



CALIBRACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO USANDO IMÁGENES SATELITALES

José Rodolfo Quintana Molina^{1*}; Ignacio Sánchez Cohen²; Sergio Iván Jiménez Jiménez² ;
Mariana de Jesús Marcial-Pablo²; Ricardo Trejo Calzada¹; Emilio Quintana Molina³

¹Posgrado de Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas. Universidad Autónoma Chapingo-
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Km. 40 Carr. Gómez Palacio Chihuahua Bermejillo, C.P.
35230, Durango, México.

rodolfoquintanam97@gmail.com – +34 615 31 23 71 (*Autor de correspondencia)

² INIFAP-CENID RASPA Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-
Atmósfera, Margen Derecha Canal Sacramento km 6.5, Zona Industrial, Gómez Palacio, CP. 35140,
Durango, México.

³Programa de Master in Sciences in International Land and Water Management, Water Resources
Management Chair Group, Wageningen. University & Research, 6708 PB, Wageningen, Güeldres, Países
Bajos

Resumen

El contenido de humedad en el suelo tiene un importante papel entre la atmósfera y la superficie de la tierra mediante el intercambio de la energía latente y sensible a través de la evapotranspiración. Dada la alta escases de agua para la agricultura, es crucial desarrollar modelos que ayuden a la mejora del manejo de los recursos hídricos para proporcionar soluciones a los problemas agronómicos en la parte norte de México.

En este sentido, en la presente investigación se utilizó el modelo Óptico Trapezoidal (OPTRAM) para estimar el contenido de humedad en el suelo a 5, 10 o 20 cm de profundidad, el modelo permite estimar la humedad en el suelo de manera espacial mediante la distribución de los píxeles a través de la relación de índices de vegetación (NDVI) y la swir2 transformada a reflectancia, extraídos de imágenes satelitales de las misiones Landsat-8 y Sentinel-2 a través de Google Earth Engine (GEE). Se tomaron datos del contenido de humedad volumétrica en diferentes fechas en dos parcelas de riego por gravedad y el otro en condiciones de temporal en la región hidrológica 36 de Durango, México. El contenido de humedad volumétrico en el suelo estimada con el modelo OPTRAM fue comparado con datos en campo, en el caso con imágenes Sentinel-2, la raíz del error cuadrado medio (RMSE) a 5, 10 y 20 cm fueron de 0.0437, 0.0318 y 0.0325 cm³ cm⁻³, mientras que, la R² fue de 0.7584, 0.7376 y 0.7522, respectivamente. En el caso de imágenes de Landsat-8 se encontraron valores de RMSE de 0.0586, 0.0507, 0.0534 cm³ cm⁻³, y R² de 0.7453, 0.7077 y 0.7746, respectivamente en las áreas de estudio.

Palabras claves: Contenido, humedad, índices de vegetación, Google Earth Engine



Introducción

El contenido de humedad del suelo en las capas de la superficie de la tierra es de gran importancia en distintas disciplinas tales como la agricultura, hidrología, meteorología, entre otras (Schmugge, 1980). El conocimiento del contenido de humedad del suelo en la agricultura ayuda al uso eficiente del agua, reducción de la dependencia de fertilizantes y mejoramiento en la calidad del cultivo (Garg, 2016). Cada tipo de suelo tiene la capacidad de absorber y retener una cantidad de agua relacionada con la presencia de materia orgánica, manteniendo la estructura del suelo. Distintas prácticas agrícolas modifican las propiedades inherentes de su fertilidad, lo cual repercute sobre el contenido de materia orgánica y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (Bowman et al., 1999).

A lo largo del tiempo se han desarrollado metodologías para conocer el contenido de humedad en el suelo como, el método gravimétrico en condiciones de laboratorio y el método de Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR). El primer método suele usarse para calibrar métodos indirectos. Mientras que, el método de TDR es un método indirecto que consta de la utilización de 2 aparatos, uno que recopila los datos y el sensor que toma los datos de humedad en el suelo a diferentes profundidades del suelo mediante la relación de la velocidad de las ondas electromagnéticas que pasan entre las varillas de guía de onda, midiendo el tiempo en el que viajan las ondas electromagnéticas del sensor (Walker et al., 2004).

