión.

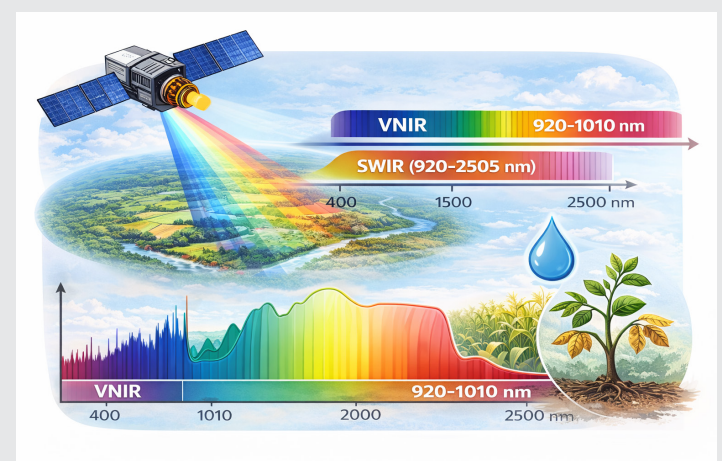


Figura 2. Esquema de la adquisición de información hiperespectral por el satélite PRISMA en superficies vegetadas.

Fuente: Elaboración propia.

El satélite PRISMA proporciona información espectral continua en los rangos VNIR (400–1010 nm) y SWIR (920–2505 nm), con alta resolución espectral y radiométrica (Figura 2), permitiendo capturar variaciones sutiles en la reflectancia asociadas al contenido hídrico en la vegetación [1], [3].

## Preprocesamiento de imágenes

Las imágenes hiperespectrales son sometidas a un

proceso sistemático (Figura 3) de preprocesamiento que incluye:

- Corrección radiométrica
- Eliminación de bandas afectadas por ruido
- Normalización espectral

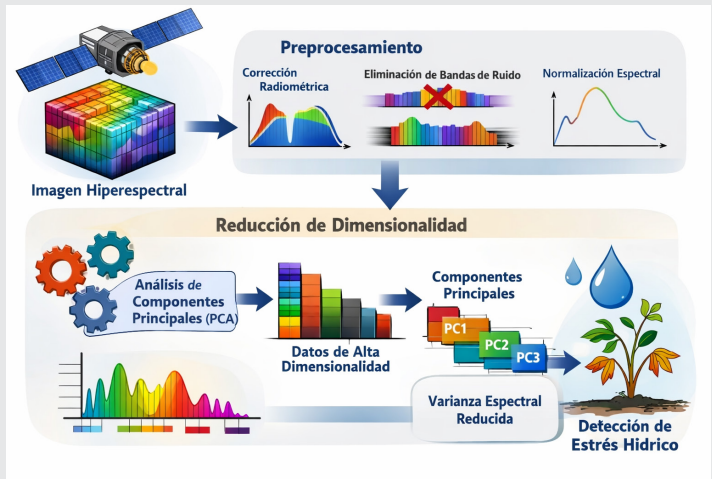


Figura 3. Esquema del preprocesamiento y reducción de dimensionalidad de imágenes hiperespectrales mediante PCA para la identificación del estrés hídrico.

Fuente: Elaboración propia con base en [4].

Debido a la alta dimensionalidad de los datos hiperespectrales, se aplica el Análisis de Componentes Principales (PCA) como técnica de reducción de dimensionalidad [4].

La selección del número de componentes principales se realiza considerando el porcentaje acumulado de varianza explicada, estableciendo un umbral mínimo del 95 % de varianza retenida, con el fin de garantizar la conservación de la información espectral relevante para el análisis del estrés hídrico.

Adicionalmente, se realiza un análisis estadístico descriptivo (media, varianza y desviación estándar) para evaluar la estabilidad espectral de las componentes seleccionadas y verificar la reducción efectiva de redundancia espectral.

