

# Análisis Comparativo Sentinel-2 vs Sequoia en la Estimación de ETc Basada en NDVI

## Comparative Analysis of Sentinel-2 vs Sequoia in NDVI-Based ETc Estimation

Servín-Prieto, A.J.<sup>1</sup>; Juárez-Hernández, J.M.<sup>2</sup>✉; Hernández-López, M.<sup>3</sup>; Velásquez-Chávez, T.E.<sup>4</sup>; Adame-Delgado, R.<sup>5</sup>

### Datos de Adscripción:

<sup>1</sup> Servín Prieto, Alan Joel  
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.  
ROR ID: <https://ror.org/00davry38>  
ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>  
alan.sp@itslerdo.edu.mx  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-7875>

<sup>2</sup> ✉ Juárez Hernández, José María  
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.  
ROR ID: <https://ror.org/00davry38>  
ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>  
jose.jh@itslerdo.edu.mx  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5790-651X>

<sup>3</sup> Hernández López, Mónica  
TecNM: Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón, Coahuila. México.  
ROR ID: <https://ror.org/00davry38>  
monicahlop@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6249-127X>

<sup>4</sup> Velásquez Chávez, Tania Elizabeth  
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.  
ROR ID: <https://ror.org/00davry38>  
ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>  
tania.vc@itslerdo.edu.mx  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7788-1786>

<sup>5</sup> Adame Delgado, Raymundo  
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.  
ROR ID: <https://ror.org/00davry38>  
ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>  
raymundo.ad@itslerdo.edu.mx  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9248-6376>

**Resumen.**— La estimación precisa de la evapotranspiración del cultivo (ETc) es fundamental para el manejo eficiente del agua en la agricultura. En este estudio se evaluó la relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la ETc mediante el método de dos pasos, utilizando datos de sensores satelitales y de vehículo aéreo no tripulado (UAV). Se emplearon imágenes del satélite Sentinel-2 y un sensor multispectral Parrot Sequoia, además de datos de evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) obtenidos de una estación meteorológica localizada en el sitio de estudio. El NDVI se transformó a coeficiente de cultivo (Kc) mediante una relación lineal, y posteriormente se estimó la ETc. Los resultados mostraron que el NDVI derivado del sensor UAV fue consistentemente mayor que el obtenido de Sentinel-2, con diferencias promedio entre 15% y 30%, lo que se reflejó en valores superiores de Kc y ETc, alcanzando diferencias de hasta 1.5 mm día<sup>-1</sup>. Asimismo, se observó una correlación moderada entre ambas fuentes de datos ( $r = 0.9398$ ), lo que indica una

concordancia general en la detección del vigor del cultivo, aunque con un sesgo sistemático atribuible a la resolución espacial y a la heterogeneidad del dosel vegetal. Se concluye que el uso de sensores UAV permite una mejor representación de la variabilidad espacial del cultivo, lo que impacta significativamente en la estimación de la evapotranspiración. Estos resultados destacan la importancia de la resolución espacial en aplicaciones de agricultura de precisión y manejo hídrico.

**Palabras Clave** – Agricultura de precisión, Evapotranspiración, NDVI, Sentinel-2, Sequoia

**Abstract** - Accurate estimation of crop evapotranspiration (ETc) is essential for efficient water management in agriculture. This study evaluated the relationship between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and ETc using the two-step method, integrating data from satellite and unmanned aerial vehicle (UAV) sensors. Imagery from Sentinel-2 and a multispectral Parrot Sequoia sensor were used, along with reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) obtained from a meteorological station located at the study site. NDVI values were transformed into crop coefficient (Kc) using a linear relationship, and ETc was subsequently estimated. Results showed that NDVI derived from the UAV sensor was consistently higher than that obtained from Sentinel-2, with average differences ranging from 15% to 30%. These differences resulted in higher Kc and ETc values, with deviations of up to 1.5 mm day<sup>-1</sup>. A moderate correlation was observed between both data sources ( $r = 0.61$ ), indicating general agreement in crop vigor detection, although a systematic bias associated with spatial resolution and canopy heterogeneity was identified. It is concluded that UAV-based sensors provide a more detailed representation of crop spatial variability, significantly influencing evapotranspiration estimates. These findings highlight the importance of spatial resolution in precision agriculture and water management applications.

**Keywords** – Precision agriculture, Evapotranspiration, NDVI, Sentinel-2, Sequoia

## I. INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola es uno de los sectores con mayor demanda de agua a nivel mundial, por lo que el manejo eficiente de este recurso se ha convertido en una prioridad para garantizar la sostenibilidad de los sistemas productivos. En este sentido, la estimación precisa de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) resulta fundamental, ya que permite conocer las necesidades hídricas reales de los cultivos y optimizar las estrategias de riego (Allen *et al.*, 1998).

Tradicionalmente, la evapotranspiración se ha estimado mediante métodos basados en información meteorológica y en coeficientes de cultivo ( $K_c$ ), conocidos como métodos directos. Uno de los enfoques más utilizados en la actualidad es el método de dos pasos propuesto por la FAO, el cual estima la  $ET_c$  a partir de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y el coeficiente de cultivo mediante la relación:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

Sin embargo, la determinación del coeficiente de cultivo mediante técnicas convencionales suele presentar limitaciones debido a la variabilidad espacial y temporal en el desarrollo del cultivo. Ante esta situación, la percepción remota ha surgido como una herramienta eficiente para estimar variables biofísicas asociadas al estado del cultivo (Jensen, 2015).