En la actualidad, la estimación del contenido de humedad del suelo mediante sensores remotos es posible gracias a las nuevas tecnologías existentes. Medidos a partir de imágenes de satélites y modelos trapezoidales ópticos (OPTRAM) y térmicos (TOTRAM), así como sensores activos y microondas. La principal diferencia entre estas técnicas son las regiones de longitud de onda dentro del espectro electromagnético (Walker, 1999). Los modelos trapezoidales ópticos y térmicos han sido los más utilizados para la estimación del contenido de humedad en el suelo mediante la utilización de los sensores remotos, ya que permiten obtener resoluciones espaciales más finas que los otros métodos.

El presente trabajo tiene como objetivo estimar el contenido de humedad volumétrico en el suelo mediante imágenes de satélite y datos medidos *in-situ* para estimar, ya sea a 5, 10 o 20 cm de profundidad utilizando la distribución de los píxeles de la relación del NDVI-STR del modelo OPTRAM a través de series de tiempo de imágenes de satelitales de las misiones Landsat-8 y Sentinel-2.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

La zona de estudio se encuentra dentro del municipio de Mapimí, Durango con tipo de clima muy seco y extremoso semicálido con lluvias en verano. Las precipitaciones se presentan de forma violenta de corta duración con promedios anuales de 264.2 mm con una máxima de 513 mm y una mínima de 81 mm. La temperatura anual de 20.8 °C, una mínima promedio de 3.9 °C en invierno y una máxima de 36.1 °C en verano. Los suelos se caracterizan por la carencia de materia orgánica, fósforo y calcio y contener altas concentraciones salinas y sódicas, especialmente en las áreas bajas.

Las áreas de agricultura de riego por gravedad están compuestas por un tipo de textura franco-arenosa a 0-30 y 30-60 cm de profundidad dentro de las parcelas de los campos experimentales de la Universidad Autónoma Chapingo-Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA) y parcelas privadas ubicadas a un costado de la URUZA. Mientras que, en el área de agricultura de temporal compuesta con un tipo de textura Franca a 0-30 y 30-60 cm de profundidad dentro de las parcelas del ejido La Purísima.

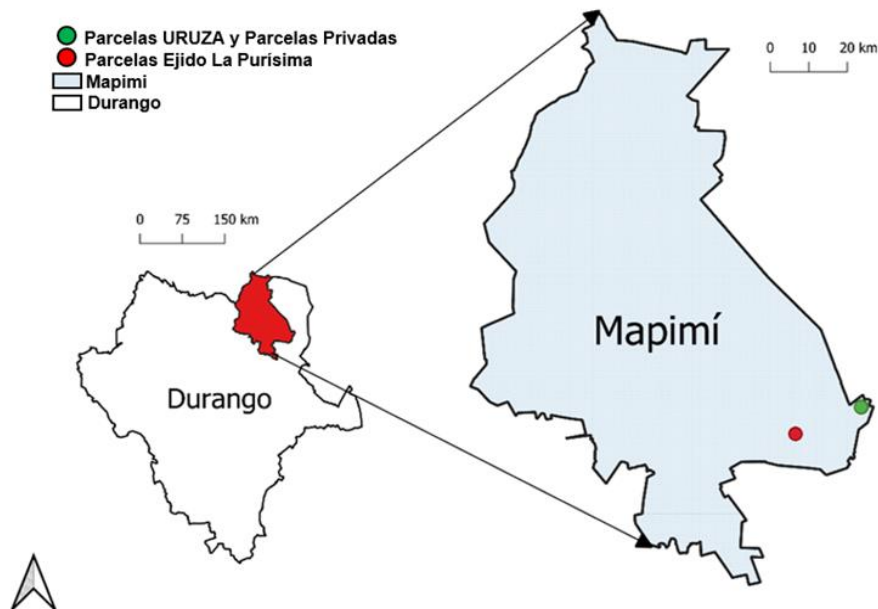


Figura 1. Mapa de ubicación del municipio de Mapimí, Durango.

Mediciones in-situ del contenido de humedad volumétrico del suelo (θ)

Dentro de la tabla 1, se muestra las fechas de toma de datos de suelo dentro de las áreas de estudio a 5, 10 y 20 cm de profundidad. Se utilizaron 2 métodos para la toma de datos de contenido de humedad volumétrica en el suelo dentro del área de agricultura de



temporal mediante el método de Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR) y para las áreas de agricultura de riego por gravedad se utilizó el método gravimétrico.

