



Artículo: COMEII-16040

II CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016

Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

METODOLOGÍA SISTEMATIZADA CON TDR PORTÁTILES, PARA EL MANEJO EFICIENTE DEL AGUA EN MAÍZ EN SINALOA

**Ernesto Sifuentes-Ibarra^{1*}; Jaime Macías-Cervantes¹; Fredy González-Hernández¹;
Hilario Flores-Gallardo²; Alberto Borbón-Gracia¹; Pablo Preciado-Rangel³**

¹INIFAP-CIRNO-Campo Experimental Valle del Fuerte. Carretera Internacional México-Nogales km 1609, Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa, México, C.P. 81110. sifuentes.ernesto@inifap.gob.mx.
(*Autor para correspondencia)

²INIFAP-CIRNOC-Campo Experimental Valle de Guadiana. Carretera Durango-El Mezquital km 5 S/N, Durango, Durango, México, C.P. 34000

³Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, Ejido Ana, Torreón, Coahuila, México. C.P. 27170

Resumen

En Sinaloa anualmente se establecen alrededor de 500 mil hectáreas de maíz, sin embargo, su rentabilidad ha ido a la baja como se observó en el ciclo OI 2014/2015. Las alternativas viables para mejorar es encontrar la combinación de prácticas que permitan mejorar la eficiencia de producción (producir el máximo rendimiento al menor costo posible) sin dañar la calidad ambiental. Aunque se han desarrollado tecnologías de riego en esta zona, los agricultores prefieren usar dispositivos para el monitoreo de la humedad del suelo. Aunque existen en el mercado gran variedad de estos, no cuentan con la calibración adecuada ni están ligados al manejo agronómico del cultivo. Se desarrolló una metodología con TDR portátiles que integra: 1) constantes hídricas del suelo, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), 2) fenología del cultivo, 3) profundidad de raíz y coeficiente de cultivo (Kc) para cada fase fenológica, 4) valores promedio diarios, decenales y mensuales de evapotranspiración de referencia (ET_o) de estaciones climáticas automatizadas y 5) contenido volumétrico de la humedad del suelo (H_v), medida con sensores de humedad portátiles TDR calibrados para suelos predominantes. La tecnología permitió lograr mayor eficiencia en la planeación, predicción, supervisión (aplicación) y evaluación del riego. Es una excelente herramienta para el aprovechamiento de la humedad residual de lluvias en siembras tempranas. En ciclos con baja disponibilidad hídrica ayuda a priorizar la asignación de riegos a nivel de predio y a nivel módulo de riego para evitar conflictos por la competencia por el agua.

Palabras clave: Humedad del suelo, escenarios hídricos, eficiencia, rendimiento.



Introducción

La producción de los cultivos es afectada por una gran diversidad de factores de manejo, suelo y clima dando lugar al uso de diferentes prácticas agronómicas y utilización de insumos diversos en dosis y épocas variables, conformando con ello la tecnología utilizada en cada condición o parcela. En los últimos años el precio del maíz ha mantenido una tendencia a la baja, siendo esta más crítica para el ciclo otoño-invierno (OI) 2014/2015, no así los costos de producción, los cuales se han incrementado, disminuyendo la rentabilidad del cultivo y con ello el margen de utilidad que el productor percibe. Ante lo anterior, una de las alternativas es encontrar la combinación ideal de prácticas que permitan mejorar la eficiencia de producción, es decir, producir el máximo rendimiento al menor costo posible por unidad de superficie, sin menoscabo de la calidad ambiental.

El contenido de humedad del suelo es muy variable espacial y temporalmente, medir el contenido de humedad del suelo en forma precisa y oportuna es fundamental para el cálculo de láminas de riego. La oportunidad y programación del riego permite valorar y aprovechar la humedad residual por lluvias de verano para siembras tempranas en otoño-invierno, así como priorizar solicitudes de riego por los productores en base a necesidad real, para lo anterior, el primer paso es conocer las constantes hídricas del suelo para los grupos texturales de una zona de riego: capacidad de campo (CC), punto de marchitamiento permanente (PMP) y humedad aprovechable (HA).

