

ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO DEL TRIGO USADO IMÁGENES SATELITALES

Mariana de Jesús Marcial-Pablo^{1*}; Sergio Iván Jiménez-Jiménez¹; Fernando Cabrera-Carbajal²; Ernesto Sifuentes-Ibarra³; Jaime Macías-Cervantes³

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta- Atmósfera (CENID RASPA), INIFAP. Gómez Palacio, Durango, México.

²Sitio Experimental Valle del Mayo (SEMAY), INIFAP. Navojoa, Sonora, México.

³Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF), INIFAP. Juan José Ríos, Sinaloa, México.

marcial.marianadejesus@inifap.gob.mx - 7772664423

Resumen

La agricultura requiere la implementación de herramientas innovadoras para mejorar la gestión del agua de riego y una estimación precisa de la evapotranspiración real de los cultivos, como las metodologías basada en sensores remotos. El seguimiento de la producción de cultivos y el riego a escala regional puede basarse en el uso de datos de sensores remotos. El estudio tiene como finalidad obtener una relación entre el coeficiente de cultivo del trigo y los índices de vegetación (IV) obtenido de las imágenes satelitales Sentinel-2. En análisis se realizó en 3 sitios del Estado de Sonora; los valores de los IV se obtuvieron con la herramienta VICAL, considerando la fecha de siembra y cosecha, y los valores de Kc se obtuvieron de software IRRIMODEL calibrados para el trigo mediante los datos de campo. Los resultados indican que el IV de mayor ajuste considerando la etapa de germinación-emergencia hasta la etapa de antesis-floración fue el NDVI con un R² de 0.946 y considerando la etapa de grano acuoso hasta la cosecha fue el WDRVI con un R² de 0.851, obteniendo así, dos funciones que relacionan los IV con Kc; la RMSE y el MAE entre los valores medidos y estimados de Kc con IV fueron de 0.084 y 0.056, respectivamente. A partir de las funciones se puede estimar el Kc del trigo de manera espacial y en zonas agrícolas de mayor superficie.

Palabras claves: Evapotranspiración, índices de vegetación, NDVI.

Introducción

El trigo es el cereal más cultivado alrededor del mundo, debido a su alto valor económico y nutricional, monitorear el crecimiento del cultivo de trigo, los parámetros biofísicos del dosel y los parámetros de rendimiento durante la temporada de desarrollo es esencial para decisiones de gestión agrícola (Magney et al., 2016). El trigo es el segundo cereal en importancia en México su producción total supera los 3 millones de toneladas, su principal productor es el estado de Sonora con una producción de 55.9% de total nacional (SIAP, 2023).

Con el aumento de la escasez de agua, se emplean varios patrones de riego de ahorro de agua en el trigo; diferentes métodos de riego y programación de riego regulan la fisiología del trigo en diferentes aspectos que causan impactos en el crecimiento del cultivo y la utilización del agua.

La determinación de la evapotranspiración (ET_c) real del cultivo durante la temporada de crecimiento tiene una ventaja potencial para lograr una programación de riego adecuada. Desarrollar y evaluar métodos precisos de medición/estimación de la evapotranspiración real de los cultivos es importante para la gestión del agua de riego de los agricultores y administradores del agua, además permite el cálculo de índices de eficiencia del uso del riego. La estimación de la evapotranspiración (ET_c) basada en el coeficiente de cultivo (K_c) es uno de los métodos más utilizados para la gestión del agua de riego a escala de campo.

El coeficiente de cultivo (K_c) es un parámetro importante para la programación del riego y la asignación de agua. Los valores de los coeficientes de cultivo tomados de la literatura pueden proporcionar una guía práctica para programar el riego, pero pueden ocurrir errores considerables al estimar las necesidades de agua de los cultivos debido a su naturaleza empírica; por lo tanto, es necesario hacer correcciones en los valores según las condiciones locales. Durante la temporada de crecimiento de los cultivos, el valor de K_c para la mayoría de los cultivos agrícolas aumenta desde un valor mínimo en la emergencia, en relación con los cambios en el desarrollo del dosel, hasta que se alcanza un K_c máximo aproximadamente con la cobertura total del dosel. El K_c tiende a disminuir en un momento después de alcanzar una cobertura total en la temporada de cultivo.

