

# Monitoreo de áreas de cultivo de maíz en la zona noroeste del Estado de México a través de sensores remotos

Monitoring of maize growing areas in the northwestern zone of the State of Mexico through remote sensors

Jocelyn Alejandra Cortez-Núñez<sup>1</sup>  
Zepeda Mondragon F<sup>2</sup>  
Miguel Eduardo García-Reyna<sup>3</sup>  
Benjamín Hernández-León<sup>4</sup>  
Abraham Aguirre-Mendizabal<sup>5</sup>

*Recibido 11 de agosto de 2023; aceptado 6 de enero de 2024*

## RESUMEN

Debido al continuo crecimiento de la población mundial y como consecuencia el aumento de la demanda de alimentos, se requiere que el sector agrícola sea eficiente y sostenible, es decir, que garantice la seguridad alimentaria, que promueva el desarrollo local y que disminuya la contaminación ambiental. Por otro lado, en la actualidad estamos viviendo una crisis climática global que ocasiona alteraciones en los ciclos hidrológicos y aumento de la temperatura, lo

<sup>1</sup> Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex)-Agencia Espacial Mexicana (AEM), México, correo electrónico: jacno421@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6411-9551>

<sup>2</sup> Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), México, correo electrónico: fzepedam@uaemex.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3297-7580>

<sup>3</sup> Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), México, correo electrónico: megarcia@uaemex.mx. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9185-3264>

<sup>4</sup> Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), México, correo electrónico: bhernandezl355@alumno.uaemex.mx. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2845-0077>

<sup>5</sup> Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), México, correo electrónico: aaguirremo04@alumno.uaemex.mx. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1404-4759>

que está ocasionando pérdidas económicas en el sector agrícola. Por tal motivo, es necesario incorporar tecnologías modernas de la Agricultura de Precisión (AP) en las prácticas agrícolas tradicionales para mejorar el rendimiento y las ganancias de los agricultores, al mismo tiempo alcanzar beneficios ambientales. En este contexto, el presente estudio dio seguimiento al desarrollo fenológico y la salud del cultivo de maíz en parcelas del municipio de Atlacomulco, Estado de México, México, a través de imágenes multispectrales del satélite Sentinel-2 y un vehículo aéreo no tripulado (VANT). Se llevó a cabo un análisis espaciotemporal de índices de vegetación (IVs) con la finalidad de determinar su sensibilidad a los cambios del verdor del cultivo, en un entorno de condiciones reales. Además, las características agrícolas proporcionadas por los agricultores que manejan las parcelas se emplearon para confirmar los hallazgos. De igual forma, se detectó falta de homogeneidad en las parcelas evaluadas indicando una deficiencia de nutrientes o de agua en algunas de éstas. También, se analizaron las retrodispersiones polarizadas VH y WV del satélite Sentinel-1, demostrándose un potencial de la polarización VH ante la falta de datos de sensores ópticos debido a la nubosidad.

*Palabras clave: agricultura de precisión, índices de vegetación, Sentinel-2, Sentinel-1, vehículo aéreo no tripulado.*

## **ABSTRACT**

Due to the continuous growth of the world population and consequently the increase in the demand for food, the agricultural sector is required to be efficient and sustainable, that is, to guarantee food security, to promote local development and to reduce environmental pollution. On the other hand, we are currently experiencing a global climate crisis that causes alterations in hydrological cycles and an increase in temperature, which is causing economic losses in the agricultural sector. For this reason, it is necessary to incorporate modern Precision Agriculture (PA) technologies into traditional agricultural practices to improve yield and profits for farmers, while achieving environmental benefits. In this context, the present study monitored the phenological development and health of the maize crop in plots in the municipality of Atlacomulco, State of Mexico, Mexico through multispectral images from the Sentinel-2 satellite and an unmanned aerial vehicle (UAV). A spatiotemporal analysis of vegetation indices (VIs) was carried out to determine their sensitivity to changes in the greenness of the crop, in an environment of real conditions. In addition, the agricultural characteristics provided by the farmers managing the plots were used to confirm the findings. Similarly, a lack of homogeneity was detected in the evaluated plots, indicating a nutrient or water deficiency in some of them. Also, the VH and WV polarized backscatters from the Sentinel-1 satellite were analyzed, demonstrating a potential for VH polarization in the absence of data from optical sensors due to cloudiness.

*Key words: precision agriculture, vegetation indices, Sentinel-2, Sentinel-1, unmanned aerial vehicle.*

## 1. Introducción

En la actualidad se vive una crisis climática global que ocasiona alteraciones en los ciclos hidrológicos y aumento de la temperatura. Dichos fenómenos han sido determinantes para la producción agropecuaria a nivel mundial. El déficit de lluvias en México ha provocado pérdidas significativas en el sector agropecuario y por ende afectación en la población de las comunidades rurales (*Diario Oficial de la Federación* [DOF], 2020, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2022), de la cual dependen económicamente de manera directa o indirecta el 19% de los hogares mexicanos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2022). Por otro lado, existe un extenso deterioro de los suelos agrícolas y la pérdida de la biodiversidad en los agroecosistemas ocasionada por el uso excesivo de los recursos naturales (SADER, 2022). Por tal motivo, la SADER a través de su Programa Sectorial 2020–2024, está trabajando en construir un sistema agroalimentario justo, autosuficiente, saludable y sostenible, a través del incremento de la producción y productividad de cultivos, la producción de alimentos sanos e inocuos, el uso responsable del suelo y el agua, la protección y conservación del ambiente, la implementación de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático y la inclusión de sectores históricamente excluidos revalorizando el trabajo y los saberes de los pequeños y medianos productores rurales y los pueblos indígenas (SADER, 2022).

La implementación de una agricultura sostenible por pequeños agricultores requiere soluciones digitales para resolver desafíos comunes (Mushi, Di Marzo y Burgi, 2022). Por tal motivo, es necesario incorporar metodologías y técnicas de la Agricultura de Precisión (AP) como son los sensores remotos abordo de satélites y vehículos aéreos no tripulados (VANT). La AP en las prácticas agrícolas tradicionales mejora la sostenibilidad generando un equilibrio dinámico (Lee, Strong y Dooley, 2021). Esto debido a que la información obtenida de sensores remotos mejora la gestión de los insumos agrícolas como son el uso de suelo, fertilizantes, semillas y plaguicidas (Johri, Singh, Khatri, Bagchi y Rajesh, 2021; Raj, *et al.*, 2021; Karunathilake, *et al.*, 2023). Los productos generados a partir de la información obtenida de sensores remotos permiten a los agricultores tomar decisiones informadas, logrando beneficios económicos y ambientales, al disminuir el uso de agroquímicos reduciendo daños ambientales y contribuyendo al ahorro económico en la compra de insumos (Delavarpour, Koparan, Nowatzki, Bajwa y Sun, 2021; Lee, *et al.*, 2021).

