

Relación entre la humedad del suelo y el índice de vegetación ajustado al suelo en cultivo de maíz bajo riego por goteo

Relationship between soil moisture and Soil Adjusted Vegetation Index in corn crops under drip irrigation

Nuria Aide López-Hernández^{1*}, Xochiketzalli Rivero-Castañeda², Lexli Estefanía Soto-Rosales², Ramón Trucíos-Caciano¹, Cristo Omar Puente-Valenzuela¹

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera, Margen Derecha Canal de Sacramento km 6.5, Zona Industrial 4 etapa, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango, México.

² Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México – Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México CP 56230

*Autor para correspondencia: lopez.nuria@inifap.gob.mx

RESUMEN

La teledetección en la agricultura es crucial al proporcionar información detallada sobre los cultivos usando sensores remotos. Los satélites son una herramienta de teledetección, cuyas imágenes pueden ser empleadas para determinar el contenido de agua en el suelo mediante índices de vegetación. El objetivo de este trabajo de investigación fue determinar la relación entre el índice SAVI y el contenido de humedad del suelo, en cultivo de maíz forrajero bajo riego por goteo, en la región de la Comarca Lagunera, mediante procesamiento de imágenes del satélite Sentinel 2. El estudio se llevó a cabo en el ciclo agrícola verano 2023 en el municipio de Francisco I. Madero, Coahuila. Se llevó a cabo un estudio experimental completamente al azar, utilizando el índice SAVI como único factor, el cual constó de dos niveles: máximo, y mínimo, con tres repeticiones de cada uno. Los resultados indican que el índice SAVI es útil para estimar el contenido de humedad del suelo cuando las plantas están más sanas y vigorosas. Por el contrario, cuando las plantas muestran un mayor estrés, el índice SAVI no es recomendado para estimar los valores de humedad del suelo, ya que el modelo generado presenta un coeficiente de determinación muy bajo. A partir de este estudio se concluye que existe una alta relación entre el índice SAVI y el contenido de humedad del suelo, en cultivo de maíz forrajero bajo riego por goteo, en la región de la Comarca Lagunera.

Palabras clave: Maíz forrajero, teledetección, imágenes satelitales, SAVI.

ABSTRACT

Teledetection in agriculture is crucial when providing detailed information about crops using remote sensors. Satellites are a remote sensing tool. Satellite images can be used to determine the water content in the soil by vegetation index. The objective of this research work was to determine the relationship between the SAVI index and the soil moisture in cultivation of fodder maize with drip irrigation, in the Comarca Lagunera region, by processing images of the Sentinel 2 satellite. The study was carried out in the Summer 2023 agricultural cycle in Francisco I. Madero, Coahuila. A completely at random experimental study was carried out, using the SAVI index as the only factor, which consisted of two levels: maximum and minimum, with three repetitions of each. The results indicate that the SAVI index is useful for estimating soil moisture content when plants are healthy and vigorous. On the contrary, when plants show a greater stress, the SAVI index is not recommended to estimate soil moisture values, since the generated model has a very low determination coefficient. From this study, it is concluded that there is a high relationship between the SAVI index and the moisture content of the soil, in crop of fodder maize with drip irrigation, in the region Comarca Lagunera region.

Keywords: Fodder maize, remote sensing, satellite images, SAVI.



INTRODUCCIÓN

El maíz forrajero es una variedad de maíz utilizada como forraje para el ganado, particularmente para las vacas lecheras. Las variedades híbridas de maíz forrajero son seleccionadas en busca de: un porte alto, mucho follaje, la mejor capacidad creadora de materia seca y rendimiento de grano, porque ese aspecto de la planta en general es lo que impacta en la productividad y la calidad de los productos derivados del maíz forrajero; pienso, pacas, heno y ensilajes (Velasco Macias *et al.*, 2022).

En el año 2023, la producción de maíz forrajero en México alcanzó las 15,431,671.36 toneladas, con 459,080.83 hectáreas cosechadas; y un rendimiento promedio nacional de 33.61 toneladas por hectárea (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2023).

La emergencia de dicha agroindustria, que conllevó innovaciones agropecuarias, así como de sistemas de refrigeración y de transporte, incidió en que la geografía del abastecimiento lechero de la ciudad de México se trasladara desde el hinterland mencionado, ubicado en los valles montanos vecinos a esa urbe, templados y con buenas precipitaciones, hacia regiones semidesérticas e irrigadas del norte mexicano, situadas en los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango. Esas regiones, a partir de la década de 1950 reconvirtieron sus economías algodonerías, en crisis, hacia la construcción de una industria láctea (Aguilar, 2019).