Para la gestión del riego, las imágenes satelitales proporcionan un medio excelente para determinar y mapear el K_c y ET_c espacial y temporalmente, al proporcionar estimaciones de la K_c y ET_c para grandes zonas agrícolas utilizando una cantidad mínima de datos terrestres se tienen un gran potencial para mejorar la gestión del riego. Algunos estudios recientes han utilizado con éxito modelos de sensores remotos para monitorear y mejorar la gestión del riego (Chen et al., 2020 ; Hadadi et al., 2022). El objetivo específico de este estudio es determinar el K_c del trigo en función de los índices de vegetación, considerando las etapas fenológicas y adicionalmente estimar el ET_c a partir del geeSEBAL de un sitio experimental.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio y manejo del cultivo

El estudio se realizó durante el ciclo otoño-invierno (OI) 2022-2023 en tres sitios experimentales; el primer sitio de estudio pertenece a las parcelas (27.3665972, -109.9240155) del Campo Experimental Norman E. Borlaug (CENEB) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en la calle Norman E. Borlaug, km 12, Valle del Yaqui, Ciudad Obregón, Sonora. El segundo sitio corresponde a las parcelas (27.1331801, -109.6858363) ubicada en la localidad de Sibolibampo, Navojoa, Sonora. El último pertenece a las parcelas (27.0102006, -109.5017278) del Sitio Experimental Valle del Mayo (SEMAY) del INIFAP, ubicado a la altura del Km 9 de la carretera Navojoa-Huatabampo, Navojoa, Sonora.

El cultivo del trigo de la variedad Don Lupe se establecieron para las parcelas de CENEB el 18 de diciembre, para Sibolibampo el 22 de noviembre y para SEMAY el 01 de diciembre; con una densidad de siembra de 80 kg de semillas/ha, con una separación entre surcos de 0.8 m. Los tratamientos de riego por gravedad evaluados fueron: 4 auxilios (4a), 3 auxilios (3a) y 2 auxilios (2a).

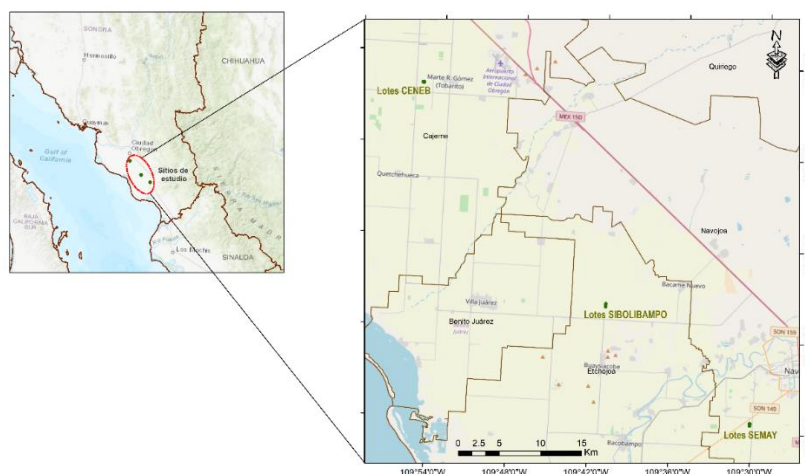


Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio.