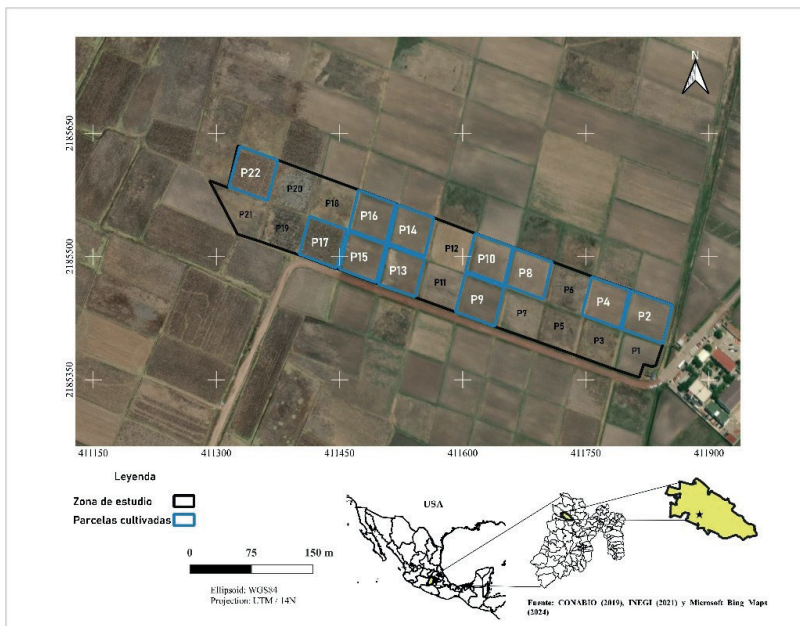
En este contexto, el presente estudio realizó el seguimiento de la salud y etapas fenológicas de 11 parcelas de maíz a través de imágenes de un VANT y de los satélites Sentinel-2 y Sentinel-1. A partir de la información multispectral procedente de las imágenes del satélite Sentinel-2 y el VANT, se llevó a cabo un análisis espaciotemporal de seis índices de vegetación (IVs) con la finalidad de determinar su sensibilidad a los cambios del vigor de la planta en un entorno de condiciones reales. Igualmente, a través de entrevistas a los agricultores que manejan las parcelas analizadas, se consultaron las prácticas agronómicas empleadas las cuales se relacionaron para confirmar los hallazgos. Las 11 parcelas presentan una heterogeneidad de los valores de los IVs debido a una

vegetación menos vigorosa en algunas parcelas y áreas específicas dentro de éstas, indicando una deficiencia de nutrientes o estrés hídrico. Asimismo, se analizaron las retrodispersiones polarizadas VH y VV del satélite Sentinel-1, demostrándose un potencial de la polarización VH para el seguimiento del desarrollo del maíz debido a su alta correlación con los IVs, siendo la información del Sentinel-1 complementaria a la de Sentinel-2 cuando no existen datos debido a la nubosidad. Esta información puede anticipar problemas en etapas tempranas del desarrollo del cultivo y llevar a cabo medidas correctivas inmediatas, especialmente en la etapa de crecimiento vegetativo antes del panojamiento, así como en etapa reproductiva, particularmente en la floración y fecundación.

## 2. Metodología

### 2.1 Área de estudio

Se realizó el monitoreo del ciclo agrícola 2022 de 5.5 hectáreas de cultivo de maíz en el Ejido de San Francisco Chalchihuapan que pertenece al municipio de Atlacomulco, Estado de México (19° 45' 58 N y 99° 52' 32 O). Esta área cubre 22 parcelas de riego rodado de  $\frac{1}{4}$  de hectárea (Figura 1). No obstante, solo 11 parcelas fueron sembradas en este ciclo. Fueron sembradas con maíz



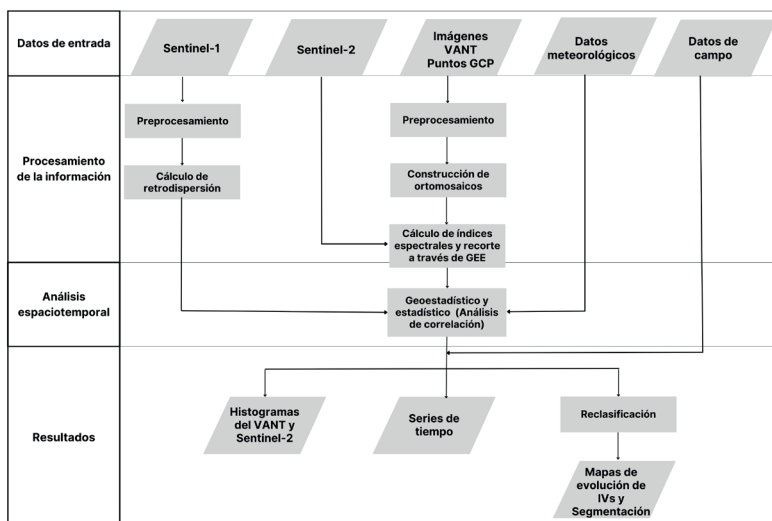
**Figura 1.** Localización de parcelas de maíz analizadas.

Fuente: elaboración propia con base en información de campo e imágenes aéreas del VANT y Google.

criollo entre el 28 de marzo y el 1 de abril de 2022. El clima en Atlacomulco es subhúmedo con lluvias en verano (CW), precipitación media anual entre 800 y 1000 mm y rangos de temperatura de 6° C-20° C. La temporada de lluvias comienza en mayo y finaliza en octubre, mientras que la estación seca, de noviembre a mayo.

## 2.2 Diseño metodológico

El diseño metodológico (Figura 2) se basó en los estudios a nivel internacional de Zhang *et al.* (2022), Jorge, Vallbéa y Solerb (2019) y Nonni *et al.* (2018) para la selección de los IVs que se analizaron en este trabajo. Mientras que a nivel nacional se consideró el estudio en parcelas experimentales de la Universidad Autónoma Chapingo de López-Hernández (2021) relacionado el monitoreo de estrés hídrico en cultivo de maíz mediante imágenes multispectrales de un VANT. Los IVs seleccionados fueron el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice Normalizado Diferencial de Borde Rojo (NDRE), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde-Rojo (GRNDVI), el Índice de Vegetación de Proporción Verde (GRVI) y el Índice de Vegetación de Rango Dinámico Amplio (WDRVI). Respecto al análisis espaciotemporal de los datos Sentinel-1 la metodología se basó en el estudio de Aobpaet (2022) y Arslan, Topakçı y Demir (2022). Los análisis de correlación se basaron el trabajo de Ma, Johansen y McCabe (2022).



**Figura 2.** Diagrama de flujo de la metodología empleada.

Fuente: elaboración propia con base en Nonni *et al.* (2018), Vallbéa y Solerb (2019), López-Hernández (2021), Jorge, Aobpaet (2022), Zhang *et al.* (2022), Arslan, Topakçı y Demir (2022); Ma, Johansen y McCabe (2022).

### 2.2.1. Datos de entrada

Sentinel-2A y 2B: se seleccionaron 21 imágenes Nivel-2A sin nubosidad desde marzo a octubre de 2022 en Google Earth Engine (GEE), con una resolución espacial de 10m. El Nivel-2A proporciona la reflectancia a nivel de la superficie (también conocida como BOA, por sus siglas en inglés). El área de estudio se encuentra ubicada al noroeste de la escena 14QMG.