### Ingeniería de variables e índices espectrales

A partir de los datos preprocesados se calculan índices espectrales sensibles al contenido de agua, entre ellos el Normalized Difference Water Index (NDWI) [5].

Estos índices permiten resaltar diferencias fisiológicas entre áreas con distintos niveles de disponibilidad hídrica y constituyen variables de entrada para los modelos de aprendizaje profundo. Se realiza un análisis comparativo preliminar entre los valores de NDWI obtenidos y los rangos reportados en la literatura para validar coherencia espectral [5], [7].

### Modelado con inteligencia artificial

El análisis del estrés hídrico se realiza mediante redes

neuronales convolucionales (CNN) adaptadas al tratamiento de datos hiperespectrales [6].

La arquitectura propuesta contempla:

- División del conjunto de datos en:
  - o 70 % entrenamiento
  - o 15 % validación
  - o 15 % prueba
- Función de pérdida: entropía cruzada categórica
- Optimizador: Adam
- Métrica principal de evaluación: precisión global
- Métricas complementarias: matriz de confusión, sensibilidad y especificidad

El entrenamiento se realiza bajo un esquema supervisado utilizando como referencia valores derivados de índices espectrales y conocimiento agronómico previo. Este enfoque permite evaluar la capacidad del modelo para identificar patrones espaciales asociados a distintos niveles de estrés hídrico [6].

### Flujo metodológico

El proceso metodológico general sigue una estructura secuencial que abarca desde el diseño conceptual del sistema, la adquisición de datos satelitales, el procesamiento y análisis de la información, hasta la generación de productos finales orientados a la toma de decisiones agronómicas. Este flujo se representa mediante un esquema metodológico (Figura 4), el cual sintetiza las principales etapas del estudio y facilita la comprensión integral del enfoque propuesto.



Figura 4. Flujo metodológico propuesto para el monitoreo del estrés hídrico en cultivos de cítricos a partir de imágenes hiperespectrales PRISMA e inteligencia artificial.

Fuente: Elaboración propia

### Limitaciones y alcances del enfoque propuesto

El enfoque metodológico propuesto presenta alcances relevantes, así como ciertas limitaciones inherentes al uso de imágenes hiperespectrales satelitales para el monitoreo del estrés hídrico en cultivos agrícolas. En términos de alcance, el uso de datos provenientes del satélite PRISMA permite realizar un análisis a escala regional, lo cual resulta adecuado para cultivos extensivos como los cítricos y para regiones con alta heterogeneidad ambiental, como el centro-norte del estado de Ve-

racruz. La elevada resolución espectral en los rangos VNIR y SWIR posibilita la identificación de variaciones fisiológicas sutiles asociadas al contenido de agua en la vegetación, incluso antes de que los síntomas de estrés sean evidentes a nivel visual [1], [3].

No obstante, una de las principales limitaciones del enfoque radica en la resolución espacial del sensor PRISMA, la cual puede restringir el análisis detallado a nivel de parcelas pequeñas o sistemas agrícolas altamente fragmentados. Esta condición puede generar mezclas espectrales en áreas donde coexisten diferentes coberturas del suelo, lo que debe ser considerado al interpretar los resultados [7]. Sin embargo, esta limitación no compromete el objetivo central del estudio, ya que el interés principal se orienta al monitoreo del estrés hídrico a escala regional y a la identificación de patrones espaciales generales.

Asimismo, la dependencia de condiciones atmosféricas favorables y la disponibilidad temporal de escenas libres de nubosidad representan un desafío común en estudios basados en percepción remota satelital. A pesar de ello, la integración de índices espectrales sensibles al contenido de agua y modelos de inteligencia artificial contribuye a mitigar estas limitaciones, fortaleciendo la robustez del análisis y ampliando el potencial de aplicación del enfoque propuesto en el contexto de la agricultura de precisión [5], [6].

