

Using LEACHM model for evaluation and optimization of the use low quality water in citrus

A. Hurtado-Soler¹ & J. Batlle-Sales

RESUMEN

Para evaluar el riesgo de salinización en suelos con cultivo de cítricos se utilizó el modelo LEACHM que fue calibrado y validado en 7 perfiles de la cuenca sedimentaria de Torreblanca (Castellón, España). Se aplicó un análisis de escenarios mediante la combinación de: cultivos, clima, suelos, tipo de riego y calidad de las aguas y se analizaron estrategias alternativas mediante la utilización de mezclas de aguas.

Los índices estadísticos mostraron un buen ajuste del modelo en la zona radicular entre 200-600 mm y una sobreestimación de la humedad en los horizontes inferiores. En cuanto al riesgo de salinización los resultados confirmaron el uso inapropiado de las aguas con $CE > 3$ dS/m. Se recomienda el uso de aguas con 2-3 dS/m únicamente en el riego por goteo y se propone una alternativa que disminuya el riesgo de salinización mediante la aplicación de diferentes tipos de agua en función de la estación.

Palabras-clave: Calidad aguas, Modelos, Riego, Salinidad

ABSTRACT

To evaluate the risk of salinization in soils with citrus crop we use the model LEACHM calibrated and validated in 7 profiles of the Torreblanca's sedimentary basin (Castellón, Spain). An analysis of scenes was applied by means of the combination of: crop, climate, soils, type of irrigation and waters quality and analyzed alternative strategies by means of the utilization of water mixtures.

The statistical index indicates a better adjustment of the model in the rootzone between the 200-600 mm and a light up-estimation of the moisture content in the lower layers. As for the risk of salinization the results confirm the inappropriate use of the waters with $CE > 3$ dS/m. The water use with 2-3 dS/m is recommended only in the drip irrigation and there proposes an alternative that diminishes the risk of salinization by means of the application of different types of water depending on the season.

Key-words: Irrigation, Models, Salinity, Water of quality

¹ Universitat de València, Dpto. Biología Vegetal, Avda. Vicente Andrés Estellés s/n 46100 Burjassot, Valencia, España, e-mail: Amparo.Hurtado@uv.es

INTRODUCCIÓN

Entre los diferentes problemas que afectan a la agricultura a nivel mundial, la salinización de los suelos es uno de los más importantes, debido a su efecto limitante sobre el rendimiento de los cultivos. La salinización secundaria producida por el riego con aguas de baja calidad (Rhoades et al., 1992) está conduciendo actualmente al abandono progresivo de miles de hectáreas. Existen cuatro aspectos importantes a tener en cuenta en la utilización de aguas de baja calidad para el riego: (1) la selección de cultivos tolerantes; (2) el mantenimiento de las propiedades físicas del suelo para asegurar una adecuada infiltración, permeabilidad y aireación de las raíces; (3) la adopción de técnicas adecuadas de riego; y (4) la disponibilidad de métodos adecuados de drenaje (Oster, 1999). Para prevenir y controlar el riesgo de salinización se utilizan modelos matemáticos que mediante el análisis de los diferentes escenarios se convierten en una herramienta eficaz de gestión (Hurtado-Soler, 2003).

El desarrollo de modelos se inicia con Dokuchaev y Hilgard en 1882 siendo Jenny en 1961 quien amplió su base científica usando un sistema de análisis aproximado. Esta aproximación es todavía la base de la mayoría de modelos (Hoosbeek et al., 2000). En el suelo los procesos evolucionan de forma continua en las tres direcciones, sin embargo los modelos precisan de unidades discretas abordando el análisis matemático mediante ecuaciones algebraicas. Para ello dividen el suelo en segmentos y ofrecen la información a determinadas profundidades denominadas nodos. Todas estas diferencias en el procedimiento de cálculo así como la simplificación del suelo por los modelos son una fuente de error en los resultados obtenidos.

