

PROGRAMACIÓN INTEGRAL DEL RIEGO EN TRIGO CON TDR PORTÁTIL EN EL SUR DE SONORA

Jaime Macías Cervantes¹; Fernando Cabrera Carbajal²; Vladimir Ruiz Perez^{3*}; Ernesto Sifuentes Ibarra¹; Sergio Iván Jiménez Jiménez⁴; Mariana de Jesús Marcial Pablo⁴

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle del Fuerte. Carretera Internacional México 15 Km 1609, C.P.81110, Juan José Ríos, Sinaloa.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Norman E. Borlaug. Calle Norman E. Borlaug S/N Km. 12, C.P. 85000, Cd Obregón, Sonora.

^{3*}Universidad Autónoma de Sinaloa. Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte. Calle 16 S/N esq. Japaraqui, Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa.

vdyx@hotmail.com – 6681623643 (*Autor de correspondencia)

⁴Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Km. 6.5 margen derecha Canal de Sacramento, C.P. 35079, Gómez Palacio, Durango

Resumen

En el sur de Sonora, el trigo consume el mayor volumen de agua del resto del padrón de cultivos debido a la mayor superficie que ocupa. Lograr un uso eficiente de este recurso puede asegurar enfrentar escenarios de escasez que pudieran reducir aún más la dotación volumétrica impidiendo ejercer programas normales de siembra o condicionar a una determinada superficie. Para lograrlo es imprescindible aplicar el riego con precisión, esto se logra mediante la determinación eficiente del contenido de humedad en el suelo ya que, al ser altamente variable espacial y temporalmente hace necesario el uso de herramientas que permitan una determinación rápida y precisa con la finalidad de elaborar planes de riego en base en las necesidades hídricas de los cultivos. El objetivo del presente trabajo fue la parametrización de componentes para la programación integral del riego en el cultivo de trigo utilizando TDR portátil, el trabajo se realizó en el sitio experimental valle del mayo perteneciente al Campo Experimental Norman E. Borlaug ubicado en el sur de Sonora. Se obtuvieron los parámetros para los componentes suelo, cultivo y clima adaptando la metodología implementada en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle del Fuerte para el cultivo de maíz. Se generó una curva de calibración específica para el sensor de humedad Scout TDR 350 para la determinación de humedad volumétrica actual y se desarrolló una metodología práctica para la gestión y programación integral del riego en el cultivo de trigo establecido en suelos de textura arcillosa.

Palabras claves: Parametrización, Fenología, Gestión de riego.

Introducción

En el sur de Sonora, el cultivo de trigo consume el mayor volumen de agua del resto del padrón de cultivos debido a la mayor superficie que ocupa, según datos estadísticos del SIAP (2022) la superficie cosechada para ese año agrícola fue de 284,587 ha. El hacer un uso más eficiente de este recurso puede asegurar enfrentar escenarios de escasez que reduzcan aún más la dotación volumétrica que impidan ejercer programas normales de siembra o condicionar a una determinada superficie.

Para lograr esto, es imprescindible aplicar el riego con precisión acorde con las características hidrofísicas del suelo y los requerimientos hídricos de los cultivos en función de la fenología y el clima (Flores-Medina et al., 2015). Una determinación eficiente del contenido de agua en el suelo es fundamental para mantener los niveles de humedad óptimos requeridos por los cultivos, según Sánchez (2011) un suelo saturado puede tener impactos negativos en las propiedades físicas y químicas del suelo, como la falta de oxígeno que impida el crecimiento de las raíces, presencia de enfermedades y pérdida de fertilizantes.

El contenido de humedad en el suelo es altamente variables espacial y temporalmente (Gavande, 1982), siendo necesario el uso de técnicas precisas, rápidas y eficientes para el monitoreo de la humedad que permita entre otras cosas, calcular láminas de riego, programar riegos, aprovechar humedad residual de lluvia, controlar el estrés hídrico y elaborar planes de riego con base en las necesidades hídricas de los cultivos (Sifuentes y Macías, 2015).

