

MONITOREO FENOLÓGICO DEL MAÍZ CON IMÁGENES SATELITALES EN MÓDULOS DE RIEGO (Primer año de transferencia)

Ernesto Sifuentes-Ibarra^{1*}; Sergio Iván Jiménez-Jiménez²; Mariana de Jesús Marcial-Pablo²; Felicitas Valeria Estrada Peralta³; Jaime Macías-Cervantes¹

¹ INIFAP-Campo Experimental Valle del Fuerte. Carretera Internacional México-Nogales, km 1609, C.P. 81110, Juan José Ríos, Sinaloa, México.

sifuentes.ernesto@inifap.gob.mx – Tel. (55) 3871-8700 Ext. 81512 (*Autor de correspondencia)

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

³ Universidad Autónoma Chapingo-Departamento de Irrigación. Texcoco, Estado de México.

Resumen

Uno de los principales problemas que se presenta en los distritos y módulos de riego es la falta de tecnologías de punta para la mejora del servicio de riego. El servicio de riego tradicional inicia con la solicitud de riego de cada productor de acuerdo a su experiencia y necesidades operativas. El uso de imágenes de satélite de acceso libre y modelos espectrales en función de índices de vegetación (IV's) para el monitoreo de la fenología de cultivo, permite mejorar el servicio del riego al asociar el desarrollo fenológico de los cultivos con su demanda hídrica en tiempo y espacio. El objetivo del presente trabajo fue analizar el primer año de transferencia de esta metodología en el cultivo de maíz ciclo OI 2022-2023, generada en 2020 y validada en el ciclo OI 2021-2022, en el norte de Sinaloa, México. El trabajo se desarrolló en el módulo de riego (MR) Batequis II-3, DR075, usando dos áreas compactas de 183 ha (19 parcelas de maíz) y 151 ha (17 parcelas de maíz) como secciones piloto. Se diseñó un sistema de transferencia, alimentado con datos de campo, datos estadísticos (SPRITER) y automatizado con las plataformas VICAL e IRRIMODEL, ambas de INIFAP. Se definió un sistema a la medida para el proceso de transferencia de la tecnología. El ahorro de agua estimado permite establecer segundos cultivos y ciclos de verano, en beneficio del productor, módulo de riego y sociedad en general.

Palabras claves: Sistema de transferencia, herramientas tecnológicas, ahorro de agua.

Introducción

Los módulos de riego de los distritos de México desde su formación han carecido de un proceso práctico para ofrecer un servicio de riego eficiente (programación-entrega-seguimiento), lo cual agrava los frecuentes escenarios de baja disponibilidad hídrica. El modelo tradicional de este servicio consiste en la elaboración de planes de riego semanales, donde cada productor solicita el riego en forma empírica y subjetiva, para posteriormente iniciar el proceso de entrega (*Ojeda-Bustamante et al., 2007*). Las grandes zonas de riego de México requieren de acciones no estructurales para mejorar el servicio de riego, como el monitoreo de la fenología de cultivos, sin embargo, su aplicación es limitada por el gran número de parcelas y grandes volúmenes de información de campo, diversidad de manejo de cultivos, variabilidad espacial y variabilidad climática, impactando en una eficiencia global de solo 33.9% (*Olmedo-Vázquez et al., 2017*).

En el año 2020 se desarrolló una metodología para el monitoreo de la fenología del cultivo de maíz para mejorar el servicio de riego en módulos del distrito de riego (DR) (075), mediante imágenes de satélite de la serie LANDSAT de acceso libre y modelos espectrales en función del Índice Normalizado de Desarrollo de Vegetación (NDVI) o del Índice Mejorado de Vegetación (EVI) calculados con imágenes de satélite, con el fin de mejorar el servicio de riego en escenarios de disponibilidad hídrica normal y restringida. (*Sifuentes-Ibarra et al., 2020*). Los aspectos donde puede impactar esta tecnología son: 1) seguimiento del desarrollo del cultivo a gran escala, 2) planeación semanal de volúmenes de agua demandados en función de etapas críticas, 3) manejo de volúmenes de agua en canales y 4) manejo del último riego para evitar aplicar volúmenes innecesarios.

Derivado de la importancia que puede tener esta tecnología en las grandes zonas de riego, el INIFAP aprobó la continuidad del proceso de adopción en módulos de riego del norte de Sinaloa, el cual incluye las etapas de validación y transferencia. La primera se llevó a cabo durante el ciclo 2021-2022 y la segunda inició en el presente ciclo OI 2022-2023, ambas en el módulo de riego Batequis II-3, DR075. En el presente trabajo se analizó el primer año de la transferencia de la tecnología usando una estrategia a la medida, durante el ciclo otoño-invierno 2022-2023, estimado los impactos en términos de ahorros y productividad del agua.