La utilización de modelos que simulan los

procesos del suelo requieren de unos pasos para asegurar su validez (Batlle-Sales, 2003): Formular la cuestión científica más relevante y decidir si la utilización de un modelo permite resolverla; Conceptualizar el caso de estudio en un modelo y seleccionar el código; Describir el sistema suelo en variables de entrada utilizando los datos disponibles o medidos para elaborar un fichero de entrada; Calibrar el modelo ejecutando numerosos ficheros, mediante la observación de cambios en los ficheros de salida y ajuste de los parámetros del modelo a las condiciones reales; Analizar la sensibilidad de los parámetros para evaluar la magnitud de las diferencias de los resultados como consecuencia de pequeñas variaciones en los parámetros de entrada; Verificar el modelo utilizando los valores medidos en el campo a partir de un juego de datos de inicio y la comparación con los datos reales; Analizar la sensibilidad de las predicciones para evaluar el grado de incertidumbre en los resultados; y finalmente, simular los escenarios posibles. Este aspecto es el más poderoso de la modelización ya que permite evaluar riesgos y ofrece información acerca de la dirección de los procesos y su intensidad.

Entre los modelos de investigación destaca el modelo 1D LEACHM (Hutson & Wagenet, 1992), que ha sido validado y calibrado en numerosas ocasiones y cuya aceptación científica se encuentra avalada por más de diez años de desarrollo. En la calibración del modelo hay que tener en cuenta todos los parámetros susceptibles de ajuste. Algunos se corresponden con situaciones reales y se ajustan directamente, otros, sin embargo son parámetros que deben ser optimizados mediante un análisis de sensibilidad. Para la validación del modelo se utilizan los índices estadísticos (Hagi-Bishow & Bonnell, 2000). Tras la calibración y validación del modelo se pro-

cede al análisis de escenarios y a la evaluación del riesgo de salinización.

El objetivo del presente trabajo es calibrar y validar el modelo LEACHM en suelos agrícolas con cultivo de cítricos tomando la zona de Torreblanca (Castellón) como representativa y evaluar la idoneidad de las calidades de aguas disponibles mediante un análisis de escenarios.

MATERIAL Y METODOS

En 1999 se llevó a cabo un estudio de los suelos de la zona de Torreblanca sobre un área de 30 km² para seleccionar los perfiles representativos de la cuenca. Se tomaron 144 perfiles a tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-90 cm) durante la estación seca y se caracterizaron sus propiedades físicas, químicas y físico-químicas. Con los datos recogidos se elaboró una base de datos georeferenciada y mediante la aplicación de SIG se realizó un mapa digital del terreno.

Para la clasificación y selección de los tipos de suelo representativos de la zona se utilizó una aproximación estocástica mediante la agrupación estadística utilizando los valores de las propiedades más relevantes. Estas propiedades diferenciadas en los perfiles se identificaron utilizando métodos multivariantes de componentes principales. Estos parámetros se utilizaron en el procedimiento de clasificación mediante clusters, jerárquicos o no, para agrupar los perfiles de suelo y obtener los diferentes tipos de suelo de la zona. El número de grupos o clusters definidos fueron ocho.

De acuerdo con los requerimientos de entrada del modelo LEACHM las propiedades físicas más relevantes son la textura, la fracción gruesa y la densidad aparente. Respecto a las propiedades químicas las más

importantes son: pH, CE, RAS, CaCO₃ y MO. El análisis multivariante de componentes principales dio como resultado que las propiedades discriminantes son: C_{Fe}, pHe, % arena, % limo, % fracción gruesa y CaCO₃. Tras la identificación de las propiedades principales se procedió a la agrupación de los perfiles en ocho clases utilizando el agrupamiento jerárquico de variables estandarizadas. Los clusters 1 al 4 corresponden con los campos de cultivo. Los perfiles seleccionados fueron: perfil PRI (cluster 1), perfiles PRII, PRIII y PRVI (cluster 2), perfiles PRIV y PRVII (cluster 3) y perfil PRV (cluster 4).

