Polo del Conocimiento

Pol. Con. (Edición núm. 109) Vol. 10, No 8
Agosto 2025, pp. 791-813
ISSN: 2550 - 682X
DOI: https://doi.org/10.23857/pc.v10i8.10183

Uso de índices de vegetación para la detección del estrés hídrico en cultivos: Una revisión sistemática de estudios basados en teledetección

Using vegetation indices for detecting water stress in crops: A systematic review of remote sensing-based studies

Utilização de índices de vegetação para deteção de stress hídrico em culturas: uma revisão sistemática de estudos baseados em deteção remota

Leonela Del Rocio De La A-Salinas [I]
ldelaa@uagraria.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-0320-4397

Jean Pierre Monserrate-Rodríguez [II]
jmonserraterodriguez@upse.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-9577-5807

Andrés Israel Medina-Robayo [III]
aimedina@uagraria.edu.ec
https://orcid.org/0009-0002-1804-3124

Byron Alexander Tobar-Cuesta [IV]
btobar@uagraria.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-5368-2792

Correspondencia: ldelaa@uagraria.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

*** Recibido:** 04 de junio de 2025 ***Aceptado:** 21 de julio de 2025 *** Publicado:** 12 de agosto de 2025

I. Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.
II. Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador.
III. Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.
IV. Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.

Resumen

Objetivo: analizar el uso de índices de vegetación para la detección del estrés hídrico en cultivos basados en teledetección**. Metodología:** se trata de una revisión sistemática de la literatura mediante bases de datos digitales de revistas indexadas y repositorios de universidades nacionales e internacionales, se incluyeron 23 publicaciones correspondientes al lapso 2020 – 2025. **Resultados:** se encuentran 08 estudios que indican que el índice de estrés hídrico de los cultivos (Crop Water Stress Index - CWSI) constituye un medio apropiado para la recolección de datos sobre el estrés hídrico mediante diversas modalidades de teledetección; se identifican 05 estudios para el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para determinar el estrés hídrico con el uso de diversas herramientas de detección remota, 10 publicaciones que emplearon varios tipos de índices de vegetación como el índice de Salud de la Vegetación (VHI), Índice de Sequía de la Vegetación (VDI); Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI); Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura (SIPI) y de índices de humedad como el Índice Diferencial de Agua Normalizado estrés hídrico índice (NDWI) y el denominado Moisture Stress Index– MSI o Índice de Estrés Hídrico basados en diversas tecnologías de teledetección de diferentes cultivos. **Conclusión:** se ha logrado establecer en el presente trabajo que los índices de vegetación para la detección del estrés hídrico en cultivos basados en teledetección pueden ser altamente efectivos para la estimación de las condiciones de riego en los diversos sistemas agrícolas para elevar el rendimiento productivo además de contribuir a mejorar las técnicas de la agricultura que debe ser cada vez más sostenible y resiliente al cambio climático actual.

Palabras clave: Cambio climático; estrés hídrico; cultivos; sostenibilidad; teledetección.

Abstract

Objective: To analyze the use of vegetation indices for the detection of water stress in crops based on remote sensing. Methodology: This is a systematic review of the literature using digital databases of indexed journals and repositories of national and international universities. 23 publications corresponding to the period 2020 - 2025 were included. Results: Eight studies are found that indicate that the Crop Water Stress Index (CWSI) constitutes an appropriate means for collecting data on water stress using various remote sensing modalities; Five studies are identified for the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to determine water stress with the use of

various remote sensing tools, 10 publications that used various types of vegetation indices such as the Vegetation Health Index (VHI), Vegetation Drought Index (VDI); Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI); Structure-Insensitive Pigmentation Index (SIPI) and moisture indices such as the Normalized Differential Water Index (NDWI) and the Moisture Stress Index (MSI) have been used based on various remote sensing technologies for different crops. Conclusion: This work has established that vegetation indices for detecting crop moisture stress based on remote sensing can be highly effective in estimating irrigation conditions in various agricultural systems to increase production yields and contribute to improving agricultural techniques, which must be increasingly sustainable and resilient to current climate change.

Keywords: Climate change; water stress; crops; sustainability, remote sensing.

Resumo

Objectivo: Analisar a utilização de índices de vegetação para detecção de stress hídrico em culturas com base em detecção remota. Metodologia: Trata-se de uma revisão sistemática da literatura com recurso a bases de dados digitais de revistas indexadas e repositórios de universidades nacionais e internacionais. Foram incluídas 23 publicações correspondentes ao período de 2020 a 2025. Resultados: São encontrados oito estudos que indicam que o Crop Water Stress Index (CWSI) constitui um meio apropriado para a recolha de dados sobre o stress hídrico utilizando diversas modalidades de deteção remota; Estão identificados cinco estudos para o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para a determinação do stress hídrico com a utilização de diversas ferramentas de deteção remota, 10 publicações que utilizaram vários tipos de índices de vegetação como o Vegetation Health Index (VHI), Vegetation Drought Index (VDI); Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI); Os Índices de Pigmentação Insensível à Estrutura (SIPI) e os índices de humidade, como o Índice Diferencial Normalizado da Água (NDWI) e o Índice de Stress Hídrico (MSI), têm sido utilizados com base em diversas tecnologias de deteção remota para diferentes culturas. Conclusão: Este trabalho estabeleceu que os índices de vegetação para deteção do stress hídrico nas culturas, com base na deteção remota, podem ser altamente eficazes na estimativa das condições de rega em diversos sistemas agrícolas, visando aumentar a produtividade e contribuir para a melhoria das técnicas agrícolas, que devem ser cada vez mais sustentáveis e resilientes às alterações climáticas atuais.

Palavras-chave: Alterações climáticas; stress hídrico; culturas; sustentabilidade; deteção remota.

Introducción

Las actividades productivas como la agricultura son esenciales para alcanzar los objetivos de seguridad alimentaria y la nutrición mundial, por ello es importante mencionar que para alcanzar el aprovisionamiento de la diversidad de productos alimenticios que demanda la población, el sector agrícola necesita utilizar grandes volúmenes de agua, lo cual en el contexto actual de cambio climático pone gran presión en el equilibrio de recursos hídricos, toda vez que dicho fenómeno está alterando los patrones climáticos y perturbando el equilibrio natural que ha traído consigo una acentuación de los períodos de sequía, entre otros complejos problemas ambientales, que determinan algún grado de estrés hídrico que impacta los cultivos de alimentos.