Obtención del coeficiente de cultivo con IRRIMODEL

El IRRIMODEL calcula los datos de K_c durante de desarrollo del cultivo utilizando la metodología propuesta por Ojeda et al. (2006), en el cual el K_c del día n está en función de los días grado crecimiento acumulados X_n .

$$K_{c_n} = K_{\max} \operatorname{erfc} \left(\left(\frac{X_n - X_{K_{\max}}}{\alpha_1} \right)^2 \right) \quad (1)$$

$$X_n = \frac{\text{GDD}_n}{\alpha_0} \quad (2)$$

Dónde: K_{max} es el valor máximo del coeficiente de cultivo (K_c); $erfc$ representa la función error complemento; x_n expresa los días grado crecimiento acumulado (GDD) hasta el día n , normalizado con respecto al parámetro α_0 ; α_0 es el valor GDD requerido para completar el ciclo fenológico del cultivo; $x_{K_{max}}$ es el valor adimensional normalizado x cuando se presenta el valor máximo K_{max} ; α_1 se obtienen del ajuste entre los datos experimentales y el modelo. Estos valores fueron tomados directamente en campo.

Los GDD realiza la acumulación térmica diaria de la diferencia entre la temperatura media y una temperatura base particular para cada cultivo y etapa de desarrollo. La estimación diaria de la variable día grado ($^{\circ}D_i$) se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} ^{\circ}D_i &= T_a - T_{min} \text{ si } T_a < T_{max} \\ ^{\circ}D_i &= T_{max} - T_{min} \text{ si } T_a \geq T_{max} \\ ^{\circ}D_i &= 0 \text{ si } T_a \leq T_{min} \end{aligned} \quad (3)$$

Donde: T_a es la temperatura media ambiental diaria, T_{min} y T_{max} son las temperaturas mínimas y máximas del aire, dentro del cual la planta se desarrolla. Los datos de temperatura se obtuvieron de las estaciones: Block 910 (Ciano), Block 1936 Sibolibampo y SEMAY de La Red de Estaciones Meteorológicas Automatizadas de Sonora (REMAS SIAFESON) de la parcela. Las temperaturas de desarrollo del trigo usadas para calcular los $^{\circ}D_i$, fueron de 4.44 y 27.2°C.

Desarrollo de modelos IV y K_c

Se han desarrollado índices de vegetación espectral con diversas formas para estimar las variables de vegetación en una variedad de especies bajo una variedad de condiciones. Algunos índices fueron creados para estimar el parámetro específico de la vegetación y otros están relacionados con muchos parámetros debido a su sensibilidad a la reflectancia. Para este estudio se emplearon cuatro índices de vegetación (IV) que se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Índices de vegetación utilizados en este estudio.

Índices de vegetation	Formula	Referencia
EVI	$2.5 \left(\frac{NIR - R}{NIR + C_1R - C_2B + L} \right)$ $C_1=6.0, C_2= 7.5; L=1.0$	Huete et al., 2002
EVI2	$2.5 \left(\frac{NIR - R}{NIR + C_1R + 1} \right)$ $C_1= 2.4$	Jiang et al., 2008
NDVI	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	Rouse et al., 1973
WDRVI	$\alpha \frac{NIR - R}{NIR + R}$ $\alpha=0.2$	Gitelson , 2004

Los valores de los IV se obtuvieron automáticamente dentro de la herramienta VICAL (Vegetation Index Calculator, Jiménez-Jiménez et al., 2022) que a su vez se encuentra soportada por la plataforma Google Earth Engine (GEE). Dentro de VICAL se agregó el URL del archivo vector de los tres sitios de estudio y se calcularon los índices de vegetación (IV) con imágenes Sentinel-2 (10 m de resolución), para cada caso. Los datos se adquirieron desde la siembra (noviembre - diciembre del 2022) hasta la madurez fisiológica (mayo del 2023).

Se relacionaron los valores de Kc obtenidos de programa IRRIMODEL (parámetros ajustado de campo) con los valores de índices de vegetación, para obtener una ecuación que estime los valores de Kc en función de IV.

Evapotranspiración del cultivo

La evapotranspiración del cultivo (ETc) se obtuvo bajo dos enfoques. En el primer enfoque la ETc se estimó de acuerdo al enfoque FAO-56, mediante la combinación de una evapotranspiración de referencia (ETo) y un coeficiente de cultivo (Kc). Los efectos de diversas variables climáticas sobre la evapotranspiración se incorporan a la ETo del cultivo y los efectos de las características que distinguen la superficie cultivada de la superficie de referencia se integran en el Kc.