En cada perfil se colocaron diferentes dispositivos: un tubo de fibra de vidrio (Tenacat) para las medidas de humedad con un aparato TDR, un tubo de PVC para la observación y extracción de agua freática, tensiómetros para medir el potencial matricial, captadores cerámicos de solución del suelo (Rhizon sampler) para medir la CE y captadores de gases para medir el CO₂ (Tabla 1).

En el momento de la apertura de los perfiles se obtuvieron muestras de suelo de cada uno de los horizontes para su análisis en el laboratorio. También se obtuvieron muestras inalteradas para la determinación de las propiedades hidráulicas, así como para el cálculo de la humedad de campo y la densidad aparente. Durante el año 1999-2000 se visitaron los perfiles monitorizados haciendo especial énfasis en la época estival en que se produce el estrés hídrico.

La muestras de aguas de los pozos de riego se muestrearon y analizaron, durante el periodo comprendido entre 1996 hasta 2001, con el fin de estudiar su composición química y la variación temporal de la misma. Los valores de pH, temperatura, Eh, CE, Oxígeno disuelto, alcalinidad, calcio, magnesio y sodio fueron medidos in situ

Tabla 1 - Monitorización del perfil: dispositivos.

PERFIL	TDR Theta (v/v) ¹ (Prof. Max. cm)	Tensiómetros (Profundidad cm)	Captore de CO ₂ (Profundidad cm)	Solución del suelo (Profundidad cm)
PRI	60	10, 40, 60	10, 40, 60	10, 40, 60
PRII	95	15, 35, 65	15, 35, 65	15, 35, 65
PRIII	90	10, 30, 60	10, 30, 60	10, 30, 60
PRIV	50	15, 50	15, 50	15, 50
PRV	40	25	25	25
PRVI	60	15, 45	15, 45	15, 45
PRVII	30	15	15	15

para evitar cambios durante el transporte de las muestras hasta el laboratorio. En el laboratorio se midieron los cationes y aniones de las aguas por cromatografía iónica.

El proceso de calibración permitió escoger entre las diferentes opciones del modelo y optimizarlas para las condiciones experimentales. A partir de las propiedades analizadas del sistema se ejecutó el modelo obteniendo unos resultados estimados que se compararon con las observaciones haciendo corresponder las fechas de salida del modelo con las fechas de monitorización. La calibración y validación del modelo permitió seleccionar las opciones más adecuadas y ajustarlas a los suelos estudiados de forma que se pudieron utilizar como herramienta de diagnóstico y prevención en el análisis de situaciones adversas y como evaluador de la eficacia de las medidas correctoras. El estudio de la correspondencia de los valores estimados por el modelo con los valores medidos se abordó mediante el análisis estadístico con el fin de validar el modelo y determinar su eficacia. Los índices estadísticos utilizados en la validación fueron: el coeficiente de masa residual (CRM), la raíz del error

cuadrático medio (RMSE), eficiencia del modelo (EF) y el coeficiente de determinación (CD), donde P_i son los valores estimados, O_i son las observaciones, \bar{O} la media de las observaciones y n el número de muestras (Figura. 1).

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} * \frac{100}{\bar{O}}$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n\bar{O}} \quad CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$$

Figura 1 - Índices Estadísticos (Hagi-Bishow & Bonell, 2000)

El índice RMSE destaca cuánto sobreestimadas o subestimadas se encuentran las simulaciones respecto de las medidas. El estadístico CD muestra la relación entre la dispersión de los valores de la simulación respecto de la media de las observaciones. El índice EF compara los valores simulados con la media de los valores medidos de manera que un valor negativo de EF indica que la media de las medidas ofrece una