En torno a lo expuesto, Alotaibi (2023) indica que el cambio climático plantea graves amenazas para la agricultura y la seguridad alimentaria, y los fenómenos meteorológicos extremos han reducido la productividad agrícola en todo el mundo. En alguna medida muchos sistemas de cultivo alrededor del globo se han visto perjudicado por el estrés hídrico intensificado por los cambios de temperatura planetaria, con respecto a ello, el reporte de la Fundación Somos Agua o We Are Water Foundation (2023) indica, esencialmente que el impacto de la sequía influye en el estrés hídrico y, en consecuencia, plantea problemas para las actividades ya sea de la agricultura y ganadería claramente fundamentales para el soporte de la seguridad alimentaria. Asimismo, el referido reporte da cuenta que el 60% de la agricultura del mundo ya se enfrenta a un estrés hídrico extremadamente alto, en particular la caña de azúcar, el trigo, el arroz y el maíz, cultivos clave en buena parte de los países pobres (WeAreWater Foundation, 2023).

La escasez del recurso hídrico en un escenario de cambio climático obliga a aumentar la eficiencia de uso del agua, utilizando métodos de riego localizados y de alta eficiencia, así como realizar programaciones de riego más precisas y diferenciales según el tipo de suelo (Quezada et al., 2020). Dado que la agricultura representa aproximadamente el 70 % de la extracción mundial de agua, es fundamental utilizarla de la manera más eficiente para obtener el máximo rendimiento y la máxima producción de alimentos. Se ha demostrado que la gestión del agua y el riego basados en el estrés hídrico de las plantas no solo ahorran agua, sino que también aumentan el rendimiento (Shyamal et al., 2020).

Coincidiendo con las cifras del uso del agua para la producción de insumos alimentarios diversos organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en nombre de ONU-Agua, pone de manifiesto que la agricultura

concentra aproximadamente el 70 % de las extracciones de agua dulce, el mismo documento también apunta que la producción agrícola está sujeta a los riesgos hídricos derivados del cambio climático (UNESCO, 2024). Coincidiendo con estos datos Ingrao et al (2023) consideran que casi el 70% de las extracciones de agua provienen de la agricultura, y en algunos países en desarrollo, esta cifra llega al 95%.

Específicamente, la problemática ambiental del cambio climático y el estrés hídrico puede surgir tanto por exceso o déficit de agua (Mahajan & Tuteja, 2005). El estrés hídrico por déficit o exceso de agua, tiene repercusiones directas en la calidad y rendimiento del cultivo (INIFAP, 2024). El estrés hídrico más común es el estrés por déficit hídrico, conocido como estrés por sequía (Mahajan & Tuteja, 2005). La sequía suele ir acompañada de temperaturas relativamente altas, que promueven la evapotranspiración y afectan la cinética fotosintética, intensificando así los efectos de la sequía y reduciendo aún más el rendimiento de los cultivos (Lagouarde & Boulet, 2016).

La detección de sequías es crucial para gestionar el riesgo, a menudo utilizando indicadores continuos de sequía derivados de datos satelitales, precipitaciones y otras variables hidrometeorológicas (Tenebo et al., 2025). Con el tiempo, se han desarrollado diversos índices de sequía que se han convertido en el método principal para monitorear las condiciones de sequía (Tenebo et al., 2025). Los métodos tradicionales de monitoreo de sequías a menudo carecen de la resolución espacial y temporal necesaria para una evaluación precisa de las condiciones. Los índices basados en teledetección ofrecen información valiosa sobre las condiciones de sequía, lo que facilita la toma de decisiones más acertada para la gestión de los recursos hídricos, la planificación agrícola y la respuesta ante desastres (Tenebo et al., 2025).

En este sentido, es necesario priorizar suficientemente en realizar inversiones centradas en herramientas tecnológicas como la Teledetección usadas para determinar el Índice de Estrés Hídrico para poder evaluar así los efectos de éstos en cultivos, y de esta manera, tal como establece (UNESCO, 2024) para conseguir una gestión sostenible de los recursos hídricos y la seguridad alimentaria.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de México, detectar el estrés hídrico es esencial para realizar una aplicación oportuna del riego. Una manera de detectar el estrés hídrico es a partir de índices de vegetación determinados con imágenes satelitales (INIFAP, 2024). Los sistemas de teledetección están plenamente

capacitados para abordar la evaluación compleja y técnica de la producción, la seguridad y el estrés hídrico de los cultivos de forma sencilla y eficiente (Ahmad et al., 2021).

Las técnicas de teledetección ayudan a obtener información a distancia de un determinado objeto situado sobre la superficie terrestre. Por tanto, el monitoreo del estado de los cuerpos de agua superficiales, mediante una alternativa rápida, precisa y económica es hacerlo mediante técnicas de teledetección usando sensores remotos satelitales (Hernández & Pavón, 2023).

De acuerdo con el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España (MARM), la teledetección tiene aplicación, entre otras, en la estimación de parámetros biofísicos de la vegetación, como el contenido de agua, materia seca, y contenido clorofílico. La estimación de contenido de agua puede ser interesante para el seguimiento del estado de la humedad de la planta tanto en el campo agrícola como en el campo forestal (MARM, 2008). La teledetección térmica permite la detección de estrés en vegetación por la relación existente entre la temperatura de la planta y su transpiración, ya que la vegetación bajo estrés hídrico cierra estomas y aumenta su temperatura (MARM, 2008).

En el caso específico de teledetección de estrés hídrico existen diferentes metodologías para la creación de modelos predictivos. Se puede trabajar con diferentes longitudes de ondas para monitorear cambios y correlacionar estos con estrés abiótico (Barquero, 2024). El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), es uno de los más populares.

Conforme a ello, la información científica deja más claro que el uso indiscriminado de los recursos naturales ha sido factor determinante para alterar y modificar el equilibrio del ambiente, lo que ha traído como consecuencia una crisis ambiental global, en donde, se distingue concretamente su dimensión cambio climático puesto que exacerba los fenómenos meteorológicos como las sequias que trae consigo efectos directos en el rendimiento de los cultivos y con ello en la seguridad alimentaria en muchas regiones del orbe, en gran parte, por el estrés hídrico causado como resultado de la socavación de los cuerpos de agua.

En este sentido, el objetivo de este estudio consiste en analizar el uso de índices de vegetación para la detección del estrés hídrico en cultivos mediante una revisión sistemática de estudios basados en teledetección.