En la actualidad existen en el mercado diversos dispositivos capaces de estimar el contenido de humedad del suelo siendo de utilidad para la investigación como para el manejo adecuado del riego (Segovia-Cardozo, 2022). De igual forma permite decidir la oportunidad y láminas de riego buscando un uso más eficiente del agua en cualquier escenario de disponibilidad. Entre los métodos indirectos más actuales están los que utilizan el método de Reflectometría de Dominio Temporal (TDR, por sus siglas en inglés), este dispositivo mide en tiempo real el tiempo en que una onda electromagnética se desplaza a lo largo de una guía (permisibilidad dieléctrica) y se transforma a Humedad volumétrica, lámina y volumen de agua, que no es posible con otros dispositivos como tensiómetros y bloques de yeso; es además un método confiable, rápido y preciso para el monitoreo de la humedad del suelo a diferentes profundidades facilitándose el monitorear extensiones grandes de cultivos y cualquier sistema de riego.

En el año 2021 el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) diseñó una metodología para el monitoreo de humedad del suelo con sensores de alta precisión (TDR) en la cual se detalla de manera clara y sencilla los métodos más comunes. También se describe la metodología para el manejo integral del riego generada por INIFAP (Sifuentes y Macías, 2015) que utiliza los componentes suelo, cultivo y clima mejorando la eficiencia en la planeación, predicción, entrega y evaluación del riego en el cultivo de maíz.

Sin embargo, estas metodologías no pueden ser extrapoladas a otros cultivos ni sitios experimentales debido a que la obtención de parámetros debe realizarse de manera local considerando las características específicas de la zona de acuerdo a las propiedades físicas del suelos, clima y fenología del cultivo. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue la parametrización de los componentes para la programación integral del riego en el cultivo de trigo utilizando TDR portátil para la zona sur del estado de Sonora.

Materiales y Métodos

Los trabajos se realizaron en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias en la zona de influencia del Sitio Experimental Valle del Mayo en la zona sur del Estado de Sonora. Los suelos predominantes son de textura arcillosa con una humedad aprovechable (HA) de 0.15 – 0.17 cm³/cm³, pobre en materia orgánica y sin problemas de sales.

Descripción de componentes

A continuación, se describen los componentes requeridos para la programación integral del riego utilizando TDR portátil, los parámetros del componente suelo considera las propiedades físicas (textura, densidad aparente (Da) y constantes hídricas (CC y PMP) de la zona de estudio, el componente clima (Eto) considera los parámetros para las condiciones características y utiliza las estaciones climáticas cercanas a la zona de estudio, el componente cultivo se parametrizo específicamente para el trigo mediante un seguimiento fenológico basado en grados día acumulados (GDA).

Suelo

Contenido de humedad en el suelo Hv (TDR portátil). Los Reflectómetro son instrumentos de medición electrónicos muy precisos que utilizan las señales eléctricas para medir la humedad del suelo. Se les llama Reflectómetro por que estos sensores envían una señal eléctrica que se propaga por la tierra y dicha señal es reflejada en el sensor y comparada con la señal original para inferir la información sobre el medio analizado.

El sensor de humedad calibrado fue el Scout TDR 350 siguiendo las recomendaciones del manual de usuarios (Spectrum Technologies, 2018) que establece una calibración en aire y agua destilada si se cambian las varillas de medición debido a que puede verse afectada la precisión según las características del material de las mismas. El sensor ofrece una precisión de $\pm 3\%$ en valores de humedad volumétrica pudiendo mejorarse si se realiza su calibración para cada sitio en particular ya que las propiedades físicas de los suelos varían de un lugar a otro.