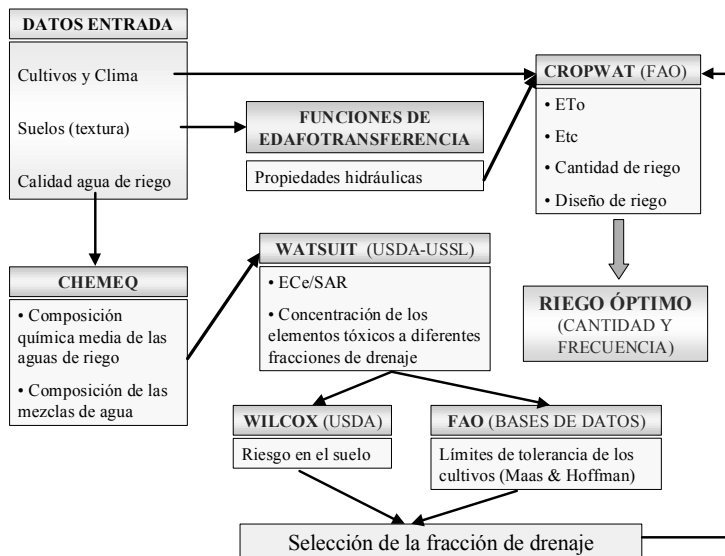


Figura 2 - Procedimiento del análisis de escenarios (Batlle-Sales & Hurtado, 2002)

mejor estimación que las simulaciones. Por último, el índice CRM es un indicador de la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar las medidas. Valores positivos de CRM indican una subestimación por parte del modelo mientras que valores negativos indican una tendencia a sobreestimar las medidas. Un ajuste perfecto entre las observaciones y las simulaciones darían los siguientes valores: RMSE = 0,0, CRM = 0,0, CD = 1,0 y EF = 1,0.

Finalmente se llevó a cabo un análisis de escenarios a partir de los datos climáticos y de suelos, usando ecuaciones de edafotransferencia para estimar las propiedades hidráulicas y se confeccionaron las tablas de datos de entradas necesarias para el diseño de escenarios en el programa CROPWAT. Por otra parte las calidades de las aguas se introdujeron en el modelo CHEMEQ y se calculó la composición de las mezclas y diluciones debidas al efecto de la lluvia. Con estos datos se ejecutó el programa WATSUIT y se seleccionó la

fracción de drenaje óptima basándose en las tablas de tolerancia de los cultivos (Rhoades, et al., 1992) y el diagrama de Wilcox (1948). La fracción de drenaje obtenida se introdujo nuevamente en el programa CROPWAT y se calculó el riego óptimo que fue corregido y evaluado con el modelo LEACHM (Figura. 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los perfiles se clasifican dentro del orden de los Inceptisoles en el suborden Xerepts como Typic calcixerept aunque el perfil PRV presenta un horizonte petrocálcico y el perfil PRVII tiene un contacto lítico a 50 cm de la superficie y por tanto se clasifican como Petrocalcic calcixerept y Lithic calcixerept respectivamente. La estructura es moderada o débil de tamaño fino y en bloques angulares. Son suelos con una consistencia dura y poco plásticos. No hay cementación y los poros son frecuentes

Tabla 2 - Composición química de las aguas de riego

CALIDAD DE AGUA	CE _e dS/m	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	Alcalinidad
		mMol/L						
W1	0,69	4,54	1,44	0,90	0,00	2,16	0,40	4,32
W2	1,26	6,10	2,29	3,80	0,00	7,01	0,90	4,28
W3	2,09	7,49	3,40	8,13	0,09	12,91	1,70	4,50
W4	2,92	14,44	3,74	11,13	0,06	23,94	1,53	3,90
W5	3,80	13,22	6,91	19,70	0,29	29,79	3,31	7,02
W6	4,99	13,14	8,89	32,18	0,17	46,24	4,14	4,00
W7	6,52	9,66	9,65	50,61	0,59	57,64	8,27	4,60
W8	8,53	12,09	11,85	69,65	0,55	79,73	9,12	5,29

de tamaño medio y finos. Hay abundancia de nódulos de naturaleza calcárea de tamaño fino. En cuanto a la actividad biológica es moderada y se observa la presencia de raíces de todos los tamaños en todos los horizontes. La condición del límite inferior es de drenaje libre para todos los perfiles excepto para el perfil PRV que presenta una capa freática a 40 cm de profundidad. En este perfil se observan rasgos de hidromorfismo en la zona comprendida entre 40-42 cm. Se observa un elevado contenido de fragmentos gruesos en todos los perfiles (0,16-0,74) por lo que presentan una elevada macroporosidad.