Entre los índices espectrales más utilizados destaca el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que permite evaluar el vigor y la cobertura vegetal a partir de los valores de reflectancia registrados en las bandas espectrales del rojo y del infrarrojo cercano (Rouse *et al.*, 1974). Diversos estudios han demostrado la existencia de relaciones lineales entre el NDVI y el coeficiente de cultivo, lo que permite estimar la evapotranspiración a partir de información satelital y de sensores remotos (Glenn *et al.*, 2008).

Actualmente, plataformas satelitales como Sentinel-2 proporcionan imágenes multiespectrales de acceso libre con una resolución espacial y temporal adecuada para aplicaciones agrícolas. Asimismo, el uso de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con sensores multiespectrales ha permitido obtener información de muy alta resolución espacial, lo que facilita el análisis detallado de la variabilidad del cultivo (Zhang & Kovacs, 2012).

A pesar de las ventajas que ofrecen ambas tecnologías, existen diferencias importantes en la resolución espacial, la escala de análisis y la capacidad de detectar la heterogeneidad del dosel vegetal, que pueden influir significativamente en la estimación del NDVI y, en consecuencia, en los valores de  $K_c$  y  $ET_c$ .

Por ello, el objetivo de este estudio consistió en evaluar la relación entre el NDVI y la evapotranspiración del cultivo mediante un método de dos pasos, utilizando información obtenida a partir de imágenes de Sentinel-2 y de un sensor multiespectral de un UAV Parrot Sequoia. Asimismo, se buscó comparar ambas fuentes de información y analizar el impacto de la resolución espacial en la estimación de la evapotranspiración en aplicaciones de agricultura de precisión.

## II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

### 2.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Granja Palestina, una unidad de producción agrícola-pecuaria ubicada en el municipio de Francisco I. Madero, en el estado de Coahuila, México. El sitio de estudio se ubica geográficamente en las coordenadas 25°46'53.2" de latitud norte y 103°18'28" de longitud oeste, a una altitud aproximada de 1,109 msnm (Figura 1).

**Figura 1**

Localización del predio Granja Palestina



El predio cuenta con una superficie total de 52.6 ha y se caracteriza por la realización de actividades agrícolas y pecuarias propias de la región semiárida del norte de México. Las condiciones climáticas predominantes en la zona favorecen el desarrollo de la agricultura bajo riego, por lo que el manejo eficiente del recurso hídrico es fundamental para la productividad agrícola (INEGI, 2020).

En el área de estudio se realizaron mediciones y se adquirió información espectral mediante sensores remotos de satélites y de vehículos aéreos no tripulados. El sitio contó con una estación meteorológica automática, utilizada para obtener las variables climáticas necesarias para calcular la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ).

Las campañas de adquisición de datos se realizaron en diferentes etapas fenológicas del cultivo, con el propósito de evaluar el comportamiento temporal del NDVI y su relación con la evapotranspiración del cultivo.

### 2.2 Adquisición de imágenes Sentinel-2

Para el análisis satelital se emplearon imágenes multiespectrales del satélite Sentinel-2 perteneciente al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Sentinel-2 proporciona imágenes con resolución espacial de 10 m, 20 m y 60 m, así como una resolución temporal de aproximadamente cinco días, lo que permite desarrollar aplicaciones agrícolas y ambientales de alta precisión (Drush *et al.*, 2012).

Las imágenes utilizadas corresponden a las mismas fechas en que se realizaron las campañas de vuelo con el UAV, con el objetivo de reducir la diferencia temporal entre ambas fuentes de información.

Las bandas espectrales empleadas para el cálculo del NDVI fueron las que se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Bandas espectrales del satélite Sentinel-2*

| Banda espectral | Longitud de onda (µm) |
|-----------------|-----------------------|
| Red (Banda 4)   | 665 nm                |
| NIR (Banda 8)   | 842 nm                |

Las imágenes fueron obtenidas a través de la plataforma Data Access Hubs del servicio Copernicus. Se aplicaron filtros de nubosidad para seleccionar únicamente las imágenes con baja cobertura de nubes en el área de estudio.

Posteriormente, las imágenes fueron recortadas con el polígono delimitado de la Granja Palestina, limitando el análisis únicamente a la superficie agrícola de interés.

### 2.3 Adquisición de imágenes UAV con sensor Parrot Sequoia

Con el propósito de comparar la respuesta espectral obtenida mediante sensores satelitales y de proximidad, se realizaron vuelos con un UAV equipado con el sensor multiespectral Parrot Sequoia.

El sensor Parrot Sequoia cuenta con cuatro bandas espectrales, como se observa en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Bandas espectrales del sensor Parrot Sequoia*

| Banda espectral | Longitud de onda (µm) |
|-----------------|-----------------------|
| Green           | 550 nm                |
| Red             | 660 nm                |
| Red Edge        | 735 nm                |
| NIR Near        | 790 nm                |

Además, el UAV incorpora un sensor RGB convencional y un sensor de irradiancia solar, lo que permite mejorar la calibración radiométrica de las imágenes.

Los vuelos se realizaron a una altura aproximada de 120 m sobre el nivel del terreno, con una resolución espacial de 18 cm, superior a la de Sentinel-2. Las misiones de vuelo fueron planificadas utilizando trayectorias automáticas con traslape longitudinal del 70% y transversal del 60%, lo que garantiza la cobertura total del predio y una adecuada reconstrucción fotogramétrica.