La evapotranspiración de referencia es la evapotranspiración potencial de un cultivo con características específicas (de referencia), que tiene sentido físico ya que su evapotranspiración se puede estimar a través de mediciones directas. El método de FAO Penman-Monteith se ha convertido en un método estándar internacional para la ETo:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{C_n}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad (4)$$

Donde ETo es la evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹); Rn es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻²día⁻¹); Ra es la radiación extraterrestre (mm día⁻¹); G es el flujo de calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹); T es la temperatura media del aire a 1.5 a 2.5 m de altura (°C), e_s es la presión de vapor de saturación (kPa); e_a es la presión real de vapor (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹); γ es la constante psicométrica (kPa °C⁻¹); C_n y C_d es el numerador y denominador que cambia con tipo de referencia y tiempo de cálculo. Los valores para los parámetros C_n y C_d se describen por Pereira et al. (2014).

Durante las últimas dos décadas, los modelos de evapotranspiración basados en sensores remotos han sido una alternativa para calcular la ET para múltiples escalas temporales y espaciales con estimaciones consistentes a nivel de píxeles e imágenes (Anderson et al., 2011; Ershadi et al., 2013). Para el segundo enfoque, se modificó el código GEEsebal (Laipelt et al., 2021) para obtener la ETc usando el modelo SEBAL con imágenes Landsat (30 m de resolución) para incorporar datos de reanálisis NLDAS (North American Land Data Assimilation System phase 2).

Análisis estadístico

El kc estimado con la función IV-Kc y la ETc estimada con geeSEBAL modificado se compararon con los datos medidos en campo mediante el software IRRIMODEL. Para medir la precisión del modelo, se aplicaron los indicadores R^2 , RMSE (raíz del cuadrado medio del error) y MAE (error absoluto medio); el RMSE proporciona las variaciones ponderadas de errores (residuales); MAE mide la magnitud media ponderada de los errores absolutos. MAE y RMSE caracterizan las diferencias entre las variables medidas (y_i) y estimadas (\hat{y}_i), se calculan de acuerdo con las ecuaciones:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (12)$$

Resultados y Discusión

Índices de vegetación

En la figura 2 se muestra la distribución general de los índices de vegetación (IV) durante las etapas fenológicas del trigo; los valores máximos de los IV se presentan en las etapas de espigado y antesis-floración. Las variaciones entre los valores de los IV se presentan principalmente en la etapa de producción de amacollo y grano masoso; lo que indica que en estas etapas es más notoria las condiciones de manejo del cultivo a partir de análisis con IV.