Materiales y Métodos

Características de la zona de estudio

El trabajo se realizó en el módulo de riego Batequis II-3, perteneciente al DR-075, el clima es seco estepario con precipitación media de 350 mm anuales, suelos predominantemente arcillosos con humedad aprovechable de 0.15 a 0.16 cm³ cm⁻³ y pendiente plana. La temperatura máxima promedio durante el periodo de crecimiento del maíz en el ciclo de estudio, fue de 29.8 ° C, mientras que el promedio de la mínima fue de 11.5 ° C, valores 0.4 y 1 ° C menores al mismo periodo del ciclo anterior, lo cual impacta en el desarrollo fenológico del cultivo. El ciclo agrícola más importante de esta región es el OI, que incluye cultivos de fechas tempranas (adelantos) y segundos cultivos,

en el Cuadro 1 se muestra un resumen del plan de riegos autorizado para el año agrícola 2022-2023 en el módulo Batequis II-3, DR075.

Cuadro 1. Resumen del plan de riegos autorizado para el año agrícola 2022-2023, en el módulo de riego Batequis II-3, DR075.

Ciclo	Sup. (ha)		NR	Lámina (cm)			Volumen (Mm ³)		
	SS	HR		Ln	LPC	LFA	Vn	VPC	VFA
Adelantos OI	1136	1136	1	20.2	24.1	28.6	2294	2731	3243
Otoño-Invierno	10922	52867	4.8	73.0	86.9	103.2	79761	94954	112747
Sub-total	12058	54003	5.8	93.2	111	131.8	82055	97685	115990
Segundos Cultivos	2786	12874	4.6	73.8	87.9	104.4	20569	24487	29076
TOTAL	14844	66877	10.4	167	198.9	236.2	102624	122172	145066

SS = superficie de siembra, HR = hectáreas riego, NR = número de riegos, Ln = lámina neta a nivel de toma, LPC = lámina bruta a nivel de punto de control, LFA = lámina bruta a nivel de presa, Vn = volumen neto a nivel de toma, VPC = volumen a nivel punto de control, VFA = volumen a nivel de presa.

Generación y validación de la tecnología

La tecnología para estimar la fenología del cultivo de maíz a partir de imágenes de satélite se generó en los módulos de riego Batequis II-3 y Santa Rosa III-1 del DR075 en el año 2020, obteniendo dos modelos espectrales de forma cuadrática que relacionan el desarrollo fenológico (DF) con los índices de vegetación NDVI y EVI, para lo anterior se utilizaron datos históricos de DF y los IV de 30 parcelas de maíz ciclo OI, del periodo 1998 a 2018. Como fuente de información se utilizaron los registros históricos de los de los MR almacenados en el programa SPRITER y las imágenes de satélite LANDSAT adquiridas de la plataforma <https://glovis.usgs.gov/>. La precisión de los modelos se realizó mediante la comparación de las estimaciones de los modelos con datos medidos en campo. La validación hizo durante el ciclo OI 2021-2022 en nueve parcelas representativas del DR075 ubicadas en el módulo Batequis, II-3, donde se monitoreó semanalmente la fenología comparando el DF-observado con el DF-estimado con los modelos espectrales. Para automatizar el proceso se utilizó la plataforma VICAL con los modelos integrados, que es una adaptación de la plataforma Google Earth Engine (Jiménez-Jiménez et al., 2022).

Transferencia y análisis de impactos (Primer año)

La transferencia inició en el ciclo OI 2022-2023, en el MR Batequis II-3, para esto se diseñó un sistema que integra las herramientas tecnológicas VICAL, IRRIMODEL y Sensores portátiles de humedad TDR, así como la interacción con la operación tradicional del módulo (Figura 1).