Los resultados del análisis de las aguas subterráneas ponen en evidencia un fuerte proceso de mezcla de las aguas cársicas con agua marina. Este proceso de intrusión marina se debe a la sobreexplotación de los acuíferos costeros. Las aguas de los pozos de riego presentan conductividades que oscilan entre 0,6-8,5 dS/m y el RAS entre 1-17 (Tabla 2). Estas aguas tienen una predominancia en calcio sobre el resto de cationes, esto es importante porque

disminuye la RAS y el PSI. Las aguas de riego de Torreblanca tienen un CSR < 0 por tanto no se forma carbonato sódico residual. No obstante en algunos campos se ha observado la formación de láminas superficiales muy finas formando una pequeña costra pelicular aunque se trata de situaciones puntuales que podrían provocar una ligera disminución de la permeabilidad.

En la calibración del modelo, los parámetros que mayor sensibilidad presentan son: los intervalos de tiempo, el número de nodos, la condición del límite inferior, la ecuación de flujo, el modelo de retención, la pendiente, el número de curva, el potencial mínimo de la raíz, la cobertura, la profundidad de las raíces, el factor del cultivo y la dispersividad. El modelo de retención de humedad que mejor ajusta a las condiciones experimentales es el de Rawls & Brakensiek (1985) contenido en el LEACHM. Este modelo permite el cálculo de la humedad para numerosos potenciales matriciales definiendo con mucha precisión las curvas de humedad. Los resultados de la validación del

modelo muestran un elevado paralelismo de las observaciones y las estimaciones obtenidas en el modelo, sobre todo en la zona radicular. Este paralelismo disminuye en la parte química (CEe) debido principalmente a la propagación de errores ya que la rutina del equilibrio químico se produce con posterioridad al transporte de agua (Tabla 3). Por otra parte, hay que tener en cuenta que la toma de muestras se realizó mediante un método destructivo, por tanto las medidas se realizaron cada vez en un punto diferente. En cuanto al método de obtención de la solución se trata de un método indirecto a partir de muestras llevadas al laboratorio cuyos resultados pueden diferir de los obtenidos a partir de métodos directos (Palacios *et al.*, 1999). Hay que tener en cuenta que el modelo es unidimensional y no tiene en cuenta la dispersión lateral, limitando la dispersión longitudinal al intervalo dependiente del número de nodos que para suelos francoarcillosos tiene un valor superior (Perfect *et al.*, 2002). Los campos presentan una gran heterogeneidad espacial que se puede representar mediante mapas de conductividad obtenidos con EM38 (Batlle-Sales *et al.*, 2000). La macroporosidad y el flujo preferente son factores no considerados en el

modelo.

En el análisis de escenarios los resultados de la evaluación de las calidades de agua de riego W1, W2, W3 y W4 se han obtenido los patrones de riego óptimo para el cultivo de cítricos. Se trata de un cultivo muy sensible con patrones poco resistentes a la toxicidad por cloruros cuyos umbrales de tolerancia son 1,7 dS/m y 10 mmol/L respectivamente. El patrón de riego optimizado presenta las siguientes características: El balance de agua permite la recarga del acuífero durante todo el año cubriendo las necesidades del cultivo sin que aparezca en ningún momento déficit hídrico ni utilización de las reservas de agua del suelo. La humedad se mantiene constante durante todo el año minimizando el potencial matricial que se encuentra por debajo de -100 kPa excepto en el perfil PRV y en algunos meses de los perfiles PRVI y PRVII. Estos perfiles presentan valores de arcilla mayores que el resto de los perfiles y requieren de cantidades de riego algo mayores. En estas condiciones no se produce estrés hídrico para el cultivo, sin embargo si puede existir un estrés osmótico debido a la concentración de sales en el suelo si se utilizan las aguas de calidades W4, W5 y W6. El movimiento de agua a