Las imágenes obtenidas fueron procesadas con el software Pix4D, especializado en la generación de orto mosaicos multiespectrales georreferenciados. Posteriormente, se realizaron procesos de calibración radiométrica utilizando paneles de reflectancia y el sensor de luz incidente.

### 2.4 Cálculo de Índice de Vegetación NDVI

El NDVI se utilizó como indicador del vigor y de la cobertura vegetal del cultivo.

El cálculo del NDVI se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (2)$$

Donde:

- NIR representa la reflectancia en el infrarrojo.
- Red representa la reflectancia en la banda roja.

Los valores del NDVI varían entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican vegetación vigorosa y sana, así como una alta actividad fotosintética (Rouse *et al.*, 1974).

El cálculo fue realizado tanto para las imágenes de Sentinel-2 como para los orto mosaicos generados con el sensor Parrot Sequoia. Posteriormente, se generaron mapas de la distribución espacial del NDVI para analizar la variabilidad del cultivo en el sitio de estudio.

### 2.5 Obtención de la Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>0</sub>)

La ET<sub>0</sub> se obtuvo a partir de datos meteorológicos registrados por una estación climatológica automática de la marca DAVIS instalada en la Granja Palestina. La estación permitió el monitoreo continuo de variables climáticas necesarias para el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

Las variables climáticas consideradas fueron: la temperatura máxima y mínima, la humedad relativa, la velocidad del viento, la radiación solar y la precipitación, entre otras.

El cálculo de ET<sub>0</sub> se realizó mediante el método Penman-Monteith de la FAO-56, considerado el estándar internacional para la estimación de la evapotranspiración (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_0 = \frac{[0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \left( \frac{900}{T + 273} \right) u_2 (es - ea)]}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} \quad (3)$$

Donde:

- ET<sub>0</sub> corresponde a la evapotranspiración de referencia.
- Rn representa la radiación neta.
- G el flujo de calor en el suelo.
- T corresponde a la temperatura media del aire.
- U<sub>2</sub> representa la velocidad del viento.
- es-ea corresponde al déficit de presión de vapor.
- A es la pendiente de la curva de presión de vapor.
- Y corresponde a la constante psicrométrica.

Los datos meteorológicos fueron procesados diariamente y posteriormente integrados con la información espectral obtenida por los sensores. Antes de realizar los análisis estadísticos y espaciales.

### 2.6 Relación NDVI - Kc

Con el propósito de estimar la evapotranspiración del cultivo, los valores de NDVI se transformaron en el coeficiente de cultivo Kc mediante una relación reportada por Calera *et al.*, 2018.

$$Kc = 1.25(NDVI) - 0.2 \quad (4)$$

Esta relación permite estimar dinámicamente el coeficiente de cultivo a partir del vigor vegetativo observado mediante sensores remotos (Gleen *et al.*, 2008).

Posteriormente, el cálculo de la evapotranspiración del cultivo se realizó por el método de dos pasos:

$$ETc = Kc \times ET_0 \quad (5)$$

Donde:

- ETc corresponde a la evapotranspiración del cultivo.
- Kc representa el coeficiente de cultivo.
- ET0 corresponde a la evapotranspiración de referencia.

Este procedimiento se aplicó tanto a los valores de NDVI obtenidos con Sentinel-2 como a los derivados del sensor Parrot Sequoia.

## 2.7 Procesamiento y análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron organizados y procesados con Excel® y Statgraphics®.

Se realizaron análisis comparativos entre:

- NDVI Sentinel-2 vs. NDVI UAV
- Kc Sentinel-2 vs. Kc UAV
- ETc Sentinel-2 vs. ETc UAV

Asimismo, se aplicaron análisis de correlación lineal para evaluar el grado de asociación entre ambas fuentes de información.

El coeficiente de correlación de Pearson se calculó mediante la expresión:

$$r = \frac{\sum[(xi - \bar{x})(yi - \bar{y})]}{\sqrt{[\sum(xi - \bar{x})^2 \sum(yi - \bar{y})^2]}} \quad (6)$$

Además, se analizaron las diferencias porcentuales y los errores promedio entre los valores estimados obtenidos a partir de ambas fuentes de información.

## 2.8 Generación de mapas temáticos

Finalmente, se generaron mapas temáticos de NDVI, Kc y ETc para visualizar la distribución espacial del cultivo en el área de estudio.

Los productos cartográficos permiten identificar zonas de diferente vigor vegetativo y variabilidad hídrica, facilitando el análisis espacial del comportamiento del cultivo.

La alta resolución espacial obtenida con UAV permitió detectar patrones de variabilidad no identificables en las imágenes de Sentinel-2.

# III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 3.1 Análisis descriptivo de los valores de NDVI

A partir de la base de datos integrada por un total de 95 observaciones en dos periodos de tiempo, 2020 y 2021, se compararon los valores de NDVI obtenidos con los sensores Sentinel-2 y Parrot Sequoia. Los resultados mostraron que el NDVI obtenido con el Parrot Sequoia presentó valores promedio superiores a los estimados a partir de Sentinel-2.

El NDVI de Sentinel-2 presentó una media de 0.596, con valores mínimos y máximos de 0.181 y 0.877, respectivamente. Por su parte, el NDVI de Sequoia mostró una media de 0.714, con valores entre 0.147 y 0.887. Esta diferencia indica que el sensor del UAV registró una mayor respuesta espectral asociada al vigor vegetal del cultivo (Tabla 3).