Se realizó una calibración específica para las condiciones de suelo de la zona de estudio siguiendo las recomendaciones del manual de usuario haciendo modificaciones en el proceso por el autor. El procedimiento consta de los siguientes pasos;

- Se toma lectura con el sensor en puntos específicos a diferentes profundidades expresando el resultado en periodo (mS), para este caso la profundidad de muestreo fue de 0-20 cm.
- Simultáneamente se toma muestra de suelo en el mismo punto para la determinación de la humedad gravimétrica (Wg).
- Los valores de humedad obtenidos de la muestra de suelo se expresan en términos de humedad volumétrica (Wv) según la fórmula 1, el valor de densidad aparente (Da) se recomienda que se obtengan por algún método de campo.
- La muestra con el sensor y la muestra de suelo se toman en dos puntos, el primero en suelo con humedad en condiciones de capacidad de campo (CC) y el segundo en suelo en condiciones lo más cercanas a punto de marchitez permanente (PMP).
- Se grafica los dos pares de datos obtenidos (periodo mS y humedad volumétrica %) en los puntos de muestreo, se aplica una línea de tendencia (lineal) al grafico para generar la curva.
- Los resultados de la curva pueden extrapolarse con la ecuación obtenida y así generar tablas para obtener los valores de contenido de humedad según las lecturas del sensor en periodo (mS).

$$Wv = Wg \times Da \quad (1)$$

Constantes hídricas. Se realizó un muestreo de perfil de suelo a una profundidad de 1.2 m, se tomaron muestra cada 30 cm para analizarse en laboratorio. Se estimaron las constantes hídricas del suelo (CC y PPM).

Textura y Densidad aparente. Se calculó la densidad aparente (Da) por el método del plástico en campo y la textura se estimó en laboratorio por el método de Bouyoucos. Se midió la conductividad eléctrica (CE) de las muestras procesadas en laboratorio para conocer el índice de salinidad del suelo y no sobrepasar las especificaciones requeridas por el sensor (> 2 dS/m).

Cultivo

Fenología. Se obtuvo mediante observación directa, se estableció un experimento con tres tratamientos de riego para el cultivo de trigo (2, 3 y 4 auxilios), se monitoreo la aparición de etapas fenológicas según la guía para la caracterización fenotípica de trigo de Pask et al., (2013). Para conocer el contenido de humedad actual al momento del riego se hicieron mediciones antes de su aplicación.

Criterio de Riego (CR). El criterio de riego (CR) utilizado se obtuvo de experimentos desarrollados en la zona de estudio en el cultivo de trigo sobre calendarios de 2, 3 y 4 riegos de auxilio. Para la calibración de parámetros se utilizó el CR del calendario con 3 riegos que fue el que presentó el rendimiento más alto.

Coefficiente de cultivo (Kc) y Profundidad radicular (Pr). Ambos valores se obtuvieron del Manual de Evapotranspiración de Cultivos FAO-56 ajustados a etapas fenológicas.

Clima

Evapotranspiración de referencia (Eto). Se utilizaron las bases de datos generadas por la red estaciones climáticas REMAS-SIAFESON (<http://www.siafeson.com/remas/>) que utilizan el método Penman-Monteith (Allen et al., 1998) para su cálculo.

Resultados y Discusión

Metodología para la programación integral del riego con TDR

Se generó una metodología integral para el manejo eficiente del riego con TDR portátil en el cultivo de trigo para suelos de textura arcillosa en la zona sur del estado de Sonora, adaptada de la metodología empleada en INIFAP, CEVAF, Sinaloa, basada en los componentes antes descritos.

Suelo

Contenido de humedad volumétrica (Hv) con TDR portátil

A continuación, la **Figura 1** muestra la curva de calibración característica para el sensor de humedad TDR 350 para suelos de textura arcillosa predominantes en el Valle del Mayo, Sonora.