Sentinel-1: se seleccionaron 17 imágenes desde marzo a octubre de 2022 en el portal de Copernicus, con un intervalo de 12 días entre imágenes. Se empleó el producto Ground Range Detected (GRD) de nivel 1, modo de franja Interferometric Wide (IW), resolución espacial de 10 m y polarizaciones duales (VV y VH). Igualmente, se seleccionaron imágenes del paso descendente del satélite debido a que éste cubría completamente el área de estudio.

VANT: se emplearon imágenes capturadas a través de una cámara multispectral Sequoia abordo de una plataforma Parrot Disco Pro AG. Esta cámara tiene integrado un GPS con sensor de luz. Además, tiene cuatro bandas: verde (530–570 nm), roja (640–680 nm), borde rojo (730–740 nm) e infrarrojo cercano (NIR) (770–810 nm). Las imágenes de Sequoia fueron tomadas mientras volaba a 50 m de altura de la superficie, obteniendo una resolución espacial de 5 cm. Se realizaron cuatro vuelos entre las 10:30 a 11:30 a.m., con la finalidad de mantener una iluminación similar respecto a las imágenes obtenidas por el satélite Sentinel-2. Los vuelos se realizaron el 05 de julio, 19 de agosto, 28 de septiembre y 28 de octubre de 2022. Asimismo, las imágenes se adquirieron con un 80% de superposición. El sensor capturó 340 imágenes para cada una de las cuatro bandas espectrales.

Datos de campo: se realizaron entrevistas a los agricultores para conocer sus prácticas agronómicas en las etapas clave de crecimiento del cultivo de maíz. El ciclo agrícola comenzó con un barbecho en enero, el riego rodado de las parcelas en febrero, un proceso de rastreo del suelo en marzo, siembra del 28 de marzo al 1 de abril, fertilización y escarda en mayo, aplicación de herbicida en julio, finalmente la cosecha se llevó a cabo en diciembre.

Datos meteorológicos: se realizó un análisis de correlación de los IVs con datos de precipitación acumulada (mm), humedad relativa media mensual (%), temperatura media mensual (°C) y radiación solar media mensual (W/m<sup>2</sup>). Los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica automática de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual se localiza a 19°47'57 N y 99°52'38 W, a una altitud de 2,570 m.s.n.m. Se encuentra ubicada aproximadamente a 5.5 km del área de estudio.

### 2.2.2. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de imágenes de los satélites Sentinel-1 y Sentinel-2, así como del VANT, se empleó una estación de trabajo HP Z6 G4. El equipo de cómputo empleado cuenta con un procesador Intel Xeron® Platinum 8260 CPU 2.40 GHz, 128 GB RAM, NVIDIA Versión 451.48 Quadro P2200.

Preprocesamiento de imágenes Sentinel-1: se utilizó el Sentinel-1 Toolbox del (versión 9.0.0) de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés). La metodología se basó en el estudio de Filipponi (2019), la cual incluyó siete herramientas a) corrección de órbita (Apply orbit), b) eliminación de ruido térmico (Thermal Noise Removal), c) eliminación del ruido de borde (Border Noise Removal), d) calibración (Calibration), e) aplicación de filtro para eliminación de ruido de moteado (Speckle Filtering), f) corrección geométrica (Range Doppler Terrain Correction) y g) conversión de valores de retrodispersión a decibelios (Conversion to dB). Los procesos se realizaron en lote con las herramientas Graph Builder y Batch Processing.

Procesamiento de imágenes Sentinel-2: los IVs seleccionados se calcularon a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE) a partir de las fórmulas de la Tabla 1.

**Tabla 1.** Índices de Vegetación analizados

Índice	Fórmula
NDVI	$(\text{NIR}-\text{RED})/(\text{NIR}+\text{RED})$
NDRE	$(\text{NIR}-\text{REG})/(\text{NIR}+\text{REG})$
GNDVI	$(\text{NIR}-\text{G})/(\text{NIR}+\text{G})$
GRNDVI	$(\text{NIR}-\text{G})/(\text{NIR}+\text{G})$
GRVI	$\text{NIR}/\text{G}$
WDRVI	$((0.1*\text{NIR})-\text{RED})/((0.1*\text{NIR})+\text{RED})$

NIR= infrarrojo cercano, RED= banda roja, REG= banda borde rojo, GREEN= banda verde.

**Fuente:** elaboración propia con base en Zhang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2022; Jorge, *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2022, Maresma *et al.*, 2016.

Preprocesamiento y procesamiento de imágenes del VANT: Los ortomosaicos georreferenciados se generaron utilizando el programa Agisoft Metashape, se emplearon las herramientas a) Orientar fotos, b) Referencia para desarrollar la corrección geométrica importando el archivo con los puntos control terrestres (GCP, por sus siglas en inglés,) en este estudio se consideraron seis GCP, los cuales se obtuvieron por medio de un sistema cinemático en tiempo real (RTK, por sus siglas en inglés) para medir con mayor precisión la posición de los objetos. Éstos se distribuyeron en los vértices y centro del área de estudio. Posteriormente, se empleó la herramienta a) Crear nube de puntos densa, b) Crea la malla, c) Crear el modelo de teselas, d) Crear ortomosaico. Finalmente, a partir de los ortomosaicos se estimaron los mismos IVs que se calcularon con las imágenes Sentinel-2.

### 2.2.3. Análisis espaciotemporal

Las capas ráster de los IVs del satélite Sentinel-2, así como la retrodispersión del satélite Sentinel-1 se vectorizaron a través de la herramienta *Raster Pixels*

to *Points* del programa QGIS versión 3.20.2 para tener un mejor manejo de la información. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis espaciotemporal de los seis IVs y la retrodispersión con la finalidad de determinar su sensibilidad a los cambios del verdor de la planta. Por otro lado, se reclasificaron los índices normalizados NDVI, GNDVI, GRNDVI y NDRE calculados con las imágenes del VANT a través de la herramienta Reclasificación por tabla de QGIS considerando 4 clases asociadas a la salud del cultivo a) planta saludable con valores del 1 al 0.6, b) planta medianamente saludable con valores de 0.6 al 0.3, c) planta enferma con valores de 0.3 al 0 y d) planta muerta u otro objeto con valores de 0 a -1.