Metodología

La metodología empleada en esta investigación es de revisión sistemática bajo la técnica de análisis documental. Según Ramos & García (2024), las revisiones sistemáticas incluyen el proceso de análisis de trabajos publicados previamente en una determinada línea de investigación. En atención al análisis de la información documental el autor Peña (2022) apunta que es un proceso estrechamente vinculado a la lectura profunda, identificación de palabras clave, comprensión, dominio o familiaridad con el tema tratado, conocimiento del significado de las palabras, caracterización de la estructura del texto, entre otros.

A partir de ahí, se realizó una búsqueda vía online en bases de datos de revistas indexadas, en repositorios digitales de universidades nacionales e internacionales y en plataformas de organismos especializados que guardan relación con la temática en estudio publicados en los últimos 5 años, es decir desde 2020 hasta el año en curso 2025. La selección de trabajos se restringió a los idiomas inglés y español, utilizando como descriptores los siguientes términos: “índices de vegetación”, “estrés hídrico en cultivos”, “teledetección” or “vegetation indices”, “water stress in crops”, “remote sensing”

Los trabajos elegidos siguieron los siguientes criterios de inclusión: a) estudios publicados entre 2020 y 2025; b) investigaciones bajo el formato de artículos académicos y científicos y trabajos de titulación y maestría tanto del contexto nacional e internacional, estudios de revisión bibliográfica, cuantitativos, cualitativos o mixtos, en idioma inglés y español y que tienen relación directa con la temática abordada. En contrapartida, también se destacan algunos criterios de exclusión que además de no cumplir los criterios de inclusión reflejados, se descartan aquellos con duplicación de información, no presentaban evidencia actual o se desviaban del tema de índices de vegetación para la detección del estrés hídrico en cultivos basados en teledetección. De esta manera se incluyeron veintitrés (23) documentos bajo el formato de artículos científicos (17), trabajos de titulación (03), trabajos de maestría (02) y tesis doctoral (01) para esta revisión.

El análisis de contenido de textos y documentos constituyó la técnica de análisis de la información recabada a través de la estrategia de búsqueda empleada y de la aplicación de los criterios de selección establecidos previamente. Según Arbeláez & Onrubia (2014), el análisis de contenido permite de manera válida, interpretar textos y documentos de forma explícita o implícita para describir particularidades del contexto de investigación.

Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la revisión de literatura científica más relevante y concordante con el tema de investigación que cumplieron con los criterios de inclusión establecidos para su selección.

Tabla 1. *Distribución de estudios según el índice de estrés hídrico de los cultivos (Crop Water Stress Index - CWSI)*

Autor (es)/año	**Tipo de cultivo**	**Herramienta de detección remota**	**Resultados/conclusiones**
Ramos et al (2025)	Cultivares de palto (Hass, Fuerte y Zutano)	Termografía infrarroja acoplados en drones	Se demostró que la termografía infrarroja puede medir eficazmente el IEHC en cultivares de palto, con variaciones significativas observadas en la Th, según la condición de riego.
Mousinho (2024)	Viñedos	Vehículos aéreos no tripulados (UAV – Unmanned Aerial Vehicle)	Tras calcular los diferentes índices a partir de imágenes térmicas para diferentes horas del día (9h solares y 12h solares) y estudiar su relación con el potencial hídrico del tallo en las diferentes horas, se llegó a la conclusión de que CWSI según Bellvert fue el índice térmico que presentó una mayor robustez en los datos.
Irik et al (2024)	Plantas de comino negro	Índice de estrés hídrico de los cultivos (CWSI) y de los índices espectrales de vegetación	Se determinó que existen correlaciones significativas entre el rendimiento, los componentes del rendimiento y el CWSI y los índices espectrales de vegetación.
Been Cho et al (2024)		Integración de la inteligencia artificial (IA) y las tecnologías de teledetección para abordar el problema del estrés hídrico en los cultivos	Se espera que las imágenes térmicas reconstruidas permitan evaluar eficazmente las condiciones de estrés hídrico. La IA Explicable (XAI) es útil para interpretar el impacto de diversas variables en la evaluación del estrés hídrico y ofrece un futuro prometedor.
Velazquez et al (2024)	Cultivo del olivo, el melocotonero y el almendro	Sensores para la monitorización del estrés hídrico.	El Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI) mostró una mejor correlación con la conductancia estomática (gs) (R^2 = 0,76) y con el potencial hídrico foliar (ΨL) (R^2 = 0,75) en comparación con el Potencial Hídrico del Xilema (ΨS) (R^2 = 0,6).

Huancas & Barrios (2023)	Cultivos de arrozales	Imágenes térmicas infrarrojas	Se obtiene que el CWSI calculado con información obtenida del RPA, (temperaturas foliares con cámara térmica) es la variable más adecuada para definir el estrés hídrico y así establecer el momento oportuno para el riego del cultivo.
Quezada et al (2020)	Cultivares plantas de manzano "Royal Gala"	Termografía infrarroja	El CWSI no se comportó como un buen predictor del estado hídrico de la planta ni del rendimiento y calidad en manzano.
Rodríguez et al (2020)	Producción de UVA	Empleo de drones que disponen de cámaras térmicas.	Según los resultados obtenidos, el empleo de imágenes térmicas resulta un buen indicador del estado hídrico del viñedo, que permite realizar un manejo eficiente del mismo, para poder obtener una cosecha con buenos niveles de producción y calidad.

Fuente: Elaboración propia

Los trabajos seleccionados para la revisión bibliográfica que se muestran en la Tabla 1, evalúan el Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos (Crop Water Stress Index - CWSI) que utilizan diferentes modalidades de teledetección para la recolección de datos, se identificaron un total 08 publicaciones de los autores Ramos et al (2025) centrado en herramienta de detección remota de Termografía infrarroja acoplados en drones para determinar el estrés fisiológico en cultivares de palto (Hass, Fuerte y Zutano); Mousinho (2024) con teledetección en vehículos aéreos no tripulados (UAV – Unmanned Aerial Vehicle en viñedos; Irik et al (2024) determina el CWSI y los índices espectrales de vegetación para plantas de comino negro; Been Cho et al (2024) integra la inteligencia artificial (IA) y las tecnologías de teledetección para abordar el problema del estrés hídrico en los cultivos; Velazquez et al (2024) utiliza sensores para la monitorización del estrés hídrico para el cultivo del olivo, el melocotonero y el almendro; Huancas & Barrios (2023) a través de Imágenes térmicas infrarrojas para Cultivos de arrozales; Quezada et al (2020) mediante la Termografía infrarroja para cultivares plantas de manzano "Royal Gala" y; Rodríguez et al (2020) emplea drones que disponen de cámaras térmicas para la producción de UVA.