El estrés hídrico es un fenómeno frecuente en el cultivo del maíz, y puede tener un impacto considerable en la producción y calidad del grano. La sequía o la falta de agua en el suelo son causas comunes de este tipo de estrés en las plantas de maíz. Esto, a su vez, puede disminuir la capacidad de crecimiento del grano durante su etapa de llenado (Villalobos González *et al.*, 2016).

La teledetección es una forma de obtener información sobre objetos a través de la toma y análisis de datos sin que los instrumentos empleados para adquirir dichos datos estén en contacto directo con el objeto, lo que es muy ayuda en muchos procesos, incluida la agricultura.

La teledetección en la agricultura es crucial al proporcionar información detallada sobre los cultivos usando sensores remotos. Esto permite un monitoreo

efectivo de la variabilidad de los cultivos tanto en el espacio como en el tiempo (Andreu *et al.*, 2018).

Los satélites son una herramienta de teledetección, entre ellos está el Sentinel-2, que es una misión de la European Space Agency que: se basa en una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita, separados por 180 grados, para lograr una cobertura y una descarga de datos óptimos. Las imágenes de los satélites son empleadas para determinar varios índices vegetales, como el área con clorofila en la hoja y el contenido en agua (European Space Agency [ESA], 2015).

En esta investigación, no se pretende recopilar información detallada y argumentos ya realizados sobre el funcionamiento del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo, esto ya se ha profundizado en varios trabajos, algunos ya citados en este documento, como lo son el trabajo de Huete, A. R. (1988) "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)" o el de Rodríguez-Moreno y Bullock. (2013) "Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense", por el contrario, se busca explorar cómo estas herramientas tecnológicas permiten una evaluación integral y dinámica de vigorosidad del cultivo y el estado hídrico del suelo, ofreciendo una base sólida para la toma de decisiones en la gestión agrícola.

La importancia de esta investigación radica en hallar una relación entre el índice SAVI y el contenido de humedad del para optimizar el uso del agua del riego en la Comarca Lagunera. El objetivo de esta investigación fue determinar la relación entre el SAVI y el contenido de humedad del suelo, y su influencia en la vigorosidad de las plantas de maíz forrajero bajo riego por goteo, en la región semiárida de la Comarca Lagunera, mediante procesamiento de imágenes satelitales, medición de la humedad del suelo y análisis estadístico, para la creación de modelos que relacionen el índice SAVI con el porcentaje de humedad del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de los valores del contenido de humedad del suelo (Θ) y los valores, tanto máximo como mínimo, del índice SAVI, se determinó su relación (Figura 1), mediante un modelo de regresión lineal simple, obteniéndose la ecuación siguiente:



$$\Theta = 13.869\text{SAVI} + 19.783, R^2 = 0.7172$$

Dónde: Θ es el contenido de humedad del suelo

El coeficiente de determinación (R^2) se considera alto, por lo que, los resultados de este estudio indican que el contenido de humedad del suelo tiene una alta relación con el índice SAVI, lo que significa que el modelo resulta eficiente para predecir (estimar) el contenido de humedad del suelo a través de los valores de SAVI obtenidos a partir de imágenes de satélite.

Además, se generaron otros dos modelos, uno para los puntos máximos de SAVI modelos (Figura 2), donde se espera tener a las plantas con menor estrés, es decir, mayor vigorosidad, y otro para los puntos mínimos de SAVI (Figura 3), donde se considera que las plantas muestran la menor vigorosidad, que se relaciona a su vez con un mayor estrés. El modelo que relaciona los valores mínimos del índice SAVI y el contenido de humedad del suelo se expresa en la ecuación 5, y se observa que tiene un coeficiente de determinación muy alto. Esto indica que el modelo es confiable para estimar los valores de humedad del suelo a partir de los valores del índice SAVI, cuando

las plantas de maíz forrajero no se presentan algún tipo de estrés, como el estrés hídrico. Es decir, el índice SAVI podría ser un indicador adecuado para conocer la distribución de la humedad en el suelo.

$$\Theta = 15.592\text{SAVI} + 18.874, R^2 = 0.9308 \quad (5)$$

Los resultados indican que el índice SAVI es útil para estimar el contenido de humedad del suelo cuando las plantas están más sanas y vigorosa.

Por el contrario, cuando las plantas muestran un mayor estrés, el índice SAVI no es recomendado para estimar los valores de humedad del suelo, ya que el modelo generado (ecuación 6), presenta un coeficiente de determinación muy bajo.

$$\Theta = 6.7601\text{SAVI} + 24.094, R^2 = 0.1821$$

El resultado anterior, indica que aunque el índice SAVI es un indicador de la vigorosidad del maíz forrajero, no permite estimar la humedad del suelo cuando esta es baja y genera estrés en las plantas.