**Tabla 3**

*Estadística descriptiva de NDVI, Kc y ETc*

| Variable        | Media | Desviación estándar | Mínimo | Máximo |
|-----------------|-------|---------------------|--------|--------|
| NDVI Sentinel-2 | 0.596 | 0.162               | 0.181  | 0.877  |
| NDVI Sequoia    | 0.714 | 0.176               | 0.147  | 0.887  |
| Kc Sentinel-2   | 0.545 | 0.202               | 0.027  | 0.897  |
| Kc Sequoia      | 0.692 | 0.220               | -0.016 | 0.909  |
| ETc Sentinel-2  | 0.354 | 0.140               | 0.018  | 0.627  |
| ETc Sequoia     | 0.448 | 0.146               | -0.008 | 0.639  |

La diferencia promedio entre ambos sensores fue de 0.118 unidades de NDVI, siendo mayor la obtenida con Sequoia. Esta diferencia representa un incremento aproximado del 19,7% respecto al NDVI promedio estimado a partir de Sentinel-2. Lo anterior puede explicarse por la mayor resolución espacial del sensor Parrot Sequoia, que permitió detectar con mayor detalle la variabilidad del dosel vegetal y reducir el efecto de la suciedad espectral entre la vegetación, el suelo desnudo y las sombras.

## 3.2 Comparación temporal Sentinel-2 y Parrot Sequoia

El análisis por fecha permitió observar que las mayores diferencias entre los sensores se registraron durante el ciclo 2020, principalmente en las fechas del 27 de abril, 7 de mayo, 17 de mayo y 6 de junio. En estas fechas, el NDVI de Sequoia fue considerablemente superior al de Sentinel-2 (Tabla 4).

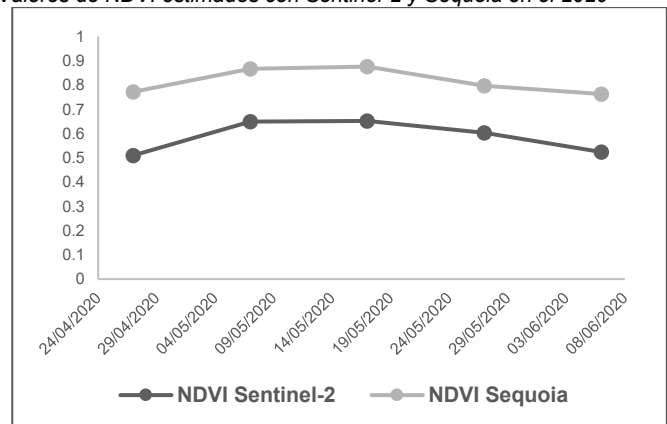
**Tabla 4**

*Promedios de NDVI y ETc en el ciclo 2020*

| Fecha      | n | NDVI Sentinel-2 | NDVI Sequoia | ETc Sentinel-2 | ETc Sequoia | Dif. ETc |
|------------|---|-----------------|--------------|----------------|-------------|----------|
| 27/04/2020 | 6 | 0.510           | 0.772        | 0.267          | 0.467       | 0.200    |
| 07/05/2020 | 4 | 0.649           | 0.867        | 0.403          | 0.583       | 0.180    |
| 17/05/2020 | 3 | 0.652           | 0.876        | 0.375          | 0.546       | 0.171    |
| 27/05/2020 | 6 | 0.603           | 0.797        | 0.310          | 0.446       | 0.135    |
| 06/06/2020 | 5 | 0.524           | 0.763        | 0.301          | 0.497       | 0.196    |

**Figura 2**

*Valores de NDVI estimados con Sentinel-2 y Sequoia en el 2020*



En lo que respecta al ciclo 2021, las diferencias entre sensores fueron más variables. En algunas fechas como el 17 de mayo, los valores promedio fueron muy similares, mientras que, en otras fechas, como el 7 de junio y el 16 de junio, el sensor Parrot Sequoia volvió a presentar valores superiores (Tabla 5). Esto sugiere que la relación entre ambos sensores puede verse influida por la etapa fenológica del cultivo, la cobertura vegetal, la homogeneidad de la parcela y las condiciones de adquisición de las imágenes.