Aunque cada vez se incrementa el número de productores y organismos agrícolas que intentan usar dispositivos para medir la humedad del suelo en Sinaloa, no han logrado un manejo eficiente de sus riegos debido a que no cuentan con la calibración adecuada ni están ligados al manejo agronómico de los cultivos. La tecnología TDR portátil adaptada a las condiciones de manejo de los cultivos de las zonas de riego, representa un método rápido y preciso para el monitoreo de la humedad del suelo a diferentes profundidades, para la prevención y corrección de deficiencias y excesos de humedad.

Los sensores de humedad del suelo TDR (Time Domain Reflectometry), determinan la variación de las propiedades dieléctricas relacionadas con las variaciones en el contenido de agua. El Contenido Volumétrico de Agua (H_v) es la relación del volumen de agua en un cierto volumen de suelo contra el volumen total de suelo. Bajo saturación, el contenido volumétrico de agua (expresado en porcentaje) sería igual al porcentaje de espacio poroso en el suelo. El principio bajo el cual trabaja el TDR involucra la medición del tiempo en que una onda electromagnética se desplaza a lo largo de una guía. La velocidad de la onda en los suelos depende de la permisibilidad dieléctrica en bruto (ϵ) para el suelo. El hecho de que el agua ($\epsilon = 80$) tiene una constante dieléctrica mayor que la del aire ($\epsilon = 1$) o los sólidos del suelo ($\epsilon = 3-7$) se explota para determinar el contenido volumétrico de agua. El contenido volumétrico de agua medido por el TDR es un promedio a lo largo de la guía.



La electrónica en el TDR genera y mide el regreso de una señal de alta energía que viaja hacia abajo y de regreso, por el suelo, a lo largo de una guía compuesta por las dos barras intercambiables de acero inoxidable.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar una metodología que integre estos dos elementos, la cual se le nombró: *“Metodología sistematizada con TDR portátiles para el manejo del riego”* y estuvo compuesta de los siguientes elementos: 1) constantes hídricas del suelo, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) predeterminadas para cada textura, 2) fenología del cultivo, 3) profundidad de raíz y coeficiente de cultivo (Kc) para cada fase fenológica, 4) valores promedio diarios, decenales y mensuales de evapotranspiración de referencia (ET_o) de estaciones climáticas automatizadas de la zona y 5) contenido volumétrico de la humedad del suelo (H_v), medida con sensores de humedad portátiles TDR (Time Domain Reflectometry) calibrados para suelos predominantes.

La metodología se ha utilizado en los últimos dos ciclos agrícolas OI (2014/2015 y 2015/2016) en el norte de Sinaloa, principalmente en empresas dedicadas a la producción de papa y maíz, empresas proveedoras de insumos y módulos de riego a través del programa RIGRAT.

Materiales y métodos

Cada componente de la metodología propuesta se generó como se describe a continuación:

1) Constantes hídricas del suelo

Las constantes hídricas capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y humedad aprovechable (HA), se estimaron para las doce clases texturales del suelo usando los modelos de Rawls y Brakensiek (1983) y los valores promedio de materia orgánica (MO) y densidad aparente de la región (Da), los cuales fluctuaron en 1% y 1.15 g cm⁻³ respectivamente.

$$CC = 0.3486 - 0.0018(Arena) + 0.0039(Arcilla) + 0.0228(MO) - 0.0738(Da) \quad (1)$$

$$CC = 0.3486 - 0.0018(Arena) + 0.0039(Arcilla) + 0.0228(MO) - 0.0738(Da) \quad (2)$$

$$HA = CC - PMP \quad (3)$$

En la Figura 1 se pueden observar los valores de las constantes hídricas para las doce clases texturales (límite de cada color), la diferencia entre estos representa HA