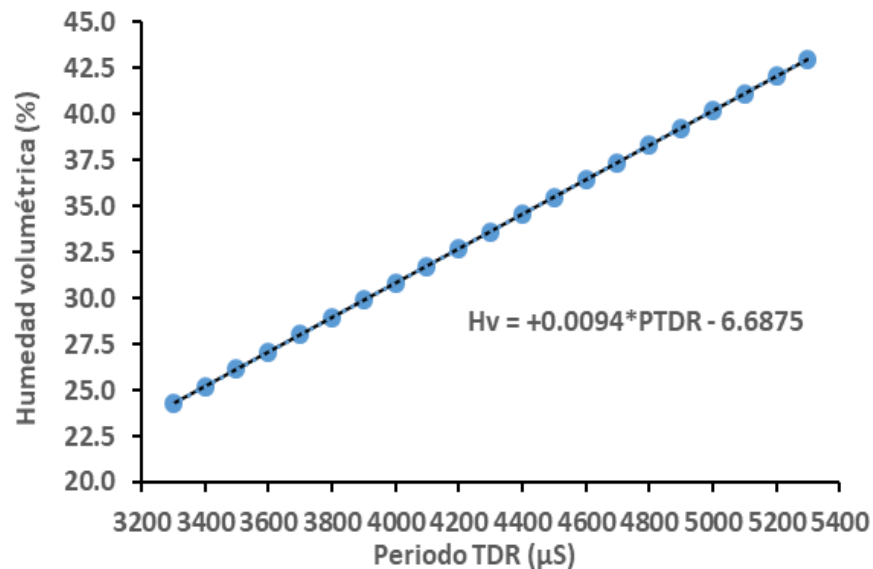


Figura 1. Relación del periodo (mS) de TDR300 y 350 (20 cm) y el contenido volumétrico de humedad (%); textura arcillosa.

Con base en la figura anterior se pueden generar cuadros relacionando el periodo y el contenido de humedad volumétrico utilizando la fórmula obtenida (Fórmula 2). Según las características del dispositivo la lectura de humedad se verá afectada por el contenido de sales solo para casos de conductividad eléctrica (EC) > 2 dS/m.

$$H_v = +0.0094 \times PTDR - 6.6875 \quad (2)$$

Donde H_v es la humedad volumétrica y PTDR es el periodo obtenido por el sensor en un punto específico.

Constantes hídricas (CC y PMP), Textura y densidad aparente (D_a)

A continuación, el **Cuadro 1** muestra los resultados obtenidos mediante análisis de suelo en laboratorio sobre textura, constantes hídricas y densidad aparente.

Cuadro 1. Resultados obtenidos del análisis de suelo

Prof-cm	% Arena	% Limo	% Arcilla	Textura	CC (%)	PMP(%)	$D_a(g/cm^3)$
0-30	21.4	20.2	58.4	R	40.8	21.3	1.16
30-60	20.0	19.6	60.4	R	40.9	19.4	1.23
60-90	15.4	22.2	62.4	R			
90-120	10.8	28.0	61.2	R			

Los resultados indican una textura de suelo arcillosa en todas las profundidades muestreadas, los valores de CC y PMP obtenidos en laboratorio fueron ajustados a las constantes de humedad (H_v) por textura de Rawls y Brakensiek (1983) para suelo de textura arcillosa (CC = 43% y PMP = 28%). Los valores de densidad aparente se obtuvieron de los primeros dos estratos muestreados (0-30 cm y 30-60 cm), se midió la densidad aparente en campo por el método del plástico (1.2 g/cm³) para corroborar los valores obtenidos en laboratorio.

Cultivo

El siguiente cuadro (**Cuadro 2**) muestra los resultados obtenidos de fenología, profundidad radicular (Pr), coeficiente de cultivo (Kc) y criterio de riego (CR)

Cuadro 2. Coeficiente de cultivo (Kc), Profundidad de raíz (Pr) y Criterio de riego (CR) por etapa fenológica basada en grados día acumulados (GDA) del cultivo de trigo.

Etapa	GDA	Pr (cm)	Kc	CR (%)
Germinación-emergencia	0	6	0.2	
Producción de hojas de del tallo principal	155	14	0.22	
Producción de amacollo	325	36	0.54	
Producción de nudos tp(encañado)	450	53	0.79	65
Vaina engrosada (embuche)	563	64	0.95	
Espigado	664	71	1.05	
Antesis-floración	790	76	1.10	55
Grano acuoso	969	79	1.02	
Grano lechoso	1115	80	0.83	
Grano masoso	1286	80	0.50	65
Madurez fisiológica	1504	80	0.2	

Se identificaron 10 etapas fenológicas, las cuales se caracterizó su duración a grados día acumulados (GDA). Esto es posible mediante la plataforma IriModel (Sifuentes y Macías, 2015). Para los valores de criterio de riego (CR) se establecieron los utilizados en el calendario de riego de tres auxilios para el cultivo de trigo de experimentos desarrollados en la zona de estudio donde se evaluaron tres tiramientos (2, 3 y 4 auxilios), se utilizó un valor de criterio de riego para cada grupo de etapas fenológicas (**Cuadro 2**). Para las variables de profundidad (Pr) y Coeficiente de cultivo (Kc) se utilizaron los obtenidos del manual FAO-56 ajustados por etapa fenológica del cultivo.