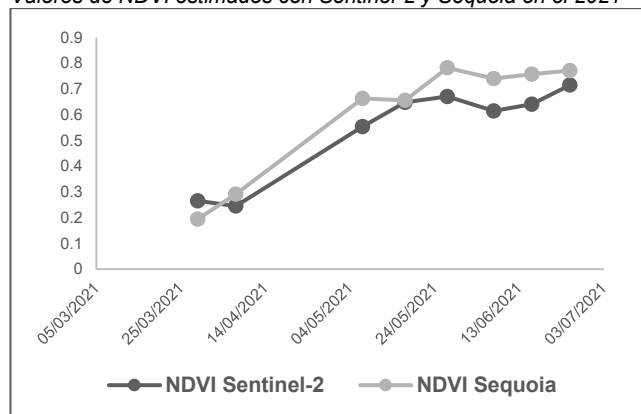
**Tabla 5**

Promedios de NDVI y ETc en el ciclo 2021

| Fecha      | n  | NDVI Sentinel-2 | NDVI Sequoia | ETc Sentinel-2 | ETc Sequoia | Dif. ETc |
|------------|----|-----------------|--------------|----------------|-------------|----------|
| 29/03/2021 | 3  | 0.266           | 0.195        | 0.068          | 0.022       | 0.045    |
| 07/04/2021 | 4  | 0.245           | 0.291        | 0.074          | 0.113       | 0.039    |
| 07/05/2021 | 12 | 0.554           | 0.663        | 0.310          | 0.396       | 0.086    |
| 17/05/2021 | 9  | 0.648           | 0.656        | 0.384          | 0.391       | 0.007    |
| 27/05/2021 | 12 | 0.671           | 0.782        | 0.390          | 0.474       | 0.084    |
| 07/06/2021 | 9  | 0.615           | 0.740        | 0.376          | 0.479       | 0.103    |
| 16/06/2021 | 11 | 0.641           | 0.758        | 0.445          | 0.553       | 0.108    |
| 25/06/2021 | 11 | 0.715           | 0.772        | 0.479          | 0.528       | 0.049    |

**Figura 3**

Valores de NDVI estimados con Sentinel-2 y Sequoia en el 2021



Diversos estudios recientes han demostrado que los sensores de UAV permiten obtener información espectral con mayor detalle espacial que las plataformas satelitales, lo que mejora la detección de la variabilidad intraparcilaria y el monitoreo de cultivos en la agricultura de precisión (Vélez *et al.*, 2023; El-Jamaoui *et al.*, 2025).

Resultados similares a los obtenidos en este estudio han sido reportados en investigaciones recientes, en las que Sentinel-2 mostró limitaciones para detectar la heterogeneidad espacial en parcelas agrícolas con cobertura vegetal variable (Xie *et al.*, 2021).

### 3.3 Relación NDVI y Kc

Para el Kc se utilizó la relación lineal de la ecuación 4. Los resultados indicaron que el Kc promedio estimado con Sentinel-2 fue de 0.545 mientras que el Kc obtenido con Sequoia fue de 0.692. Esta diferencia es consecuencia directa de los valores más altos de NDVI observados con el sensor del UAV.

El uso de un Kc derivado del NDVI permite representar dinámicamente el desarrollo del cultivo, a diferencia de los coeficientes tabulados, que asumen condiciones generales. Por ello, el empleo de sensores remotos fortalece la estimación de las necesidades hídricas al incorporar la variabilidad espacial y temporal del cultivo (Allen *et al.*, 1998; Glenn *et al.*, 2008).

Investigaciones recientes han demostrado que el NDVI derivado de sensores remotos puede utilizarse con éxito para estimar coeficientes de cultivo y de evapotranspiración en diferentes etapas fenológicas (Imtiaz *et al.*, 2023; Fong *et al.*, 2025).

### 3.4 Estimación de la ETc

Para la estimación de la ETc se utilizó el método descrito en la ecuación 5.

Según los cálculos realizados, la ETc promedio estimada con Sentinel-2 fue de 0.354, mientras que la ETc obtenida con Parrot Sequoia fue de 0.448. La diferencia promedio entre ambas estimaciones fue de 0.095 unidades, siendo mayor la estimación basada en el sensor UAV.

Este resultado confirma que las diferencias en el NDVI se trasladan directamente a la estimación de Kc y, posteriormente, a la ETc. En términos prácticos, subestimar el NDVI puede derivar en una subestimación de los requerimientos hídricos del cultivo, lo cual resulta relevante para la programación del riego en sistemas agrícolas de precisión.

De acuerdo con las Tablas 4 y 5, las mayores diferencias de ETc se observaron el 27 de abril de 2020, el 6 de junio de 2020 y el 7 de mayo de 2020, con diferencias promedio de 0.200, 0.196 y 0.180, respectivamente. Estas variaciones de ETc reflejan el impacto de la resolución espacial de los sensores en la estimación de variables asociadas al consumo de agua del cultivo.

Estudios recientes destacan que las tecnologías de percepción remota constituyen una herramienta eficiente para mejorar la estimación espacial de la evapotranspiración y optimizar el manejo del agua en sistemas agrícolas (Fong *et al.*, 2025).