Tabla 2. *Distribución de estudios según el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)*

Autor (es)/año	**Tipo de cultivo**	**Herramienta de detección remota**	**Resultados/conclusiones**
Dey et al (2025)	Cultivo de arroz	Sentinel-2, POWER Data Access Viewer y Google Earth Engine (GEE). basado en aprendizaje profundo para predecir el NDVI	Los resultados experimentales muestran que la metodología empleada supera a otras técnicas en un margen de entre el 4 % y el 8 %
Villalaz et al (2024)	Plantas de cacao	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), temperatura del suelo y planta (hojas)	Se concluye que, las plantas de cacao presentaron un buen vigor vegetal, de acuerdo con el NDVI, aunque fueron afectadas con un índice de estrés hídrico por temperatura en dos meses no consecutivos, lo que podría afectar las distintas fases fenológicas repercutiendo en la baja producción.
Jardim et al (2022)	Cultivos de soja	Sensor hiperespectral incrustado en un dron	El NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), puede utilizarse para predecir el rendimiento de la soja como herramienta en un programa de selección en condiciones de sequía.
Gálvez (2020)	Plantas de palma africana	Información espectral para cuantificar el estrés hídrico	Se obtuvo mayores coeficientes de correlación R: 0,73 para el NDVI
Quito et al (2020)	Cultivo de brócoli	Imágenes multiespectrales (RED, NIR), capturadas a corta distancia (pixel de 2,4mm)	El estudio permitió profundizar en el conocimiento de la utilidad del NDVI a escala de parcela, como un enfoque rápido, alternativo y no destructivo para estimar estrés hídrico en cultivos para decisiones más oportunas.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2 se identifican 05 estudios para el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para determinar el estrés hídrico con el uso de diversas herramientas de detección remota, en este caso se encuentran los autores Dey et al (2025) desarrollan un marco semiautomatizado para generar un conjunto completo de datos de series temporales tras el preprocesamiento necesario

utilizando la información de Sentinel-2, POWER Data Access Viewer y Google Earth Engine (GEE), basado en aprendizaje profundo para predecir el NDVI a partir de sus series temporales históricas e información meteorológica y espacial para el cultivo de arroz en India; Villalaz et al (2024) determinan el índice NDVI en plantas de cacao; Jardim et al (2022) mediante el sensor hiperespectral incrustado en un dron se determina el NDVI en cultivos de soja; Gálvez (2020) adquiere información espectral para cuantificar el estrés hídrico mediante el NDVI en plantas de palma africana y; Quito et al (2020) a través de imágenes multiespectrales (RED, NIR), capturadas a corta distancia (pixel de 2,4mm) evalúa la utilidad del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) a escala de parcela, como un enfoque rápido, alternativo y no destructivo para estimar estrés hídrico en cultivos de brócoli para decisiones más oportunas.

Tabla 3. *Distribución de estudios según varios tipos de índices de vegetación e índices hídricos en diversos cultivos basados en teledetección*

Autor (es)/año	**Tipo de cultivo**	**Herramienta de detección remota de estrés fisiológico en cultivos**	**Resultados/conclusiones**
Torres (2025)	Cultivo de maíz forrajero	Datos de teledetección del Instrumento Multiespectral (MSI) Sentinel-2ª, para analizar la correlación entre el contenido de humedad del suelo y el Índice de Estrés Hídrico	Los resultados revelaron una correlación baja entre el MSI y el contenido de humedad del suelo.
Tenebo et al (2025)	Cultivares domésticos (cebada, el trigo, el teff, el sorgo y el maíz)	Índice de Salud de la Vegetación (VHI), el Índice Estandarizado de Precipitación Evapotranspiración (SPEI) y el Índice de Sequía de la Vegetación (VDI)	Se encontró una correlación lineal positiva entre VDI y VHI con ($R^2 = .74$, $p < .01$) en toda la región de estudio. Tanto el VHI como el índice de humedad del suelo (SSM) sirven como valiosos indicadores para monitorear el desarrollo de sequías meteorológicas y agrícolas en esta área de estudio
Torres et al (2025)	Huertos de aguacate	Tecnologías de teledetección satelital y sensores de humedad del suelo en campo para evaluar el estrés hídrico y optimizar la gestión del riego en huertos de aguacate, utilizando imágenes multiespectrales de los satélites Landsat 8 y 9, se derivaron índices	El estudio demuestra el potencial de las tecnologías de teledetección para la evaluación del estrés hídrico a gran escala, ofreciendo una solución escalable y rentable para optimizar las prácticas de riego en regiones con escasez de agua.

		clave de vegetación (NDVI y SAVI) y NDWI.	
Santos (2024)		Imágenes de satélite Sentinel-2 y MODIS y calcula cinco índices de vegetación diferentes (NDVI, NDMI, MSI, NDWI y SIPI) para el monitoreo agrícola	Los resultados obtenidos destacan el gran potencial de la teledetección para el seguimiento de cultivos, proporcionando soluciones innovadoras para el monitoreo detallado de cultivos en parcelas pequeñas mixtas, ambas tecnologías ofrecen datos gratuitos y accesibles, lo que facilita la implementación de prácticas sostenibles y garantiza su viabilidad a largo plazo.
Safdar et al (2023)	Cultivos hortícolas de alto valor	Sistemas de teledetección multiespectrales/hiperespectrales y térmicos	Los índices ópticos de banda estrecha podrían utilizarse para planificar el riego de cultivos hortícolas de alto valor en países con escasez de agua.
Raya (2023)	El trigo (Triticum sp.) es el cultivo principal.	Diferentes tecnologías de teledetección para mejorar la eficiencia del uso del agua y N en rotaciones de cultivo tomadas con sensores de pinza (Dualex®), proximales (GreenSeeker®, espectro radiómetro de campo HR-512i® y una cámara térmica FLIR SC305®) e imágenes hiperspectrales capturadas desde una aeronave	Demuestra que la teledetección es una herramienta útil para para predecir diferentes variables agronómicas (biomasa, NNI, rendimiento, GNC y N exportado) y detectar el estado hídrico del cultivo del trigo bajo diferentes interacciones y localizaciones
Bermúdez et al (2023)	Plantas de lechuga romana	Modelo de red neuronal convolucional (CNN, por sus siglas en inglés), para detectar determinados periodos de deshidratación en plantas a través de imágenes tomadas en tiempo real.	Los experimentos muestran una precisión y sensibilidad del modelo del 83% en la identificación del nivel de deshidratación y del 98,8% en ambas métricas, considerando una tolerancia de más/menos un nivel de diferencia con respecto al real.
Subert et el (2021)	Caña de azúcar	Cámara multiespectral, instalada en un vehículo aéreo no tripulado (UAV)	Esta técnica ayudó a diferenciar los campos de caña de azúcar afectados por estrés de los cultivos sanos.