Cuadro 1. Días de toma de muestra de contenido de humedad del suelo y día de órbita del satélite

Satélite	Ubicación	No. de imágenes	Día de adquisición (Año 2022)
Sentinel-2	Agricultura de temporal-Parcelas Ejido la Purísima	6	Feb. 16, Feb.21, Feb. 26, Mar. 06, Mar. 08, Mar. 11
Landsat-8		1	Mar. 06
Sentinel-2	Agricultura de riego por gravedad-Parcelas URUZA	11	Mar. 23, Mar. 31, Abr. 02, Abr. 05, Abr. 07, Abr. 15, Abr. 17, Jun. 14, Jun. 21, Jun. 26, Jul. 01
Landsat-8		4	Mar. 22, Abr. 07, Jun. 10, Jun.26
Sentinel-2	Agricultura de riego por gravedad-Parcelas Privadas	4	Jul. 14, Jul. 16, Jul. 24, Jul. 31
Landsat-8		2	Jul. 12, Jul.28

Cálculo de humedad en el suelo usando imágenes de satélites

La humedad del suelo fue precedida mediante el análisis de las imágenes de satélite de los conjuntos de datos de las misiones Sentinel-2 y Landsat-8 disponibles dentro de la nube de Google Earth Engine. A través del desarrollo graficas de dispersión de las series de tiempo del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y su relación con la STR del modelo OPTRAM.