**Figura 5**

ETc estimada a partir del NDVI Sentinel-2 del ciclo 2020

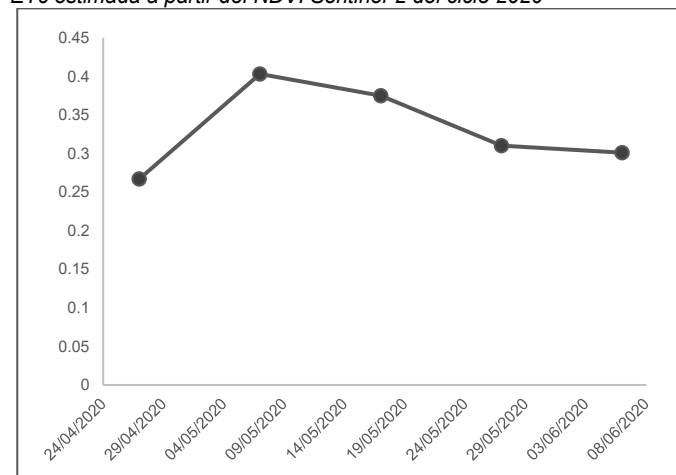


**Figura 6**

*ETc estimada a partir del NDVI Sequoia del ciclo 2020*

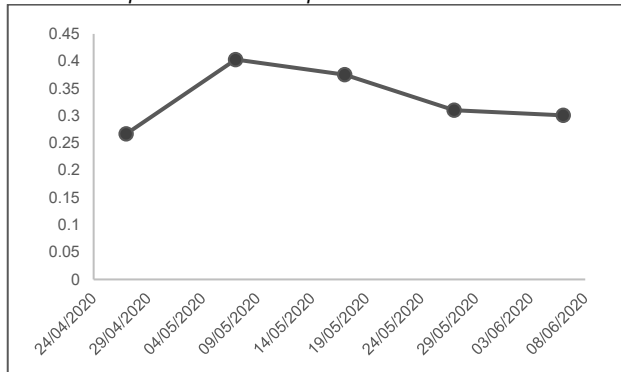


**Figura 7**

*ETc estimada a partir del NDVI Sentinel-2 del ciclo 2021*

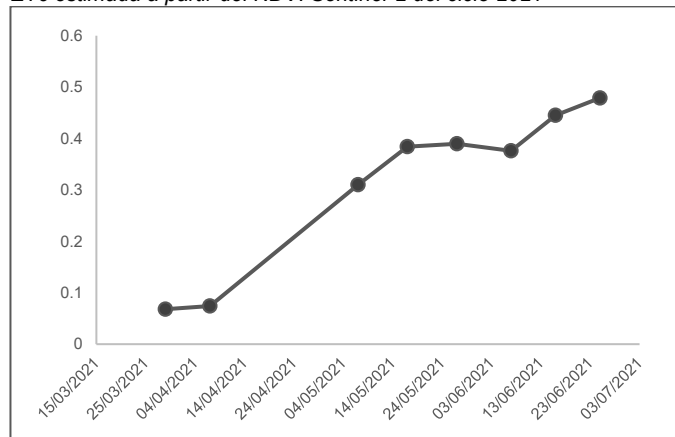
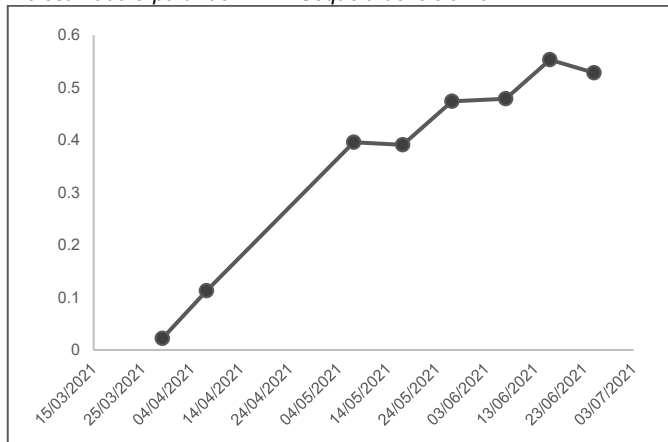


**Figura 8**

*ETc estimada a partir del NDVI Sequoia del ciclo 2021*



### 3.5 Correlación entre NDVI Sentinel-2 y NDVI Sequoia

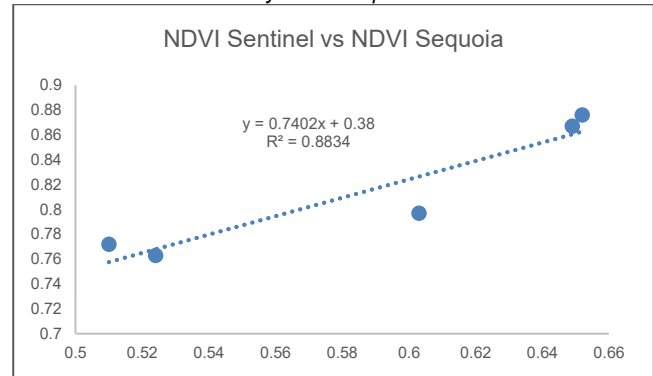
El análisis de correlación mostró una relación positiva moderada entre los valores de NDVI obtenidos con Sentinel-2 y con Parrot Sequoia. El coeficiente de correlación de Pearson fue  $r = 0.9398$ , mientras que el coeficiente de determinación fue  $r^2 = 0.8834$ .

El modelo de regresión lineal obtenido fue:

$$NDVI Sequoia = 0.38 + 0.740(NDVI Sentinel - 2) \quad (7)$$

**Figura 9**

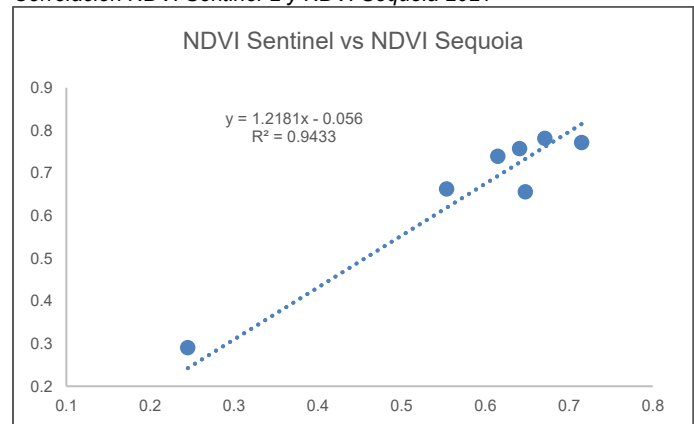
*Correlación NDVI Sentinel-2 y NDVI Sequoia 2020*