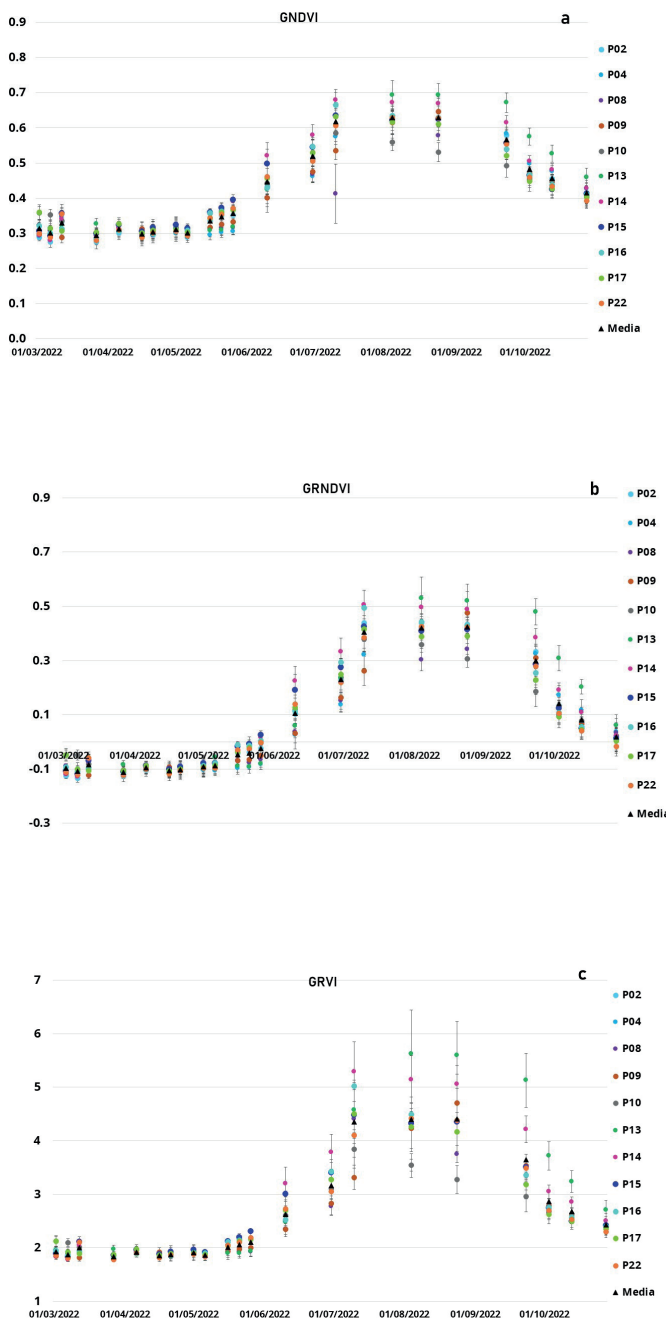
De igual forma, se realizó una segmentación con los resultados de los seis IVs calculados a partir de las imágenes del VANT con el objetivo de realizar una fusión iterativa de regiones a través de una medida de costo de homogeneidad en función de las características espectrales. Se empleó la herramienta segmentación de fusión de regiones genéricas (*Generic Region Merging Processor*) del programa SNAP (Lassalle, Inglada, Michel, Grizonnet y Malik, 2015). La segmentación se realizó a partir de la unión de los 6 IVs (GNDVI, GRNDVI, GRVI, NDRE, NDVI y WDRVI) de las imágenes de los cuatro vuelos del VANT, con los criterios (umbral  $t= 100$ , 50 iteraciones, criterio de fusión de región por el método de *best fitting*, criterio de costo de fusión por el método de *spring*, homogeneidad espectral  $cw= 0.5$  y homogeneidad espacial  $sw= 0.5$ ) y 100 iteraciones. Finalmente, se evaluó la relación de los IVs con los valores de retrodispersados de las polarizaciones VV y VH.

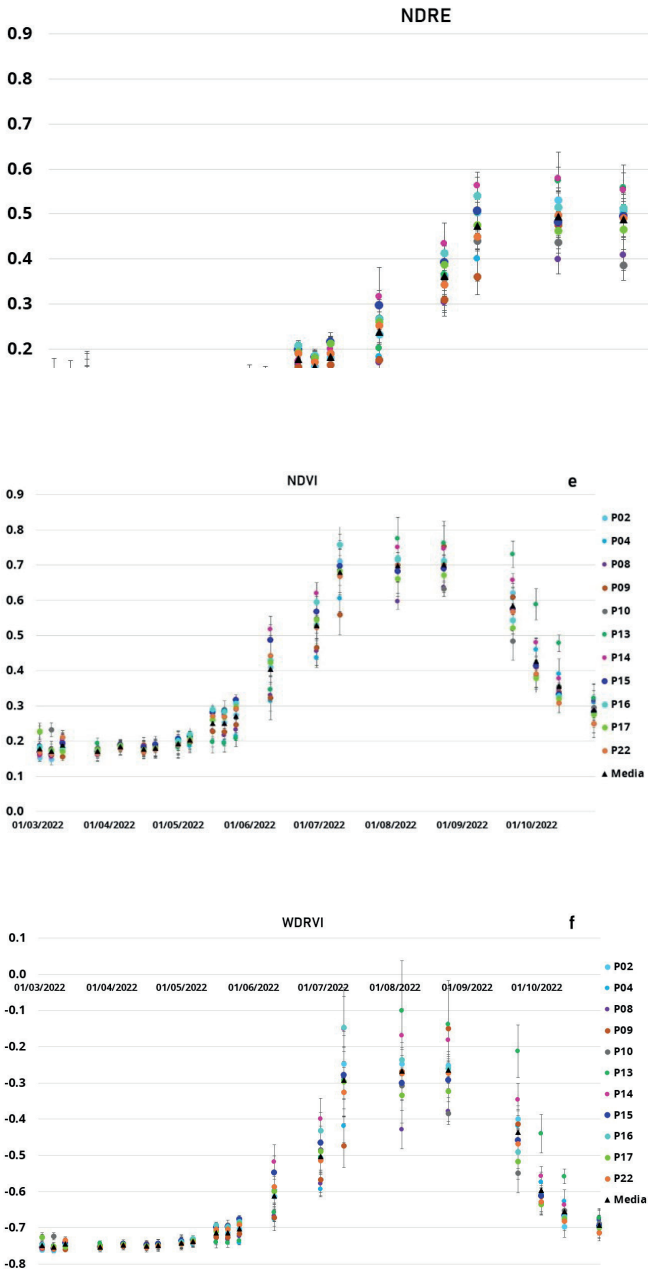
### 3. Resultados y discusión

La Figura 3 presenta las series de tiempo de los valores de los seis IVs calculados a partir de las imágenes Sentinel-2 para las 11 parcelas cultivadas en el ciclo agrícola 2022. Los valores de los IVs fueron relacionados con las prácticas agronómicas y las etapas de crecimiento del maíz. Todos los IVs muestran la distribución normal esperada, se pueden observar valores bajos de IVs en las etapas de siembra y fertilización, después de la aplicación de herbicida se puede observar que los valores de los IVs presentan un crecimiento exponencial con un pico a finales de agosto. Posteriormente, los valores de IVs disminuyen debido a que el contenido de agua del dosel del maíz reduce, indicando que los granos de maíz han pasado por las etapas finales de crecimiento y es hora de cosechar. Por otro lado, en las gráficas se puede observar que los valores de IVs presentaron variabilidad entre parcelas. Los IVs indican una heterogeneidad en la salud del maíz, por ejemplo, en la parcela 13 (P13) tiene valores más altos en los seis IVs que la parcela 8 (P8), lo que podría estar relacionado con diversas causas como la presencia de vegetación herbácea entre los surcos, las diferentes prácticas agronómicas empleadas, la deficiencia de nutrientes o agua entre parcelas y las condiciones de sequía y altas temperaturas registradas (Nonni *et al.*, 2018; Wang, Fang, Zhao, Huang y Jiang, 2020).

Además, la inspección *in situ* confirmó que esta falta de homogeneidad se debe a una vegetación menos vigorosa, debido a que en algunas parcelas las plantas presentan hojas verdes y otras hojas amarillas (Figura 4). Las plantas

verdes son más ricas en clorofila, por lo que se trataba de plantas sanas. Mientras que las plantas amarillas indican que una posible eficiencia de agua o nutrientes.