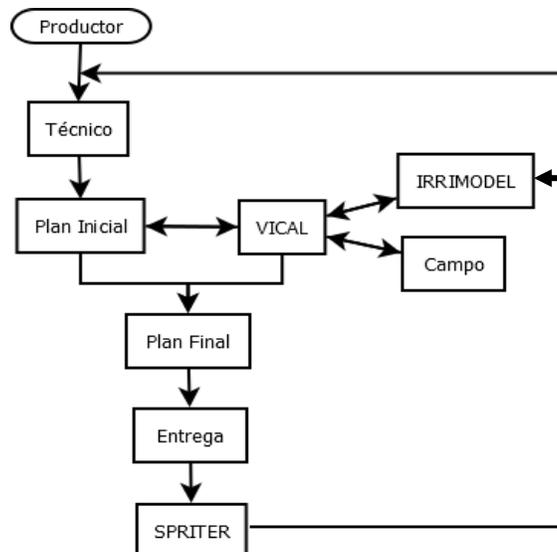


Figura 1. Sistema diseñado para la transferencia de la tecnología “Monitoreo fenológico del maíz con imágenes satelitales en módulos de riego”: 1) el productor solicita el riego al técnico responsable de la sección, 2) el técnico a su vez crea un plan semanal inicial con los productores que solicitaron el riego; 3) el plan inicial se verifica en la plataforma VICAL, 4) se ajusta el plan inicial monitoreando las fases fenológicas de los cultivos con VICAL, 5) verificar con la plataforma IRRIMODEL y en campo con TDR si se requiere, 6) los riegos entregados y finalizados se registran en el programa SPRITER, donde se encuentra la base de datos del módulo de riego, 7) actualizar el programa IRRIMODEL y 8) repetir el proceso.

El proceso de transferencia se llevó a cabo en 37 parcelas de maíz, 17 pertenecientes a la sección 30 y 20 a la sección 26, estas parcelas suman 333.6 ha (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parcelas piloto de maíz para transferencia de la tecnología en el módulo de riego Batequis II-3, DR075.

Ubicación	Parcelas	Superficie		Periodo de siembra		Genotipos
		ha	% (sección)	inicio	fin	
Sección 26	20	182.5	9.5	18/10	13/12	Asgrow, Monsanto, Syngenta, Pioneer
Sección 30	17	151.1	6.0	27/10	7/12	
Total	37	333.6	7.8	---	---	---

Las variables medidas en las dos secciones piloto fueron fenología y riegos aplicados, la primera usando la plataforma VICAL y la segunda usando las bases de datos del MR. En el Cuadro 3 se muestran las fases fenológicas y los GDDA recomendados para cada riego de auxilio, bajo los escenarios de disponibilidad hídrica normal y escasez (Sifuentes et al., 2021), en el primero el distrito de riego autoriza aplicar cuatro riegos de auxilio y un riego de germinación (asiento), mientras que en el segundo, se elimina un riego de auxilio por déficit de volumen en el sistema de presas, derivado de escurrimientos insuficientes. En el ciclo estudiado el escenario fue normal.

Además, se realizó un análisis de rendimiento y un análisis comparativo en término de riegos aplicados y volumen ahorrado.

Cuadro 3. Etapa fenológica y grados día-desarrollo acumulados (GDDA) en la que se debe aplicar cada riego de auxilio en dos escenarios de disponibilidad hídrica (normal y escasez), en el DR075 (Sifuentes et al., 2021),

Normal			Escasez		
Auxilio	Fase	GDDA	Auxilio	Fase	GDDA
1A	4-6 hojas verdaderas (V4-V6)	400-500	1A	8-10 hojas verdaderas (V8-V10)	600
2A	8-11 hojas verdaderas (V8-V11)	600-700	2A	Jilote (R1)	850
3A	Hoja bandera-jilote (VT-R1)	800-900	3A	Grano lechoso-masoso (R3-R4)	1150
4A	Grano lechoso-masoso (R3-R4)	1100-1200			

Los GDD representan el calor que la planta utiliza en un día (°C) entre dos temperaturas umbrales de desarrollo, que para el caso de maíz fueron 10 y 30 °C. Por ejemplo, si la temperatura media del aire (Ta) en un día fue de 30 °C, $GDD = 30 - 10 = 20$. El calor por abajo del umbral mínimo y por encima del máximo, no se considera para el desarrollo del cultivo. Los requerimientos de GDDA para las diferentes fases fenológicas para un híbrido en específico no cambian, lo cual permite pronosticar su aparición bajo cualquier condición climática.

Resultados y Discusión

La Figura 2 muestra un reporte gráfico de fenología generado el 13/04/2023 a nivel MR (izquierda) y a nivel de parcela (11/04/2023), donde las etapas estimadas para estas fechas se presentan con un color específico.