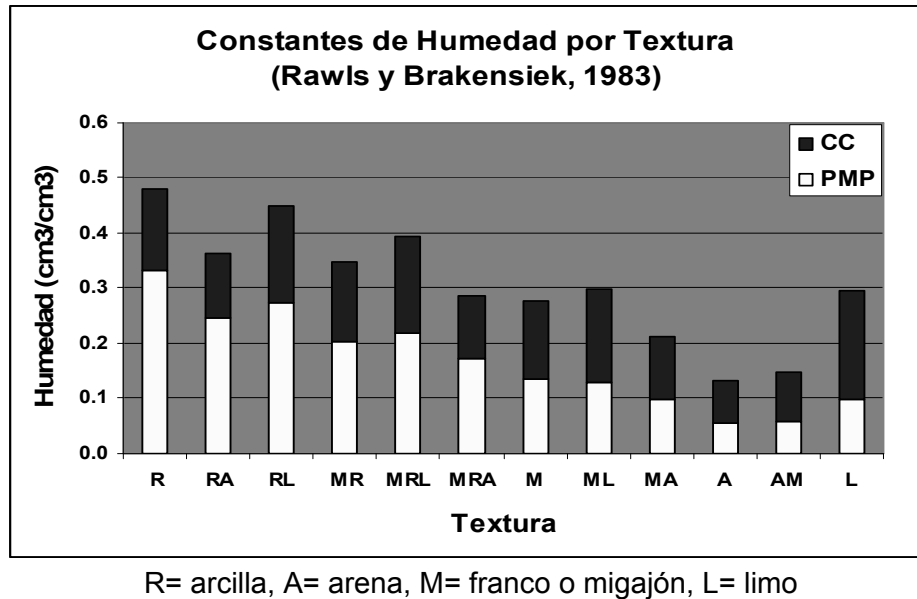


Figura 1. Constantes hídricas (CC y PMP) para las doce clases texturales del suelo en Sinaloa. Adaptadas de Rawls y Brakensiek (1983).

2) Fenología del cultivo

Se utilizaron las guías propuestas por Ritchie *et al.* (1992), para la caracterización fenológica de los principales híbridos de maíz: CARIBÚ, DK-4050, CERES XR-47, P3058. Estos autores dividieron el desarrollo del cultivo en etapas vegetativa (V) y reproductiva (R), las cuales a su vez las subdividieron en diferentes fases, como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Caracterización fenológica del cultivo de maíz de acuerdo a Ritchie *et al.* (1992).

| Etapa | Fase | Clave |
|--------------|-------------------------------|---------|
| Vegetativa | Emergencia | VE |
| | Aparición de hojas verdaderas | V1...Vn |
| | Flor masculina o espiga | VT |
| Reproductiva | Flor femenina o Jilote | R1 |
| | Grano acuoso | R2 |
| | Grano lechoso | R3 |
| | Grano masoso | R4 |
| | Grano dentado | R5 |
| | Madurez fisiológica | R6 |



3) Profundidad de raíz (Pr) y coeficiente de cultivo (Kc)

Para estas variables se utilizaron los valores por etapa fenológica determinados por Ojeda *et al.*, (2006) en un estudio desarrollado en esta misma región, donde Pr la determinaron mediante observaciones directas del perfil de suelo y Kc utilizando la relación de Bowen-balance de energía (Cuadro 2).

Cuadro 2. Fenología promedio de híbridos comerciales de ciclo intermedio y su relación con su desarrollo radicular, Kc y consumo de agua (Ojeda *et al.*, 2006)