**Figura 3.** Comportamiento de los seis IVs en la zona de estudio: a) GNDVI, b) GRNDVI, c) GRVI, d) NDRE, e) NDVI y f) WDRVI.

Fuente: elaboración propia con base en los datos de Sentinel-2.



El GNDVI se ha considerado útil para evaluar la variabilidad de la clorofila foliar cuando el índice de área foliar es moderadamente alto (Burns *et al.*, 2022). De igual forma, el GNDVI ha sido de los mejores predictores del rendimiento de grano de maíz al principio de la temporada de crecimiento cuando la aplicación de N adicional todavía es agrónomicamente factible (Maresma *et al.*, 2016; Burns *et al.*, 2022). Además, el NDRE se ha mostrado más ventajoso que NDVI porque es muy sensible a los cambios en las propiedades de la vegetación y particularmente útil para identificar el crecimiento. Asimismo, NDRE se ha utilizado para la detección de irregularidades en el riego (Jorge *et al.*, 2019). Esto es posible debido a una mayor reflectancia en la banda del borde rojo que en la banda roja cuando cambia el contenido de agua y nitrógeno (Raeva *et al.*, 2019; Burns *et al.*, 2022). Comparando los valores obtenidos de NDVI y NDRE del presente estudio, muestran una diferencia de 0.3, especialmente en la etapa reproductiva. Donde el panojamiento es una de las etapas fenológicas más importantes del maíz que influyen en el rendimiento (Jorge *et al.*, 2019). Por otro parte, el GRNDVI ha mostrado potencial para discriminar hojas infestadas de hojas sanas. El análisis concluyó que las hojas sanas presentaron valores más altos de IVs en comparación con las hojas infestadas. Debido a que el ataque es intenso, esta plaga disminuye la capacidad fotosintética de la planta por la destrucción y caída de hojas (Santos *et al.*, 2022). Esta situación podría ser otra razón por la cual hay valores bajos de IVs en algunas de las parcelas (Figura 3b). Para la detección remota de la deficiencia de nitrógeno en el maíz, se ha reportado una mayor sensibilidad del GRVI para evaluar las deficiencias de N en el maíz (Maresma *et al.*, 2016). El cual mostró mayor sensibilidad para detectar anomalías en el maíz entre parcelas (Figura 3c). Otros autores informaron la mayor sensibilidad del GRVI que los índices basados en la banda roja para evaluar las deficiencias de N en el maíz en las etapas de crecimiento V12 o posteriores (Chang *et al.*, 2020). Por último, WDRVI ha mostrado sensibilidad a los cambios en los valores del índice de área foliar (LAI) porque estos mantienen una relación lineal (Marino y Alvino, 2019). Además, WDRVI ha demostrado distinguir aplicaciones de N por encima o por debajo de 250 – 300 kg·N·ha<sup>-1</sup> y en la predicción de rendimiento de grano en la etapa V12. Considerando una caracterización robusta de las características fisiológicas y fenológicas del cultivo (Maresma *et al.*, 2016).

Posteriormente, se realizó una regresión lineal empleando el programa Jamovi entre los valores medios mensuales de los IVs con los datos meteorológicos. La precipitación acumulada mensual (mm), la humedad relativa media mensual (%) y la radiación solar media mensual (W/m<sup>2</sup>) mostraron correlación con los valores medios de los IVs. Sin embargo, la temperatura no mostró correlación (Tabla 2). Se consideró un nivel de confianza del 95%. En la Tabla 3 se presenta la estadística descriptiva de las variables meteorológicas que presentaron correlación con los IVs.

**Tabla 2.** Valores del coeficiente de determinación

Índice	Pe		HR		T		RS	
	R <sup>2</sup>	P	R <sup>2</sup>	P	R <sup>2</sup>	P	R <sup>2</sup>	P
GNDVI	0.665	0.014	0.855	0.001	0.166	0.317	0.739	0.006
GRNDVI	0.733	0.007	0.791	0.003	0.111	0.419	0.654	0.015
GRVI	0.758	0.005	0.751	0.005	0.112	0.419	0.610	0.022
NDRE	0.672	0.013	0.748	0.006	0.080	0.496	0.587	0.027
NDVI	0.733	0.007	0.788	0.003	0.100	0.445	0.648	0.016
WDRVI	0.796	0.003	0.691	0.011	0.071	0.524	0.536	0.039

Pe= precipitación, HR= humedad relativa, T= temperatura, RS= radiación solar.

**Fuente:** elaboración propia con base en datos de la Estación Meteorológica Automática de Atlacomulco.

**Tabla 3.** Estadística descriptiva de la precipitación, humedad relativa y radiación solar

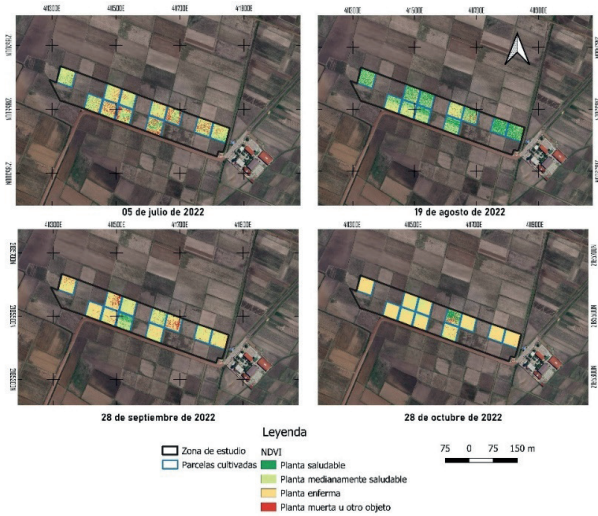
Mes	Pe (mm)				HR (%)				RS (W/m <sup>2</sup> )			
	Acu	Max	Min	Media	Max	Min	SD	Media	Max	Min	SD	
Marzo	3	1	0	34	90	2	19	303	1269	0	396	
Abril	56	7	0	45	97	1	24	292	1314	0	388	
Mayo	20	2	0	39	93	3	22	311	1266	0	401	
Junio	101	6	0	60	100	4	22	238	1253	0	339	
Julio	182	14	0	68	100	9	22	227	1242	0	329	
Agosto	157	12	0	73	100	17	22	222	1325	0	326	
Septiembre	60	5	0	70	100	21	18	238	1227	0	238	
Octubre	60	4	0	70	100	20	22	222	1167	0	330	

SD=desviación estándar, Max=máximo, Min=mínimo, Pe=precipitación, HR=humedad relativa, Acu=acumulada, PS= radiación solar.