Estos resultados indican que aproximadamente el 88.3% de la variabilidad del NDVI Sequoia puede ser explicada por los valores de NDVI Sentinel-2. Aunque existe una tendencia positiva entre ambas fuentes de datos, la relación no es completamente directa debido a diferencias en la resolución espacial, la escala de observación, la geometría de adquisición, la calibración radiométrica y la heterogeneidad del dosel vegetal. La correlación moderada confirma que Sentinel-2 es útil para el monitoreo general del cultivo, mientras que Parrot Sequoia ofrece mayor sensibilidad para detectar la variabilidad intraparcelsaria. Este comportamiento coincide con lo reportado por Zhang y Kovacs (2012), quienes señalan que los UAV permiten obtener información de muy alta resolución para aplicaciones de agricultura de precisión. Estudios recientes reportan comportamientos similares a los obtenidos, en los que los sensores UAV muestran una mayor capacidad para representar la estructura real del dosel vegetal y detectar la variabilidad espacial en comparación con plataformas satelitales de resolución media (Veléz *et al.*, 2023).

**Figura 10**

*Correlación NDVI Sentinel-2 y NDVI Sequoia 2021*



### 3.6 Discusión técnica de los resultados

Los resultados de este estudio demuestran que el sensor Parrot Sequoia registra valores de NDVI superiores a los de Sentinel-2 en la mayoría de las fechas evaluadas. Esta diferencia se atribuye principalmente a la resolución espacial centimétrica del UAV, que permite distinguir con mayor precisión la vegetación del suelo desnudo y de otros elementos presentes en la parcela. En contraste, Sentinel-2 integra la respuesta espectral de áreas de 10 m por píxel, lo que puede generar mezcla espectral, especialmente en parcelas con cobertura vegetal heterogénea. Este efecto puede disminuir el valor promedio del NDVI cuando dentro del píxel hay zonas con suelo expuesto, sombra o variabilidad en la densidad del cultivo.

Desde el punto de vista del manejo hídrico, las diferencias encontradas son relevantes, ya que el NDVI se utilizó como variable de entrada para estimar el Kc y, posteriormente, la ETc. Por lo tanto, una diferencia en el valor de NDVI puede modificar la estimación final de la demanda de agua del cultivo.

Los resultados sugieren que Sentinel-2 es una herramienta adecuada para el seguimiento regional y multitemporal de cultivos, debido a su cobertura espacial, disponibilidad gratuita y frecuencia de revisita. Sin embargo, para decisiones de manejo, como riego diferenciado o identificación de zonas de estrés, el uso del UAV con sensores multiespectrales ofrece mayor precisión espacial.

Las diferencias observadas entre Sentinel-2 y Parrot Sequoia pueden atribuirse al efecto de mezcla espectral asociado a la resolución espacial del satélite, especialmente en parcelas heterogéneas. Investigaciones recientes reportan comportamientos similares, en los que los sensores de UAV muestran una mayor capacidad para representar la estructura real del dosel vegetal (Vélez *et al.*, 2023; El-Jamoiu *et al.*, 2025).

### 3.7 Implicaciones para la agricultura de precisión

La integración de imágenes satelitales y de sensores equipados en UAV representa una estrategia tecnológica útil para fortalecer la agricultura de precisión. Mientras Sentinel-2 permite analizar grandes superficies agrícolas a bajo costo, el sensor Parrot Sequoia permite obtener información detallada a nivel de parcela.

Con base en los resultados, el uso de NDVI derivado de UAV puede mejorar la identificación de zonas con diferente vigor vegetal y apoyar decisiones relacionadas con la programación de riego, estimación de necesidades hídricas, detección de estrés en el cultivo, manejo diferenciado por zonas y la optimización del uso del agua.

En regiones semiáridas, donde el recurso hídrico es limitado, este tipo de herramientas resulta especialmente importante para mejorar la eficiencia del riego y reducir las pérdidas de agua.

Aunque los resultados muestran una relación clara entre ambas fuentes de información, es importante considerar algunas limitaciones. En primer lugar, las diferencias en la fecha y la hora de adquisición entre Sentinel-2 y UAV pueden influir en los valores espectrales registrados. Asimismo, factores como la nubosidad, las sombras, la humedad del suelo, el ángulo solar y la calibración radiométrica pueden introducir variabilidad en los datos.

También se debe considerar que la ecuación utilizada para transformar NDVI a Kc es una aproximación lineal, por lo que su precisión puede variar según el tipo de cultivo, etapa fenológica y condiciones locales. Por ello, se recomienda complementar futuras investigaciones con mediciones de campo, sensores de humedad del suelo, lisímetros o estaciones de flujo para validar la estimación de ETc.

Por último, aunque el UAV ofrece mayor detalle espacial, su uso implica mayores requerimientos operativos, procesamiento fotogramétrico y limitaciones de cobertura, mientras que Sentinel-2 permite análisis regionales de forma gratuita y periódica.

## IV. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar la relación entre los valores de NDVI obtenidos a partir de imágenes de Sentinel-2 y de un sensor multiespectral Parrot Sequoia montado en un vehículo aéreo no tripulado (UAV), así como su aplicación para estimar el coeficiente de cultivo Kc y la evapotranspiración del cultivo ETc en condiciones agrícolas del área de estudio.