| Etapa | Clave | Prof. Radicular (cm) | Kc | CONSUMO DE AGUA PROMEDIO | | | DURACIÓN ETAPA | |
|----------------|-------|----------------------|-------------|--------------------------|------------|-----------|----------------|--------|
| | | | | Diario (mm) | Etapa (mm) | Acum (mm) | GD | GDA |
| Emergencia | Ve | 7 | 0.05 - 0.3 | 0.59 | 7.10 | 7.10 | 109.4 | 109.4 |
| 4 Hojas | V4 | 30 | 0.4 - 0.45 | 0.63 | 21.60 | 28.70 | 207.0 | 316.4 |
| 8 Hojas | V8 | 70 | 0.8 - 0.85 | 1.41 | 52.20 | 80.90 | 185.5 | 501.9 |
| 12 Hojas | V12 | 80 | 0.9 - 0.98 | 2.50 | 35.00 | 115.90 | 74.1 | 576.0 |
| Flor masculina | VT | 90 | 1 - 1.12 | 3.03 | 39.30 | 155.20 | 89.1 | 665.1 |
| Jiloteo | R1 | 100 | 1.15 - 1.25 | 4.47 | 67.00 | 222.20 | 158.3 | 823.4 |
| Grano acuoso | R2 | 100 | 1.1 - 1.2 | 4.87 | 82.90 | 305.10 | 155.1 | 978.5 |
| Grano lechoso | R3 | 100 | 1 - 1.1 | 4.32 | 47.50 | 352.60 | 123.7 | 1102.2 |
| Grano masoso | R4 | 100 | 0.8 - 1 | 4.34 | 47.80 | 400.40 | 137.5 | 1239.7 |
| Grano abollado | R5 | 100 | 0.6 - 0.85 | 2.97 | 20.80 | 421.20 | 95.8 | 1335.5 |
| Madurez | R6 | 100 | 0.3 - 0.4 | 1.85 | 14.80 | 436.00 | 115.6 | 1451.1 |
| Cosecha | - | 100 | 0.05 - 0.2 | 0.81 | 8.90 | 444.90 | 189.6 | 1640.7 |

4) Evapotranspiración de referencia (ET_o) promedio

Se utilizaron las bases de datos climáticas de los últimos cinco años, generadas con la red nacional de estaciones climáticas automatizadas administradas por INIFAP (<http://clima.inifap.gob.mx/>), para la generación de cuadros con valores diarios, decenales y mensuales de ET_o para las diferentes estaciones climáticas del norte de Sinaloa. La ET_o es estimada en forma automática con el método de Penman-Monteith.

5) Contenido volumétrico de humedad del suelo (H_v)

Para el monitoreo de esta variable se utilizó el TDR-300 Spectrum por su portabilidad y extensión de 100 cm integrada, lo cual permite el monitoreo de la humedad en todo el perfil de la zona de raíces. Aunque este dispositivo al igual que otros de su tipo cuentan con curvas de calibración predeterminadas de fábrica o métodos de calibración rápida, sin embargo, los valores de H_v varían significativamente con respecto al método gravimétrico, por lo que se generaron las curvas de calibración específicas para los suelos predominantes. En la Figura 2 se aprecian las curvas utilizadas para las dos texturas predominantes en el norte de Sinaloa.