Clima

A continuación, se presentan los cuadros (**Cuadro 3 y 4**) generados con los datos climáticos de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio. Corresponden a datos diarios, decenales y mensuales de Eto.

Cuadro 3. Evapotranspiración de referencia, Eto. CENEB.

MES	DECENA	ETo (mm)		
		DIARIA	DECENAL	MENSUAL
DICIEMBRE	1	4.0	40.1	129.2
	2	4.5	45.5	
	3	4.0	43.7	
ENERO	1	3.7	37.0	122.1
	2	4.0	39.9	
	3	4.1	45.1	
FEBRERO	1	4.1	40.7	115.8
	2	3.9	39.4	
	3	4.5	35.7	
MARZO	1	4.5	45.0	159.7
	2	5.0	49.8	
	3	5.9	64.8	
ABRIL	1	6.1	60.5	208.0
	2	7.0	69.8	
	3	7.8	77.7	

Cuadro 4. Evapotranspiración de referencia, Eto. Sibolibampo.

MES	DECENA	ETo (mm)		
		DIARIA	DECENAL	MENSUAL
DICIEMBRE	1	4.1	41.0	126.8
	2	4.3	42.8	
	3	3.9	43.0	
ENERO	1	3.7	36.7	119.2
	2	3.9	39.5	
	3	3.9	43.0	
FEBRERO	1	3.8	38.3	111.9
	2	3.9	38.8	
	3	4.3	34.8	
MARZO	1	4.5	44.8	171.9
	2	6.1	60.5	
	3	6.1	66.6	

ABRIL	1	6.3	63.3	219.9
	2	7.4	74.0	
	3	8.3	82.7	

Aplicación de la metodología.

La aplicación de la metodología se muestra en los siguientes pasos.

- 1-Determinación de la humedad actual (Hact) volumétrica con el uso del sensor de humedad TDR.
- 2-Se determina la etapa fenológica en la que se encuentra el cultivo al momento de tomar la lectura con TDR.
- 3-Se calcula el momento de riego (MR) con base al criterio de riego establecido (CR) según la etapa fenológica del cultivo utilizando la fórmula 3. Esto determina el porcentaje de humedad aprovechable (Ha) que se dejara agotar para aplicar el riego (formula 4).
- 4-Se calcula la humedad residual (Hres) con la fórmula 5.
- 5-Se calculan los días al riego utilizando la Evapotranspiración real del cultivo (ETr) la cual se obtiene con la fórmula 6 y el coeficiente del cultivo (Kc) según la etapa fenológica.
- 6-Finalmente se calculan los días faltantes para la aplicación del próximo riego con la fórmula 7.

$$MR = CC - (Ha \times CR) \quad (3)$$

$$Ha = CC - PMP \quad (4)$$

$$Hres = (Hact - MR) \times Pr \quad (5)$$

$$ETr = Eto \text{ (actual)} \times Kc \quad (6)$$

$$\text{Días al riego} = Hres/ETr \text{ (actual)}. \quad (7)$$

Ejemplo de caso

Se inspecciono una parcela de trigo, textura Arcillosa, en el módulo de riego No 1 Fuerte-Mayo Huatabampo, Sonora, se muestreó con TDR portátil a 0-30 y 30-60 cm de profundidad. En promedio se obtuvo una humedad volumétrica actual (Hact) de 42%, 5190 mS, (Figura 1).

La etapa fenológica fue amacollamiento la que define la profundidad radicular (raíz) y el Kc de 360 mm y 0.54, respectivamente (Cuadro 2).