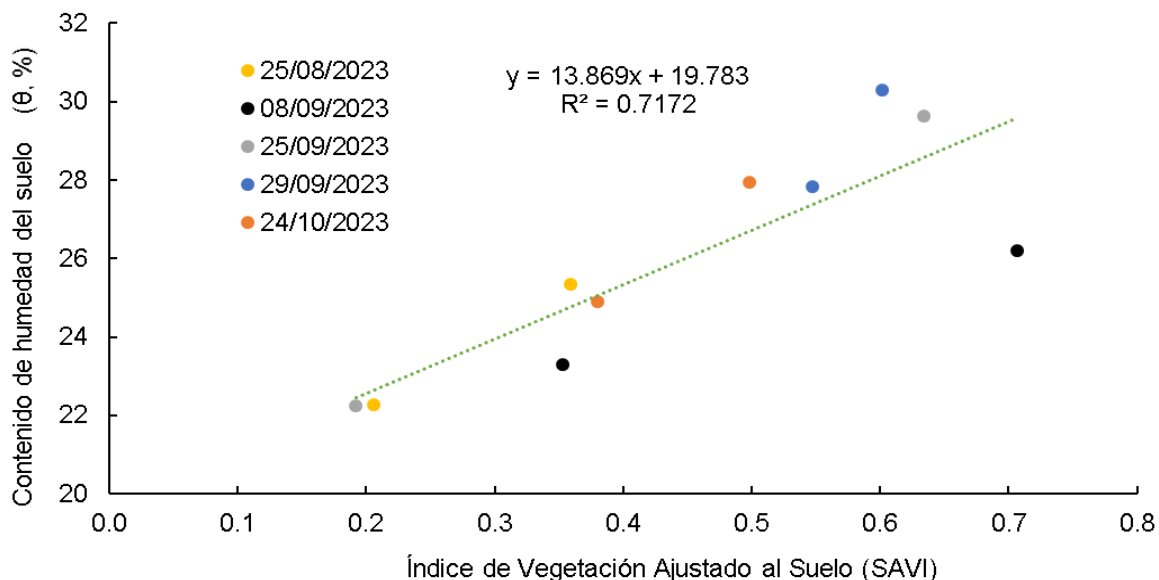


Figura 1. Relación lineal entre el contenido de humedad del suelo y el índice SAVI en cultivo de maíz forrajero.

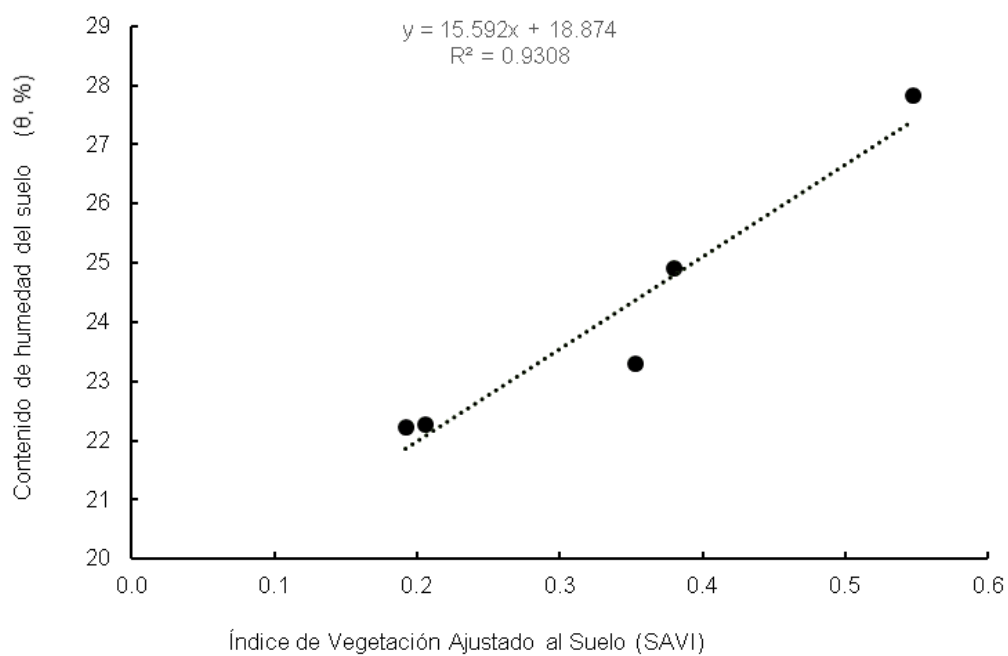


Figura 2. Relación lineal entre el contenido de humedad del suelo y los valores mínimos del índice SAVI.

