

DETECCIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO EN EL CULTIVO DE LECHUGA USANDO DRONES E ÍNDICES DE VEGETACIÓN

**Víctor Manuel Gordillo Salinas^{1*}; Juan Gilberto Pérez Santiago²; Juan Arista Cortes¹;
Cecilia Téllez Quintanar³**

¹Subcoordinación de Agua y Alimentos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

gordillo.victor@hotmail.com - +52 55-69-64-65-53 (*Autor de correspondencia)

²Premium Farms S.P.R. de R.L. de C.V. Camino Real S/N, C.P. 61615, Tzurumutaro, Pátzcuaro, Michoacán.

³Subdirección de Inteligencia e Información Tecnológica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

Resumen

El déficit hídrico causa cambios fisiológicos y bioquímicos en los cultivos provocando una reducción en la fotosíntesis, lo cual induce, a una disminución en el rendimiento. Las respuestas espectrales de las plantas al estrés hídrico han sido un parámetro para establecer umbrales en el manejo del riego. Los drones en coadyuvancia con sensores multiespectrales y térmicos permiten obtener información sobre el estado hídrico de los cultivos de manera eficiente y oportuna. En este estudio se obtuvieron imágenes derivadas del sensor multiespectral Parrot Sequoia y del sensor térmico Flir VUE PRO montados en un dron Inspire 1 V2 para un cultivo de lechuga. Se determinaron seis índices de vegetación espectrales y un índice de vegetación térmico. Se colectaron 9 muestras de suelo de manera aleatoria en la parcela y se determinó el contenido de humedad usando el método gravimétrico. El objetivo fue evaluar y validar el desempeño de los índices de vegetación en la detección de la variabilidad espacial del estrés hídrico. Se encontró que los índices espectrales tienen un buen ajuste para una función polinómica de segundo orden. Los índices que mejor explican la variabilidad espacial del contenido de humedad del suelo fueron el OSAVI, NDVI y NDRE con valores de R^2 de 0.71, 0.69 y 0.64, respectivamente, superando el desempeño del índice térmico CWSI ($R^2=0.56$). El GNDI fue el índice con menor valor de R^2 (0.18). Los índices espectrales tienen potencial para la determinación del estrés hídrico, pero se requiere de mayor investigación en otras etapas y para otros cultivos.

Palabras clave: estrés hídrico, índices de vegetación, drones.

Introducción

Muchas regiones del mundo han alcanzado el límite de aprovechamiento del agua, lo que las ha llevado a sobreexplotar los recursos hídricos superficiales y subterráneos, creando un impacto negativo en el ambiente (Salazar-Moreno *et al.*, 2014).

El sector económico al cual se le destina el 76% del agua en México es al agrícola (CONAGUA, 2018). Por lo tanto, el uso eficiente y efectivo del agua en los sistemas de riego es vital para el desarrollo sostenible de la agricultura y la seguridad alimentaria.

Se requieren innovaciones en la gestión del agua de riego para optimizar el uso agrícola del agua en regiones del mundo con estrés hídrico, y la respuesta fisiológica de las plantas al estrés hídrico es un criterio importante (Ihuoma & Madramootoo, 2019).

El estrés hídrico de los cultivos es un factor abiótico que se hace presente en la planta como respuesta a un déficit en la humedad del suelo o condiciones atmosféricas adversas aunado a la variabilidad del suelo y cultivo, la topografía, y la uniformidad del riego, provocando disminuciones en el rendimiento de los cultivos y por lo tanto pérdidas económicas en los agricultores.

En la identificación y monitoreo del estrés hídrico de los cultivos agrícolas actualmente existen diversas metodologías que van desde mediciones de la humedad del suelo *in situ* hasta los enfoques basados en planta que determinan el estado real del agua en el cultivo. Si bien estos métodos convencionales resultan prácticos y eficientes, el tiempo destinado para su implementación en campo es demasiado, en algunos casos destructivos, costosos en términos económicos y los resultados obtenidos suponen homogeneidad del terreno y cultivo.

Recientemente la percepción remota apoyada con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT's) ha permitido la adquisición de imágenes de alta resolución espacial y en tiempo real del que se pueden obtener indicadores de estrés hídrico aprovechando los mecanismos de respuesta de las plantas ante esta condición de escasez de agua.