Ahmad et al (2021)		Sistemas de detección óptica, sistemas de detección termométrica, sistemas de detección de la temperatura superficial terrestre, sistemas de detección multiespectral (espaciales y aéreos), sistemas de detección hiperespectral y el sistema de detección LiDAR	Estudios sobre estrés hídrico en los cultivos y sus aplicaciones en teledetección, existe un gran número de técnicas y marcos de trabajo consolidados que son precisos, reproducibles y aplicables en una amplia variedad de condiciones climáticas, edáficas y de cultivo.
Meza et al (2020)	Cultivos de agricultura de precisión	Recolección y análisis de datos espectrales a diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético (firmas espectrales) por medio de un espectroradiómetro FieldSpec 4Hi-Res	La finalidad de caracterizar el estrés hídrico y optimizar los recursos de riego en actividades de agricultura de precisión.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3 a partir de la revisión bibliográfica se seleccionaron 10 publicaciones que emplearon varios tipos de índices de vegetación, e índice hídrico en diversos cultivos basados en diversas tecnologías de teledetección de diferentes cultivos, en tal sentido, el autor Torres (2025) analiza la correlación entre el contenido de humedad del suelo y el Índice de Estrés Hídrico mediante datos de teledetección del Instrumento Multiespectral (MSI) Sentinel-2ª, en cultivos de maíz forrajero; Tenebo et al (2025) evalúa los Índice de Salud de la Vegetación (VHI), el Índice Estandarizado de Precipitación Evapotranspiración (SPEI) y el Índice de Sequía de la Vegetación (VDI) en cultivares domésticos (cebada, el trigo, el teff, el sorgo y el maíz).

Por otra parte, Torres et al (2025) mediante Tecnologías de teledetección satelital y sensores de humedad del suelo en campo para evaluar el estrés hídrico y optimizar la gestión del riego en huertos de aguacate, utilizando imágenes multiespectrales de los satélites Landsat 8 y 9, se derivaron índices clave de vegetación (NDVI y SAVI) y NDWI; (Santos Portillo, 2024) a través de Imágenes de satélite Sentinel-2 y MODIS calcula cinco índices de vegetación diferentes (NDVI, NDMI, MSI, NDWI y SIPI) para el monitoreo agrícola; Safdar et al (2023) plante a los sistemas de teledetección multiespectrales/hiperespectrales y térmicos para planificar el riego de cultivos hortícolas de alto valor en países con escasez de agua.

Igualmente, Raya (2023) plantea diferentes tecnologías de teledetección para mejorar la eficiencia del uso del agua y N en rotaciones de cultivo tomadas con sensores de pinza (Dualex®), proximales

(GreenSeeker®, espectro radiómetro de campo HR-512i® y una cámara térmica FLIR SC305®) e imágenes hiperspectrales capturadas desde una aeronave, para cultivo de trigo (Triticum sp.); Bermúdez et al (2023) presenta el modelo de red neuronal convolucional (CNN, por sus siglas en inglés), para detectar determinados periodos de deshidratación en plantas a través de imágenes tomadas en tiempo real.

Por otro lado, Subert et al (2021) plantea la tecnología de una cámara multiespectral, instalada en un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para evaluar campos de caña de azúcar afectados por estrés de los cultivos sanos; Ahmad el al (2021) utilizó sistemas de detección óptica, sistemas de detección termométrica, sistemas de detección de la temperatura superficial terrestre, sistemas de detección multiespectral (espaciales y aéreos), sistemas de detección hiperespectral y el sistema de detección LiDAR para evaluar estrés hídrico en los cultivos.

Asimismo, Meza et al (2020) realiza la recolección y análisis de datos espectrales a diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético (firmas espectrales) por medio de un espectroradiómetro FieldSpec 4Hi-Res, con la finalidad de caracterizar el estrés hídrico y optimizar los recursos de riego en actividades de agricultura de precisión.

Discusión

Los resultados de la revisión bibliográfica demuestran que la tecnología de teledetección juega un papel importante para la evaluación de índices de vegetación para la detección del estrés hídrico de los cultivos con mayor precisión que los métodos convencionales. Como se observa en los resultados de la Tabla 1, concerniente a la distribución de estudios sobre el índice de estrés hídrico de los cultivos (Crop Water Stress Index - CWSI) con diversas tecnologías de teledetección se tiene a los autores Ramos et al (2025) quienes han demostrado que la termografía infrarroja acoplados en drones arrojó variaciones significativas según las condiciones de riego para tres variedades de palto (Hass, Fuerte y Zutano); Mousinho (2024) mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV – Unmanned Aerial Vehicle) para estudiar el potencial hídrico del tallo en viñedos a diferentes horas presentó robustez en los datos; Irik et al (2024) determinó correlaciones significativas entre CWSI y los índices espectrales de vegetación para plantas de comino negro; Been Cho et al (2024) integra la inteligencia artificial (IA) y las tecnologías de teledetección para abordar el problema del estrés hídrico en los cultivos lo que ofrece un futuro prometedor; Velazquez et al (2024) a través de sensores para la monitorización del estrés hídrico mostró una mejor correlación en la conductancia

estomática en cultivo del olivo, el melocotonero y el almendro; Huancas & Barrios (2023) define el estrés hídrico en cultivos de arrozales mediante imágenes térmicas infrarrojas y así establecer el momento oportuno para el riego del cultivo; en contraposición Quezada et al (2020) también por termografía infrarroja indica que el CWSI no se comportó como un buen predictor del estado hídrico de la planta ni del rendimiento y calidad en las plantas de manzano de la variedad "Royal Gala" y; Rodríguez et al (2020) empleó drones que disponen de cámaras térmicas y según los resultados obtenidos, el empleo de imágenes térmicas resulta un buen indicador del estado hídrico del viñedo, que permite realizar un manejo eficiente del mismo, para poder obtener una cosecha con buenos niveles de producción y calidad.