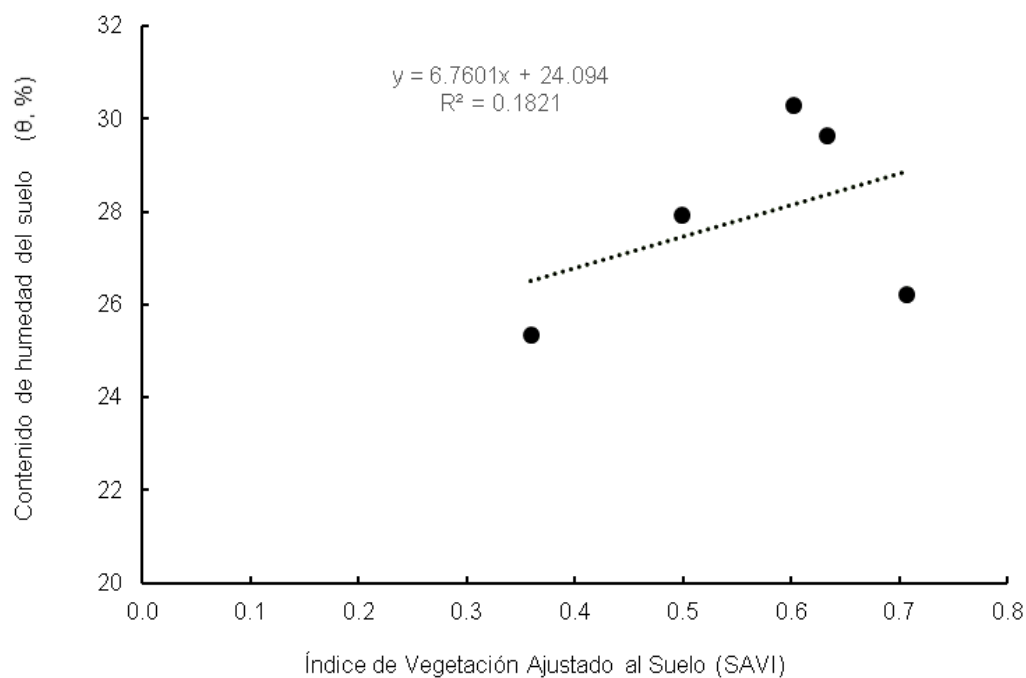


Figura 3. Relación lineal entre el contenido de humedad del suelo y los valores máximos del índice SAVI.

A partir del análisis t de Student se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el contenido de humedad del suelo en los sitios donde los valores del índice SAVI eran los mínimos, respecto a los sitios donde los valores eran máximos (Figura 4). Es decir, el índice SAVI permite identificar los sitios con menor y mayor porcentaje de humedad del suelo, utilizando como indicador la vigorosidad del cultivo, en este caso, del maíz forrajero. Únicamente en la fecha del 29 de septiembre del 2023, no se presenta una diferencia estadísticamente significativa, esto se puede deber a que el contenido de humedad en los puntos de medición era muy similar o a que, en la etapa fenológica correspondiente a la fecha, el cultivo de maíz es menos sensible a las variaciones de humedad. Por tal motivo, se recomienda ampliar este tipo de estudios, ya que es importante obtener mayor información y mejorar los modelos de predicción obtenidos en este trabajo.

Estos resultados son comparables con los presentados por Mohamed et al (2018), quienes encontraron que existe una alta correlación entre índices de vegetación como el índice de humedad del suelo (Soil Moisture Index, SMI) y el contenido de humedad del suelo en diferentes periodos de crecimiento del cultivo. En ese estudio, los modelos de simulación que generaron, combinan el índice de vegetación, el contenido de agua del suelo y el contenido de agua de la planta en diferentes periodos de crecimiento del trigo de invierno, y encontraron que las correlaciones entre el índice de vegetación diferencial (DVI) y el índice de vegetación perpendicular (PVI) al comienzo del periodo de elongación del tallo, en el periodo de emergencia de la espiga y en el periodo de maduración con el contenido de humedad del suelo fueron altamente significativas ($P < 0.01$).