Generalmente, las imágenes obtenidas se encuentran en las regiones espectrales del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico. Sus principales ventajas en comparación con otros métodos radican en el hecho de que no son destructivos, invasivos, son rápidos y rentables.

Los objetivos de este trabajo de investigación son: 1) evaluar y validar el desempeño de los índices de vegetación espectral y térmico en la identificación espacial del estrés hídrico en un área establecida con el cultivo de lechuga y 2) Mapear la variabilidad espacial del estrés hídrico.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio

El estudio fue realizado en un lote denominado M2-A del campo experimental Montecillos perteneciente al Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, localizados entre las coordenadas 19° 28' 59" latitud norte y 98° 53' 24" longitud oeste a una altitud de 2,250 m. El área del sitio experimental consta de una superficie de aproximadamente 1,600 m² (**Figura 1**).

El clima es Cb(Wo)(W)(i)g, que corresponde a un templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y oscilación térmica corta (entre 5 y 7 °C). La temperatura media anual es de 15.5 °C. El mes más caluroso es mayo y el más frío enero. Con una precipitación media anual de 644 milímetros.

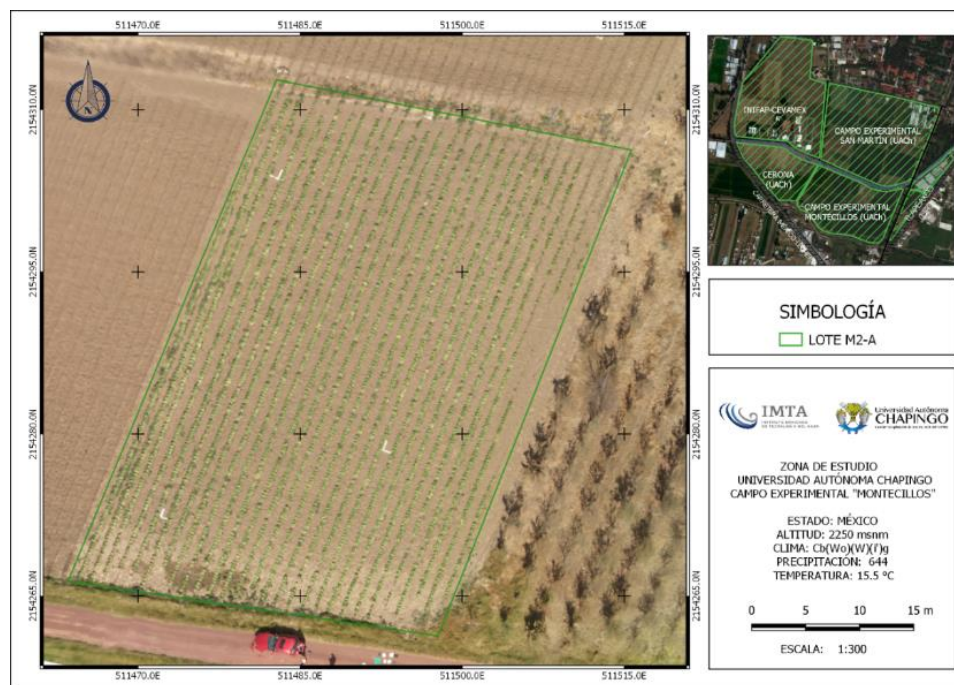


Figura 1. Localización geográfica del sitio de estudio.

Las características del suelo descrito por (Vázquez-Rosales, 2017), corresponden a una textura franco arcilloso, los porcentajes de arcillas, limos y arenas se muestran en el cuadro 4.1, la densidad aparente es de 1.35 g/cm³ para una profundidad de 30 cm, la Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchitamiento Permanente (PMP) son de 32.47% y 17.80% en cantidades gravimétricas respectivamente.

El cultivo establecido en el experimento fue lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad "Annie", y el riego fue efectuado por un sistema de riego por goteo, asimismo, las labores culturales se realizaron con base en la practicas convencionales de la zona.

Campaña de vuelo

Se realizó una sola campaña de vuelo con apoyo de un dron INSPIRE 1 V2 equipado con un sensor multispectral Parrot SEQUOIA (Parrot Co. Ltd, Paris, Francia) y un sensor térmico Flir VUE PRO (Flir Systems, Inc., Wilsonville, E.U.A.) (**Figura 2**), coincidiendo con la etapa fenológica de encabezamiento de la lechuga.