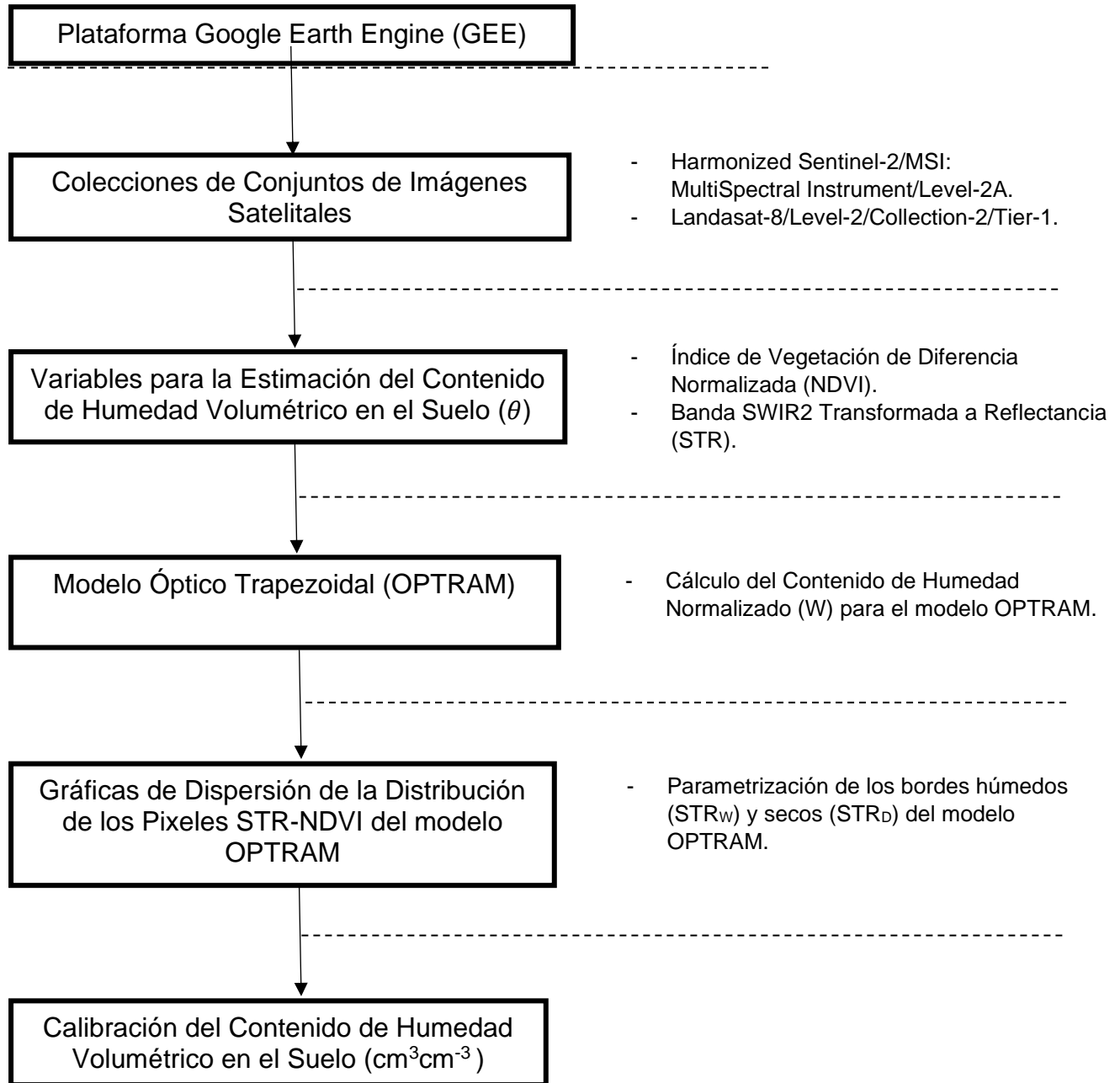


Figura 2. Metodología utilizada para la calibración del contenido de humedad volumétrico en el suelo. (elaboración propia).

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI fue calculado mediante el uso de las bandas espectrales del infrarrojo cercano y las bandas espectrales rojas (Rouse, 1973) (ecuación 1).

$$NDVI = \frac{\text{Banda NIR} - \text{Banda Roja}}{\text{Banda NIR} + \text{Banda Roja}} \quad (1)$$

Modelo Óptico Trapezoidal (OPTRAM) para la estimación del contenido de humedad del suelo mediante sensores remotos.

El Modelo Trapezoidal OPTRAM, está basado en el concepto de remplazar la variable de la LST en el modelo TOTRAM con una medida para la humedad del suelo en el dominio óptico mediante la relación lineal de la STR-IV, como se muestra en la figura 4.

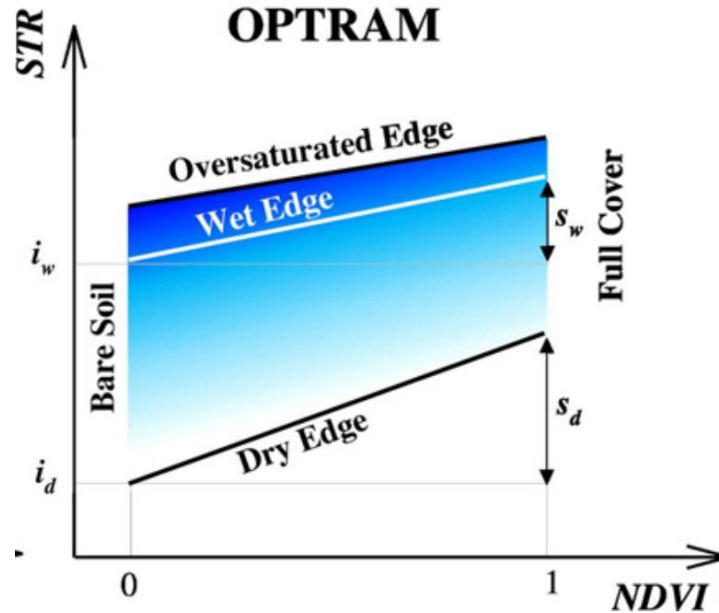


Figura 3. Parámetros del Modelo Trapezoidal Óptico (Sadeghi et al., 2017).

El modelo físico para la relación lineal entre el contenido de humedad superficial y la banda del infrarrojo cercano (SWIR) transformada en reflectancia (STR) (Sadeghi et al., 2015) (Ecuación):

$$W = \frac{\theta - \theta_d}{\theta_w - \theta_d} = \frac{STR - STR_d}{STR_w - STR_d} \quad (2)$$

Donde, STR en la SWIR transformada a reflectancia y, STR_d y STR_w son las STR mínimo y máximo local del contenido de humedad del suelo seco (θ_d) y húmedo (θ_w). La STR está relacionada a la reflectancia de la SWIR (R_{SWIR}) (Ecuación 3):

$$STR = \frac{(1 - R_{SWIR})^2}{2R_{SWIR}} \quad (3)$$

Donde R_{SWIR} es la SWIR2 transformada a reflectancia.