Por otro lado, los resultados de la Tabla 2 referida al Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) ha sido evaluado por los autores Dey et al (2025) a través de la tecnología Sentinel-2, POWER Data Access Viewer y Google Earth Engine (GEE), basado en aprendizaje profundo para predecir el NDVI con resultados prometedores para el cultivo de arroz; Villalaz et al (2024) concluye de acuerdo con el NDVI que aunque las plantas de cacao fueron afectadas con un índice de estrés hídrico por temperatura en dos meses no consecutivos lo que podría afectar las distintas fases fenológicas repercutiendo en la baja producción, no obstante presentaron un buen vigor vegetal y; Jardim et al (2022) mediante el sensor hiperespectral incrustado en un dron, indicó que el NDVI, puede utilizarse para predecir el rendimiento de la soja como herramienta en un programa de selección en condiciones de sequía.

Asimismo en la Tabla 3 se observan los resultados para varios tipos de índices de vegetación e índices hídricos en diversos cultivos basados en teledetección lo cual se refleja en las siguientes publicaciones: Torres (2025) analiza la correlación entre el contenido de humedad del suelo y el Índice de Estrés Hídrico a partir de datos de teledetección del Instrumento Multiespectral (MSI) Sentinel-2ª para cultivos de maíz forrajero con baja correlación; Tenebo et al (2025) alude al Índice de Salud de la Vegetación (VHI), el Índice Estandarizado de Precipitación Evapotranspiración (SPEI) y el Índice de Sequía de la Vegetación (VDI) para cultivos domésticos de cebada, el trigo, el teff, el sorgo y el maíz y encuentran una correlación lineal positiva en toda la región de estudio por lo cual concluye que tanto el VIH como el SSM sirven como valiosos indicadores para monitorear el desarrollo de sequías meteorológicas y agrícolas.

También el estudio de Torres et al (2025) destacan el potencial de la teledetección mediante Imágenes de satélite Sentinel-2 y MODIS para el seguimiento de cultivos a través de los índices

de vegetación (NDVI y SAVI) y estrés hídrico (NDWI), dichas tecnologías ofrecen datos gratuitos y accesibles, lo que facilita la implementación de prácticas sostenibles y garantiza su viabilidad a largo plazo; Safdar et al (2023) plantean que mediante el empleo de sistemas de teledetección multiespectrales/hiperespectrales y térmicos, los índices ópticos de banda estrecha podrían utilizarse para planificar el riego de cultivos hortícolas de alto valor en países con escasez de agua; Raya (2023) para para predecir diferentes variables agronómicas (biomasa, NNI, rendimiento, GNC y N exportado) y detectar el estado hídrico del cultivo del trigo bajo diferentes interacciones y localizaciones, emplea diferentes tecnologías de teledetección para mejorar la eficiencia del uso del agua y N en rotaciones de cultivo tomadas con sensores de pinza (Dualex®), proximales (GreenSeeker®, espectro radiómetro de campo HR-512i® y una cámara térmica FLIR SC305®) e imágenes hiperspectrales capturadas desde una aeronave.

Por su parte, Bermúdez et al (2023) para la identificación del nivel de deshidratación emplea el modelo de red neuronal convolucional (CNN, por sus siglas en inglés), para detectar determinados periodos de deshidratación en plantas a través de imágenes tomadas en tiempo real; Subert et al (2021) presenta la tecnología mediante el uso de una cámara multiespectral, instalada en un vehículo aéreo no tripulado (UAV) e indica que esta técnica ayudó a diferenciar los campos de caña de azúcar afectados por estrés de los cultivos sanos.

Siguiendo con las publicaciones seleccionadas Ahmad et al (2021) argumenta que existe un gran número de técnicas y marcos de trabajo consolidados que son precisos, reproducibles y aplicables en una amplia variedad de condiciones climáticas, edáficas y de cultivo, de este modo consideró los sistemas de detección óptica, sistemas de detección termométrica, sistemas de detección de la temperatura superficial terrestre, sistemas de detección multiespectral (espaciales y aéreos), sistemas de detección hiperespectral y el sistema de detección LiDAR y; Meza et al (2020) con la finalidad de caracterizar el estrés hídrico y optimizar los recursos de riego en actividades de agricultura de precisión, recolecta y analiza datos espectrales a diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético (firmas espectrales) por medio de un espectroradiómetro FieldSpec 4Hi-Res.

Como se ha observado en el marco de la revisión bibliográfica, el impacto de la teledetección para evaluar los índices de vegetación para la detección del estrés hídrico en cultivos, es una herramienta clave para la adaptación de nuevas técnicas de riego de la agricultura a la realidad del cambio climático que se vive en el planeta hoy en día.

Conclusiones

En esta investigación, se propone un análisis mediante una revisión bibliográfica del uso de índices de vegetación para la detección del estrés hídrico en cultivos basados en teledetección, los resultados muestran un gran potencial de dichas aplicaciones tecnológicas para monitorear y obtener datos confiables que permitan determinar con la mayor precisión la salud de la vegetación y el estado de escasez hídrica en las diversas zonas de cultivo evaluadas en el interés de respaldar y mejorar la producción de la agricultura bajo criterios sostenibles y garantizar la seguridad alimentaria de las comunidades nacionales, regionales y locales.

Los hallazgos (Tabla 1) revelaron que el índice de estrés hídrico de los cultivos (Crop Water Stress Index - CWSI) bajo diversas modalidades de teledetección constituye un medio apropiado para la recolección de datos sobre el estrés hídrico, según indican los estudios de los autores Ramos et al (2025); Mousinho (2024); Irik et al (2024); Been Cho et al (2024); Velazquez et al (2024); Huancas & Barrios (2023); Quezada et al (2020) y; Rodríguez et al (2020).

Asimismo, la investigación refleja (Tabla 2) el uso del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) como instrumento eficaz en materia de monitoreo de salud de la vegetación y evaluación del estrés hídrico de cultivos agrícolas mediante métodos de teledetección, en este particular, centran su estudio autores como Dey et al (2025); Villalaz et al (2024); Jardim et al (2022); Gálvez (2020) y Quito et al (2020).

Finalmente, el estudio también consideró (Tabla 3) otros varios tipos de índices de vegetación e índices hídricos en diversos cultivos basados en teledetección, a partir de los cuales se recaba información de gran utilidad que podría utilizarse para planificar el riego de cultivos en condiciones de sequía y mejorar el rendimiento de la producción agrícola de forma sostenible, con respecto a esta cuestión se accedió a publicaciones donde se encuentran algunas reflexiones de este tema como los autores: Torres (2025); Tenebo et al (2025); Torres et al (2025); Santos (2024); agrícola; Safdar et al (2023); Raya (2023); Bermúdez et al (2023); Subert et al (2021); Ahmad et al (2021) y; Meza et al (2020).