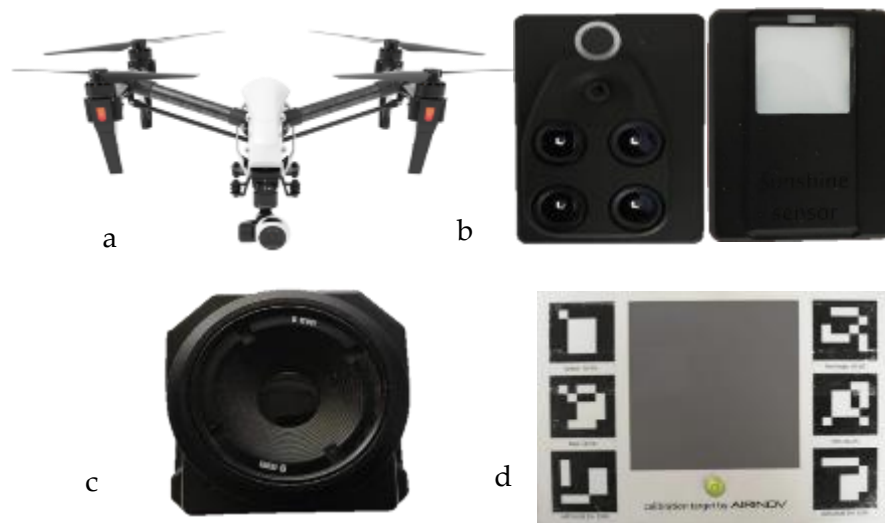


Figura 2. Plataforma aérea de mapeo. a) Drone INSPIRE 1 V2, b) cámara multispectral Parrot SEQUOIA y sensor Sunshine, c) cámara térmica Flir VUE PRO, d) Panel de calibración AIRINOV.

La misión de vuelo fue programada a una altura de 60 m sobre el nivel del suelo con un traslape frontal y lateral de 90%, con la finalidad de obtener productos cartográficos con alta resolución espacial. Las imágenes capturadas presentaron una resolución espacial de 6.07 y 12.19 cm/píxel para la cámara multispectral y térmica respectivamente.

Muestreo de humedad *in-situ*

Para conocer el contenido de humedad del suelo se realizaron 9 muestreos aleatorios (**Figura 3**) a una profundidad de 30 cm utilizando una barrena de pie, y se aplicó el método gravimétrico a las muestras, la cual consistió de conocer el peso inmediatamente después de obtener la muestra de suelo, la cual es considerada como el peso húmedo, y posteriormente llevarlo a la estufa a una temperatura de 105°C por 24 horas hasta alcanzar una masa constante, también conocido como el peso seco de la muestra.

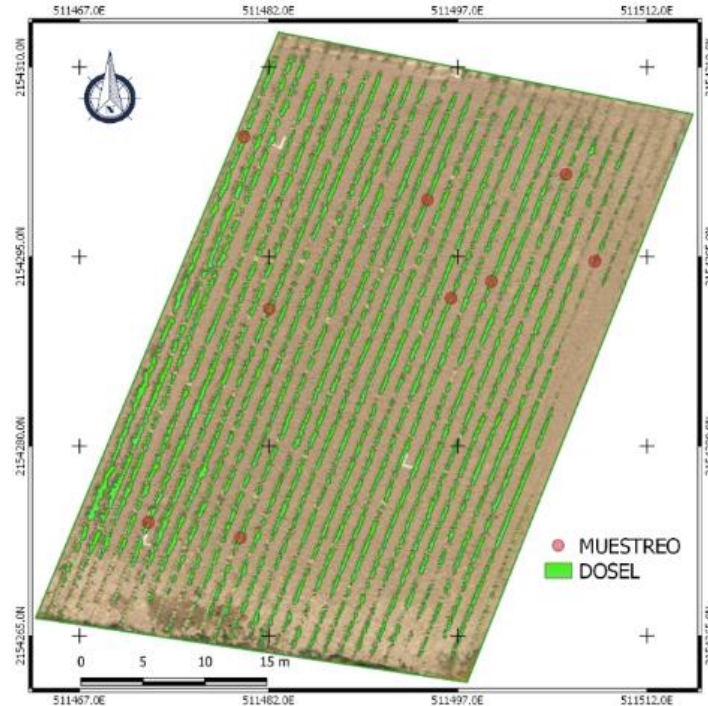


Figura 3. Distribución espacial de los muestreos de suelo

Índices de vegetación

Se utilizaron 6 índices espectrales, estos índices se seleccionaron con base en la oferta de canales espectrales que presentaban los sensores utilizados, y 1 índice térmico. En el siguiente cuadro se presenta una descripción de cada uno de ellos:

Cuadro 1. Características de los Índices de vegetación.