Tabla 3 - Validación del modelo mediante índices estadísticos

Perfil	Humedad				CEe			
	EF	CD	RMSE	CRM	EF	CD	RMSE	CRM
PRI	0,94	0,85	5,25	0,00	0,86	1,10	10,32	0,04
PRII	0,90	0,76	5,22	0,00	0,91	1,43	54,57	0,23
PRIII	0,92	0,94	3,33	-0,01	0,89	1,10	15,02	0,06
PRIV	0,88	0,84	4,85	-0,03	0,72	0,92	25,21	-0,13
PRV	0,91	1,17	2,56	-0,02	0,94	1,39	87,81	0,68
PRVI	0,86	0,87	5,27	-0,02	0,92	0,82	15,52	-0,04
PRVII	0,87	0,80	4,26	0,00	0,75	1,29	25,85	-0,03

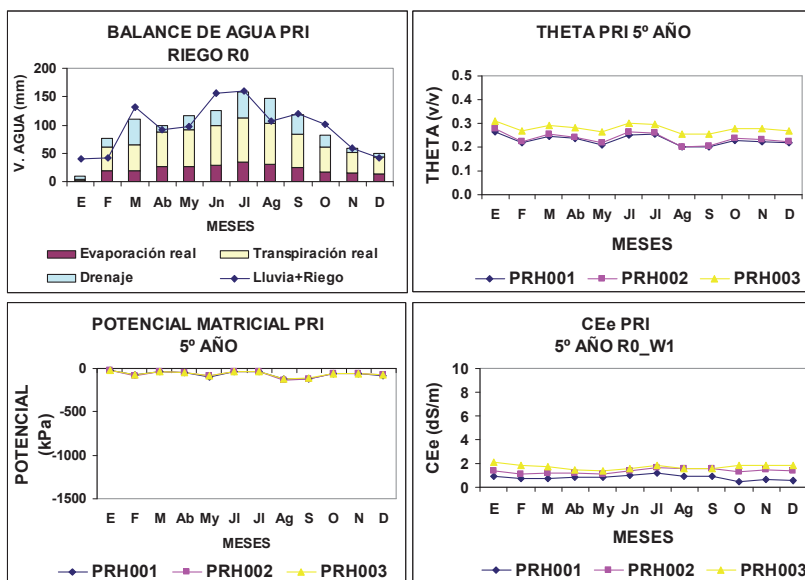


Figura 3 - Diseño de riego óptimo PRI

través del perfil se produce en todos los horizontes existiendo un drenaje constante hacia el acuífero y por tanto evitando la acumulación de sales en el perfil (Figura 3).

En la evaluación de la utilización de mezclas los resultados muestran una mejor eficiencia al utilizar aguas de baja calidad en invierno y aguas de mejor calidad en verano en lugar de utilizar aguas de diferente calidad mezcladas en balsa. Ello es debido a que durante el invierno la lluvia provoca una dilución de las sales acumuladas por el uso de aguas salinas y durante el verano el agua de mejor calidad impide la acumulación de sales que no pueden ser lavadas por la lluvia. De esta forma se garantiza un lavado constante de las sales (Hurtado-Soler, 2003).

CONCLUSIONES

La calibración y validación del modelo

LEACHM para la zona agrícola de Torreblanca mediante la evaluación con índices estadísticos muestra la validez del modelo con una eficiencia $> 0,85$ en la parte hidráulica y $> 0,75$ en la parte química. Entre las limitaciones más importantes del modelo se encuentra: que la ecuación de Richards no considera la fracción gruesa, que el modelo no tiene en cuenta las vías preferentes de flujo (bypass-flow) y que presenta un desarrollo incorrecto de la rutina de los carbonatos.