## RESULTADOS

Se espera que el uso de imágenes hiperespectrales provenientes del satélite PRISMA permita identificar patrones espectrales asociados al estrés hídrico en cultivos de cítricos a escala regional, particularmente mediante el análisis de las bandas del rango SWIR, sensibles al contenido de agua en la vegetación (Figura 5) [1], [3]. Se anticipa que las diferencias en reflectancia espectral entre zonas con distinta disponibilidad hídrica sean estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), evidenciando variaciones fisiológicas coherentes con los procesos descritos en la literatura sobre estrés hídrico vegetal [7].

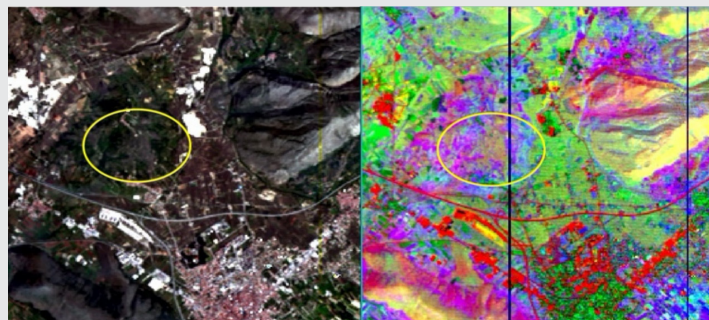


Figura 5. Comparación particular del PRISMA VNIR de *Alba Fucens* referida a la imagen RGB (izquierda) y PCA (derecha), donde se observan las diferencias estructurales del terreno y variaciones espectrales útiles para análisis avanzados.

Fuente: Recuperado de artículo [10].

En relación con los índices espectrales, se espera que el Normalized Difference Water Index (NDWI) presente diferencias cuantificables entre áreas clasificadas como bajo, medio y alto estrés hídrico. Se proyecta realizar un análisis estadístico comparativo mediante pruebas de diferencia de medias y análisis de varianza (ANOVA), con el fin de evaluar la coherencia de los valores obtenidos respecto a los rangos reportados en estudios previos [5]. Asimismo, se prevé calcular medidas de dispersión como desviación estándar y error estándar, las cuales permitirán representar la incertidumbre asociada a la clasificación espectral.

En cuanto al desempeño del modelo de inteligencia artificial, se espera que la red neuronal convolucional alcance una precisión global superior al 85 % en la clasificación de los niveles de estrés hídrico, con valores de sensibilidad y especificidad equilibrados entre clases. La evaluación se realizará mediante matriz de confusión, cálculo de F1-score y análisis de estabilidad del modelo a través del conjunto de validación [6]. Se prevé que la integración de información espectral completa (VNIR + SWIR) mejore el desempeño respecto a modelos basados únicamente en índices espectrales tradicionales.

Como producto final, se espera la generación de mapas temáticos de estrés hídrico con representación espacial de niveles de afectación, acompañados de métricas de incertidumbre. Estos mapas permitirán identificar zonas prioritarias para intervención agronómica, optimización del riego y gestión eficiente del recurso hídrico. Se anticipa que los resultados demuestren la viabilidad del uso de imágenes hiperespectrales PRISMA como alternativa metodológica superior frente a enfoques basados exclusivamente en sensores multispectrales convencionales [1], [5].

Finalmente, se espera que el análisis comparativo entre los resultados obtenidos y los reportados en la literatura científica permita validar la consistencia metodológica del enfoque propuesto, fortaleciendo su aplicabilidad en regiones agrícolas con alta heterogeneidad ambiental y variabilidad climática [3], [7].

## CONCLUSIONES

El presente trabajo propone una metodología cuantitativa basada en imágenes hiperespectrales del satélite PRISMA y técnicas de inteligencia artificial para el monitoreo regional del estrés hídrico en cultivos de cítricos del centro-norte del estado de Veracruz. A partir del análisis desarrollado, se concluye que la percepción remota hiperespectral, particularmente en los rangos VNIR y SWIR, ofrece un alto potencial para detectar variaciones fisiológicas asociadas al contenido de agua en la vegetación antes de que los síntomas sean perceptibles visualmente [3], [7].