Índice	Nombre	Fórmula	Referencia
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
RDVI	Índice de vegetación con diferencia renormalizada.	$RDVI = \frac{NIR - RED}{\sqrt{NIR + RED}}$	Rougean & Breon. (1995)
NDRE	Índice de borde rojo de diferencia normalizada	$NDRE = \frac{NIR - RED_{EDGE}}{NIR + RED_{EDGE}}$	Barnes <i>et al.</i> (2000)
GNDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada verde	$GNDVI = \frac{NIR - GREN}{NIR + GREN}$	Gitelson & Merzlyak, (1998)
SAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo.	$SAVI = \frac{(1 + 0.5) * (NIR - RED)}{NIR - RED + 0.5}$	Huete. (1988)
OSAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo optimizado	$OSAVI = \frac{(1 + 0.16) * (NIR - RED)}{NIR - RED + 0.16}$	Haboudane <i>et al.</i> (2002)

Índice	Nombre	Fórmula	Referencia
CWSI	Índice del estrés hídrico del cultivo	$WSI = \frac{(T_{dosel} - T_{húmedo})}{(T_{seco} - T_{húmedo})}$	Jones, 1999

Resultados y Discusión

Mapas de reflectancia

El procesamiento de las imágenes del dron fue realizado a través del software Pix4D (Pix4D S.A., Prilly, Suiza), en dicho procesamiento se aplicó una corrección geométrica y radiométrica.

El software Pix4D entrega como producto final mapas de reflectancia para las bandas GREEN, RED, RED EDGE y NIR del sensor Parrot Sequoia como se presentan en la **Figura 4**.

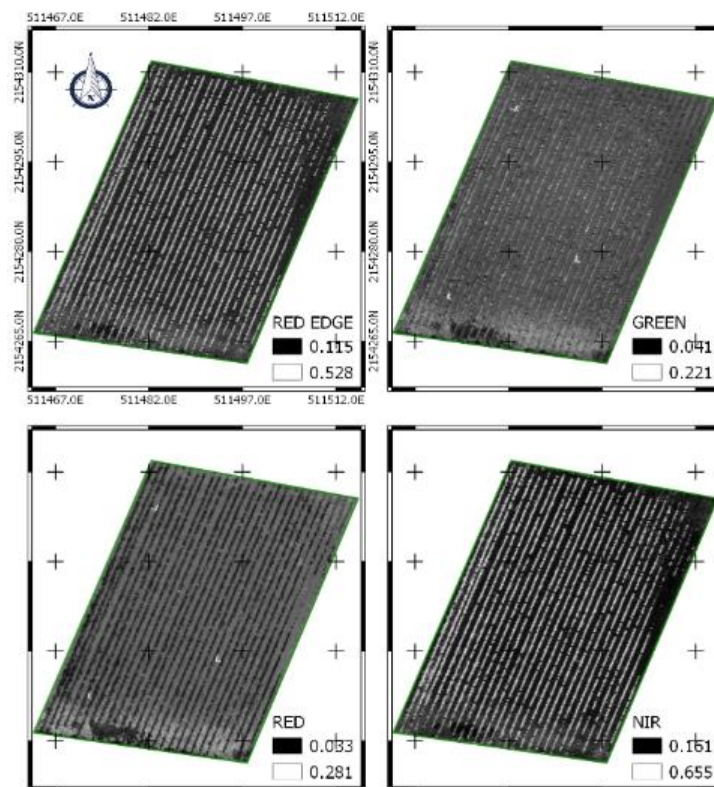


Figura 4. Mapas de reflectancia del sensor Parrot Sequoia.

Con cada una de las bandas fue posible determinar posteriormente las relaciones aritméticas para cada uno de los índices de vegetación.

Índice Térmico CWSI

El cálculo del CWSI se realizó con el software QGIS. En la **Figura 5** puede verse la variabilidad que presenta el valor del Índice dentro de la parcela de estudio.