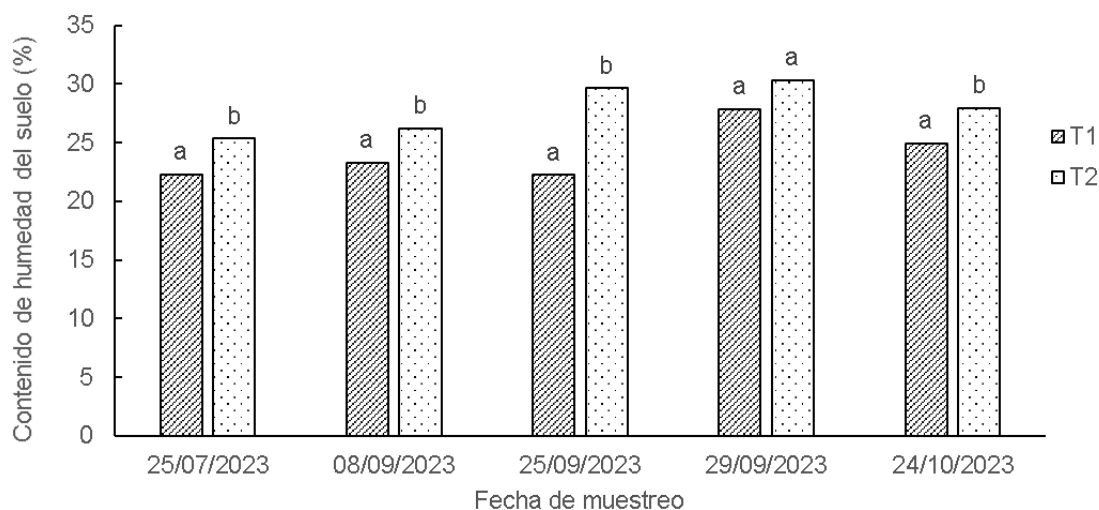


Figura 4. Comparación del contenido de humedad en puntos con los valores mínimos (T1) y máximos (T2) del índice SAVI, en diferentes periodos de crecimiento del maíz forrajero en verano 2023. Mismas letras no difieren estadísticamente con base en la prueba t de Student con $p \leq 0.05$

Los valores de humedad del suelo registrados muestran que el programa de riego cumplió su objetivo y mantuvo la humedad dentro de los límites críticos en los cuales el agua del suelo es aprovechable para las plantas (22 y 36%, valores respectivos a los indicadores: CC y PMP). Se identificó que en las áreas correspondientes para nivel SAVI alto hubo valores de humedad siempre mayores

a los ponderados para el nivel SAVI bajo, la prueba t-student general demostró que en general hay diferencia estadísticamente significativa entre porcentajes de humedad en los suelos de las áreas zonificadas con el tratamiento SAVI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los valores del contenido de humedad del suelo (Θ) y los valores, tanto máximo como mínimo, del índice SAVI, se determinó su relación (Figura 1), mediante un modelo de regresión lineal simple, obteniéndose la ecuación siguiente:

$$\Theta = 13.869\text{SAVI} + 19.783, R^2 = 0.7172 \quad (4)$$

Dónde: Θ es el contenido de humedad del suelo

El coeficiente de determinación (R^2) se considera alto, por lo que, los resultados de este estudio indican que el contenido de humedad del suelo tiene una alta relación con el índice SAVI, lo que significa que el modelo resulta eficiente para predecir (estimar) el contenido de humedad del suelo a través de los valores de SAVI obtenidos a partir de imágenes de satélite.

Además, se generaron otros dos modelos, uno para los puntos máximos de SAVI modelos (Figura 2), donde se espera tener a las plantas con menor estrés, es decir, mayor vigorosidad, y otro para los puntos mínimos de SAVI (Figura 3), donde se considera que las plantas muestran la menor vigorosidad, que se relaciona a su vez con un mayor estrés. El modelo que relaciona los valores mínimos del índice SAVI y el contenido de humedad del suelo se

expresa en la ecuación 5, y se observa que tiene un coeficiente de determinación muy alto. Esto indica que el modelo es confiable para estimar los valores de humedad del suelo a partir de los valores del índice SAVI, cuando las plantas de maíz forrajero no se presentan algún tipo de estrés, como el estrés hídrico. Es decir, el índice SAVI podría ser un indicador adecuado para conocer la distribución de la humedad en el suelo.

$$\Theta = 15.592\text{SAVI} + 18.874, R^2 = 0.9308 \quad (5)$$

Los resultados indican que el índice SAVI es útil para estimar el contenido de humedad del suelo cuando las plantas están más sanas y vigorosa.

Por el contrario, cuando las plantas muestran un mayor estrés, el índice SAVI no es recomendado para estimar los valores de humedad del suelo, ya que el modelo generado (ecuación 6), presenta un coeficiente de determinación muy bajo.

$$\Theta = 6.7601\text{SAVI} + 24.094, R^2 = 0.1821 \quad (6)$$

El resultado anterior, indica que aunque el índice SAVI es un indicador de la vigorosidad del maíz forrajero, no permite estimar la humedad del suelo cuando esta es baja y genera estrés en las plantas.