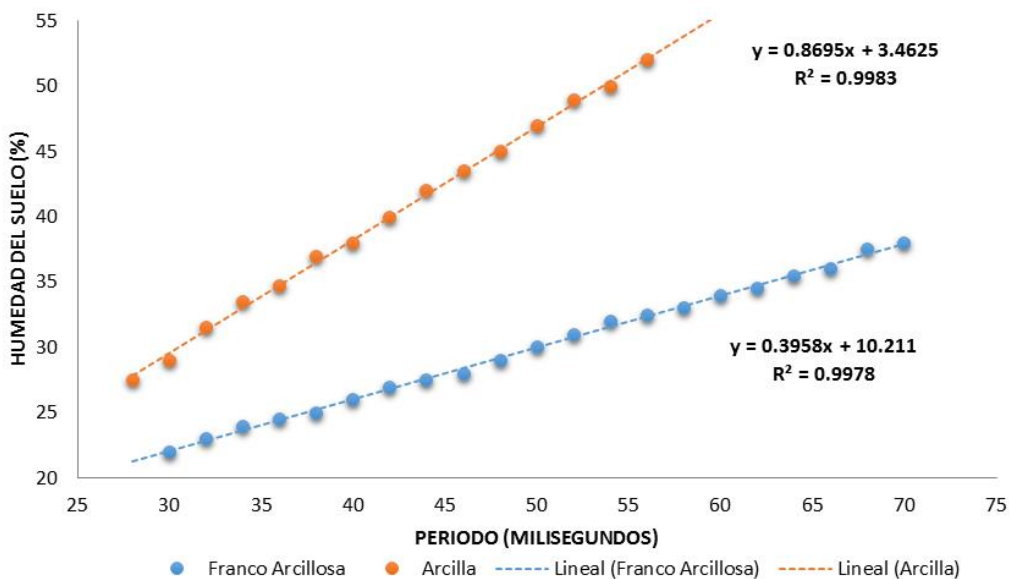


Figura 2. Curvas de calibración TDR-300 para dos texturas en el norte de Sinaloa.

Análisis y discusión de resultados

En la Figura 3 se describe la metodología propuesta y la interacción de cada componente a nivel de predio.

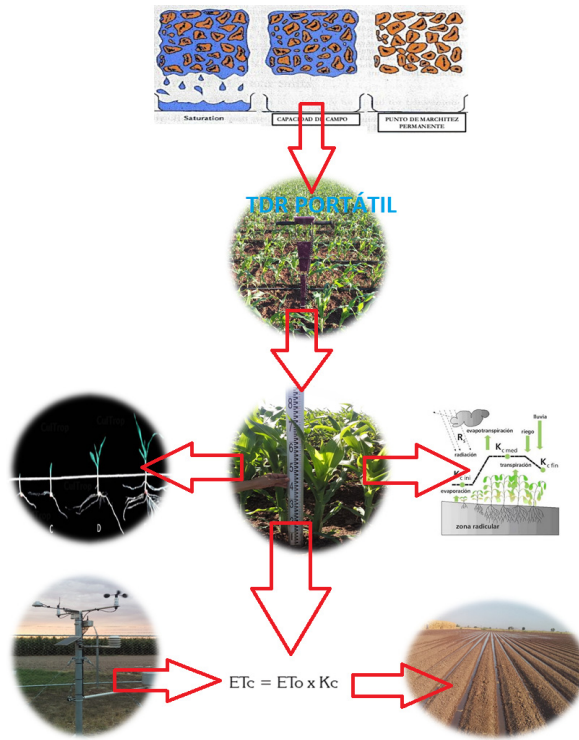


Figura 3. Componentes de la tecnología TDR-portátil para manejo integral de riego en maíz en Sinaloa

La aplicación de la metodología se resume en los seis pasos siguientes:

1. **Humedad actual (TDR):** Se determina la humedad actual (humedad volumétrica) de la parcela con la ayuda de un dispositivo TDR.
2. **Etapa actual de cultivo:** Se identifica la etapa fenológica del cultivo al momento de tomar lecturas de humedad con el TDR.
3. **Momento de riego (MR):** Se determina el criterio de riego adecuado y se usa la siguiente fórmula: $MR = CC - HFA = CC - ((CC - PMP) \times CR)$, donde CR es el criterio de riego, CC es la capacidad de campo y HFA es la humedad fácilmente aprovechable.
4. **Humedad residual:** Se realiza el cálculo de la humedad residual actual en la parcela con la siguiente fórmula: $Hres = (Hact - MR) \times Pr$; donde Hres es la humedad residual, Hact es la humedad actual y Pr la profundidad radicular.
5. **Días al riego:** Para calcular los días al próximo riego se debe conocer la ETr actual (mm/día), la cual se obtiene de multiplicar la evapotranspiración de referencia ($ET0$) actual por el Kc que está definido por la etapa fenológica, **ETr actual** = $ET0$ actual $\times Kc$.



6. Una vez que se obtenga la ETr se calculan los días al próximo riego como sigue: **Días al riego**= Hres/ETr actual

En los últimos dos ciclos agrícolas OI, en el norte de Sinaloa se ha utilizado principalmente por empresas productoras agrícolas, empresas proveedoras de insumos y módulos de riego a través del programa RIGRAT.