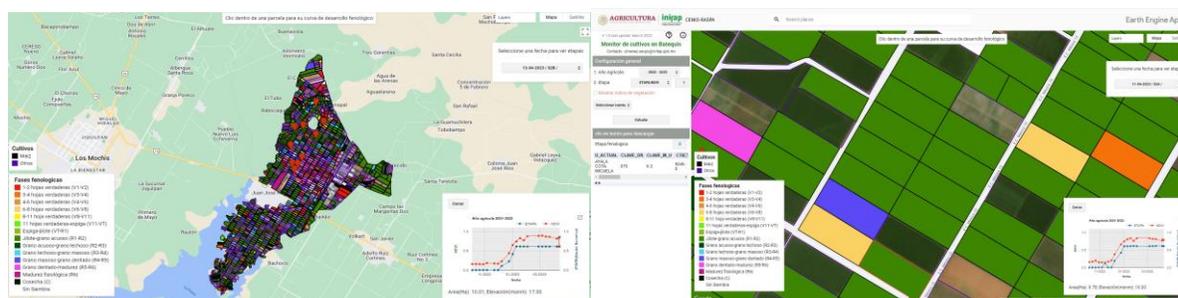


Figura 2. Plataforma VICAL para monitoreo de la fenología de maíz en el módulo Batequis II-3, DR075, para la mejora del servicio de riego.

Grado de uso de la tecnología

El grado de uso de la tecnología se refiere al porcentaje de parcelas que recibieron los riegos de auxilio de acuerdo a lo recomendado por el monitoreo fenológico con imágenes satelitales en las secciones piloto 26 (a) y 30 (b) del módulo de riego Batequis II-3, DR075, durante el primer año de transferencia, ciclo OI 2022-2023 (Figura 3). La sección 26 tuvo el mayor grado de coincidencia respecto a lo recomendado, especialmente en el 1A y 3A con 85 y 75% respectivamente, mientras que la sección 30 su grado de coincidencia fue menor en todos los casos, respecto a la 26, llegando solo a 58% en 1A y 2A. Cabe mencionar que en las dos secciones no se aplicaron riegos innecesarios (quinto auxilio) de acuerdo a lo recomendado por *Sifuentes et al. (2021)* y que este análisis proporciona una idea del uso de la tecnología a nivel MR.

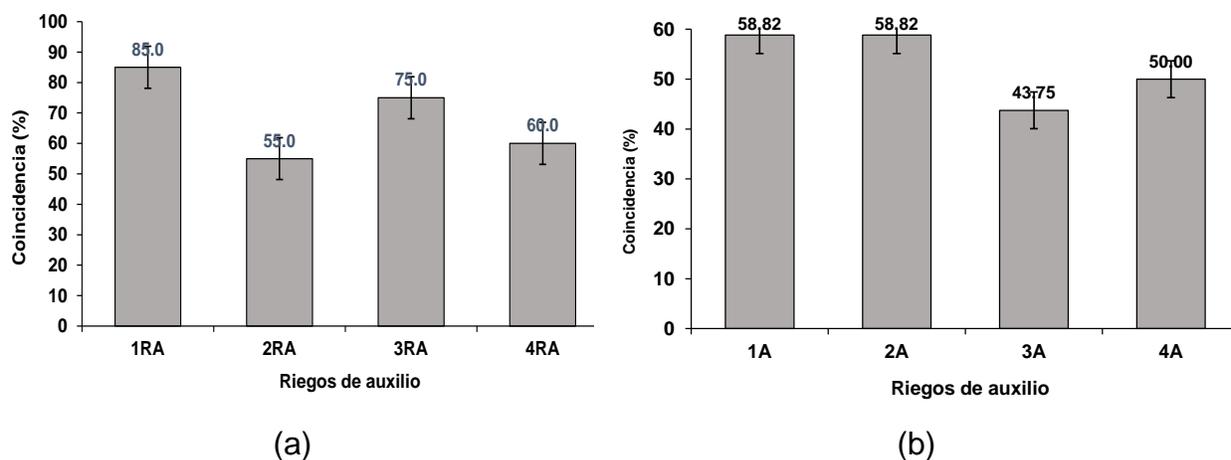


Figura 3. Grado de uso de la tecnología de monitoreo fenológico del maíz con imágenes satelitales en secciones piloto, 26 (a) y 30 (b) del módulo de riego Batequis II-3, DR075, durante el primer año de transferencia, ciclo OI 2022-2023.

