Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol IX, A. L. Orozco Corral
Barcelona, 18 a 20 de Noviembre, 2009

IMPACTO AMBIENTAL DEL MANEJO EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO MEDIANTE SONDAS DE CAPACITANCIA (FDR) SOBRE LOS ACUIFEROS

Alfonso Luis Orozco Corral[1]

1: Departamento de Investigación, Desarrollo, Innovación y Transferencia Tecnológica
Grupo La Norteñita
Km. 98.5 Carretera Chihuahua – Cuauhtémoc. Fraccionamiento Real del Bosque
Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México. 31552
Tel. +52 (625) 590-2537 Fax. +52 (625) 590-2538
alfonsoorozco@grupolanorteñita.com www.grupolanorteñita.com

Palabras clave: Ahorro de Agua de Riego, Sonda de Capacitancia, FDR, Humedad Volumétrica del Suelo, Manejo Eficiente del Agua de Riego.

RESUMEN. *La explotación del acuífero Cuauhtémoc es de 4,230 pozos, con volumen medio de extracción de 360 Mm^3/año, se recarga con 87 Mm^3/año, existiendo un déficit medio anual de 273 Mm^3 dicha extracción es principalmente para la agricultura (92%). El estudio se realizó en Rancho El Rosario, Municipio Guerrero, Chihuahua, México, en 570 hectáreas de manzano, irrigadas por microaspersión. Se utilizaron sondas de capacitancia FDR para medir el contenido de agua del suelo y se monitoreó del clima en tiempo real. Objetivos: manejar eficientemente el agua de riego, disminuir extracciones profundas y evitar lixiviaciones de agroquímicos. Metodologías propuestas por la FAO e INIFAP. Resultados: ahorro de agua del 42% (4 Mm^3) (7,000 m^3/ha.), 40% electricidad y nula lixiviación de agroquímicos. El uso de sondas FDR permitió optimizar los riegos y ahorrar agua, evitando contaminación de acuíferos por agroquímicos, estudiar dinámica del suelo y corregir estados de stress hídrico.*

ABSTRACT. *The exploitation of the Cuauhtémoc aquifer is of 4,230 wells, with a mean volume of extraction of 360 Mm3/year, it is recharged with 87 Mm^3/year, having a mean annual deficit of 273 Mm^3, this extraction is mainly for the agriculture (92%). The study was carried out during the period 2005-2008 at Rancho El Rosario, Municipality of Guerrero, Chihuahua. It has 570 hectares planted (628,705 trees) with Golden Delicious apple variety, with low pressure micro irrigation system, using capacitance probes (FDR) to measure the contained volumetric water in the soil and real time climate monitoring. Objectives: With the purpose of making an efficient handling of the irrigation water and to diminish the deep extractions and to avoid pesticides lixiviation. Methodologies were used proposed by the FAO and INIFAP. Results: indicate significant savings of irrigation water up to 45% (7,000 m^3/ha and 4 Mm^3 in 570 has., 40% electricity and null pesticide lixiviation. The probes FDR allowed to optimize the watering and to save water, avoiding contamination of aquifer for pesticides, to study dynamics of the floor and to correct states of hydric stress.*

1. INTRODUCCIÓN

En la cuenca No. 34 de La Laguna de Bustillos existen aproximadamente 4,230 pozos, con una extracción anual de 360 millones de metros cúbicos (Mm^3), una recarga de 87 Mm^3, con déficit anual de 273 Mm^3 (CNA, 2007). Esto ha originado que cientos de pozos se encuentren secos, en otros tantos se ha bajado el nivel estático y algunos han llegado a perforar hasta una profundidad de 800 metros (Parra y Ortiz, 2004).

El abatimiento de los mantos acuíferos en la región de Cuauhtémoc, Chihuahua es preocupante: si no se toman las medidas adecuadas para optimizar el uso del agua de irrigación, se puede llegar a la perdida de miles de hectáreas dedicadas al cultivo del manzano, ya que el agua es el factor mas limitante para la fruticultura. Es importante tener presentes consideraciones de tipo ambiental en el diseño y operación de los sistemas de irrigación, ya que el agua en exceso se infiltra por debajo de la zona radicular, arrastrando residuos de fertilizantes u otras sustancias químicas, contaminando así los mantos acuíferos.