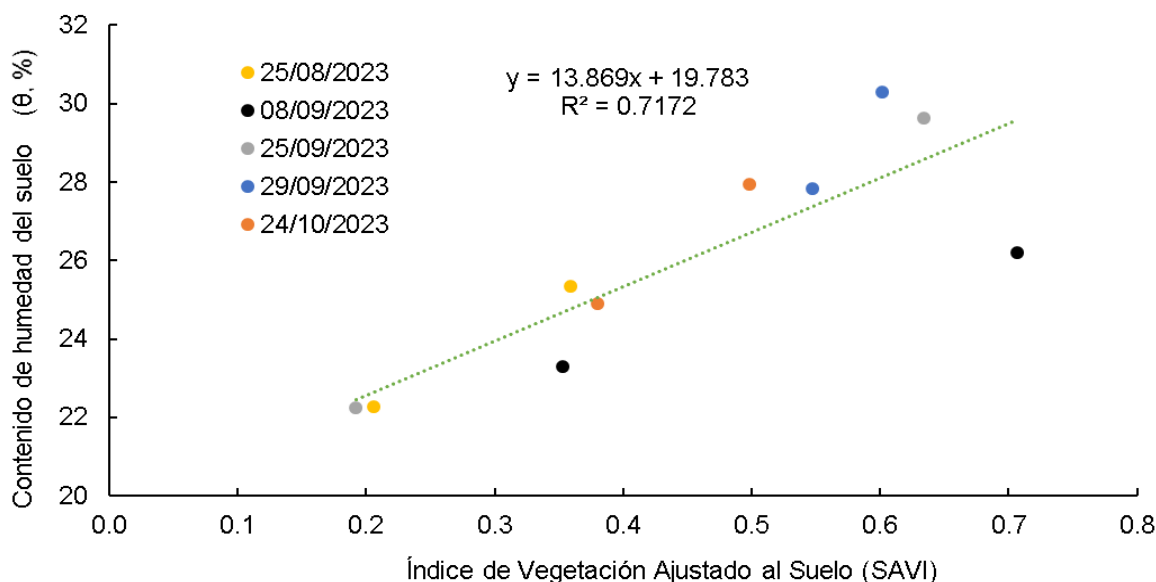


Figura 1. Relación lineal entre el contenido de humedad del suelo y el índice SAVI en cultivo de maíz forrajero.



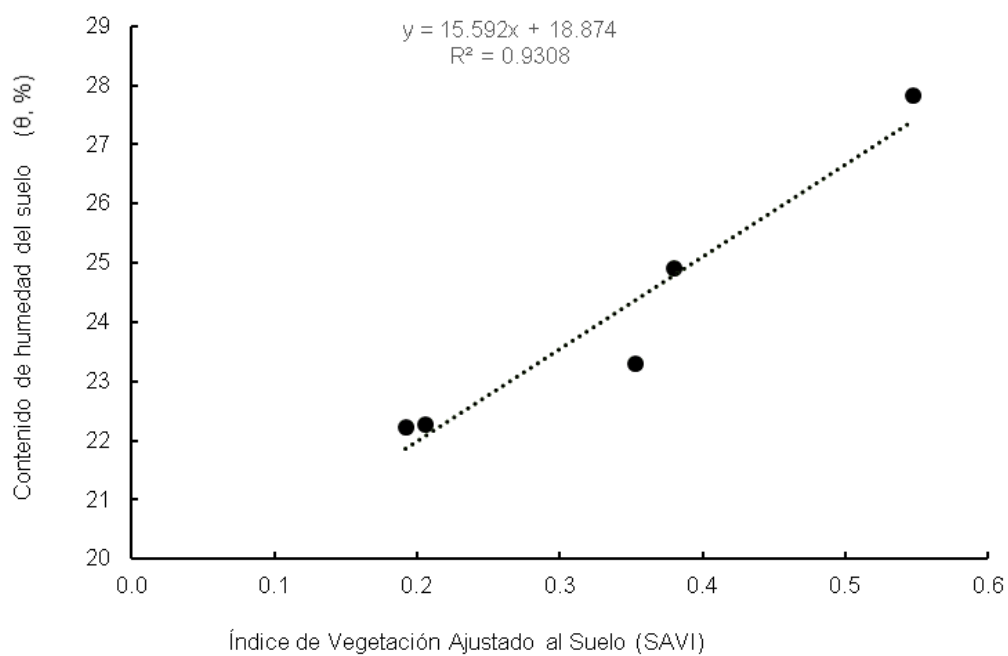


Figura 2. Relación lineal entre el contenido de humedad del suelo y los valores mínimos del índice SAVI.