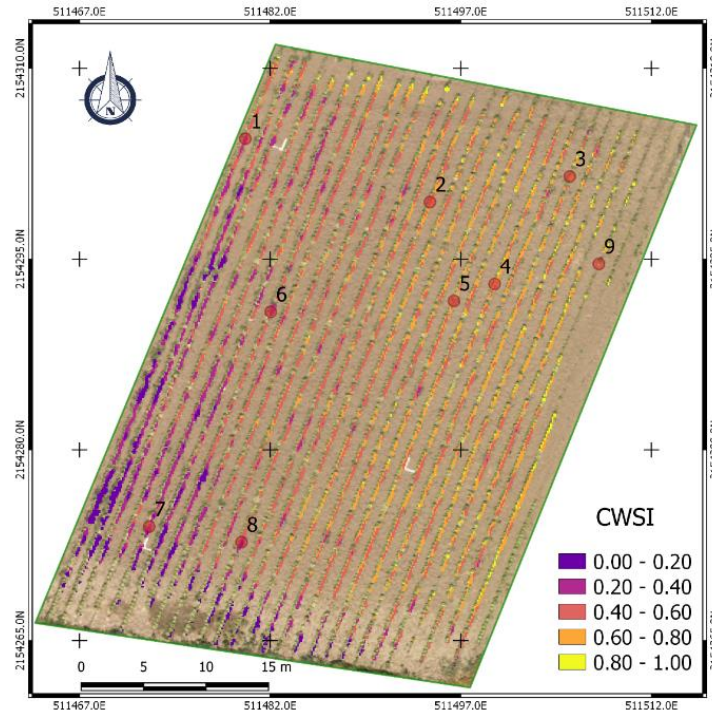


Figura 5. Mapa de la variabilidad del CWSI para el área de estudio

Usando termografía infrarroja cercana para establecer los umbrales críticos de CWSI en la programación del riego de un cultivo de lechuga, (Tarqui-Delgado *et al.*, 2017) determinaron el límite donde la planta no se encuentra en estrés, con valores de 0 a 0.23 del CWSI, los valores con estrés relativo y necesidad del suministro de riego se encontraron en los rangos de 0.24 a 0.31 para obtener rendimientos de 3.17 a 3.44 kg m⁻², para los valores de estrés de mayor magnitud se encontraron en los límites de 0.32 a 0.50 influenciando en el rendimiento hasta 1.7 kg m⁻². Los valores del índice de estrés hídrico en los rangos 0.56 a 1.00 resultan en la muerte del cultivo.

El alcance de esta investigación limitó la medición del rendimiento de la lechuga, sin embargo, usando los umbrales del déficit hídrico mencionados por (Tarqui-Delgado *et al.*, 2017) podemos intuir una disminución notoria de rendimiento en la cosecha de la lechuga, ya que el valor medio de CWSI en promedio fue de 0.5 indicando altas necesidades de riego. Los valores bajos donde la planta no presentó estrés hídrico se localizaron en la periferia Suroeste, probablemente debido a la humedad proveniente de la parcela adyacente, la cual tuvo una gestión de riego por aspersión, en contraste con la periferia noreste donde se podría esperar una disminución en el rendimiento y calidad de la lechuga.

Índices espectrales

Los mapas de índices NDVI, RDVI, NDRE, GNDVI, SAVI, y OSAVI extraídos de los mapas de reflectancia se muestran en la **Figura 6**. En los índices NDVI, GNDVI, NDRE y OSAVI las zonas con alta variabilidad espacial son bien reconocibles, mientras que los índices RDVI y SAVI expusieron menor variabilidad.

En la zona fronteriza sur de la parcela, aparecen píxeles que representan los valores más bajos, debido a que la lechuga se encuentra en distinta etapa fenológica. Sin embargo, para todos los índices también se pueden encontrar algunos valores bajos dentro de la parcela esto se debe a que aún existen píxeles mixtos que no fueron discriminados en su totalidad.