Mientras que, STR_d y la STR_w son obtenidos mediante la relación de la STR-IV para un área específica. La parte alta considerada como el borde húmedo (ecuación 4) y la parte baja considerada como el borde seco (ecuación 5) del trapecoide.

$$STR_w = i_w + s_w \text{ Índice de Vegetación} \quad (4)$$

$$STR_d = i_d + s_d \text{ Índice de Vegetación} \quad (5)$$

Por lo que, la combinación de las ecuaciones (2), (4) y (5), la humedad del suelo para cada píxel puede ser estimada como una función de la STR y el IV (ecuación 6):

$$W = \frac{i_d + i_d \text{ Índice de Vegetación} - STR}{i_d - i_w + (s_d - s_w) \text{ Índice de Vegetación}} \quad (6)$$

Resultados y Discusión

Parametrización del modelo OPTRAM

El modelo fue parametrizado a través de la distribución de los píxeles dentro de la relación de la STR-NDVI (OPTRAM) mediante la combinación de bordes curvos (húmedo) y lineales (seco) en OPTRAM utilizando Sentinel-2 (figura.4), bordes curvos (húmedo/seco) en OPTRAM utilizando Landsat-8 (figura. 5).

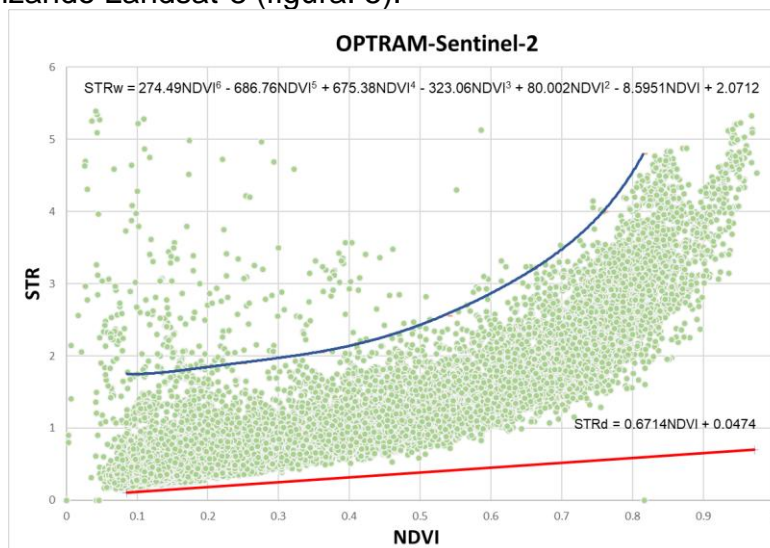


Figura 4. Distribución de los píxeles dentro de STR-NDVI modelo OPTRAM combinación de las áreas de estudio. STR_d (borde seco-línea roja) y STR_w (borde húmedo-curva azul).

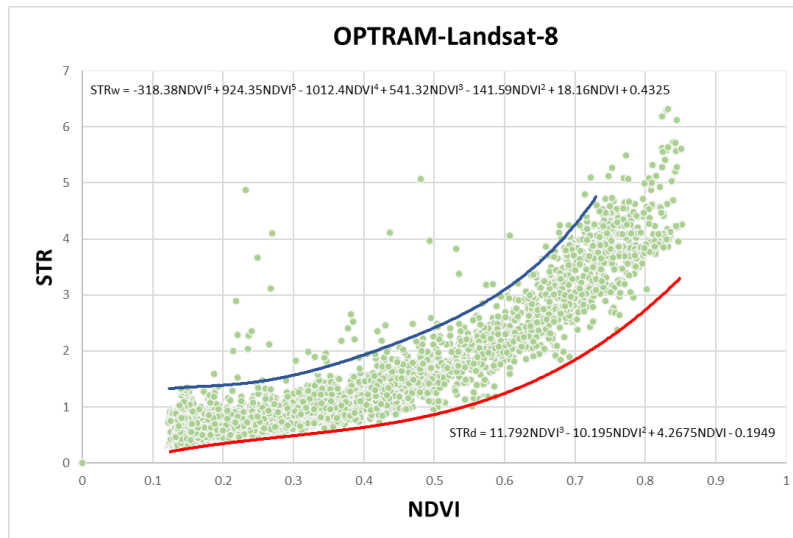


Figura 6. Distribución de los pixeles dentro de STR-NDVI modelo OPTRAM combinación de las áreas de estudio. STR_d (borde seco-línea curva roja) y STR_w (borde húmedo-línea curva azul).