El manejo apropiado del agua debe estar en relación con el sistema de irrigación utilizado. En la irrigación de los huertos manzaneros, el ajuste de las cantidades de agua a aplicar, el tiempo de riego apropiado, el drenaje del suelo, la operatividad de labores culturales y medioambientales, constituyen las características más importantes que deben ser optimizadas. La utilización de tecnología apropiada es una herramienta para superar las limitaciones que puedan surgir de una demanda creciente de agua. El control del riego permite aumentar la eficiencia de uso del agua de irrigación y reducir o eliminar las pérdidas por lixiviación y escurrimientos y consecuentemente hacer un mejor manejo del recurso agua.

2. OBJETIVOS

El objetivo general fue determinar el régimen de riego para un huerto de manzano irrigado por microaspersión, en el Rancho Experimental El Rosario, en el Municipio de Guerrero, Chihuahua, a través del uso de sondas de capacitancia (FDR) para medir y monitorear continuamente la humedad del suelo en la zona radicular y de estaciones meteorológicas para la captura de datos climáticos, para de este modo programar, optimizar y manejar eficientemente los riegos, de acuerdo a las características del suelo y a las necesidades del cultivo en todo su ciclo fenológico y mejorar el aprovechamiento de los nutrientes aportados, lo cual permite hacer un uso racional de los recursos agua y suelo.

2.1 Objetivos específicos:

- Manejar eficientemente el agua de irrigación, a través de una programación de riegos.
- Disminuir el volumen de agua de extracción que se usa para riego.
- Evaluar el comportamiento de la sonda de capacitancia (FDR)
- Disminuir los riesgos de lixiviación de agroquímicos a los acuíferos.

3. ANTECEDENTES

Un buen manejo de irrigación se basa en optimizar la distribución espacial y temporal del agua aplicada con el objeto de incrementar la producción y calidad de los cultivos. Las buenas prácticas de irrigación, están diseñadas para mantener un adecuado nivel de humedad en esta zona y minimizar la contaminación difusa, es decir, lixiviación del agua y nutrientes por debajo de la zona radicular (Fares y Alva, 2000).

El conocimiento del contenido de agua en el suelo es fundamental para explicar una serie de procesos, tales como: balance del agua, velocidad de infiltración, escurrimientos, abatimiento de mantos acuíferos, crecimiento y desarrollo de cultivos y diseño de sistemas de irrigación (Dasberg y Dalton, 1985).

Varios factores afectan la permitividad efectiva del suelo. Es el caso del contenido en humedad, la porosidad (Weitz et al., 1997), la frecuencia de la onda electromagnética utilizada (Campbell, 1990), la temperatura (Or y Wraith, 1999), la salinidad (Campbell, 2002), la mineralogía (Olhoeft, 1989), el contenido en materia orgánica (Topp et al., 1980; Roth et al., 1992), o el tamaño y forma de las partículas y poros presentes en el suelo (Sen, 1981; Knight y Endres, 1990).

La situación actual del agua en el mundo corresponde a un panorama de escasez, sobreexplotación y contaminación, de tal forma que ya se considera un factor limitante para un desarrollo sustentable. Lo anterior obliga a buscar formas de incrementar la eficiencia en el uso del agua, para así impactar en aquellos aspectos donde el efecto del rescate del recurso, tanto en cantidad como en calidad, sea el mayor posible (Phene, 1999).

El Coeficientes de cultivo (K_c) es el coeficiente que relaciona la evapotranspiración del cultivo **(**ET_c), con la evapotranspiración de referencia (ET_o), y representa la evapotranspiración del cultivo en condiciones óptimas de

crecimiento vegetativo y rendimiento (Doorembos y Pruit, 1976). Los coeficientes de cultivo (K_c), varían con el desarrollo vegetativo de la planta, clima y sistema de riego; dichos valores se deben obtener para cada región y para cada sistema de riego (Hargreaves y Samani, 1991; Rincón y Sáenz, 1996).