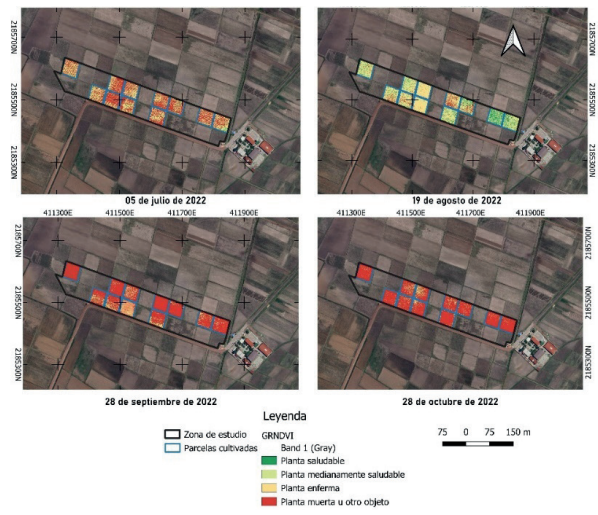
**Fuente:** elaboración propia con base en datos de la Estación Meteorológica Automática de Atlacomulco.

Con base en el análisis de los datos meteorológicos y considerando el día de la siembra y las etapas de crecimiento cruciales del maíz para obtener un óptimo rendimiento (etapas V12, V18 y VT de crecimiento vegetativo y emergencia de barbas de la etapa reproductiva), se determinó que es necesario el riego en dichas etapas con la finalidad de mejorar el rendimiento de las parcelas, debido a la baja precipitación en los meses de mayo a junio donde se desarrollan dichas etapas.

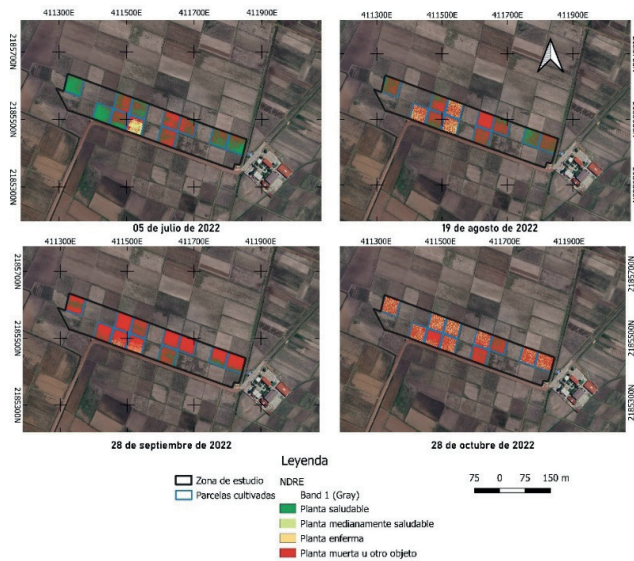
La Figura 6, Figura 7 y Figura 8, presentan mapas de los datos reclasificados del IVs normalizados NDVI, GRNDVI y NDRE del VANT. En la Figura 8, se puede observar que en la parcela 10 (P10) fue sembrada días posteriores en comparación con las otras parcelas debido a que el 28 de octubre presenta valores de 0.6 a 1, mientras que las otras parcelas presentan valores menores a 0.6.



**Figura 6.** Evolución del NDVI en los cuatro vuelos del VANT realizados. Fuente: elaboración propia con base en imágenes del VANT (resolución espacial 5cm).



**Figura 7.** Evolución del GRNDVI en los cuatro vuelos del VANT realizados. Fuente: elaboración propia con base en imágenes del VANT (resolución espacial 5 cm).

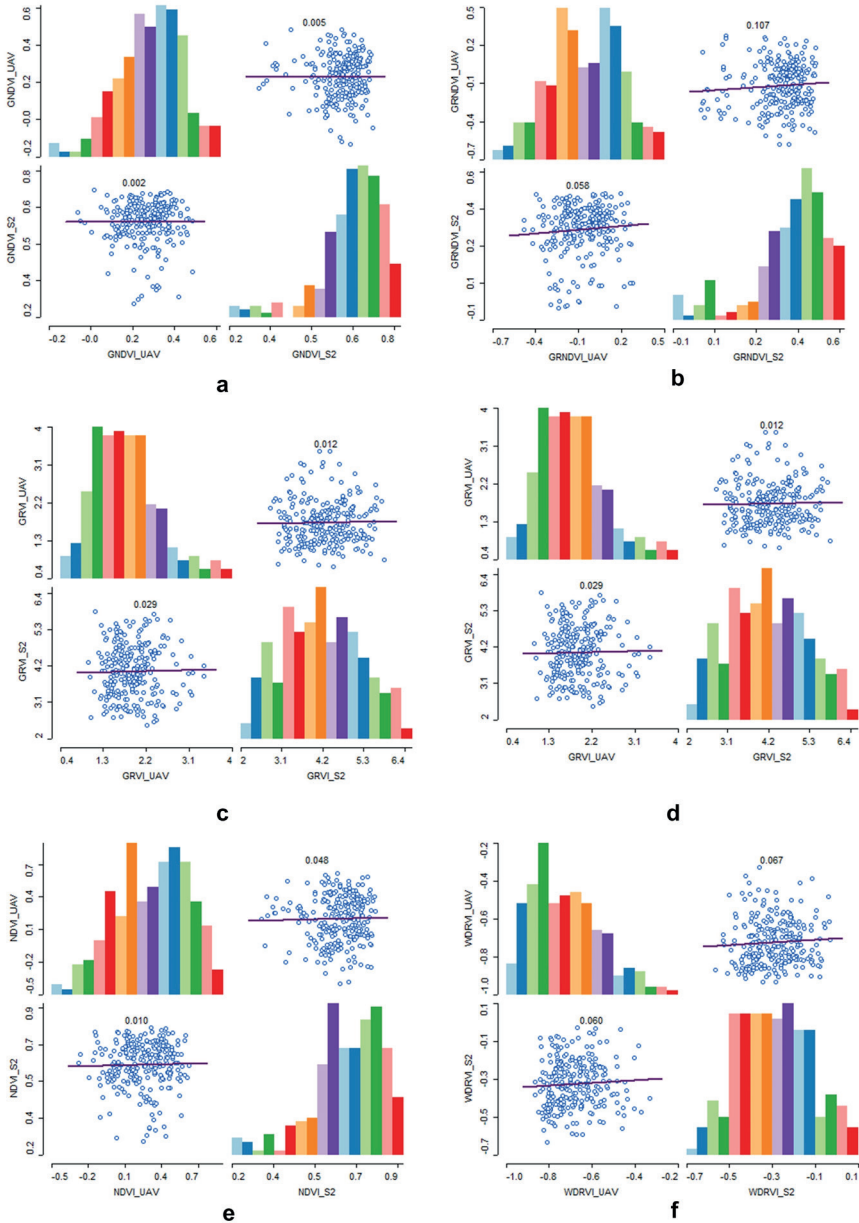


**Figura 8.** Evolución del NRDE en los cuatro vuelos del VANT realizados.

Fuente: elaboración propia con base en imágenes del VANT (resolución espacial 5 cm).