Comparación de datos medidos vs estimados del modelo OPTRAM entre las misiones Sentinel-2 y Landsat-8

La comparación de los datos medidos con los datos estimados del contenido de humedad en el suelo (figura. 7) del modelo OPTRAM a 5 cm de profundidad entre las misiones Landsat-8 y Sentinel-2 mostraron correlaciones muy cercanas con rangos de R^2 de 0.745 a 0.759 y RMSE con rangos de 0.043 a 0.059 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, concentrando la mayoría de las correlaciones en los rangos de humedad de 0.09 a 0.27 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Sin embargo, debido a la diferencia en el número de muestra el modelo OPTRAM desarrollado con Sentinel-2 es ligeramente mejor al desarrollado con Landsat-8. Al igual que la diferencia entre sus RMSE de 0.0149 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Por otra parte, el modelo OPTRAM a 10 cm de profundidad mostro las mejores correlaciones utilizando la misión Sentinel-2 obteniendo una $R^2 = 0.7376$ y $\text{RMSE} = 0.0318 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$, a comparación de Landsat-8. Finalmente, el modelo OPTRAM a 20 cm de profundidad con Sentinel-2 obtuvo una $R^2 = 0.7522$ y $\text{RMSE} = 0.0325 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$, mientras que con Landsat-8 se obtuvo una R^2 superior a la Sentinel-2 de 0.7746 y $\text{RMSE} = 0.0534 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