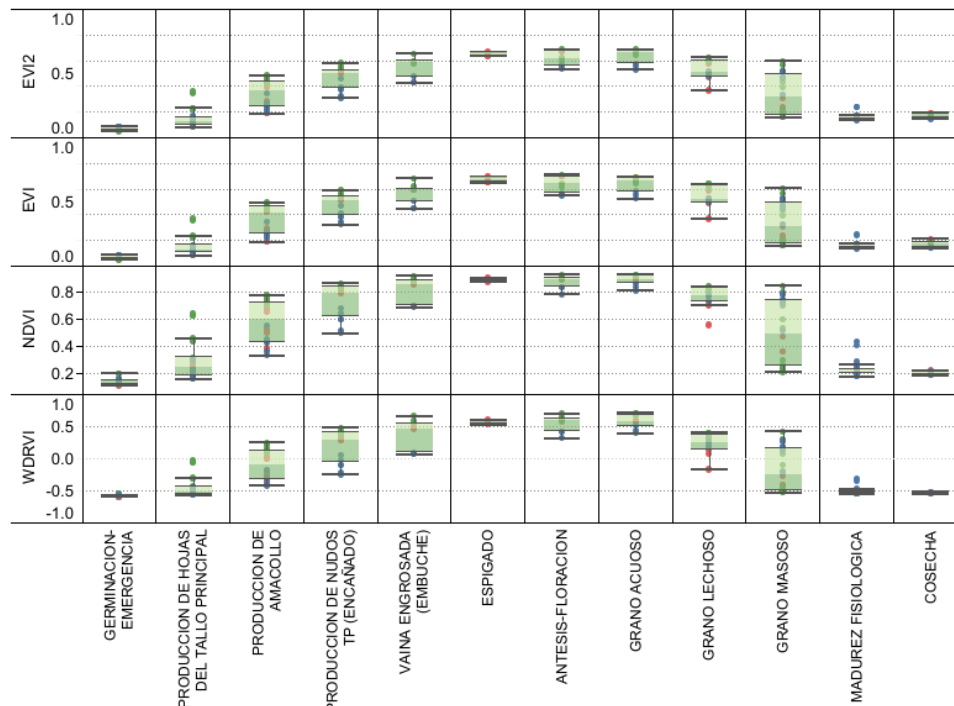


Figura 2. Comportamiento de los índices de vegetación durante el desarrollo del trigo.

Relación IV-Kc

Para aumentar la relación entre IV-Kc se obtuvieron dos funciones; en la primera función se consideran los valores obtenidos de la etapa de germinación-emergencia hasta la etapa de antesis-floración con un R^2 mayor a 0.9 para todos los índices analizados. Para la segunda función se incluye la etapa de grano acuoso hasta la cosecha con un R^2 mayor a 0.8, donde los datos obtenidos IV son más dispersos. La mayor relación se obtiene con el NDVI ($R^2=0.946$) y WDRVI ($R^2=0.851$), respectivamente (Figura 3).

Las relaciones consideradas en el análisis de estas dos variables se expresan con las siguientes ecuaciones: $Kc = -0.519 NDVI^2 + 1.572 NDVI + 0.056$ y $Kc = 0.457 WDRVI^2 + 0.594 WDRVI + 0.386$; para un Kc mínimo y máximo de 0.13 y 1.17 para la primera función y de 0.13 y 1.14 para la segunda función.