El momento de riego según la fórmula 3 será cuando se abata el 65% de humedad aprovechable (Ha) es decir cuando el suelo llegue a 33.25% de humedad.

$$Ha = CC - PMP \text{ ----- } Ha = (0.43 - 0.28) \times 100 \text{ ----- } Ha = 15\%$$

$$MR = CC - (Ha \times CR) \text{ ----- } MR = 0.43 - (0.15 \times 0.65) \times 100 \text{ ----- } MR = 33.25\%$$

De acuerdo a la anterior la humedad residual (Hres) es de 35.1 mm.

$$Hres = (Hact - MR) \times Pr \text{ ----- } Hres = (0.43 - 0.3325) \times 360 \text{ ----- } Hres = 35.1 \text{ mm}$$

Con lo anterior se calculan los días al riego, para el cual se debe conocer la evapotranspiración de referencia (ET_o) promedio en la fecha del muestreo de la estación de clima más cercana a la parcela, en el ejemplo corresponde a la segunda decena de enero con E_{to} = 3.9 mm (Sibolibampo, Cuadro 3.

$$Etr(\text{actual}) = Eto \times Kc \text{ ----- } Etr = 3.9 \text{ mm} \times 0.54 \text{ ----- } Etr = 2.106 \text{ mm/día}$$

$$\text{Días al riego} = Hres / ETr \text{ actual} = 35.1 / 2.106 = 14.9 \text{ días.}$$

Conclusiones

La curva de calibración generada para del sensor de humedad TDR 350 permite aumentar la eficiencia en la gestión del riego mediante un monitoreo rápido y preciso de parcelas, siendo una herramienta útil para aprovechar la humedad residual de lluvias al momento de la siembra. La metodología implementada demostró ser una herramienta practica para productores ya que permite un manejo del riego preciso que se traduce en la obtención de buenos rendimientos, a los módulos de riego les permite bajo escenarios de disponibilidad de agua normales planear, administrar y evaluar el riego acorde a las necesidades del cultivo. Bajo escenarios de baja disponibilidad de agua le permite al productor monitorear el nivel de estrés en etapas fenológicas permitiendo definir aquellas donde se puede restringir el riego y así disminuir el estrés hídrico en etapas susceptibles. Bajo este mismo escenario la metodología desarrollada es de utilidad para la operatividad de módulos de riego ayudando a priorizar el suministro acorde a las condiciones de humedad del suelo según el cultivo establecido.

Referencias Bibliográficas

Richard, A., Pereira L. S., Raes D. y Smith M., 1998. Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO. Roma.

Flores-Medina, M., Flores-García, F., Velasco-Martínez, V., González-Cervantes, G., & Jurado-Zamarripa, F. (2015). Monitoreo de humedad en suelo a través de red inalámbrica de sensores. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(5), 1–14.

Gavande, S.A. (1982). *Física de suelos, principios y aplicaciones*. Editorial limusa. Segunda edición. México, D.F. 351 pág.

Pask, A.J.D., Pietragalla, j., Mullan, D. M., Chavez-Dulanto P. N. Y Reynolds, M. P. (Eds.) (2013) *Fito mejoramiento Fisiológico II: Una Guía de Campo para la Caracterización Fenotípica de Trigo*. México, D.F.: CIMMYT.

REMAS-SIAFESON (<http://www.siafeson.com/remas/>)

Sánchez-Torres, J. D. (2011). Efecto del exceso de agua en el suelo y la fisiología de la planta de banano. *November* 2011, 11. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35358.54085>

Segovia-Cardozo, D. A., Franco, L., & Provenzano, G. (2022). Detecting crop water requirement indicators in irrigated agroecosystems from soil water content profiles: An application for a citrus orchard. *Science of the Total Environment*, 806, 150492. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150492>.

SIAP (2022). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Cierre de la producción agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Sifuentes-Ibarra, E., Macías-Cervantes, J. 2015. Programación integral y gestión del riego a través de internet. INIFAP-CIRNO. Campo Experimental Valle del Fuerte. Manual de usuario v. 2.0. Folleto técnico No. 42. ISBN: 978-607-0547-9., Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa. - 39pag.

SPECTRUM TECHNOLOGIES, INC.: Manual del producto Sensor de medición de humedad TDR 300, 31pag., Ed. FIELDSCOUT, USA, 2009.