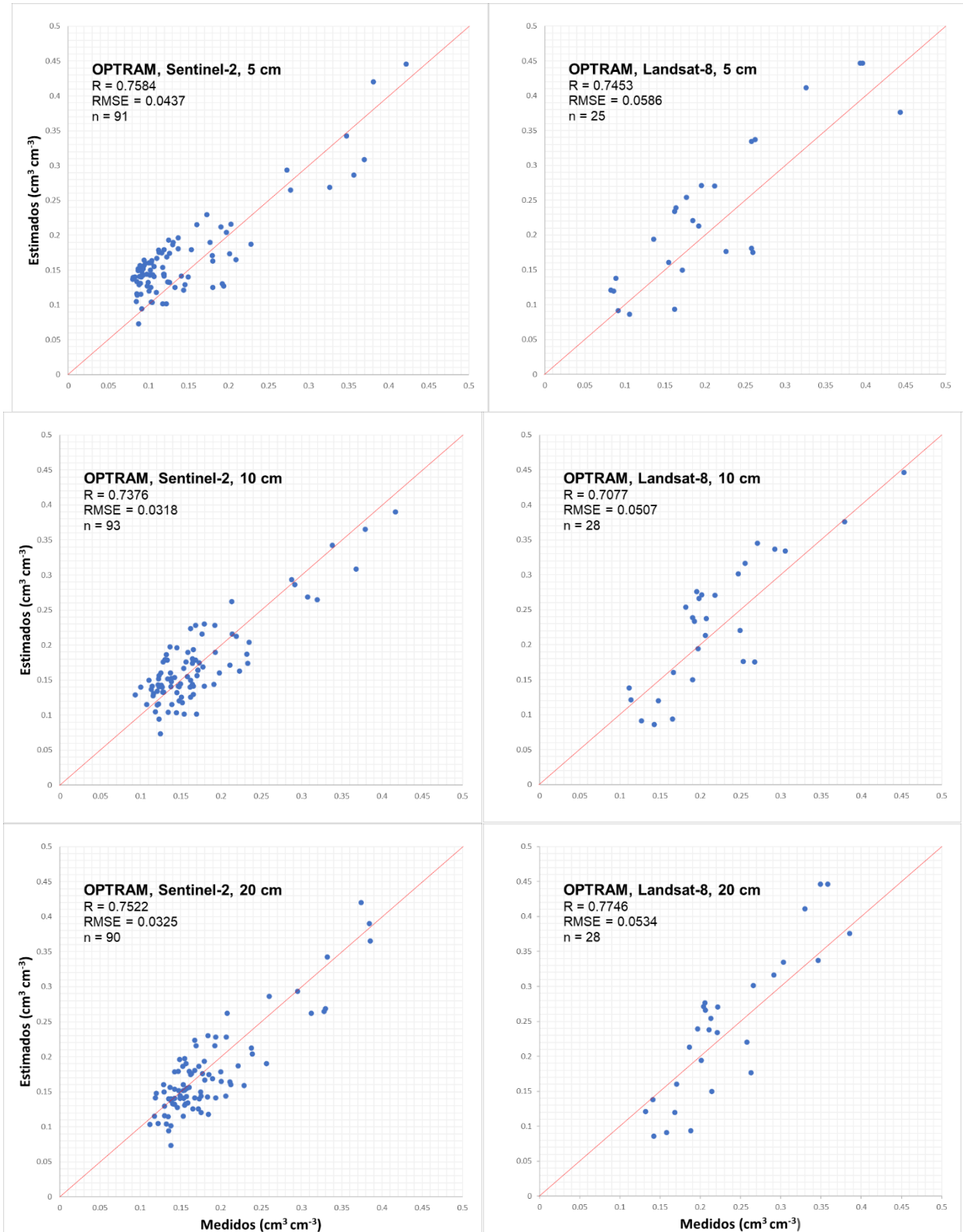


Figura 7. Estimaciones de humedad en el suelo mediante los modelos OPTRAM basados en la relación de STR-NDVI comparados con mediciones in situ de las áreas de estudio.



Conclusiones

Se encontró que existe una buena correlación de los datos medidos in-situ versus los datos estimados mediante el modelo OPTRAM a través de la implementación de series de tiempo de fechas de toma de muestra de suelo y fechas de años pasados. Al igual, que la combinación de las distribuciones de los pixeles de STR-NDVI el modelo, mostro un comportamiento positivo al momento de la correlación de los valores de humedad en el suelo medidos y estimados.

Debido a la resolución temporal (16 días) y espacial (30 m) de la misión Landsat-8, el numero de muestras a comparación de la misión Sentinel-2 fue mucho más baja. Sin embargo, los resultados obtenidos tuvieron una mejor correlación utilizando las imágenes de satélite de la misión Sentinel-2. Pero, para el monitoreo de humedad en el suelo, Landsat-8 es menos viable, debido a su resolución temporal y espacial. Dicho eso, la misión Sentinel-2 para el monitoreo de humedad en el suelo y sus resoluciones temporales de 2 a 5 días y espaciales de 10 m, son una opción mucho más viable. En conclusión, ambos satélites mostraron buenos resultados separados la misión Sentinel-2 muestra mucha mas viabilidad que la misión Landsat 8, pero en conjunto y combinando sus orbitas satelitales ambas obtendrían un monitoreo de la humedad en el suelo mucha más amplio y preciso.

Referencias Bibliográficas

- Bowman, R. A., Vigil, M, F., Nielsen, R, L and Anderson, R, L. (1999). Soil Organic Matter Changes in Intensively Cropped Dryland Systems. Soil Science Society of America Journal. 63(1), 186-191.
- Carlson, T. N. (2013) Triangle models and misconceptions. International Journal of Remote sensing Applications. 3(3), 155-158.
- Departament of the Interior U.S. Geological Survey. Landsat 8-9 Operational Land Imager (OLI) - Thermal Infrared Sensor (TIRS) Collection 2 Level 2 (L2) Data Format Control Book (DFCB). Version 6.0, 2020.
- Garg, A., Munoth, P., and Goyal, R. (2016). Application of soil moisture sensor in agriculture. In *Proceedings of Internation Conference on Hydraulic*. 1662-1772.
- Patton, J. Tyson Oschsner (2014). Relating Volumetric and Gravimetric Soil Water Contents. [Video].
- Rouse, J. W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation [NASA/GSFC Type II Report]. Greenbelt, MD: NASA/Goddard Space Flight Center.



- Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M., & Jones, S. B. (2017). The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. *Remote sensing of environment*, 198, 52-68. doi:10.1016/j.rse.2017.05.041.
- Sadeghi, M., Jones, S. B., Philpot, W. D. (2015). A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands. *Remote Sensing of Environment*. 164, 66-76.
- Schmugge, T. J., Jackson, T. J., and McKim, H. L. (1980). Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research*. 16(6), 961-979. doi:10.1029/wr016i006p00961.
- Walker, J. P. (1999). Estimating soil moisture profile dynamics from near-surface soil moisture measurements and standard meteorological data (Doctoral dissertation, University of Newcastle).
- Walker, J. P., Willgoose, G. R., and Kalma D. J. (2004). *In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques*. *Journal of Hydrology*. 293(4), 85-99. doi:10.1016/S0022-1694(04)00039-3.