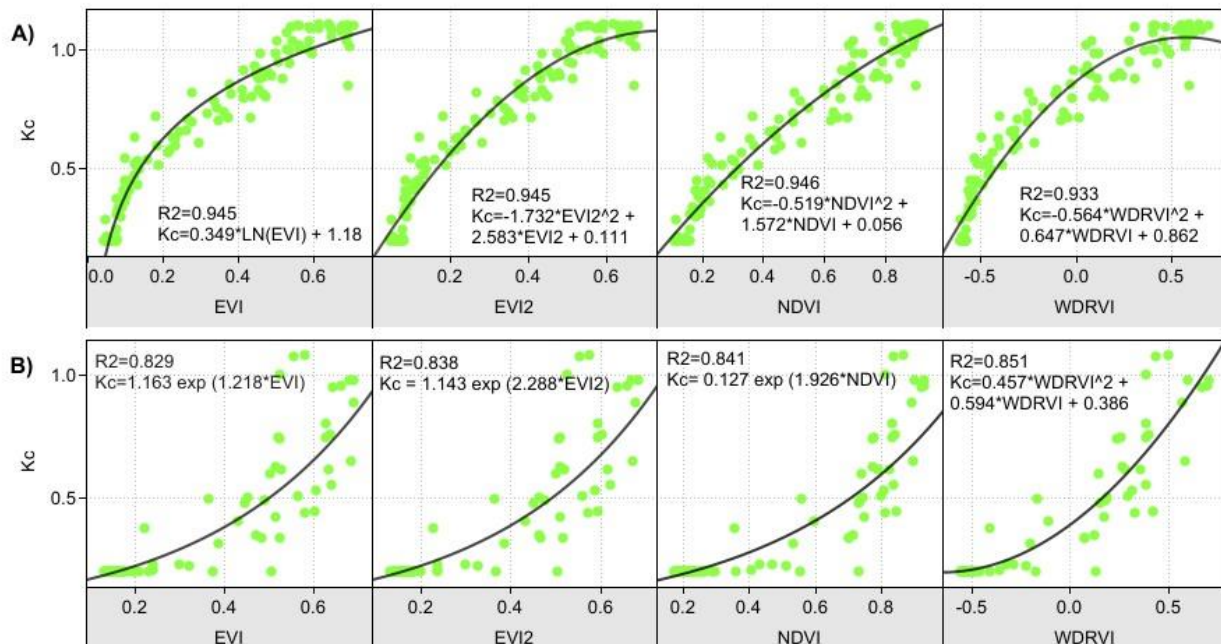


Figura 3. Relación entre IV-Kc considerando las etapas de a) germinación-emergencia a antesis-floración, b) grano acuoso a cosecha.

Los resultados de la relación entre los valores de Kc medidos con el IRRIMODEL y estimados con los IV presentaron R^2 de 0.932, RMSE de 0.084 y un MAE de 0.056, donde los valores de Kc-IV se subestiman menos de 2%. El valor máximo de Kc modelado fue de aproximadamente 1.1(Figura 4).

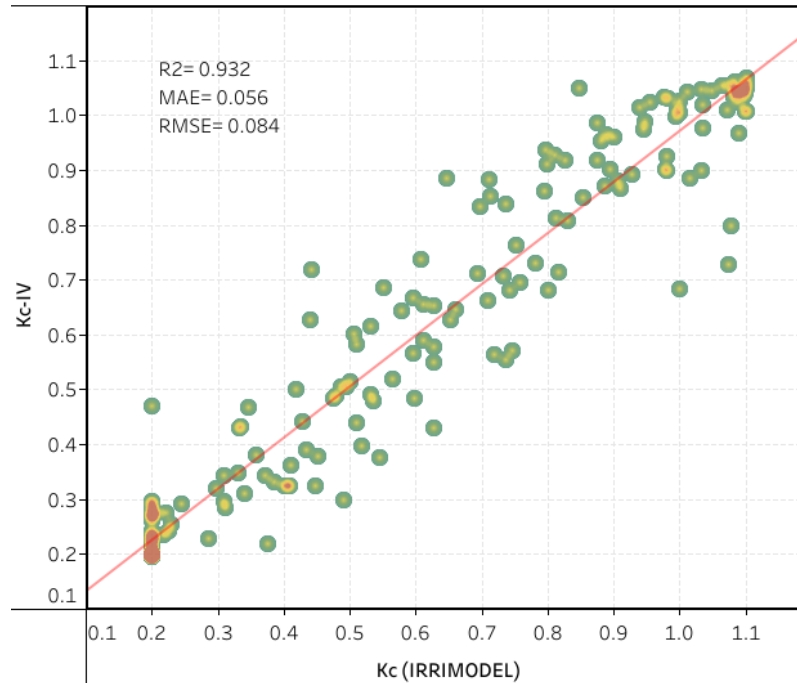


Figura 4. Comparación de los valores de coeficiente de cultivo (Kc) medidos con IRRIMODEL y estimado con IV.

Evapotranspiración del cultivo

Para este análisis se comparó la ETc a partir del Kc (IRRIMODEL) y ETo obtenido de los datos de la estación meteorológica contra la ETc estimada con la herramienta geeSEBAL para el sitio de Sibolibampo. En la Figura 5 se puede observar que el mayor número de datos generados con geeSEBAL (Laipelt et al., 2021) se subestiman, con un RMSE de 0.472 y un MAE de 0.392.