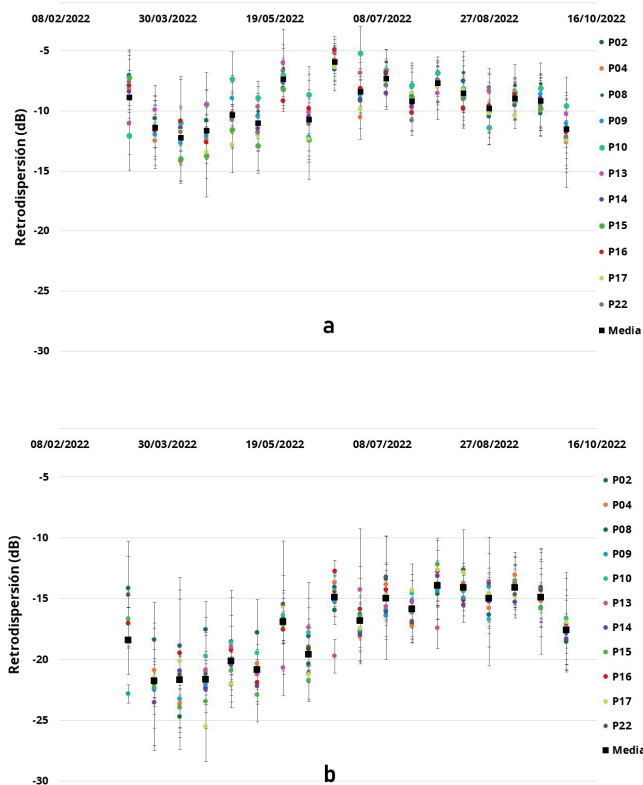
En la Figura 9, se presenta el histograma de los IVs obtenidos a partir del VANT y Sentinel-2 para el mes de julio en la etapa reproductiva de la planta de maíz, se puede observar una mayor variabilidad en los datos del VANT, esto se debe principalmente a que el sensor del VANT detecta la respuesta del suelo desprovisto de vegetación de los surcos, por lo que es recomendable eliminar el ruido que causa el suelo en los datos del VANT a través de una clasificación supervisada, por otro lado, es importante realizar el seguimiento de todo el ciclo fenológico del maíz a partir de imágenes obtenidas del VANT como se llevó a cabo con sensores satelitales.

Respecto a los resultados del satélite activo Sentinel-1, se realizó el seguimiento de las retrodispersiones polarizadas VV y VH de marzo a octubre de 2022 (Figura 10). La tendencia de ambas polarizaciones mostró valores altos de retrodispersión durante las etapas vegetativas del maíz cercanas al panojamiento. Mientras que en las actividades de barbecho, riego, rastreo y siembra demostraron menores valores de retrodispersión se puede atribuir la rugosidad del suelo en estas etapas. De esta forma, los valores altos en las parcelas fueron causados por la vegetación y el contenido de agua del suelo, mientras que los valores más bajos en la etapa vegetativa indican parcelas con estrés hídrico.



**Figura 9.** Histograma de los datos del VANT (reescalada a 10m) y Sentinel-2 en julio para cada IVs.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 10.** Retrodispersión multitemporal de los valores de las polarizaciones a) VV y b) VH. Fuente: elaboración propia con base en pase descendente Sentinel-1, trayectoria 41.

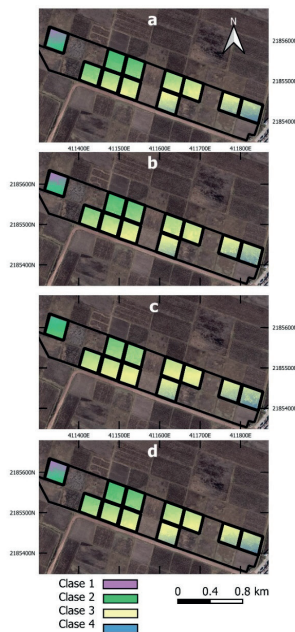
Durante el crecimiento de la vegetación, la retrodispersión polarizada VV demostró una variación de amplitud mayor que la retrodispersión polarizada VH. Por lo tanto, es importante considerar que las señales de radar pueden volverse sensibles a la humedad del suelo (Arslan *et al.*, 2022), especialmente cuando la distancia entre surcos es amplia. Por otro lado, la disminución de retrodispersión indica que el contenido de agua del dosel ha comenzado a disminuir y que es hora de cosechar. Finalmente, los datos de los IVs se correlacionaron con los valores de retrodispersión de las polarizaciones VV y VH. En diversos estudios se ha explorado el potencial de estas polarizaciones para monitorear los cambios en los cultivos (Ma *et al.*, 2022; Wang, *et al.*, 2020). Otros estudios han revelado la posibilidad de complementar los IVs con la información de la retrodispersión debido a la falta de datos de sensores ópticos debido a la nubosidad (Aobpaet, 2022). El resultado de este estudio mostró valores altos del coeficiente de determinación entre retrodispersiones polarizadas VH y todos los VI analizados (Tabla 4).

**Tabla 4.** Valores del coeficiente de determinación de la correlación entre los IVs y retrodispersión

Índice	VH		VV	
	R <sup>2</sup>	P	R <sup>2</sup>	P
GNDVI	0.919	<0.001	0.456	0.066
GRNDVI	0.895	<0.001	0.507	0.048
GRVI	0.858	<0.001	0.467	0.062
NDRE	0.907	<0.001	0.568	0.031
NDVI	0.900	<0.001	0.531	0.040
WDRVI	0.836	0.001	0.523	0.043

**Fuente:** elaboración propia con base en datos de Sentinel-1.

Finalmente, con relación a los resultados de la segmentación de fusión de regiones genéricas de los IVs calculados a partir de las imágenes del VANT, se observan las regiones del área de estudio que presentan características similares (Figura 11). Se logró determinar que la clase 2 representa los valores más altos de los IVs. Además, se puede observar que el comportamiento de las regiones es similar en el tiempo.



**Figura 11.** Segmentación considerando los seis IVs del área de estudio .

Fuente: elaboración propia con base en imágenes del VANT (resolución espacial 5 cm).

## 4. Conclusiones

La información obtenida a partir de los tres sensores remotos abordo de los satélites Sentinel-1, Sentinel-2 y un vehículo aéreo no tripulado permitió analizar la dinámica espaciotemporal del cultivo de maíz en 5.5 hectáreas del Ejido de San Francisco Chalchihuapan del municipio de Atlacomulco, Estado de México. Se identificó una falta de homogeneidad espacial y temporal de la salud del cultivo en las 11 parcelas analizadas, lo cual se determinó con seis IVs. Los índices GRNDVI, NDRE y WDRVI demostraron una mayor sensibilidad a los cambios en el verdor del maíz que NDVI, lo que indica que estos podrían ser mejores predictores del rendimiento del maíz en la etapa de crecimiento. Por otro lado, respecto a la información obtenida del VANT se detectó que es recomendable eliminar el ruido generado por el suelo de los surcos con la finalidad de obtener solo la respuesta espectral del cultivo. Finalmente, la retrodispersión polarizada VH han demostrado un potencial en el monitoreo del crecimiento del maíz debido a su alta correlación con los IVs. Por lo tanto, el uso de datos SAR en aplicaciones agrícolas podría usarse cuando no estén disponibles datos de sensores ópticos. En estudios futuros, es conveniente estimar el rendimiento del maíz a través de los IVs NDRE, WDRVI y GRNDVI.

## Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades brindadas por los agricultores del Ejido San Francisco Chalchihuapan. Su agradecimiento especial al señor Miguel Ángel Martínez presidente del Comisariado Ejidal, al señor Bernabé Martínez y al ingeniero. Daniel Mendoza González por su apoyo y compartir sus experiencias. Los autores desean dar un importante agradecimiento al Centro Regional de Desarrollo Espacial (CREDES) Estado de México de la Agencia Espacial Mexicana (AEM) por el acceso al equipo de cómputo del Laboratorio de Análisis y Procesamiento de Imágenes (LAPI). Finalmente, un agradecimiento especial al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por haber otorgado el apoyo económico al primer autor, lo que permitió realizar este estudio.

## Bibliografía

- Aobpaet, A. (2022). Monitoring of crop growth stages using Sentinel-1 synthetic aperture radar data. *Agriculture and Natural Resources*, 56(2), 307-320.  
DOI: <https://doi.org/10.34044/j.anres.2022.56.2.09>
- Arslan, I., Topakçı, M. y Demir, N. (2022). Monitoring Maize Growth and Calculating Plant Heights with Synthetic Aperture Radar (SAR) and Optical Satellite Images. *Agriculture*, 12(6), 800.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12060800>
- Burns, B., Green, V., Hashem, A., Massey, J. H., Shew, A., Adviento-Borbe, M. y Milad, M. (2022). Determining nitrogen deficiencies for maize using various remote sensing indices. *Precision Agriculture*, 23(3), 791-811.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09861-4>

- Chang, C., Zhou, R., Kira, O., Marri, S., Skovira, J., Gu, L. y Sun, Y. (2020). An Unmanned Aerial System (UAS) for concurrent measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence and hyperspectral reflectance toward improving crop monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 294, 108145.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108145>
- Delavarpour, N., Koparan, C., Nowatzki, J., Bajwa, S. y Sun, X. (2021). A Technical Study on UAV Characteristics for Precision Agriculture Applications and Associated Practical Challenges. *Remote Sensing*, 1204.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13061204>
- Diario Oficial de la Federación [DOF]* (2020, 25 de junio). Programa Sectorial de Agricultura y Desarrollo Rural 2020–2024. Recuperado de [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5595549&fecha=25/06/2020#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5595549&fecha=25/06/2020#gsc.tab=0)
- Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. *Multidisciplinary digital publishing. Proceedings*, 18(1), 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06201>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2022, 04 de octubre). Panorama General. Censo Agropecuario 2022. Recuperado de [https://en.www.inegi.org.mx/contenidos/app/consultapublica/doc/descarga/CA2022/proyecto/Presn\\_ConsultaCA22.pdf](https://en.www.inegi.org.mx/contenidos/app/consultapublica/doc/descarga/CA2022/proyecto/Presn_ConsultaCA22.pdf)
- Johri, P., Singh, J., Khatri, S., Bagchi, A., y Rajesh, E. (2021). Role of Satellites in Agriculture. En Moh, M., Sharma, K.P., Agrawal, R. y Garcia-Diaz, V. (Ed.), *Smart IoT for Research and Industry* (pp.109-120). *Suiza: Springer Nature*.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-71485-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71485-7_6)
- Jorge, J., Vallbéa, M. y Soler, J. A. (2019). Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images. *European Journal of Remote*, 52(1), 169-177.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1572459>
- Karunathilake, E. M. B. M., Le, A. T., Heo, S., Chung, Y. S., y Mansoor, S. (2023). The path to smart farming: Innovations and opportunities in precision agriculture. *Agriculture*, 13(8), 1593. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081593>
- Lassalle, P., Inglada, J., Michel, J., Grizonnet, M. y Malik, J. (2015). A scalable tile-based framework for region-merging segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(10), 5473-5485.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2422848>
- Lee, C., Strong, R. y Dooley, K. (2021,) Analyzing Precision Agriculture Adoption across the Globe: A Systematic Review of Scholarship from 1999–2020. *Sustainability*, 13(18), 10295. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131810295>
- Ma, C., Johansen, K. y McCabe, M. (2022). Monitoring Irrigation Events and Crop Dynamics Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series. *Remote Sensing*, 14(5), 1205.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14051205>
- Maresma, Á., Ariza, M., Martínez, E., Lloveras, J. y Martínez-Casasnovas, J. A. (2016) Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in maize (*Zea mays* L.) from a standard UAV service. *Remote Sensing*, 8(12), 973.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8120973>
- Marino, S. y Alvino, A. (2019). Detection of Spatial and Temporal Variability of Wheat Cultivars by High-Resolution Vegetation Indices. *Agronomy*, 9(5), 226.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9050226>
- Mahlayeye, M., Darvishzadeh, R. y Nelson, A. (2022). Cropping Patterns of Annual Crops: A Remote Sensing Review. *Remote Sensing*, 14(10), 2404.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14102404>

- Mushi, G., Di Marzo, S. y Burgi, P. (2022). Digital Technology and Services for Sustainable Agriculture in Tanzania: A Literature Review. *Sustainability*, 14(4), 2415.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/su14042415>
- Nonni, F., Malacarne, D., Pappalardo, S., Codato, D., Meggio, F., y De Marchi, M. (2018). Sentinel-2 Data Analysis and Comparison with UAV Multispectral Images for Precision Viticulture. *GI Forum*, 1, 105-116.  
DOI: [https://doi.org/10.1553/giscience2018\\_01\\_s105](https://doi.org/10.1553/giscience2018_01_s105)
- Raeva, P., Šedina, J. y Dlesk, A. (2019). Monitoring of crop fields using multispectral and thermal imagery from UAV. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 192-201.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1527661>
- Raj, M., Gupta, S., Chamola, V., Elhence, A., Garg, T., Atiquzzaman, M. y Niyato, D. (2021). A survey on the role of Internet of Things for adopting and promoting Agriculture 4.0. *Journal of Network and Computer Applications*, 187(1), 103107.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103107>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER]. (2022, 8 de marzo). Agricultura Sostenible. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/agricultura-sostenible>
- Santos, L., Ferraz, G., Marin, D., Carvalho, M., Dias, J., Alecrim, A. y Silva, M. (2022) Vegetation Indices Applied to Suborbital Multispectral Images of Healthy Coffee and Coffee Infested with Coffee Leaf Miner. *AgriEngineering*, 4(1), 311-319.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering4010021>
- Wang, Y., Fang, S., Zhao, L., Huang, X. y Jiang, X. (2020) Parcel-based summer maize mapping and phenology estimation combined using Sentinel-2 and time series Sentinel-1 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108, 102720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102720>
- Yang, X., Shu, L., Chen, J., Ferrag, M., Wu, J., Nurellari, E. & Kai, H. (2021). A Survey on Smart Agriculture: Development Modes, Technologies, and Security and Privacy Challenges. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(2), 273-302.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/JAS.2020.1003536>
- Zhang, S., Yang, J., Leng, P., Ma, Y., Wang, H. & Song, H. (2023). Crop Type Mapping with Temporal Sample Migration. *International Journal of Remote Sensing*, 1-19.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2192881>
- Zhang, X., Zhang, K., Sun, Y., Zhao, Y., Zhuang, H., Ban, W., . . . Hao, Y. (2022). Combining Spectral and Texture Features of UAS-Based Multispectral Images for Maize Leaf Area Index Estimation. *Remote Sensing*, 14(2), 331.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14020331>