Con base en los hallazgos presentados, en general se puede decir que los índices de vegetación para la detección del estrés hídrico en cultivos basados en teledetección pueden ser altamente efectivos para la estimación de las condiciones de riego en los diversos sistemas agrícolas para elevar el rendimiento productivo además de contribuir a mejorar las técnicas de la agricultura que debe ser cada vez más sostenible y resiliente al cambio climático actual.

Referencias

1. Ahmad, U., Alvino, A., & Marino, S. (2021). A Review of Crop Water Stress Assessment Using Remote Sensing. Remote Sens, 13(20), 4155; https://doi.org/10.3390/rs13204155. https://www.mdpi.com/2072-4292/13/20/4155.
2. Alotaibi, M. (2023). Climate change, its impact on crop production, challenges, and possible solutions. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca; Volume 51, Issue 1, Article number13020. DOI:10.15835/nbha51113020, pp.1-39.
3. Arbeláez, M., & Onrubia, J. (2014). Análisis bibliométrico y de contenido. Dos metodologías complementarias para el análisis de la revista colombiana Educación y Cultura. Revista de Investigaciones UCM, 14(23), https://doi.org/10.22383/ri.v14i1.5. https://revistas.ucm.edu.co/index.php/revista/article/view/5, pp.14 - 31.
4. Barquero Araya, A. (2024). Teledetección Temprana de Estrés Hídrico en Dos Variedades de Plantas de Café (Coffea Arabica) . Universidad de Costa Rica. Trabajo de Titulación. https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/TFG-AndresBarqueroA.pdf, pp.125.
5. Been Cho, S., Mohamad Soleh, H., Won Choi, J., Hwang, W., Lee, H., Cho , Y., y otros. (2024). Recent methods for assessing crop water stress using AI techniques: a review. Sensors; 24(19):6313. doi: 10.3390/s24196313. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11478660/.
6. Bermúdez, J., Luna, J., Von Borstel, F., & Sandoval, J. (2023). Detección del nivel de estrés hídrico en plantas de lechuga romana a través de CNN. Pädi Vol. 11 No. Especial 2 (2023). DOI: https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial2.10943. https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/10943, pp.39–46.
7. Dey, A., Sarkar, S., Mondal, A., & Mitra, P. (2025). Space-time prediction of NDVI for rice cultivation. SN Computer Science; 6(3). DOI: 10.1007/s42979-025-03767-y. https://www.researchgate.net/publication/389438871_Spatio-Temporal_NDVI_Prediction_for_Rice_Crop.
8. Gálvez Valencia, A. (2020). Determinación del Estrés Hídrico en la Palma Africana Mediante la Integración de Parámetros de Suelo, Planta y su Respuesta Espectral. Universidad Católica de Manizales. Colombia. Trabajo de Grado de Maestría.

https://repositorio.ucm.edu.co/server/api/core/bitstreams/01cd89b7-0204-48f6-805e-4389059987eb/content, pp.61.

9. Hernández Lozano, R., & Pavón, N. (2023). Índices para el monitoreo de cuerpos de agua usando sensores remotos. Acta Universitaria 34, e3814. doi: http://doi.org/10.15174/au.2024.3814. https://www.scielo.org.mx/pdf/au/v34/2007-9621-au-34-e3814.pdf, pp.1-19.
10. Huancas Correa, N., & Barrios De La Cruz, T. (2023). Cuantificación de índice y umbral de estrés hídrico vía termografía infrarroja de un RPA en 100 hectáreas de arroz, Ferreñafe. Universidad Nacional "Pedro Ruiz Gallo" Lambayeque -Perú. Trabajo de titulación. https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11594, pp.94.
11. Ingrao, C., Strippoli, R., Lagioia, G., & Huising, D. (2023). Water scarcity in agriculture: an overview of causes, impacts, and approaches to risk reduction. Heliyón;9(8):e18507. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18507. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37534016/.
12. INIFAP. (2024). Estimación del estado hídrico del cultivo mediante el Índice de Estrés Hídrico (MSI). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias son (INIFAP) de México. https://www.gob.mx/inifap/articulos/estimacion-del-estado-hidrico-del-cultivo-mediante-el-indice-de-estres-hidrico-msi.
13. Irik, H., Kaymaz, E., Polu, P., Beyzi, E., Varol, I., Unlukara, A., y otros. (2024). Potential use of crop water stress index (CWSI) and spectral vegetation indices for black cumin under defcit irrigation. Environmental Sciences Europe; (2024) 36:93. https://doi.org/10.1186/s12302-024-00876-y, pp.1-14.
14. Jardim, C., Ribeiro, W., Gerosa, M., Pereira, L., Das Chagas, R., Ferreira, A., y otros. (2022). Water stress alters the morphophysiological, grain quality, and vegetation indices of soybean varieties. Plans; 11(4):559. doi: 10.3390/plants11040559. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8880803/.
15. Lagouarde, J., & Boulet, G. (2016). Teledetección de la superficie terrestre en hidrología continental. Elsevier Ltd. ISBN 978-1-78548-104-8. DOI. https://doi.org/10.1016/C2015-0-01226-6. pp.323 - 361. https://www.sciencedirect.com/book/9781785481048/land-surface-remote-sensing-in-continental-hydrology.
16. Mahajan, S., & Tuteja, N. (2005). Cold, salinity, and drought stress: an overview. Archives of Biochemistry and Biophysics; Volume 444, Number 2,

https://doi.org/10.1016/j.abb.2005.10.018. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000398610500439X, pp.139-158.