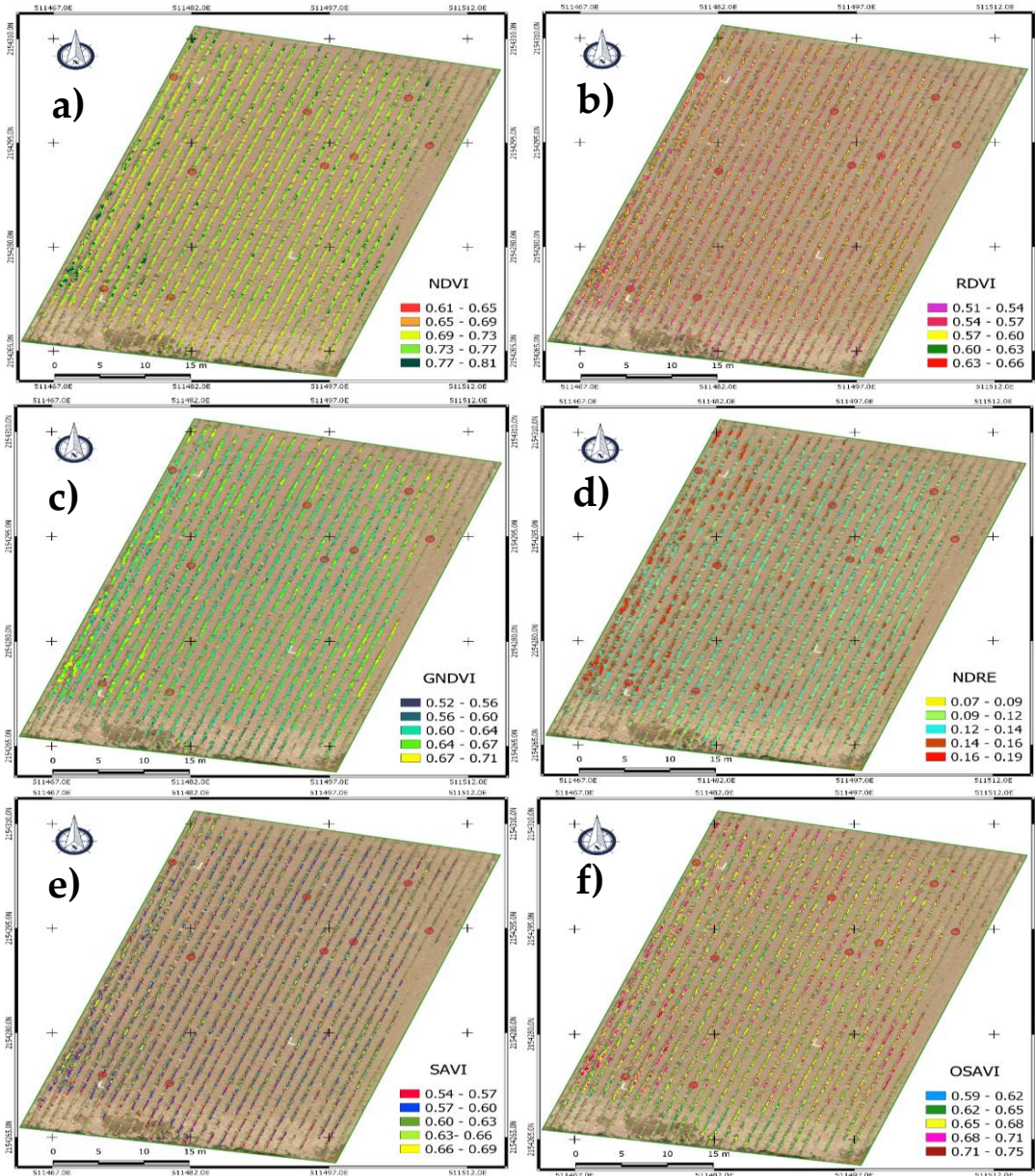


Figura 6. Mapas de la variabilidad espacial de los Índices de Vegetación: **a)** NDVI, **b)** RDVI, **c)** GNDVI, **d)** NDRE, **e)** SAVI y **f)** OSAVI.

Comparación entre los Índices de vegetación y el contenido volumétrico de agua en el suelo.

Se determinaron los contenidos de humedad del suelo para los distintos puntos de muestreo del área de estudio utilizando el método gravimétrico que posteriormente se convirtieron en contenidos volumétricos al multiplicar el valor por la densidad aparente del suelo.

Los valores resultantes de contenido volumétrico de humedad se correlacionaron con los distintos índices de vegetación propuestos mediante la prueba de un ajuste lineal y polinómico (**Cuadro 2**).