El agua en el suelo está afectada por diversas fuerzas que tienen su origen en la presencia de sales disueltas en el agua, en un fenómeno de interfase entre los poros y las partículas coloidales del suelo, y otras como la gravedad, presión hidrostática y presión barométrica. La fuerza (potencial mátrico) conque el agua es retenida por el suelo, depende de la cantidad de agua presente en el sustrato. Mientras más seco está el suelo, mayor es la tenacidad con que el agua es retenida y más es el esfuerzo que debe hacer la planta para absorberla. Por el contrario, si el suelo está muy húmedo, parte del agua no puede ser retenida y se infiltra en profundidad, según lo dicho por Avidan, (1994). Tales fuerzas hacen que el agua sea adsorbida (retenida en la superficie de las partículas por fuerzas eléctricas) temporalmente por el suelo, que sea transferida o distribuida de un punto a otro del perfil, que drene o percole, que fluya a la superficie y sea evaporada o que se desplace hacia las raíces de las plantas y sea transpirada hacia la atmósfera. En este contexto se establecen los niveles de contenido de agua en el suelo que se denominan: PS, CC y PMP. La diferencia entre estos dos últimos niveles definen lo que se conoce como HA (Doorembos y Pruit, 1976).

Según Clark, et al. (1995), es difícil generalizar acerca de la frecuencia del riego porque hay innumerables factores que deben considerarse; cultivo, profundidad y distribución radicular, características de retención de humedad del suelo, patrón de humedad del goteo y grado de automatización. Sin embargo, según Chávez y Berzoza, (2003), la aplicación de dos reglas básicas puede ser de gran ayuda: Agotar no más del 40% al 50% de la humedad del suelo disponible en la zona radicular activa y limitar las aplicaciones a 10 cm. o menos. Esto limita el grado de saturación de la zona radicular y minimiza la cantidad de agua que pueda drenar por debajo de la zona radicular activa. La frecuencia del riego varia con la etapa de crecimiento del árbol y de las variables especificas del lugar como clima y suelo, lo que concuerda con lo dicho por Hartz, (1995), Davis et al., (1985), Phene et al., (1985).

La técnica FDR está basada en la medida de la constante dieléctrica del medio suelo aire y agua, cuya determinación se realiza a través de su capacitancia, debido a que la constante dieléctrica del agua es $\theta = 75$, comparada con la del suelo que es $\theta = 5$ y con la del aire que es $\theta = 1$. La medida de capacitancia nos da la constante dieléctrica y a partir de esta, el contenido de agua del suelo. La señal de radiofrecuencia se convierte en porcentaje de humedad volumétrica (Hv) mediante la ecuación de calibración propuesta por Paltineanu y Starr (1997) la cual es facilitada por el software de calibración de la sonda.

4. METODOLOGIA

El lugar donde se implementó este programa y se realizaron los estudios es el Rancho Experimental El Rosario, propiedad del Grupo La Norteñita, ubicado en el municipio de Guerrero en el Estado de Chihuahua, México, dicho rancho tiene una extensión de 570 hectáreas y se divide en 30 lotes, los cuales tienen diferentes marcos de plantación, densidades, variedades y portainjertos.

La instrumentalización de los huertos constó de una sonda de capacitancia (FDR) portátil para la monitorización de las reservas de agua en el suelo, a tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-90 cm.). Los sensores de esta sonda envían sus mediciones al capacitor-datalogger, donde fueron almacenados. El trabajo de campo con la sonda de capacitancia consistió en tomar semanalmente las lecturas a las tres profundidades citadas, en cada uno de los 680 tubos de acceso instalados.

Los datos climáticos del 2005 al 2008 de: radiación solar, velocidad y horas de viento, temperaturas máximas y mínimas, humedades relativas máximas y mínimas, presión barométrica y precipitación pluvial, se obtuvieron de una estación meteorológica Davis, modelo Vantage Pro 2, fabricada en U.S.A.

La Sonda de Capacitancia (FDR) es un sistema de alta tecnología para monitorear la humedad de los suelos. Las variaciones de capacitancia se deben a los cambios en el dieléctrico del medio circundante, es decir, la frecuencia de oscilación es proporcional a la relación aire/agua en el suelo. La ecuación de calibración almacenada en el capacitor-datalogger permite la conversión de las medidas de capacitancia en mediadas de contenido volumétrico de agua en el suelo. Cada sensor recoge información que cubre un estrato de 10 cm. de suelo, con un radio exterior al tubo de 5-10 cm.

La distribución y cantidad de los tubos de acceso fue cuidadosamente planificada. Se instalaron un total de 680 tubos de acceso por hectárea de PVC (cédula 40 y 280 PSI), de 1.20 metros de longitud, los cuales van enterrados 1.00 metro, lo que nos permitió tomar lecturas a los 20, 45 y 75 cm. de profundidad. Al mismo tiempo que se fue alcanzando las profundidades antes citadas durante la instalación de los tubos de acceso, se tomaron muestras de suelo para determinar la clase textural.

El método de estimación que se utilizó para calcular la Evapotranspiración de Referencia (ET_o) y para determinar la Evapotranspiración del Cultivo (ET_c) fue el de Penman modificado por la FAO (Doorembos y Pruit, 1976).

En cultivos arbóreos la ET es a su vez función del porcentaje de la superficie de suelo sombreada por el árbol. Para su determinación se aplicó un coeficiente denominado F_c cuyo valor depende del porcentaje de superficie sombreada. Para la determinación del Factor de Cobertura (F_c) en frutales, se procedió a introducir el diámetro medio de la copa de los árboles de la plantación. (Zazueta, 1992).

Para determinar el Coeficientes de Cultivo (K_c) se utilizó el método FAO (Doorembos y Pruit, 1976).

Para el cálculo de la Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchites Permanente (PMP) se consideraron las ecuaciones propuestas por Ortiz (2000).

El cálculo de la Humedad Aprovechable (HA), Déficit de Humedad (DH), Lámina de Riego (LR) y Momento de Riego (MR) se efectuó mediante las ecuaciones citadas por Ortiz (2000).

La Densidad Aparente (D_a), Humedad Gravimétrica (H_g) y Humedad Volumétrica (H_v) se calcularon con las ecuaciones propuestas por Doorembos y Pruit (1976).

La Velocidad de Infiltración (V_i) se determinó a través del método del anillo infiltrómetro, utilizando la ecuación citada por Doorembos y Pruit (1976).

Para el cálculo de los Requerimientos Hídricos Mensuales (RH_{mes}) y Requerimientos Hídricos Diarios ($RH_{día}$) se utilizaron las ecuaciones propuesta por Blaney y Criddle. (Doorembos y Pruit, 1976).

El Número de Riegos (NR), Frecuencia de Riegos (FR) y Tiempo de Riego por Sección (TR) se calcularon mediante las ecuaciones citadas por Ortiz (2000).

5. RESULTADOS Y DISCUSION

Al analizar los valores obtenidos de Evapotranspiración de Referencia (ET_o) del 2005 al 2008, se encontró una escasa correlación ($R^2 = 0.4922$). Esto nos indica que la variabilidad de los valores diarios de ET_o son influenciados por la variabilidad climática de radiación solar, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, temperaturas máximas y mínimas, estado de las coberteras, porcentaje de cobertura y precipitación pluvial. Sin embargo, se observa que el coeficiente de correlación es mayores cuando los valores de evapotranspiración fueron analizados en promedios mensuales ($R^2 = 0.7942$). Se observó una excelente correlación entre la evapotranspiración de cada año según los valores de acumulación anual ($R^2 = 0.9889$) tal como se representa en la figura 1.

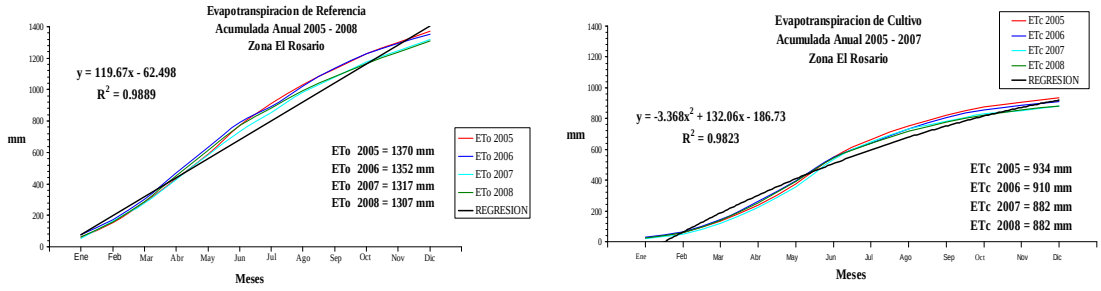


Figura 1. ET_o y ET_c acumulada anual del 2005 al 2008.

Los valores de Evapotranspiración del Cultivo (ET_c) diarios del 2005 al 2008 fueron analizados, encontrándose una moderada correlación ($R^2 = 0.6529$). Esto nos indica que la variabilidad de los valores diarios de ET_c son un

poco menos influenciados por la variabilidad climática de radiación solar, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, temperaturas máximas y mínimas, estado de las coberteras, porcentaje de cobertura y precipitación pluvial. Sin embargo, los coeficientes de correlación son mayores cuando los valores son analizados en promedios mensuales ($R^2 = 0.8155$). Se observó una excelente correlación entre los valores anuales ($R^2 = 0.9823$) como se muestra en la figura 1.

En la figura 2 se puede observar la correlación entre ET_o y ET_c en la zona El Rosario, promedios mensuales durante los años 2005 – 2008, donde se aprecia que la ET_o supera a la real ET_c, siendo la ecuación lineal de ajuste $y = 1.1806x – 1.8459$ y el coeficiente de regresión ($R^2 = 0.9209$), lo que nos sugiere que existe una correlación alta entre ambas, debido a que en los meses de mayor evapotranspiración la dispersión de los puntos es menor que en los meses de menor demanda.

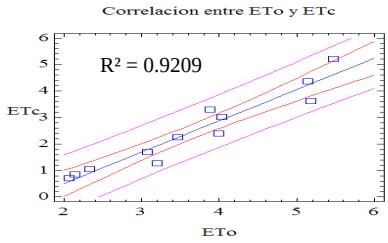
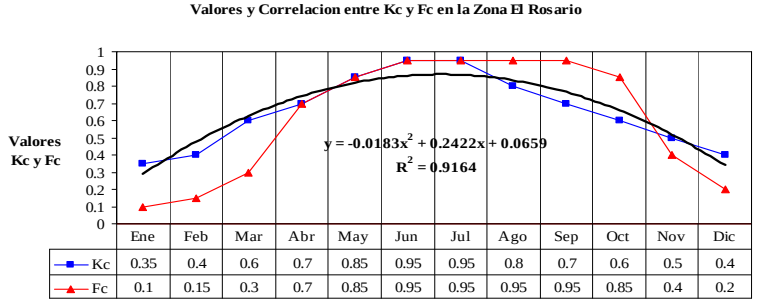


Figura 2. Correlación entre ET_o y ET_c del 2005 al 2008.

En la figura 3 se pueden observar los valores del Factor de Cobertura (F_c) obtenidos para los meses de Enero a Diciembre. Así mismo, se observan los valores de Coeficiente de Cultivo (K_c) para el mismo período. Existe una fuerte correlación entre ambas variables, donde la ecuación polinómica de ajuste es $y = -0.0183x^2 + 0.2422x + 0.0659$ y el coeficiente de regresión ($R^2 = 0.9164$) lo que nos indica que la superficie sombreada esta estrechamente relacionada con las necesidades hídricas según el ciclo fenológico.



	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Kc	0.35	0.4	0.6	0.7	0.85	0.95	0.95	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
Fc	0.1	0.15	0.3	0.7	0.85	0.95	0.95	0.95	0.95	0.85	0.4	0.2

Figura 3. Valores de Kc y Fc en la zona de estudio.

En los valores de la capacidad de almacenamiento de agua: Punto de Saturación (PS), Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchites Permanente (PMP), Humedad Aprovechable (HA), Déficit de Humedad (DH), Lámina de Riego (LR), Momento de Riego (MR), Densidad Aparente (D_a), Humedad Gravimétrica (H_g) y Humedad Volumétrica (H_v), se observó variabilidad en los parámetros hídricos de los lotes comprendidos en la zona El Rosario, dicha variabilidad es debida a las diferentes clases texturales del suelo.

Al analizar los datos de Velocidad de Infiltración (V_i) para las diferentes clases texturales encontradas, el coeficiente de regresión fue alto ($R^2 = 0.746$), lo que nos indica que los suelos analizados muestran un alto contenido de arcilla, lo que concuerda con lo encontrado en el perfil sub-superficial de 30 – 60 cm. principalmente.

. En la tabla 1 se muestran los valores obtenidos de la Programación del Riego para la zona El Rosario donde se aprecian los Requerimientos Hídricos Mensuales (RH_{mes}), Requerimientos Hídricos Diarios ($RH_{día}$), Número de Riegos (NR), Frecuencia de Riegos (FR), Tiempo de Riego por Sección (TR) y el uso consuntivo del manzano y

el número de riegos requeridos para cubrir esos requerimientos.

Tabla 1. Programación del Riego para la zona El Rosario

Mes	*RH/Mes* (mm)	*RH/Día* (mm)	*NR*	*FR* (Días)	*TR* (h)
Enero	18.56	0.58	1	39.7	6
Febrero	30.52	1.04	1	21.5	6
Marzo	60.11	1.94	3	11.9	6
Abril	106.37	3.55	4	6.5	6
Mayo	168.08	5.42	7	4.3	6
Junio	208.31	6.79	9	3.4	6
Julio	181.94	3.47	5	6.7	6
Agosto	147.94	2.37	3	9.7	6
Septiembre	104.48	1.76	2	13.0	6
Octubre	69.24	2.17	3	10.7	6
Noviembre	41.28	1.29	2	17.6	6
Diciembre	19.27	0.60	1	38.4	6
TOTALES	1,160 mm anuales		41 riegos anuales		

El sensor utilizado por la sonda de capacitancia (FDR) muestra una buena respuesta a la humedad de suelo medida en forma volumétrica, observándose una excelente precisión. Al analizar la respuesta de los sensores dieléctricos de la sonda de capacitancia FDR, a la variación de la humedad volumétrica del suelo, los coeficientes de correlación fueron levemente menores en aquellos suelos con mayor porcentaje de arcillas (figura 4).

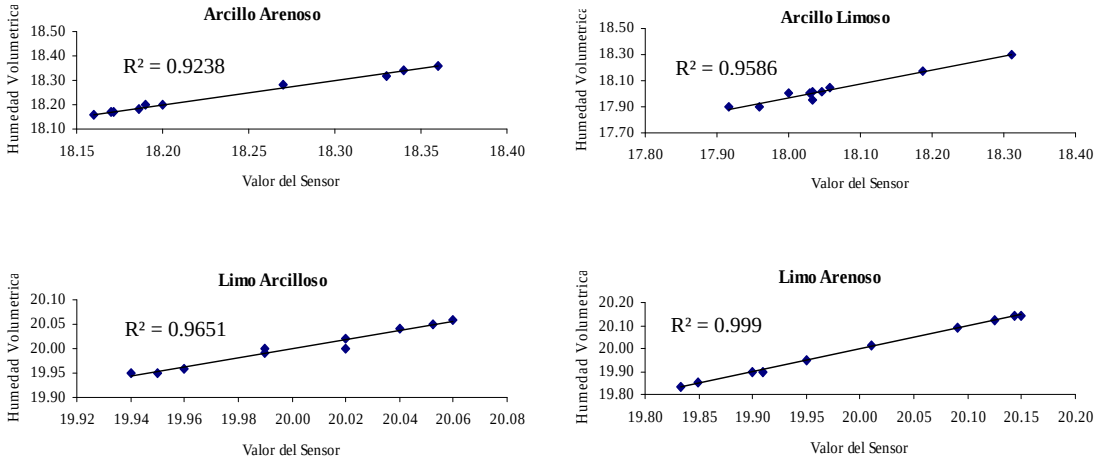


Figura 4. Respuesta del sensor dieléctrico de la sonda FDR a la humedad volumétrica del suelo en las diferentes texturas.

En la zona de estudio, se encontró que diferentes partes del suelo retienen diferentes cantidades de agua en la zona radicular, donde el análisis granulométrico promedio encontrados en la zona El Rosario, nos indica que existe un contenido alto de arcilla en el horizonte sub-superficial de 0-30 cm., lo que ocasiona una baja velocidad de infiltración influyendo directamente sobre la capacidad de retención de humedad.

En la figura 5 se puede observar la correlación entre CC y LR en la zona El Rosario, siendo la ecuación lineal de ajuste y = -1.07548 + 1.10681*LR. Existe relación estadísticamente significativa entre CC y LR para un nivel de confianza del 99%. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 98.5098% de la variabilidad en CC. El coeficiente de correlación es igual a 0.992521, indicando una relación fuerte entre las variables.

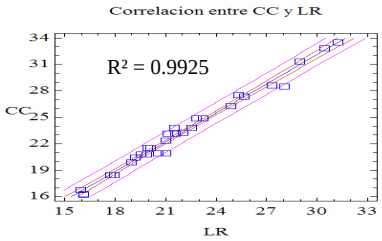


Figura 5. Correlación entre CC y LR del 2005 al 2008.

En la figura 6 se representan las láminas totales (LT) de agua aplicadas durante los años 2005 al 2008 y en la que se puede apreciar el cálculo del uso consuntivo de agua para el manzano en la zona El Rosario (1160 mm), la LR a aplicar en 41 riegos (948 mm) y la precipitación pluvial efectiva (212 mm) en el 2008. El volumen de agua de extracción que se regó fue de 9,480 m³/ha., multiplicado por 570 ha. que comprenden los treinta huertos de la zona El Rosario donde se aplicó esta programación, nos dio un total de 5.4 Mm³, contra lo regado en los años: 2005 (9.8 Mm³), 2006 (9.4 Mm³) y 2007 (9 Mm³), lo que representa un respectivo ahorro en el volumen de agua de: 4.4 Mm³, 4 Mm³ y 3.5 Mm³. Al manejar eficientemente el agua de irrigación se obtuvieron ahorros significativos de agua de extracción. Los porcentajes de ahorro para la lámina total son 43 %, 48 % y 44 %, comparado con los años 2005, 2006 y 2007.

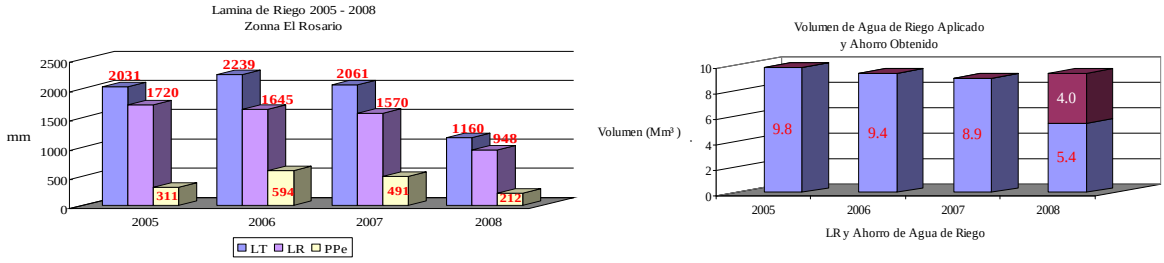


Figura 6. Láminas de agua aplicadas y el ahorro de agua de riego durante los años 2005 – 2008.

En la tabla 2 se observan las LR aplicadas durante los años 2005 – 2008. Lo que se regó en: mm., m³/ha., m³/570 ha. y el excedente de m³ en 570 ha., lo que representa un ahorro de 4 Mm³ anuales (45 %).

Tabla 2. Láminas de Riego y volúmenes aplicados durante los años 2005 – 2008

	mm	m³/ha	Mm³/570 ha	Volumen Excedente (Mm³)
LR 2005	1,720	17,200	9.8	4.4
LR 2006	1,645	16,450	9.4	4.0
LR 2007	1,570	15,700	9.0	3.5
LR 2008	948	9,480	5.4	----------

6. CONCLUSIONES

Se obtuvieron ahorros significativos en el volumen de agua de extracción profunda del 45 % (4 Mm³) según se puede observar en la figura 6 y en la tabla 2.

Esta técnica ofreció una serie de ventajas entre las que destacaron: facilidad de efectuar mediciones con rapidez en un mismo punto de forma continuada, así como también en varios puntos debido a su carácter portable; determinar el perfil de humedad de un suelo a diferentes profundidades; alto grado de precisión de las mediciones; y ejerce un mínimo impacto sobre el suelo.

La relación lineal observada entre el valor entregado por el sensor de la sonda de capacitancia (FDR) y la humedad volumétrica en las distintas texturas de suelo es muy alta (figura 5), lo que demuestra que el uso de esta tecnología simplifica de manera importante los métodos de medición de la humedad utilizados

anteriormente, por lo que se debe incorporar esta metodología en la programación de riegos.

Asumiendo que existen 30,000 ha. de cultivo manzano en la región de Cuauhtémoc y Guerrero en el Estado de Chihuahua y que el ahorro de agua para riego es de 7,000 m^3/ha., si esta metodología se adoptara, significaría un ahorro de 210 Mm^3 para el acuífero.

Finalmente podemos concluir que la programación eficiente del riego a través de sondas de capacitancia (FDR) y el monitoreo en tiempo real del clima, nos indican que se trata de herramientas indispensables en la gestión y desarrollo sustentable de los ecosistemas agrícolas, permitiendo integrar la productividad y la conservación de los recursos hídricos y edáficos, además de reducir significativamente el consumo de energía eléctrica que es utilizada para la extracción profunda de agua para riego.

REFERENCIAS

Avidan, A. (1994), *Cálculo de las necesidades de riego: Determinación del régimen de riego de los cultivos; Factores que influyen sobre el régimen de riego; La evapotranspiración de los cultivos.* Fascículos 1-3. CINADCO. Ministerio de Agricultura. Servicio de de Extensión Agrícola. Departamento de Riego y Suelos. Israel.

Brooks, K.N., P.F. Folliott, H.M. Gregersen y J.L. Thames (1993), *Hydrology and the management of watersheds*. Iowa University Press. p. 392. USA.

Campbell, J.E. (1990), *Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz.* Soil Science Society American Journal 54: 332-341.

Campbell, J.E. (2002), *Salinity effects in capacitive soil moisture measurement transactions*. First International Symposium on Soil Water Measurement using Capacitance and Impedance, pp. 1-12. Paltin International Inc., Maryland, USA

Chávez N. y M. Berzoza (2003), *Manejo y operación de sistemas de riego presurizado*. Campo Experimental Delicias, Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP-SAGARPA. Cd. Delicias, Chihuahua, México.

Clark, G.A., C.D. Stanley, A.G. Smajstrla, y F.S. Zazueta, (1995), *Consideraciones para el diseño de la microirrigación para la producción de hortalizas*. *El uso de la plasticultura para la producción intensiva de cultivos hortícolas*. Curso Nacional de Fertirrigación. INIFAP. México.

Davis, K.R., C.J. Phene, R.L. McCormick, R.B. Hutmancher, y D.W. Meek (1985), *Trickle irrigation frequency and installation depth effects on tomatoes*. Third International Drip/Trickle Irrigation Congress, Fresno, California, USA. pp. 986-902.

Dasberg, S. y F.N. Dalton (1985), *Time domain reflectometry measurements of soil water content and electrical conductivity*. Soil Science Society American Journal 49: 293-297.

Doorembos J. y W.O. Pruitt (1976), *Las necesidades de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje, Manual nº 24. Roma, Italia.

Fares A. y A.K. Alva (2000), *Soil water components based on capacitance probes in sandy soil***.** Soil Science Society American Journal 64: 311-318.

Hartz, T.K. (1995), *Manejo del agua en la producción de hortalizas con riego por goteo.* El uso de la plasticultura para la producción intensiva de cultivos hortícolas. Curso Nacional de Fertirrigación. INIFAP. México.

Hargreaves, G.H. y Z.A. Samani (1991), *Programación del riego*. Manual Bilingüe. Universidad de Las Cruces, New México, U.S.A.

Knight, R.J. y A.L. Endres, (1990), A *new concept in modeling the dielectric response of sandstones: Defining a wetted rock and bulk water system*, Geophysics 55: 586-594.

Olhoeft, G.R. (1989), *Electrical properties of rocks.* Physical Properties of Rocks and Minerals. vol. II-2. New York: Hemisphere Pub. Corp.

Or, D. y J.M. Wraith (1999), *Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model*. Water Resources 35: 371–383.

Ortiz, P. (2000), *Programación práctica del riego*. Campo Experimental Sierra de Chihuahua, Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP-SAGARPA. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

Paltineanu I. C. y J. Starr (1997), *Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration*. Soil Science Society American Journal 61: 1576

Parra, R. y P. Ortiz (2004), *Manejo del riego en manzano mediante déficit de riego controlado (DCR)*. Campo Experimental Sierra de Chihuahua, Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP-SAGARPA. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

Phene, D.J., R.J. McCormick, J.M. Miyamoto, D.W. Meek, y K.R. Davis (1985), *Evaportanspiration and crop coefficient trickle irrigated tomatoes*. Third. International Drip/Trickle Irrigation Congress, Fresno, California, USA. pp. 923-831.

Rincón, L. y Sáenz, J. (1996), *Determinación de la evapotranspiración y de los coeficientes de cultivo en lechuga iceberg con riego por goteo*. Actas del Congreso Ibérico. Murcia, España. pp. 193-202.

Roth, C.H., M.A. Malicki y R. Plagge (1992), *Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR*. Journal of Soil Science 43: 1-13.

Sen, P.N. (1981), *Relation of certain geometrical features to the dielectric anomaly of rocks.* Geophysics 46: 1714-1720.

Topp, G.C., J.L. Davis y A.P. Annan (1980), *Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines*. Water Resources 16: 574-582.

Weitz, A.M., W.T. Grauel, M. Keller y E. Veldkamp (1997), *Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin.* Water Resources 33: 1241-1249.

Zazueta, R. F. S. (1992), *Micro-Irrigación*. ICFA Internacional, Inc. Gainesville, Florida.,USA.