17. MARM. (2008). Teledetección aplicada a la detección temprana del estrés hídrico en cubiertas vegetales. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/desertificacion-restauracion/0904712280144dc1_tcm30-152646.pdf, pp.1-5.
18. Meza, K., Ruales, B., Maiguashca, J., & Rivadeneira, J. (2020). Caracterización Espectral de Estrés Hídrico en el Cultivo de Pepino Dulce (Solanum muricatum). Revista GEOESPACIAL; 17(1). https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1492/1308, pp.14-24.
19. Mousinho Almadanim, M. (2024). Estudio técnico del uso de imágenes multiespectrales y térmicas para el manejo del riego del viñedo de 17 ha en Yepes, Toledo. Universidad Politécnica de Madrid-UPM. Tesis de Maestría, E.T.S. de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (UPM). https://oa.upm.es/85035/.
20. Peña, T. (2022). Etapas del análisis de la información documental. Revista Interamericana de Bibliotecología, 45(3), e340545. https://doi.org/10.17533/udea.rib.v45n3e340545. http://www.scielo.org.co/pdf/rib/v45n3/2538-9866-rib-45-03-e4.pdf, pp.1-7.
21. Quezada, C., Bastias, R., Quintana, R., Arancibia, R., & Solis, A. (2020). Validación del Índice de Estrés Hídrico de Cultivo (Cwsi) Mediante Termografía Infrarroja y su Incidencia en Rendimiento y Calidad en Manzanas “Royal Gala”. Chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia;36(3). https://doi.org/10.29393/CHJAAS36-18VICQ50018, pp.198-207.
22. Quito, N., Tacuri, E., López, M., & Lupercio, L. (2020). Detección de estrés hídrico en brocoli (brassica oleracea var. itálica), utilizando ndvi sobre imágenes multiespecttrales capturadas a corta distancia. Journal of Science and Research. E-ISSN: 2528-8083. Vol. 5, Núm. CININGEC2020. https://doi.org/10.5281/zenodo.4421593, pp.41-59.
23. Ramos Galarza, C., & García Cruz, P. (2024). Guía para realizar estudios de revisión sistemática cuantitativa. Ciencia América; VoL.13 (1). https://doi.org/10.33210/ca.v13i1.444, pp.1-13.
24. Ramos, L., Galindo, M., Núñez, H., Espinoza, E., Pino, E., & del Águila-Ríos, S. (2025). Termografía infrarroja para medir índice de estrés hídrico en cultivares de palto (Persea

americana M.). Agronomía Mesoamericana; Volumen 36: Artículo 57230, e-ISSN 2215-3608, https://doi.org/10.15517/am.2024.57230. https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v36n1/2215-3608-am-36-01-57230.pdf, pp.1-21.

25. Raya Sereno, M. (2023). Estrategias para mejorar la productividad y eficiencia de uso de agua y nutrientes en rotaciones de cultivo. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Tesis Doctoral. https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.72719. https://oa.upm.es/72719/.
26. Rodríguez, M., González, X., Fandiño, M., & Cancela, J. (2020). Determinación del Estado Hídrico del Viñedo Mediante el Uso de Imágenes Térmicas y su Influencia en la Calidad y Producción de la Uva. AERYD. XXXVIII Congreso Nacional de Riesgos, Parte I Cartagena (Murcia) 2020. DOI:10.31428/10317/8673. https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/80029c78-fb2f-4961-881f-994786e4f5da/content, pp.1-6.
27. Safdar, M., Shahid, M., Sarwar, A., Rasul, F., Majeed, M., & Sabir, R. (2023). Crop Water Stress Detection Using Remote Sensing Techniques. Environ. Sci. Proc;5, x. https://doi.org/10.3390/xxxxxEnviron. www.mdpi.com/journal/environsciproc. https://sciforum.net/manuscripts/14198/manuscript.pdf, pp.1-6.
28. Santos Portillo, C. (2024). Desarrollo de una Herramienta de Detección Remota de Estrés Fisiológico en Cultivos Para la Mejora de la Toma de Decisiones Agronómicas en Comunidades Rurales de la Provincia de Maputo (Mozambique). Universidad de Córdoba. Trabajo Final de Máster. https://reedes.org/wp-content/uploads/2024/12/TFM-Premiado-Carolina-Santos-UCO.pdf, pp.63.
29. Shayanmehr, S., Porhajašová, J., Babošová, M., Sabouhi, M., Mohamed, M., Rastegari, H., y otros. (2022). The impacts of climate change on water resources and agricultural production in an arid region. Agriculture;12 (7), 1056; https://doi.org/10.3390/agriculture12071056. https://www.mdpi.com/2077-0472/12/7/1056.
30. Shyamal, S., Virnodkar, V., Pachghare, V., Patil, V., & Sunil Kumar, J. (2020). Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review. Springer Nature Link; Volume 21, https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-020-09711-9, pp.1121–1155.

31. Subert Semanat, A., Reyes Colgado, L., & Castro Piñol, D. (2021). Teledetección de Estrés en Cultivos de Caña A Través de Imágenes Multiespectrales Detección Remota de Estrés en Cultivos de Caña A Través de Imágenes Multiespectrales. Revista Telemática. Vol.4 No. 20. http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele, pp. 25-39 .
32. Tenebo Alito, K., Sewinet Kerebih, M., & Asregedew Hailu, D. (2025). Characterization of drought detection with remote sensing-based multi-indices and SPEI in the northeastern highlands of Ethiopia. Impact factor; 2,8. https://doi.org/10.1177/11786221251328833. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/11786221251328833.
33. Torres Roaro, A. (2025). Correlación del índice de estrés hídrico con el contenido de humedad del suelo y desarrollo fenológico del maíz forrajero utilizando imágenes de satélite (Sentinel-2). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón-Coahuila. México. Trabajo de titulación. http://repositorio.uaaan.mx:8080/handle/123456789/50448, pp.79.
34. Torres, E., Fuentes, F., Gutter, K., Rondón, F., Mancebo, J., Maurer, W., y otros. (2025). Teledetección y sensores de humedad del suelo para la gestión del riego en huertos de aguacate: un enfoque práctico para la evaluación del estrés hídrico en zonas agrícolas remotas. Remote Sensing 2025, 17 (4), 708; https://doi.org/10.3390/rs17040708. https://www.mdpi.com/2072-4292/17/4/708.
35. UNESCO. (2024). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024: agua para la prosperidad y la paz. París, Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). ISBN: 978-92-3-300229-6, Pág. 194. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391195.
36. Velazquez Chavez, L., Daccache, A., Mohamed, A., & Centritto, M. (2024). Plant-based and remote sensing for water status monitoring of orchard crops: Systematic review and meta-analysis. Agricultural Water Management; Volume 303, 109051. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109051. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037837742400386X.
37. Villalaz Pérez, J., Villarreal, J., Pineda, A., & Gutiérrez, A. (2024). Efecto del Índice de Estrés Hídrico Sobre el Estado Vegetativo de la Planta de Cacao. Ciencia Agropecuaria No. 38:84-10 4.ISSN L 2414-3278. https://www.researchgate.net/publication/377963728_EFECTO_DEL_INDICE_DE_EST

RES_HIDRICO_SOBRE_EL_ESTADO_VEGETATIVO_DE_LA_PLANTA_DE_CACAO_1.

38. WeAreWater Foundation. (2023). El estrés hídrico, factor geopolítico. https://www.wearewater.org/es/insights/el-estres-hidrico-factor-geopolitico/.

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).