Al analizar los dos modelos de ajuste para cada índice espectral se encontró que el modelo con valores mayores de coeficiente de determinación (R^2) fue presentado por la función de ajuste polinómica de segundo orden. El índice NDRE mantuvo el mismo coeficiente de determinación en ambos modelos, como se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. Coeficientes de correlación (R^2) del modelo lineal y polinómico

ÍNDICE	R^2	
	Lineal	Polinomial (2°)
NDVI	0.56	0.69
RDVI	0.43	0.62
NDRE	0.64	0.64
GNDVI	0.03	0.18
SAVI	0.44	0.63
OSAVI	0.53	0.71
CWSI	0.50	0.56

Los Índices de Vegetación (IV) espectrales presentaron correlación positiva con la humedad del suelo, los mayores valores de correlación se encontraron con OSAVI ($R^2=0.71$), NDVI ($R^2=0.69$) y NDRE ($R^2=0.64$). El índice GNDVI presentó la menor correlación ($R^2=0.18$). Por otra parte, el CWSI presentó una correlación negativa con $R^2=0.56$. En este estudio NDRE, NDVI y OSAVI tuvieron mejor desempeño que el CWSI.

Varios estudios han mostrado que existe una alta correlación entre la humedad del suelo y los índices de vegetación. (Bian *et al.*, 2019) analizaron un cultivo de algodón y encontraron una relación entre la humedad del suelo y los índices NDVI ($R^2=0.52$), OSAVI ($R^2=0.51$) y CWSI ($R^2=0.73$). En otro estudio realizado en algodón (Ballester *et al.*, 2019) encontraron una alta relación del NDVI y el CWSI con el Potencial Matricial del Suelo con correlaciones de $R^2=0.73$ y $R^2=0.83$, respectivamente.

El fuerte déficit hídrico que llevo a las lechugas a sufrir una disminución del vigor vegetativo y aumento de la temperatura, permitió que los índices fueron capaces de detectar los cambios en las plantas. Se observaron correlaciones entre los índices estudiados y el estado de humedad del suelo, encontrándose una excepción con el GNDVI que prácticamente mostró una correlación nula (R^2 de 0.03 y 0.18 para un ajuste lineal y polinómico, respectivamente).

Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de la metodología descrita en este trabajo fueron evaluados con el contenido volumétrico de agua, validando la correlación entre los IV y las necesidades hídricas del cultivo, siendo factible la aplicación de los IV espectral y térmico como referencia para la identificación del estrés hídrico.

Los índices espectrales OSAVI, NDVI y NDRE son recomendables como identificadores de la variabilidad de las necesidades hídrica del cultivo en la etapa fenológica de encabezamiento. Sin embargo, se requieren de estudios detallados para rectificar la implementación de estos índices en todo el ciclo vegetativo del cultivo.

El mapeo de la variabilidad espacial del estrés hídrico permitió diferenciar zonas de mayor demanda hídrica del cultivo. El mapeo térmico con CWSI discriminó cualitativamente sitios con déficit hídrico notorios.

Referencias Bibliográficas

- Ballester, C., Brinkho, J., Quayle, W. C., & Hornbuckle, J. (2019). Monitoring the Effects of Water Stress in Cotton Using the Green Red Vegetation Index and Red Edge Ratio. *Remote Sensing*, 11(873). <https://doi.org/10.3390/rs11070873>
- Bian, J., Zhang, Z., Chen, J., Chen, H., Cui, C., Li, X., Chen, S., & Fu, Q. (2019). Simplified Evaluation of Cotton Water Stress Using High Resolution Unmanned Aerial Vehicle Thermal Imagery. *Remote Sensing*, 11(267). <https://doi.org/10.3390/rs11030267>
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego, Año Agrícola 2017-2018*.
- Ihuoma, S. O., & Madramootoo, C. A. (2019). Sensitivity of spectral vegetation indices for monitoring water stress in tomato plants. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104860. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104860>
- Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & López-cruz, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, V(2), 177–183.
- Tarqui-Delgado, M., Chipana-Rivera, R., Mena-Herrera, F. C., Quino-Luna, J. J., Tallacagua-Terrazas, R., & Gutiérrez-Villalobos, S. (2017). Índice de estrés hídrico deñ cultivo de Lechuga (*Lactuca sativa*), mediante termometría infrarroja a diferentes láminas de riego. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 4(1), 7–18.
- Vázquez-Rosales, U. (2017). *Calibración y manejo del medidor de humedad del suelo Time Domain Reflectometry (TDR300)*. Universidad Autónoma Chapingo.