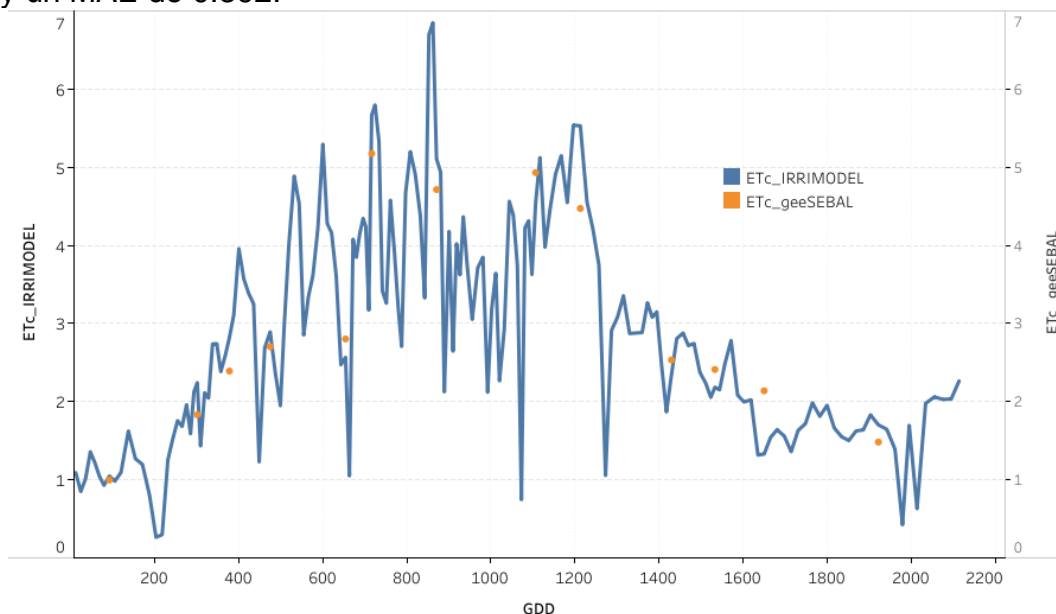


Figura 5. ETc medido con IRRIMODEL y estimado con geeSEBAL.

Conclusiones

Al separar las funciones a partir de las etapas fenológicas se obtiene una mejor correlación entre el Kc y los IV; para la primera función la mayor relación se obtiene con el NDVI y la segunda función con el WDRVI, obteniendo un mayor ajuste la primera función que considera la etapa de germinación-emergencia hasta la etapa de antes-floración con un R^2 mayor a 0.9. A partir de la relación Kc-IV se determinan los valores de Kc que se subestiman en menos de 2% con respecto Kc medido con el IRRIMODEL. Además, con las plataformas tecnológicas como el Google Earth Engine se puede obtener variables como la ETc.

Referencias Bibliográficas

- Chen, J. M., & Liu, J. (2020). Evolution of evapotranspiration models using thermal and shortwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111594.
- Gitelson, A. A. (2004). Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of plant physiology*, 161(2), 165-173.
- Hadadi, F., Moazenzadeh, R., & Mohammadi, B. (2022). Estimation of actual evapotranspiration: A novel hybrid method based on remote sensing and artificial intelligence. *Journal of Hydrology*, 609, 127774.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.
- Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., & Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote sensing of Environment*, 112(10), 3833-3845.
- Jiménez-Jiménez, S. I., Marcial-Pablo, M. D. J., Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Inzunza-Ibarra, M. A., & Sánchez-Cohen, I. (2022). VICAL: Global Calculator to Estimate Vegetation Indices for Agricultural Areas with Landsat and Sentinel-2 Data. *Agronomy*, 12(7), 1518.
- Laipelt, L., Kayser, R. H. B., Fleischmann, A. S., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021). Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 81-96.
- Magney, T. S., Eitel, J. U., Huggins, D. R., & Vierling, L. A. (2016). Proximal NDVI derived phenology improves in-season predictions of wheat quantity and quality. *Agricultural and Forest Meteorology*, 217, 46-60.
- Ojeda Bustamante, W., Sifuentes Ibarra, E., & Unland Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México.
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2014). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4-20.
- SIAP (2023). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Recuperado de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In. *Proceedings 3rd Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium*, Vol. 1, pp. 309–317. Washington, DC, USA: NASA SP-351, NASA.