Los resultados mostraron que el sensor Sequoia presentó valores de NDVI consistentemente superiores a los de Sentinel-2 durante la mayor parte de los ciclos agrícolas analizados. La diferencia promedio general del NDVI fue de aproximadamente 0.118 unidades, lo que evidencia el efecto de la resolución espacial en la representación espectral del cultivo. La alta resolución espacial del UAV permitió reducir el efecto de mezcla espectral generado por el suelo desnudo, las sombras y la heterogeneidad del dosel vegetal dentro de los píxeles satelitales.

La estimación del coeficiente de cultivo mediante las relaciones NDVI-Kc permitió obtener valores dinámicos que reflejan el comportamiento real del cultivo. Los valores de Kc derivados de Sequoia fueron superiores respecto a Sentinel-2, reflejando una mayor sensibilidad del sensor UAV para determinar diferencias de vigor vegetativo y cobertura foliar.

El análisis estadístico mostró una correlación positiva moderada entre ambas plataformas. Durante el ciclo agrícola 2020 se obtuvo un coeficiente de correlación de  $r = 0.9398$ , mientras que en 2021 fue de  $r = 0.9712$ . Estos resultados indican que Sentinel-2 puede emplearse de manera eficiente para el monitoreo agrícola regional y el análisis multitemporal; sin embargo, los sensores UAV ofrecen ventajas importantes para aplicaciones de agricultura de precisión y de monitoreo detallado a escala parcelaria.

Finalmente, se concluye que ambas tecnologías deben considerarse complementarias en los sistemas modernos de agricultura de precisión. Sentinel-2 proporciona cobertura regional y monitoreo continuo de grandes superficies agrícolas, mientras que los sensores UAV permiten caracterizar con mayor detalle la variabilidad espacial del cultivo y mejorar la precisión en la estimación de variables biofísicas asociadas al manejo hídrico.

## V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo y al Instituto Tecnológico de Torreón por el apoyo académico y técnico brindado para el desarrollo de esta investigación.

También reconocemos a la Agencia Espacial Europea (ESA) por proporcionar acceso libre a los datos de satélite y al INIFAP por los datos de la estación meteorológica.

## VI. REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F. y Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>

El-Jamaoui, I., Boulfiza, M., El Ansari, M. y Labbassi, K. (2025). A comparative assessment of Sentinel-2 and UAV-based imagery for precision agriculture applications. *Sensors*, 25(17), 5281. <https://doi.org/10.3390/s25175281>

Fong, T. Y., Chen, X., Wang, Y. y Liu, Z. (2025). Advancing evapotranspiration estimation with remote sensing technologies. *Agricultural Water Management*, 312, 109271. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109271>

Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L. y Nelson, S. G. (2008). Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8(4), 2136–2160. <https://doi.org/10.3390/s8042136>

Imtiaz, F., Ahmed, S., Khan, M. y Ali, R. (2023). Remote sensing approaches for evapotranspiration estimation in agriculture. *Frontiers in Remote Sensing*, 4, 1274019. <https://doi.org/10.3389/frsen.2023.1274019>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de población y vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>

Jensen, J. R. (2015). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4.a ed.). Pearson.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. y Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*, 351, 309–317.

Sishodia, R. P., Ray, R. L. y Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>

Vélez, S., Ariza-Sentís, M. y Valente, J. (2023). Benchmarking the reliability of Sentinel-2 satellite data for estimating NDVI through UAV multispectral imagery. *Environmental Sciences Proceedings*, 29(1), 58. <https://doi.org/10.3390/envirosciproc2023029058>

Xie, Y., Zhang, Y., Li, X. y Wang, S. (2021). Review of Sentinel-2 applications in agriculture and vegetation monitoring. *Remote Sensing*, 13(5), 817. <https://doi.org/10.3390/rs13050817>

Zhang, C. y Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>

| No. | Rol                                                            | Descripción                                                                                                                                                                                                      |
|-----|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                                                                | <p><i>Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre</i></p> <p><i>Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.</i></p> |
| 1   | Conceptualización<br>[Conceptualization]                       | Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández                                                                                                                                                             |
| 2   | Curación de datos<br>[Data curation]                           | Alan Joel Servín Prieto, Tania Elizabeth Velásquez Chávez                                                                                                                                                        |
| 3   | Análisis formal<br>[Formal analysis]                           | Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández                                                                                                                                                             |
| 4   | Obtención de fondos<br>[Funding acquisition]                   | Alan Joel Servín Prieto                                                                                                                                                                                          |
| 5   | Investigación<br>[Investigation]                               | Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández, Tania Elizabeth Velasquez Chávez, Mónica Hernández López y Raymundo Adame Delgado                                                                          |
| 6   | Metodología<br>[Methodology]                                   | Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández                                                                                                                                                             |
| 7   | Administración del proyecto<br>[Project administration]        | Alan Joel Servín Prieto                                                                                                                                                                                          |
| 8   | Recursos<br>[Resources]                                        | Alan Joel Servín Prieto                                                                                                                                                                                          |
| 9   | Software<br>[Software]                                         | Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández                                                                                                                                                             |
| 10  | Supervisión<br>[Supervision]                                   | Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López                                                                                                                                                         |
| 11  | Validación<br>[Validation]                                     | Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López                                                                                                                                                         |
| 12  | Visualización<br>[Visualization]                               | Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández                                                                                                                                                             |
| 13  | Redacción - borrador original<br>[Writing – original draft]    | Alan Joel Servín Prieto                                                                                                                                                                                          |
| 14  | Redacción - revisión y edición<br>[Writing – review & editing] | Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández, Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López y Raymundo Adame Delgado                                                                          |