El uso de bandas en el rango SWIR representa un aporte tecnológico relevante, ya que estas longitudes de onda están directamente relacionadas con procesos de absorción del agua en los tejidos vegetales. Esta capacidad permite mejorar la discriminación espectral entre distintos niveles de estrés hídrico en comparación con enfoques basados únicamente en datos multiespectrales tradicionales [5]. En este sentido, la misión PRISMA constituye una plataforma adecuada para el análisis regional del estado hídrico en sistemas agrícolas heterogéneos [1].

Asimismo, la integración de modelos de aprendizaje profundo permite avanzar hacia esquemas de clasificación automatizada que combinan información espectral y espacial, incrementando la precisión en la identificación de patrones asociados al estrés hídrico [6]. Este enfoque contribuye al desarrollo de herramientas metodológicas reproducibles y escalables para aplicaciones en agricultura de precisión.

Desde una perspectiva regional, la metodología propuesta tiene implicaciones relevantes para la gestión eficiente del recurso hídrico en zonas citrícolas sometidas a variabilidad climática creciente. La generación de mapas temáticos de estrés hídrico con soporte cuantitativo puede facilitar la toma de decisiones agronómicas relacionadas con riego, priorización de intervención y optimización de recursos, fortaleciendo la sostenibilidad productiva.

Finalmente, este estudio aporta evidencia metodológica sobre la viabilidad del uso de datos hiperespectrales satelitales combinados con inteligencia artificial para el monitoreo agrícola regional. Como líneas futuras de investigación, se plantea la incorporación de validación directa en campo, análisis multitemporal y comparación con sensores multiespectrales, con el fin de consolidar un modelo robusto para la evaluación del estrés hídrico en cultivos perennes bajo escenarios de cambio climático.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado a través del programa de becas que hace posible el desarrollo de este proyecto. De igual manera, expreso mi reconocimiento al Dr. Irahan Otoniel José Guzmán por su orientación, confianza y acompañamiento académico.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] P. Guanter et al., "The PRISMA Mission: Hyperspectral Satellite for Earth Observation," *Remote Sensing of Environment*, vol. 262, p. 112499, 2021.

[2] D. Turner et al., "UAVs and satellite remote sensing for mapping agricultural water stress," *Agricultural Water Management*, vol. 216, pp. 26–38, 2019.

[3] E. M. Hunt and C. S. T. Daughtry, "What good are hyperspectral measurements for agricultural remote sensing?" *Remote Sensing*, vol. 5, no. 8, pp. 3947–3966, 2013.

[4] J. A. Richards and X. Jia, *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, 5th ed. Berlin, Germany: Springer, 2013.

[5] B. C. Gao, "NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space," *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, no. 3, pp. 257–266, 1996.

[6] S. Feng, Y. Zhao, and X. Li, "Deep learning for crop stress classification using hyperspectral data," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 194, pp. 24–40, 2022.

[7] J. Flexas et al., "Plant responses to drought stress: From physiology to remote sensing," *Plant Science*, vol. 181, no. 1, pp. 1–20, 2009.

[8] D. Lu et al., "Remote sensing of agricultural drought monitoring: A review," *Agricultural Water Management*, vol. 233, p. 106102, 2020.

[9] G. Camps-Valls et al., "Advances in hyperspectral image classification: Earth monitoring with statistical learning methods," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 1, pp. 45–54, 2014.

[10] Alicandro, M., Candigliota, E., Dominici, D., Immordino, F., Masin, F., Pascucci, N., ... & Zollini, S. (2022). Hyperspectral PRISMA and Sentinel-2 preliminary assessment comparison in Alba fucens and sinuessa archaeological sites (Italy). *Land*, 11(11), 2070.