Las ventajas e impactos potenciales que tiene son las siguientes:

1. Uso eficiente del agua: en fechas de siembra tempranas (20 octubre al 10 de noviembre) con disponibilidad normal de agua, es posible ahorrar por aprovechamiento de agua de lluvia y manejo eficiente de riegos de auxilio, hasta 40 cm de agua ($4,000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$); en siembras del normales (20 octubre al 30 de noviembre) bajo el mismo escenario de disponibilidad el ahorro es de $1,200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Bajo un escenario de escasez con pocas lluvias de verano, el ahorro es de $2,600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, con los cual se podrían regar 0.37 ha adicionales.
2. Rendimiento: es posible incrementar el rendimiento de 10 a 15% ($1,060$ a $1,600 \text{ kg ha}^{-1}$) en riego por gravedad (rodado) con respecto al sistema tradicional.
3. Operación de sistemas de riego: en sistemas de producción de semilla ayuda a manejar la humedad del suelo para llevar a cabo algunas labores mecanizadas (ahorro de tiempo, recursos y mejor producción), en módulos de riego mejora la planeación y supervisión, reduciendo gastos de traslado (10%) y presión social por el recurso; potencia además los sistemas de riego presurizados al incrementar el rendimiento hasta en 30%, evitando el abandono de los mismos.
4. Puede enlazarse a la plataforma IRRIMODEL (Sifuentes *et al.*, 2015) (www.cevaf.redirectme.net) a través de una aplicación móvil para su automatización.

El Cuadro 3 resume las ventajas comparativas entre el manejo tradicional y el manejo del riego con la metodología propuesta.

Cuadro 3. Ventajas comparativas entre el manejo tradicional del riego y el manejo apoyado con sensores TDR en el norte de Sinaloa.

| Variable | Manejo tradicional | Manejo integral-TDR |
|--|---|--|
| Uso del agua ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$): | 8,700 | --- |
| Uso de agua en siembras tempranas con lluvias de verano ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) | --- | 4,700 |
| Uso de agua en siembras normales ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) | --- | 7,500 |
| Uso de agua en escenario de escasez ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) | --- | 6,100 |
| Rendimiento (t ha^{-1}) | 10.7 | 12.3 |
| Operación de sistemas de riego | ineficiente, gastos innecesarios (traslados, sub-utilización de maquinaria) | eficiente, ahorro de 10% en traslados, aprovechamiento |



| | | |
|--|--------|---------------|
| | | de maquinaria |
| Costo de producción (\$ ha ⁻¹) | 26,838 | 27,038 |

Conclusiones

Se cuenta con la metodología probada para las condiciones de Sinaloa y puede aplicarse en todas las zonas agrícolas de México, incluso las de temporal con riego complementario. Los principales usuarios de la tecnología son Módulos de riego, asociaciones de usuarios, comités campesinos, empresas agrícolas, compañías distribuidoras de insumos, técnicos y productores agrícolas independientes. Considerando las ventajas cualitativas el costo para este tipo de usuarios no representa una limitante.

Referencias bibliográficas

- CIRNO (INIFAP) 2016. Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos. México. <http://clima.inifap.gob.mx/Inmysr>.
- Ojeda, B.W., Sifuentes, E.I. y Unland, W.H. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. *Agrociencia*, 40: 13-25. Montecillos, Edo. México.
- Rawls, W.J. and Brakensiek, D. L. 1983. A procedure of predict Green and ampt infiltration parameters. In proceedings of the national conference on advances in infiltration, American Society of Agricultural and Engineers. Pp. 102-112.
- Ritchie, S.W., Hanway, J.J., Benson, G.O., 1992. How a corn plant develops. Special Report No. 48. Iowa State University, Cooperative Extension Service, Ames, IA, <http://maize.agron.iastate.edu/corngrows.html>.
- Sifuentes I, E., Macías C, J. 2015. Programación Integral y Gestión del Riego a Través de Internet. INIFAP-CIRNO. Campo Experimental Valle del Fuerte. Manual de Usuario. ISBN: 978-607-0547-9.1-39p. Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa.