

USO EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO MEDIANTE SONDAS DE CAPACITANCIA

EFFICIENT WATERING MANAGEMENT USING CAPACITANCE PROBES

Alfonso Luis Orozco Corral¹

Resumen

La explotación del acuífero Cuauhtémoc es de 4,230 pozos, con volumen medio de extracción de 360 Mm³/año, se recarga con 87 Mm³/año, existiendo un déficit medio anual de 273 Mm³ dicha extracción es principalmente para la agricultura (92%). Es necesario incorporar tecnologías y programas de riego más eficientes que contribuyan al desarrollo sustentable de la agricultura en México.

El estudio se realizó durante el período 2005-2008 en el Rancho El Rosario, Municipio de Guerrero, Chihuahua. Cuenta con 570 hectáreas plantadas (628,705 árboles) con manzano variedad Golden Delicious, irrigadas por microaspersión de baja presión, utilizando sondas de capacitancia (FDR) para medir el contenido volumétrico de agua del suelo y el monitoreo del clima en tiempo real.

Con la finalidad de efectuar un manejo eficiente del agua de riego y disminuir las extracciones profundas, se utilizaron metodologías propuestas por la FAO e INIFAP, para el cálculo de las variables: Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración de cultivo, factor de cobertura, coeficientes de cultivo, clase textural de suelos, punto de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, humedad aprovechable, déficit de humedad, porcentaje permitido de abatimiento de humedad, lámina de riego, momento de riego, densidad aparente, velocidad de infiltración, humedad gravimétrica y volumétrica, precipitación efectiva, requerimientos hídricos diarios, mensuales y anuales, número de riegos, frecuencia y tiempo de riegos. Se instaló un sistema de tubos de acceso para la toma de datos semanales de la sonda de capacitancia para el monitoreo de la humedad del suelo, comparando los valores dieléctricos de la sonda con la humedad volumétrica del suelo. Los datos meteorológicos se obtuvieron de estaciones pertenecientes a la red agroclimática de UNIFRUT. El análisis estadístico se efectuó por medio de la regresión lineal y polinómica (R²).

Además de la obtención de balances hídricos ajustados para uso en investigaciones sobre los procesos de contaminación de acuíferos por nitratos, la utilización de sondas de capacitancia proporciona información que permite la optimización de los riegos, la corrección de estados de stress hídrico en los cultivos y el estudio de la dinámica del suelo.

Los resultados indican ahorros significativos de agua de riego del 45 % (7,000 m³/ha y 4 Mm³ en 570 ha.). Así mismo, se obtuvo un ahorro de energía eléctrica para la extracción profunda de agua, del 42 % (800,000 Kwh). Asumiendo que existen 30,000 ha. de cultivo manzano en la región de Cuauhtémoc y Guerrero en el Estado de Chihuahua, si esta metodología se adoptara significaría un ahorro de 209 Mm³ anuales para el acuífero, lo que impactaría significativamente sobre el déficit de recarga existente, minimizando los impactos ambientales negativos e incrementando las expectativas de vida del acuífero (25 años) y contribuyendo al desarrollo socioeconómico de la región.

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

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 Mm³/year, having a mean annual deficit of 273 Mm³ this extraction is mainly for the agriculture (92%). It is necessary to incorporate technologies and more efficient watering programs that contribute to the sustainable development of the agriculture in Mexico.

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.

With the purpose of making an efficient handling of the irrigation water and to diminish the deep extractions, methodologies were used proposed by the FAO and INIFAP, for the calculation of the variables: ETo, ETc, canopy factor, Kc, soil texture, saturation point, FC, SP, available humidity, deficit of humidity, allowed percentage of depression of humidity, watering sheet, watering moment, apparent density, infiltration, gravimetric and volumetric humidity, effective rain precipitation, hydric requirements daily, monthly and annual, amount of watering, frequency and time of watering. A system of access tubes was installed for the taking of weekly data with the capacitance probe for the monitoring of humidity in the soils, comparing the dielectrics values of the probe with the volumetric humidity of the soils. Meteorological data was obtained

¹ Alfonso Luis Orozco Corral. Investigador. Grupo La Norteña. Departamento de Investigación, Desarrollo, Innovación y Transferencia Tecnológica. Km. 98.5 Carr. Chihuahua-Cuauhtémoc. Fracc. Real del Monte. C.P. 31552 Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México. Tel. +52 (625) 590-2537. Fax +52 (625) 590-2538. alfonsoorozco@grupolanortenita.com www.grupolanortenita.com

at weather stations belonging to the agro-climatic UNIFRUT net. The statistical analysis was made by means of the lineal and polynomial regression (R^2).

Besides obtaining adjusted hydric balances for use in research on the processes of contamination of aquifer by nitrates, the use of capacitance probes provides information that allows the optimization of the irrigation water, the correction of hydric stress in crops and study of the soil dynamics.

The results indicate significant savings of irrigation water up to 45% (6,970 m³/ha and 4 Mm³ in 570 ha.). Likewise, an electric power saving was obtained for the deep extraction of water, up to 42% (800,000 Kwh). Assuming that there are 30,000 ha. of apple cultivar in the region of Cuauhtémoc and Guerrero, Chihuahua, Mexico, if this methodology was adopted it would mean a saving of 209 Mm³ for the aquifer annually, what would impact significantly on the deficit of existing water recharge, minimizing the negative environmental impacts and increasing the life expectations of the aquifer (25 years) and contributing to the socioeconomic development of the region.

Key words: Water economy, Capacitance probes, FDR, Efficient Watering Management.

INTRODUCCION

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 (Mm³), una recarga de 87 Mm³, con déficit anual de 273 Mm³ (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 pérdida 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.

OBJETIVOS

- 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.

- Disminuir el consumo de energía eléctrica.
- Evaluar el comportamiento de la sonda de capacitancia (FDR)
- Disminuir los riesgos de lixiviación de agroquímicos a los acuíferos.

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 (constante dieléctrica) 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 (Olhoef, 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_0), y representa la evapotranspiración del cultivo en condiciones óptimas de crecimiento vegetativo y rendimiento (*Doorembos y Pruitt, 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) con que 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: Punto de saturación (PS), Capacidad de campo (CC) y Punto de marchitez permanente (PMP). La diferencia entre estos dos últimos niveles definen lo que se conoce como Humedad abatible (HA), (*Doorembos y Pruitt, 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 varía con la etapa de crecimiento del árbol y de las variables específicas 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 (H_v) mediante la ecuación de calibración propuesta por *Paltineanu y Starr (1997)* la cual es facilitada por el *software de calibración* de la sonda.

METODOLOGIA

El lugar donde se implementó este programa y se realizaron los estudios es el *Rancho Experimental El Rosario*, propiedad del Grupo La Norteña, 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.

Evapotranspiración de Referencia (ET_0). El método de estimación que se utilizó es el de Penman modificado por la *FAO (Doorembos y Pruitt, 1976)*.

Evapotranspiración del Cultivo o Real (ET_c). Para determinarla se utilizó el método Penman-FAO (Doorembos y Pruitt, 1976).

Factor de Cobertura (F_c). 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 F_c en frutales, se procedió a introducir el diámetro medio de la copa de los árboles de la plantación. (Zazueta, 1992).

Coefficientes de Cultivo (K_c). Para determinarla se utilizó el método FAO (Doorembos y Pruitt, 1976).

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

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

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

Velocidad de Infiltración (V). Para determinarla se empleó el método del anillo infiltrómetro, utilizando la ecuación citada por Doorembos y Pruitt (1976).

Requerimientos Hídricos Mensuales (RH_{mes}) y Requerimientos Hídricos Diarios ($RH_{día}$). Se calcularon usando las ecuaciones propuesta por Blaney y Criddle. (Doorembos y Pruitt, 1976).

Número de Riegos (NR), Frecuencia de Riegos (FR) y Tiempo de Riego por Sección (TR). Su cálculo fue mediante las ecuaciones citadas por Ortiz (2000).

RESULTADOS Y DISCUSION

Evapotranspiración de Referencia (ET_o). Al analizar los valores diarios obtenidos de ET_o del 2005

al 2008, se encontró una escasa correlación ($R^2 = 0.49$). 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 ($R^2 = 0.79$). Se observó una excelente correlación entre la evapotranspiración de cada año según los valores de acumulación anual ($R^2 = 0.98$).

Evapotranspiración del Cultivo (ET_c). Los valores de ET_c diarios del 2005 al 2008 fueron analizados, encontrándose una moderada correlación ($R^2 = 0.65$). 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 ($R^2 = 0.81$). Se observó una excelente correlación entre los valores anuales ($R^2 = 0.98$).

En la figura 3 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 ($R^2 = 0.92$), 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.

Factor de Cobertura (F_c). Entre los valores del F_c obtenidos para los meses de Enero a Diciembre y los valores de K_c para el mismo período, existe una

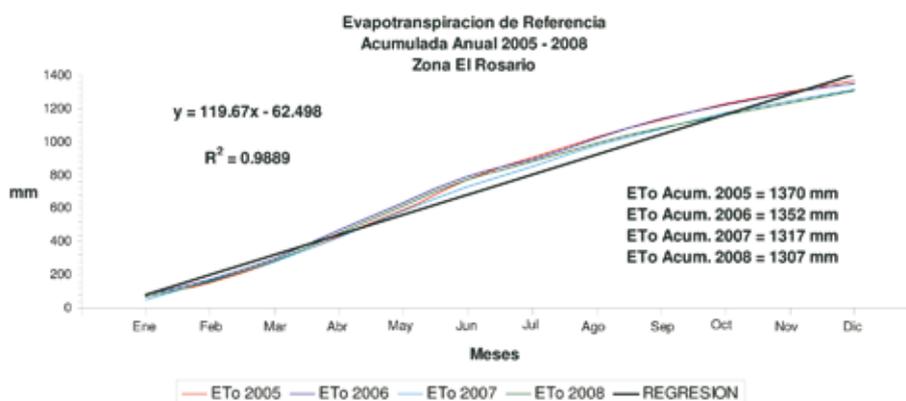


Figura 1. ETo acumulada anual del 2005 al 2008.

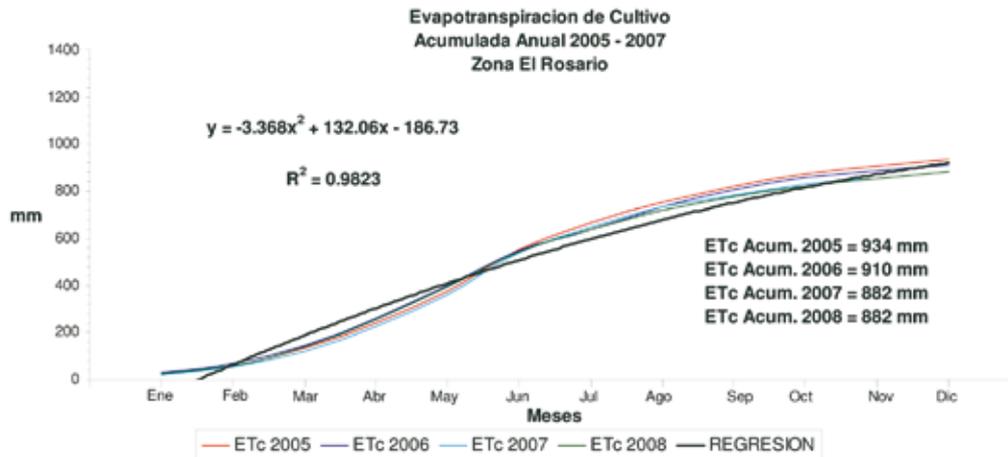


Figura 2. ETc acumulada anual del 2005 al 2008.

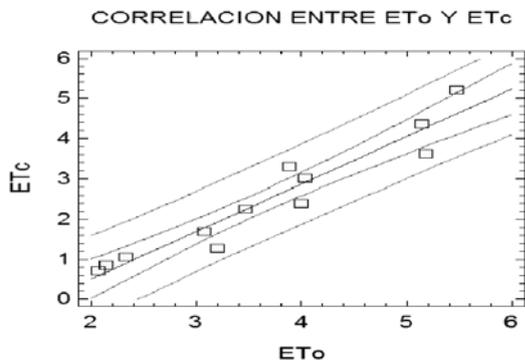


Figura 3. Correlación entre ET0 y ETc promedios mensuales durante los años 2005 – 2008.

fuerte correlación entre ambas variables ($R^2 = 0.91$), lo que nos indica que la superficie sombreada esta estrechamente relacionada con las necesidades hídricas según el ciclo fenológico, lo que se ve representado en la figura 4.

Coefficientes de Cultivo (K_c). En la figura 4 se pueden observar los valores del F_c obtenidos para los meses de Enero a Diciembre. Así mismo, se observan los valores de K_c para el mismo período. Existe una fuerte correlación entre ambas variables, donde la ecuación polinomial de ajuste es $y = -0.0183x^2 + 0.2422x + 0.0659$ y el coeficiente de regresión ($R^2 = 0.91$) lo que nos indica que la superficie sombreada esta estrechamente relacionada con las necesidades hídricas según el ciclo fenológico.

Punto de Saturación (PS), Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP), Humedad Aprovechable (HA), Déficit de Humedad (DH), Lámina de Riego (LR), Momento de Riego

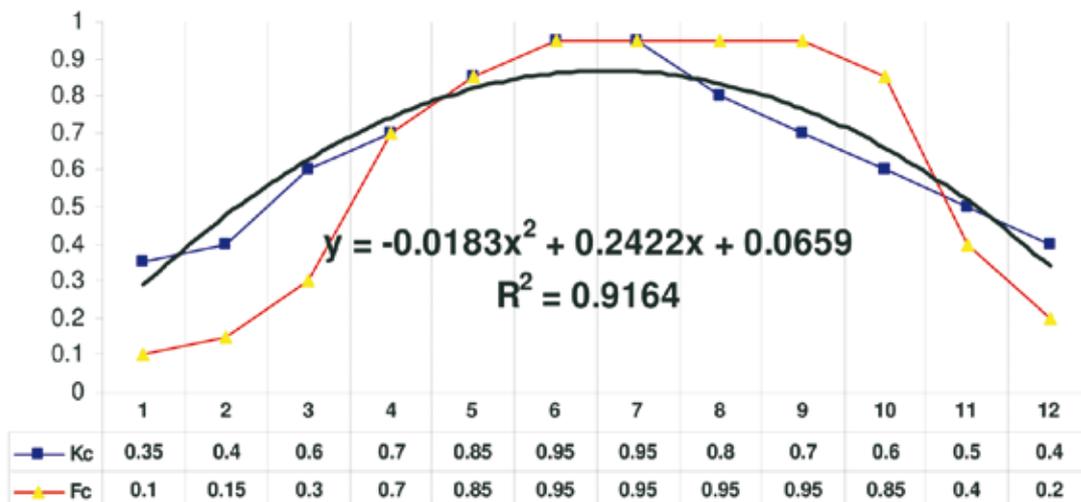


Figura 4. Valores de K_c y F_c en la zona de estudio.

(MR), Densidad Aparente (D_a), Humedad Gravitométrica (H_g) y Humedad Volumétrica (H_v). En los valores de la capacidad de almacenamiento de agua 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 (Anexo 1).

Velocidad de Infiltración (V_i). Al analizar los datos de V_i para las diferentes clases texturales encontradas, el coeficiente de regresión fue alto ($R^2 = 0.74$), 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.

Requerimientos Hídricos Mensuales (RH_{mes}), Requerimientos Hídricos Diarios ($RH_{día}$), Número de Riegos (NR), Frecuencia de Riegos (FR) y Tiempo de Riego por Sección (TR). En la tabla 1 se muestran los valores obtenidos de la Programación del Riego para la zona El Rosario, donde se aprecia el uso consuntivo del manzano y el número de riegos requeridos para cubrir esos requerimientos. Se puede observar además el NR, LR, PPe, y LT (lámina total), aplicadas durante el 2005 – 2008.

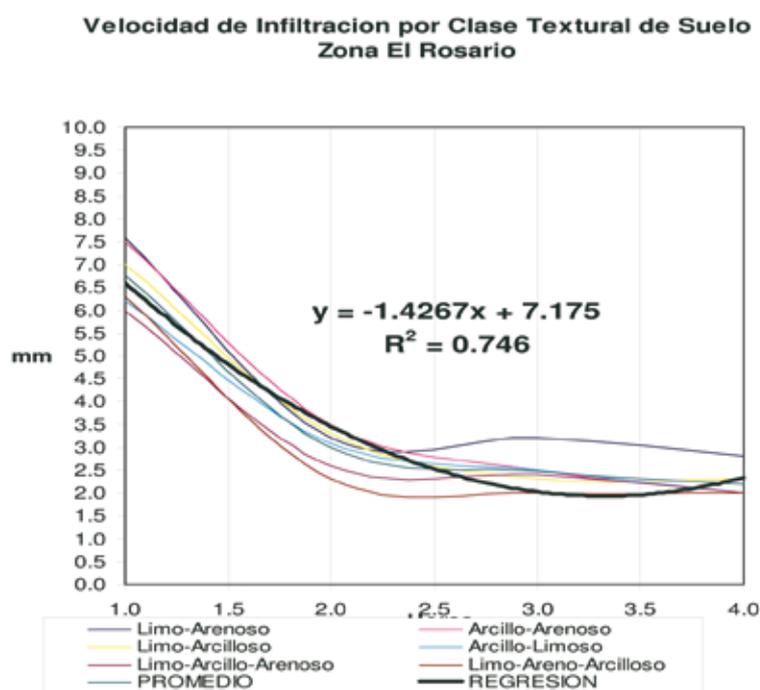


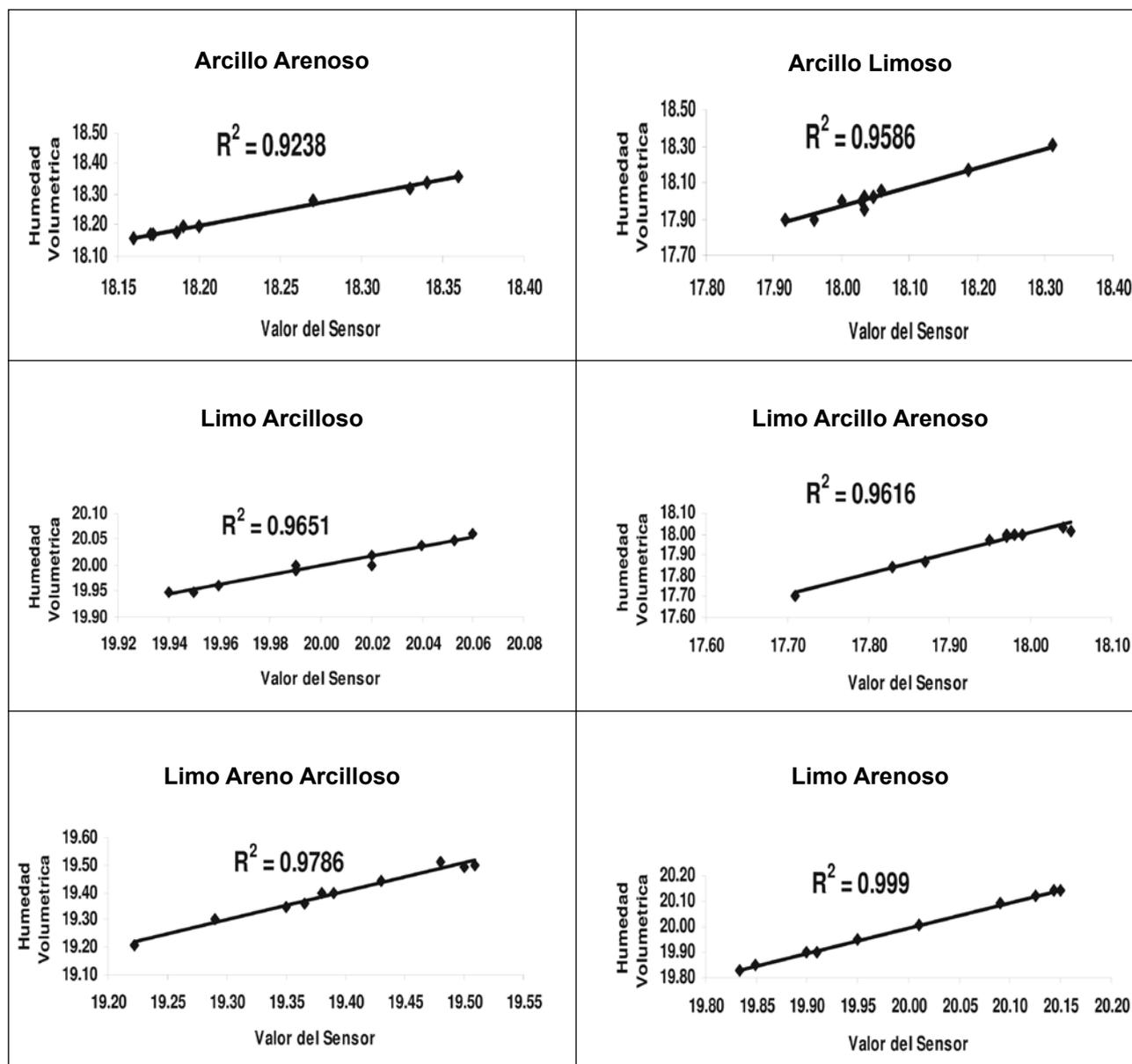
Figura 5. Valores promedio de la velocidad de infiltración expresado en mm/hora

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	12
Febrero	30.52	1.04	1	21.5	12
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	3	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	12
TOTAL	1156.11		41		

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 capaci-

tancia 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 (figuras 6–11).



Figuras 6-11. Respuesta del sensor dieléctrico de la sonda FDR a la humedad volumétrica del suelo en las diferentes texturas encontradas en la zona

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 12 se puede observar la correlación entre CC y LR en la zona El Rosario, siendo la ecuación

lineal de ajuste $y = -1.07548 + 1.10681 \cdot LR$. Existe relación estadísticamente significativa entre CC y LR para un nivel de confianza del 99%. El estadístico R² indica que el modelo explica un 98 % de la variabilidad en CC. El coeficiente de correlación es igual a 0.99, indicando una relación fuerte entre las variables.

En la figura 13 se representan las láminas totales (LT) de agua aplicadas durante los años 2005 al 2007 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 ahorro promedio en el volumen de agua de 4 Mm³ (4.4 Mm³, 4 Mm³ y 3.5 Mm³ respectivamente). 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, como se observa en la figura 14.

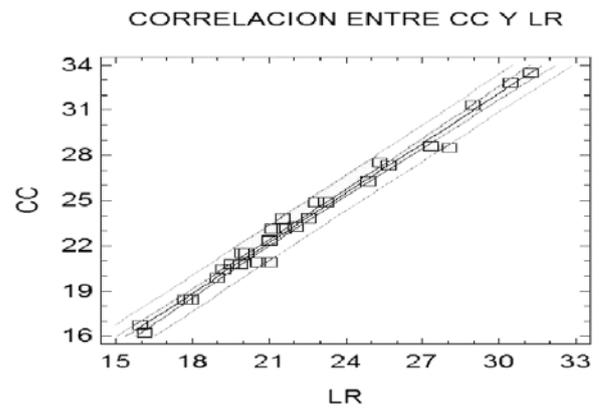


Figura 12. Correlación entre CC y LR durante los años 2005 – 2008

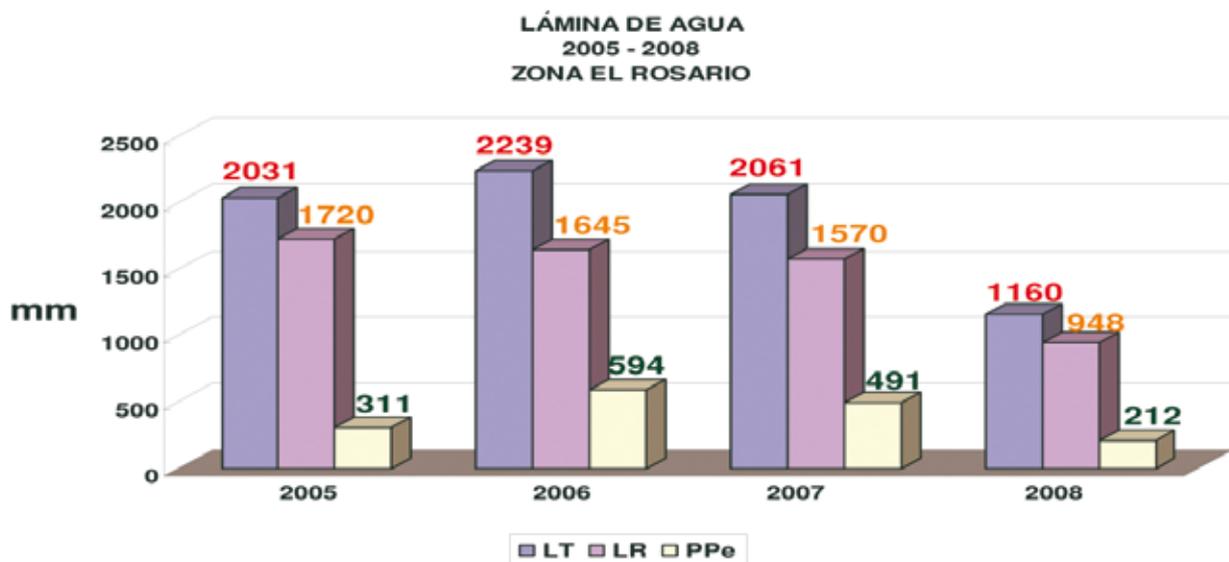


Figura 13. Láminas de agua aplicadas durante los años 2005 – 2008

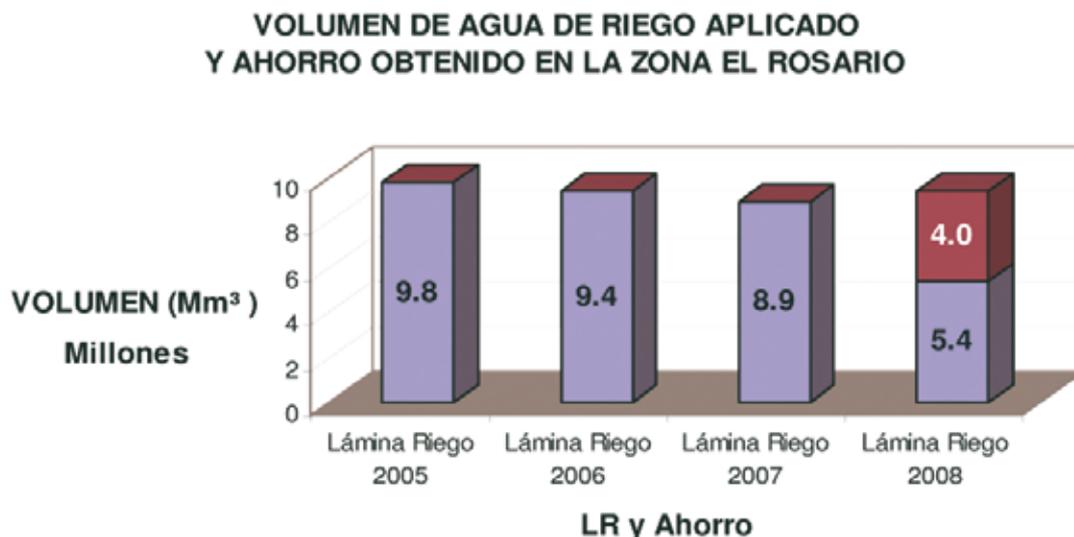


Figura 14. Volúmenes aplicados y ahorro obtenido durante los años 2005 – 2008

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 promedio de 4 Mm³ anuales (45 %).

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

	mm	m ³ /ha	Mm ³ /570 ha	Volumen Excedente (Mm ³)
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	-----

En la figura 15 se representan el consumo de energía eléctrica en la zona El Rosario durante los años 2005 al 2008. El consumo fue de 27 pozos de extracción profunda en 41 riegos durante el 2008. El volumen de agua de extracción que se regó fue de 5.4 Mm³, para las 570 ha. que comprenden los treinta huertos de la zona El Rosario donde se aplicó esta programación, nos dio un total de consumo de electricidad de 1.140,000 Kwh, contra el consumo en los años: 2005

(1.994.000), 2006 (1.938.000) y 2007 (1.966.000), lo que representa un ahorro en el consumo de electricidad de 826,000 Kwh. Durante el 2008 manejando eficientemente el agua de irrigación a través de una programación de riegos, se obtuvieron ahorros significativos de energía eléctrica para la extracción profunda del agua, el porcentaje de ahorro fue del 42 %, comparado con los años 2005, 2006 y 2007.

CONCLUSIONES

**ZONA EL ROSARIO
CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA
27 Pozos profundos para 570 ha.**

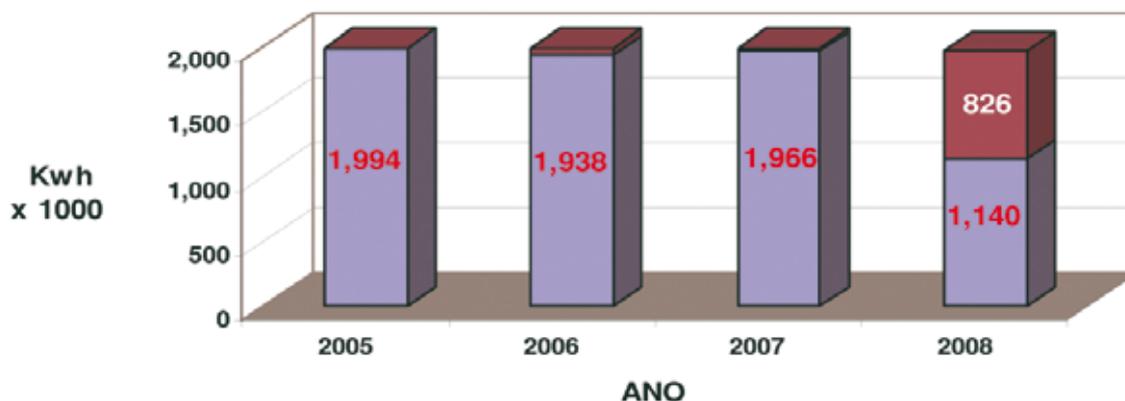


Figura 15. Consumo y ahorro de energía eléctrica durante los años 2005 – 2008

Se obtuvieron ahorros significativos en el volumen de agua de extracción profunda del 45 %, lo que representó 4 Mm³ en 570 hectáreas (7.000 m³/ha.) según se puede observar en las figuras 10 y 11, y en la tabla 2.

El ahorro de energía eléctrica para la extracción de agua con fines de riego fue del 42 %, lo que representó 826.000 Kwh en 27 pozos profundos según se muestra en la figura 12.

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 (figuras 3 - 8), 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 m³/ha., si esta metodología se adoptara, significaría un ahorro de 210 Mm³ para el acuífero.

Finalmente podemos concluir que la programación eficiente del riego a través de sondas de capacitancia (FDR) y el monitoreo del clima en tiempo real, nos indica 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 n° 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, *Evapotranspiration 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.

Anexo 1. Valores de capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la zona El Rosario

LOTE	(PS) (%)	(CC) (%)	(PMP) (%)	(HA) (%)	(DH) (%)	(Da) (gr/ cm ³)	(Hg) (%)	(Hv) (%)	(MR) (%)	(LR) (mm)	CLASE TEXTURAL
Pozo 3	42.00	22.35	13.30	9.05	4.52	1.31	13.87	18.17	17.83	21.02	Arcillo-arenoso
Pozo 2 A	43.50	23.16	13.78	9.38	4.69	1.30	13.99	18.19	18.47	21.61	Arcillo-arenoso
Pozo 2 B	37.50	19.90	11.84	8.06	4.03	1.33	13.40	17.82	15.87	19.00	Limo-arcillo-arenoso
Pozo 4	43.50	23.16	13.78	9.38	4.69	1.27	15.30	19.44	18.47	21.11	Limo-arcilloso
Pozo 9	30.66	16.18	9.63	6.55	3.28	1.39	14.70	20.44	12.90	16.14	Limo-arenoso
Pozo 6	39.33	20.90	12.43	8.46	4.23	1.37	14.58	19.98	16.67	20.55	Limo-arenoso
Frentes 9	38.50	20.44	12.16	8.28	4.14	1.31	13.52	17.71	16.30	19.22	Limo-arcillo-arenoso
Pozo 13	44.66	23.79	14.16	9.64	4.82	1.26	14.11	17.78	18.97	21.51	Arcillo-limoso
Pozo 8	46.66	24.88	14.80	10.08	5.04	1.30	15.18	19.74	19.84	23.21	Limo-arcilloso
Pozo 5	58.50	31.31	18.63	12.68	6.34	1.29	14.11	18.20	24.97	28.99	Arcillo-limoso
Frentes 5	51.58	27.55	16.39	11.16	5.58	1.28	13.87	17.76	21.97	25.31	Arcillo-limoso
Pozo 12	61.33	32.85	19.55	13.30	6.65	1.29	13.99	18.05	26.20	30.42	Arcillo-limoso
Pozo 7	46.66	24.88	14.80	10.08	5.04	1.28	14.11	18.06	19.84	22.85	Arcillo-limoso
Pozo 10	62.50	33.49	19.92	13.56	6.78	1.30	14.94	19.43	26.71	31.25	Arcillo-limoso
Pozo 11	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.31	13.99	18.33	16.59	19.56	Arcillo-limoso
Pozo 1	40.50	21.53	12.81	8.72	4.36	1.29	14.23	18.35	17.17	19.94	Arcillo-limoso
La Estación	39.40	20.93	12.46	8.48	4.24	1.40	14.82	20.75	16.69	21.03	Limo-arenoso
Mayo Verde	31.66	16.73	9.95	6.77	3.38	1.33	14.46	19.24	13.35	15.98	Limo-arenos-arcilloso
Frentes MV	34.75	18.41	10.95	7.45	3.72	1.34	14.35	19.22	14.69	17.71	Limo-arenos-arcilloso
Laterales MV	51.16	27.32	16.26	11.07	5.53	1.31	13.29	17.40	21.79	25.70	Limo-arcillo-arenoso
Presa	40.50	21.53	12.81	8.72	4.36	1.30	13.64	17.73	17.17	20.09	Limo-arcillo-arenoso
Compuerta	44.66	23.79	14.16	9.64	4.82	1.32	13.52	17.85	18.97	22.54	Limo-arcillo-arenoso
Cuchilla	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.33	15.42	20.52	16.59	19.86	Limo-arcilloso
CH-P	43.64	23.24	13.83	9.41	4.70	1.32	13.87	18.31	18.54	22.02	Arcillo-limoso
Vivero	34.75	18.41	10.95	7.45	3.72	1.36	14.35	19.51	14.69	17.98	Limo-arenos-arcilloso
Corrales	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.31	15.55	20.37	16.59	19.56	Limo-arcilloso
Páramo Alto	30.83	16.28	9.68	6.59	3.30	1.38	14.58	20.13	12.98	16.12	Limo-arenoso
Páramo Bajo	53.33	28.50	16.96	11.54	5.77	1.37	14.70	20.14	22.73	28.03	Limo-arenoso
Crucifijo	53.50	28.60	17.01	11.58	5.79	1.33	14.11	18.76	22.81	27.30	Arcillo-limoso
Escapulario	49.20	26.26	15.62	10.63	5.32	1.32	13.87	18.31	20.94	24.88	Arcillo-limoso
PROMEDIO	43.74	23.29	13.86	9.43	4.72	1.32	14.28	18.86		22.18	