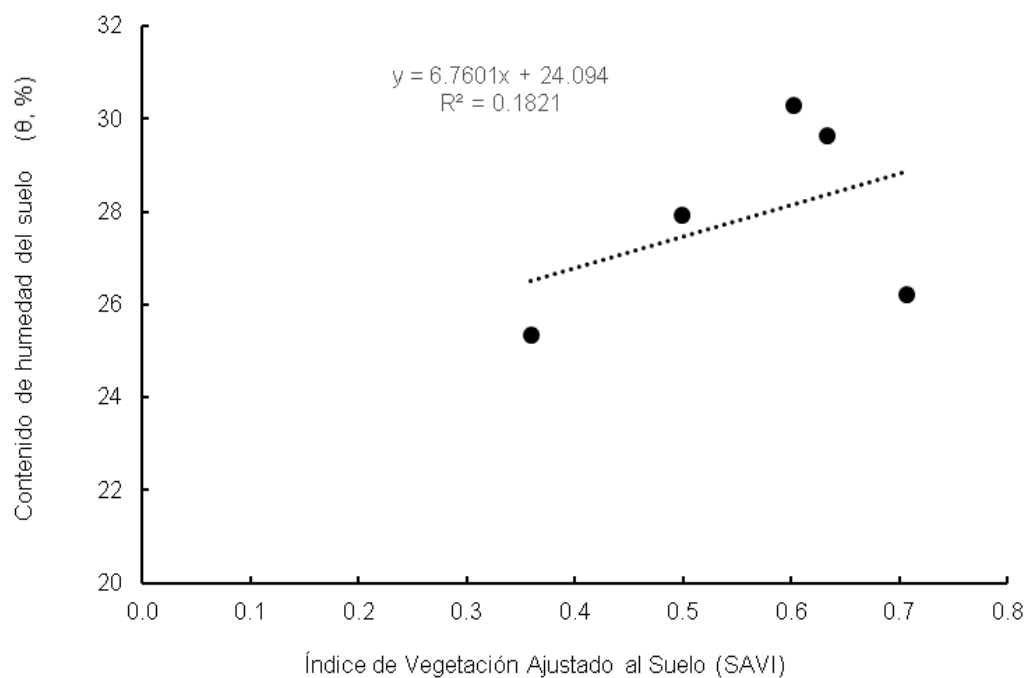


Figura 3. Relación lineal entre el contenido de humedad del suelo y los valores máximos del índice SAVI.

A partir del análisis t de Student se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el contenido de humedad del suelo en los sitios donde los valores del índice SAVI eran los mínimos, respecto a los sitios donde los valores eran máximos (Figura 4). Es decir, el índice SAVI permite identificar los sitios con menor y mayor porcentaje de humedad del suelo, utilizando como indicador la vigorosidad del cultivo, en este caso, del maíz forrajero. Únicamente en la fecha del 29 de septiembre del 2023, no se presenta una diferencia estadísticamente significativa, esto se puede deber a que el contenido de humedad en los puntos de medición era muy similar o a que, en la etapa fenológica correspondiente a la fecha, el cultivo de maíz es menos sensible a las variaciones de humedad. Por tal motivo, se recomienda ampliar este tipo de estudios, ya que es importante obtener mayor información y mejorar los modelos de predicción obtenidos en este trabajo.

Estos resultados son comparables con los presentados por Mohamed et al (2018), quienes encontraron que existe una alta correlación entre índices de vegetación como el índice de humedad del suelo (Soil Moisture Index, SMI) y el contenido de humedad del suelo en diferentes periodos de crecimiento del cultivo.

En ese estudio, los modelos de simulación que generaron, combinan el índice de vegetación, el contenido de agua del suelo y el contenido de agua de la planta en diferentes periodos de crecimiento del trigo de invierno, y encontraron que las correlaciones entre el índice de vegetación diferencial (DVI) y el índice de vegetación perpendicular (PVI) al comienzo del periodo de elongación del tallo, en el periodo de emergencia de la espiga y en el periodo de maduración con el contenido de humedad del suelo fueron altamente significativas ($P < 0.01$).