Uso del agua

En la Figura 4 se muestran las láminas totales aplicadas (Lb) y Lb en 4A, en las secciones piloto 26 (a) y 30 (b) del módulo Batequis II-3, DR075, donde la primera reportó en promedio 2 cm menos de Lb total y valores similares de Lb del 4A (18 cm), lo anterior representa un ahorro de 200 m³ ha⁻¹

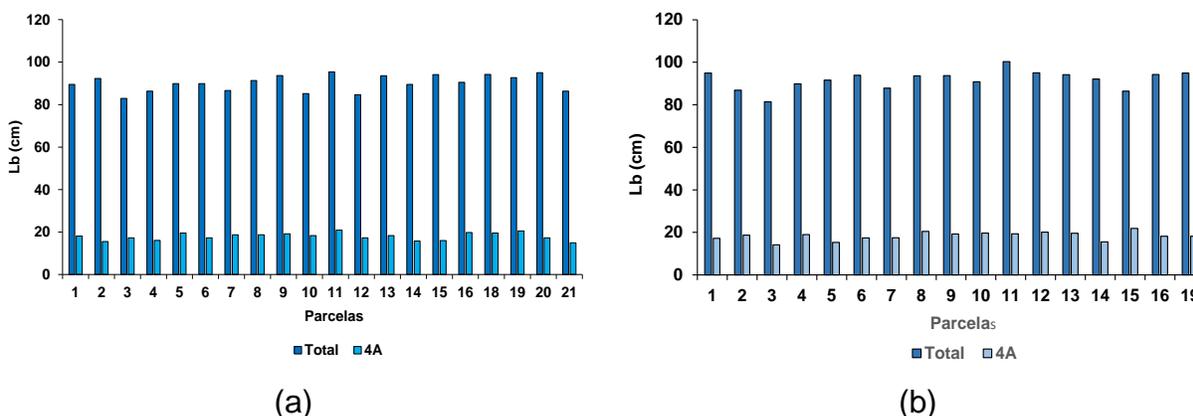


Figura 4. Lámina total aplicada y lámina aplicada en el cuarto riego de auxilio en parcelas de maíz de las secciones piloto 26 (a) y 30 (b), durante el primer año de transferencia de la tecnología de monitoreo fenológico del maíz con imágenes satelitales en el módulo de riego Batequis II-3, DR075, ciclo OI 2022-2023.

Evitar aplicar un riego innecesario (quinto auxilio), representa un ahorro de $1800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ con los cuales es posible establecer 0.2 ha adicionales por cada hectárea donde se aplicaron solo 4A, esto en escenarios normales de disponibilidad de agua. En escenarios de sequía donde se aplica esta tecnología para 3A, se podrían establecer hasta 0.45 ha adicionales. Lo anterior ha permitido a este MR establecer segundos cultivos y ciclos de verano, lo cual no sucede en MR que no aplican este tipo de herramientas.

Conclusiones

Se definió un sistema a la medida para el proceso de transferencia de la tecnología “Monitoreo fenológico del maíz con imágenes satelitales en módulos de riego”, utilizando herramientas tecnológicas de última generación. El grado de uso de la tecnología en el primer año de transferencia en el MR Batequis II-3, DR075, fue satisfactorio evitando riegos innecesarios, sin embargo, se espera que a medida que se incrementa su uso, los beneficios serán mayores. El ahorro de agua que se puede tener con la aplicación de esta tecnología permite establecer segundos cultivos y ciclos de verano, en beneficio del productor, módulo de riego y sociedad en general.

Referencias Bibliográficas

- Jiménez-Jiménez, S.I.; Marcial-Pablo, M.J.; Ojeda-Bustamante, W.; Sifuentes-Ibarra, E.; Inzunza-Ibarra, M.A.; y Sánchez-Cohen, I. (2022). VICAL: Global Calculator to Estimate Vegetation Indices for Agricultural Areas with Landsat and Sentinel-2 Data. *Agronomy* 2022, 12, 1518.
- Ojeda, B. W.; González, C.J.M.; Sifuentes, I.E., Isidro, E. y Rendón, P.L. (2007). Using spatial information systems to improve water management in México. *Agricultural Water Management*. 89. pp 81-88.
- Olmedo, V.V.M. (2017). Determinación de indicadores de gestión en los módulos del distrito de riego No.41, Río Yaqui (Sonora, México). Universidad de Córdoba. Tesis Doctoral. Córdoba, España. 222pp.

- Sifuentes-Ibarra, E.; Ojeda-Bustamante, W.; Ontiveros-Capurata, R.E.; Sánchez-Cohen, I. (2020). Improving the monitoring of corn phenology in large agricultural areas using remote sensing data series. Spanish Journal of Agricultural Research, Volume 18, Issue 3, e1204. <https://doi.org/10.5424/sjar/2020183-16269>.
- Sifuentes-Ibarra, E.; Ojeda-Bustamante, Macías-Cervantes, J.; Mendoza-Pérez, C. y, Preciado-Rangel, P. (2021). Déficit hídrico en maíz al considerar fenología, efecto en rendimiento y eficiencia en el uso del agua. Agrociencia 55: 209-226. 2021. DOI: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i3.2414>. Texcoco, Edo. Méx.