En la evaluación del riesgo de salinización de las aguas de riego se observa la insostenibilidad del riego con aguas con CE superior a 3 dS/m y se recomienda clausurar los pozos. Se propone una estrategia de riego (R0) optimizada para el riego convencional que distribuye el riego más eficientemente evitando las pérdidas por escorrentía y manteniendo constante la humedad del suelo todo el año.

Finalmente, como alternativa a la utilización de aguas con CE ≈ 2 dS/m (W3), se

propone la utilización de la peor calidad de agua ($CE \approx 2$ dS/m, W3) en invierno y del agua de mejor calidad ($CE < 1,5$ dS/m, W1-W2) en verano frente a la mezcla de ambas calidades en una balsa y riego con calidad intermedia.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado forma parte de la Tesis Doctoral de la Dra. Desamparados Hurtado Soler dirigida por el Dr. Jorge Batlle Sales realizada al amparo del Proyecto de Investigación "An integrated approach for sustainable management of lands susceptible to degradation/desertification", PL970598 ENV4-CT97-0681 European Commission, Directorate General XII (Science, Research and RTD).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Batlle-Sales, J. 2003. Scaling up the results of ID simulation models. In J. M. Lynch, J. S. Schepers & I. Ünver (ed). *Innovative Soil-Plant Systems for sustainable Agricultural Practices*. OECD. Izmir. Turkey.
- Batlle-Sales, J., Hurtado, A. & Batlle-Montero, E. 2000. Cartografía cuasi-tridimensional de cambios multitemporales en la salinidad mediante medida del campo electromagnético inducido y geoestadística. In R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibañez-Huerta y N.E. García-Calderón (eds.). *La Edafología y sus perspectivas al siglo XXI*. Tomo II. Colegio de Postgraduados, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Hagi-Bishow, M. & Bonnell, R. B. 2000. Assessment of LEACHM-C model for semi-arid saline irrigation. *ICID Journal*, 49 (1):29-42.
- Hoosbeek, M., R., Amundson, R. G. & Bryant R. B. 2000. Pedological modeling. In Sumner, M. E. (ed.) *Handbook of Soil Science*. CRC Press. Boca Raton.
- Hurtado-Soler, A. 2003. Uso del modelo LEACHM para la evaluación del riesgo de salinización en suelos bajo riego. Tesis Doctoral. Universitat de València.
- Hutson, J. L. & Wagenet, R. J. 1992. LEACHM: Leaching Estimation and Chemistry Model: A process based model of water and solute movement transformations, plant uptake and chemical reactions in the saturated zone. Version 3. Research Series N° 92-3. Dept. of Soil, Crop, and Atmospheric Sciences, Cornell University. Ithaca. New York.
- Oster, J. D. 1999. Use of marginal quality waters for irrigation. In Dr. Nassim Al-Abed (ed.) *Irrigation management and saline conditions*. Proceedings Regional Symposium Just. Irbid. Jordan.
- Palacios, M. P., Pardo, A., Del-Nero. E. & Rodríguez, F. 1999. Estudio comparativo de la solución extraída por pelos radicales, cápsulas cerámicas y el extracto saturado, en condiciones de laboratorio. In R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón (eds.) *Estudios de la Zona no Saturada del suelo*. ICIA. Tenerife.
- Perfect, E., Sukop, M. C. & Haszler, G. R. 2002. Prediction of dispersivity for undisturbed soil columns from water retention parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66:696-701.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A. & Mashali, A. M. 1992. The use of saline water for crop production. *FAO Irrigation and Drainage Paper 48*. Rome. Italia.
- Suárez, D. L. & Simunek, J. 1997. UTSAT-CHEM: Unsaturated water and solute transport model with equilibrium and kinetic chemistry. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 61 (6):1633-1646.