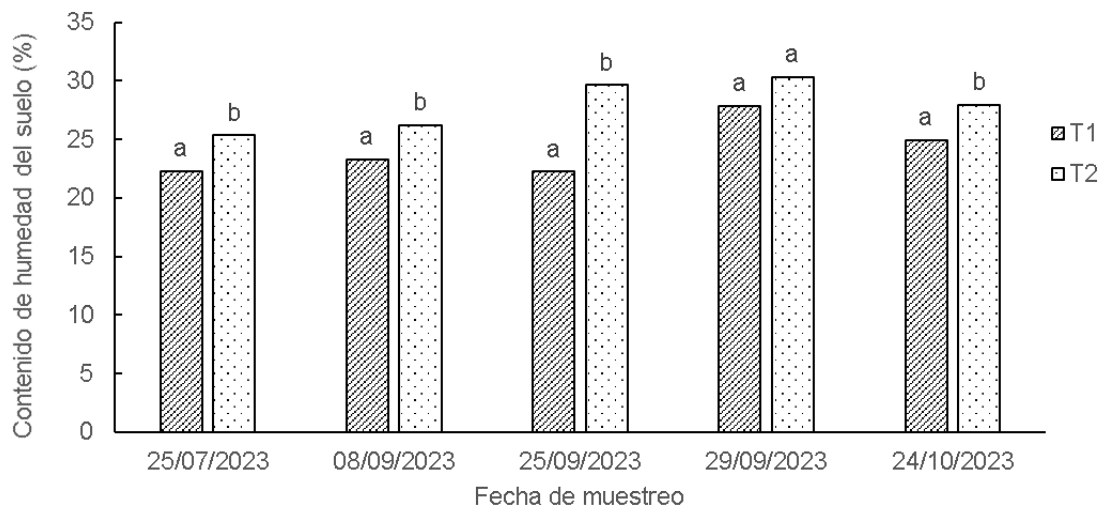


Figura 4. Comparación del contenido de humedad en puntos con los valores mínimos (T1) y máximos (T2) del índice SAVI, en diferentes periodos de crecimiento del maíz forrajero en verano 2023. Mismas letras no difieren estadísticamente con base en la prueba t de Student con $p \leq 0.05$

Los valores de humedad del suelo registrados muestran que el programa de riego cumplió su objetivo y mantuvo la humedad dentro de los límites críticos en los cuales el agua del suelo es aprovechable para las plantas (22 y 36%, valores respectivos a los indicadores: CC y PMP). Se

identificó que en las áreas correspondientes para nivel SAVI alto hubo valores de humedad siempre mayores a los ponderados para el nivel SAVI bajo, la prueba t-student general demostró que en general hay diferencia estadísticamente significativa entre

porcentajes de humedad en los suelos de las áreas zonificadas con el tratamiento SAVI.

CONCLUSIONES

La teledetección, a partir de índices de vegetación, es una herramienta útil para monitorear en tiempo casi real el contenido de humedad el suelo, el cual es un indicador del estado hídrico de los cultivos. A partir de este estudio se concluye que existe una alta relación entre el índice SAVI y el contenido de humedad del suelo, en cultivo de maíz forrajero bajo riego por goteo, en la región de la Comarca Lagunera.

LITERATURA CITADA

- Andreu, A; Carpintero, E; González-Dugo, M.P. 2018. Teledetección para la agricultura. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), Sevilla, España, 1-10 p.
- Aguilar, L. A. 2019. Moverse para no extinguirse.: Trayectoria productiva y movilización social de pequeños lecheros de Chihuahua, México, 1950-2018. *Historia Mexicana*, 72, 213-213.
- European Space Agency (2015). Sentinel-2 Mission. Consultado por última vez el 28 de octubre de 2024 en: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, (25), 295309.
- Mohamed, E. S., Ali, A., El-Shirbeny, M., Abutaleb, K., Shaddad, S. M. (2020). Mapping soil moisture and their correlation with crop pattern using remotely sensed data in arid region. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(3), 347-353.
- Rodríguez Moreno, V. M. y Bullock, S. H. 2013. Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4, 611-623.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2023. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola, cierre de la producción agrícola. SIAP. Consultado por última vez el 28 de

octubre de 2024 en: nube.siap.gob.mx/cierreagricola/

Velasco Macias, S., Tadeo Robledo, M., Espinosa Calderón, A., Zaragoza Esparza, J., Canales Islas, E. y Coutiño Estrada, B. 2022. Rendimiento de grano, forraje y calidad forrajera de nuevos híbridos de maíz de Valles Altos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 77-86.

Villalobos González, A., López Castañeda, M. C., Aguilar Rincón, S., Heber, V. y López Hernández, M. B. 2016. Relaciones hídricas en maíces de Valles Altos de la Mesa Central de México en condiciones de sequía y fertilización nitrogenada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7, 1651–1665.

