

MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE SALES EN UN SUELO CON CULTIVO DE TOMATES BAJO RIEGO LOCALIZADO

G. E. Vargas¹ y A. Rodríguez-Rodríguez¹

¹ Departamento de Edafología y Geología. Facultad de Biología. Universidad de La Laguna. (e-mail: antororo@ull.es)

RESUMEN. Se realiza una simulación de la distribución de la salinidad en suelos agrícolas de regadío, utilizando para ello un modelo de transporte de multicomponentes en medio poroso variablemente saturado, UNSATCHEM-2D (Simunek y Suarez, 1993b). Este modelo se ha utilizado para simular la distribución de sales en un cultivo de tomates de la isla de Fuerteventura. El suelo de cultivo es un Calcisol léptico, el sistema de riego es localizado de alta frecuencia (goteo) con aguas de pozo que presentan un alto riesgo de salinización del suelo ($CE = 7840 \mu\text{S}/\text{cm}$) y el cultivo, como se ha dicho, es tomate de la variedad *Daniela*. El modelo simula que a los 100 días de implantado el cultivo se produce una fuerte acumulación salina en los primeros 10 cm del suelo a unos 35 cm de distancia del gotero, llegando a alcanzar la solución edáfica más de 300 dS/m en los primeros 2 cm superficiales y descendiendo rápidamente con la profundidad. La distribución de isolíneas de conductividad eléctrica al finalizar el cultivo (270 días), muestra una distribución más homogénea de la salinidad que la obtenida para los 100 días de cultivo y además la zona de máxima acumulación de sales aparece mucho más cerca del punto de goteo (18-20 cm). Según el modelo, la máxima acumulación de sales en la superficie del suelo tiene lugar, en la simulación de 100 días, en una franja situada entre 30 y 40 cm de distancia al gotero mientras que al final del cultivo (270 días), la zona de acumulación salina se desplaza hacia el gotero, en una franja situada entre 15 y 25 cm del punto de goteo, debido a las menores dimensiones del bulbo hídrico. El modelo también predice un desplazamiento de la zona de acumulación de sales hacia el punto de goteo, y que esta franja se sitúa a unos 8-11 cm (depende de la época) alejada de la zona, donde la humedad en la superficie del suelo alcanza el punto de marchitamiento. Se concluye que en la zona de desarrollo radicular de las plantas, las condiciones de salinidad se mantienen siempre por debajo de los niveles críticos para el crecimiento del cultivo, debido a que el sistema de riego utilizado favorece la formación de un bulbo hídrico donde se produce un desplazamiento de las sales hacia las zonas superficiales de los espacios entre goteros. Sin embargo las sales continúan existiendo y acumulándose en los primeros 50 cm del suelo, lo que conlleva a una *salinización oculta*, proceso en el que la utilización de modelos como el UNSATCHEM-2D u otros similares podrían ser de gran utilidad para predecir las zonas de acumulación de sales y diseñar las prácticas de manejo más adecuadas para el suelo.

ABSTRACT. The distribution of salinity in irrigated

agricultural land was simulated using a multicomponent transfer model in variably saturated porous medium, UNSATCHEM-2D (Simunek and Suarez, 1993b). The necessary inputs for the model UNSATCHEM-2D are the concentration of the major ions (calcium, magnesium, sodium, potassium, sulfates, chlorides and nitrates), alkalinity (carbonates and bicarbonates), concentrations in adsorbed and solid phases, water content (field capacity and wilting point), bulk density and partial CO_2 pressure. The absorption of water by the roots depends on the hydric potential difference between inside and outside the roots. The osmotic potential values are obtained by the model by using the osmotic coefficients and the modified equation of van't Hoff, the absorption of solutes by the plant roots being considered negligible. This model was used to simulate the distribution of salts in a tomato crop on the island of Fuerteventura. The soil involved is a leptic Calcisol, the irrigation system is localized high-frequency (drip) with well-water that presents a high risk of soil salinization ($CE = 7840 \text{ dS}/\text{cm}$) and the crop, as stated above, is tomato of the Daniela variety. 100 days after crop planting a marked accumulation of salts was simulated in the first 10 cm of the soil to a distance of 35 cm from the point of irrigation, the soil solution reaching more than 300 dS/m in the first 2 cm at the surface and quickly descending with depth. The model showed that distribution of electrical conductivity isolines at the end of the cropping period (270 days) was more homogeneous than that obtained 100 days after planting and, moreover, the zone of maximum accumulation of salts was much closer to the point of irrigation (18-20 cm). The maximum accumulation of salts at the soil surface takes place, in the 100-day simulation, in a strip situated between 30 and 40 cm from the irrigation point while, at crop end (270 days), the zone of salt accumulation is found to be closer to the point of irrigation, in a strip located between 15 and 25 cm from the watering point, due to the smaller dimensions of the water bulb. In addition, not only does the zone of salts accumulation shift towards the point of irrigation, but it is also observed that this strip is situated some 8-11 cm (depending on the season) distant from the zone where the surface soil moisture reaches wilting point. It is concluded that, in the area of plant root development, conditions of salinity are constantly maintained below critical levels for crop growth, due to the fact that the irrigation system used enhances the formation of a water bulb where the salts are displaced towards the surficial areas between the points of irrigation. However, the salts remain and accumulate in the first 50 cm of the soil, giving place to a hidden salinization, a process

in which the application of models such as UNSATCHEN-2D or similar may prove to be very useful in order to predict the areas of salts accumulation and design the most suitable agricultural practices for the soil.

1.- Introducción

Un modelo realista de la química de la zona radicular tiene que tener en cuenta los procesos que tienen lugar en las fases sólida, líquida y gaseosa. Los factores más importantes que influyen en este sistema químico y dinámico son el flujo del agua, el transporte de calor y los cambios en la concentración de CO₂ (Simunek y Suárez, 1994a).

En las décadas de los 70 y 80 se desarrollaron algunos modelos hidrológicos de flujo de agua, transporte de solutos y equilibrio químico en disoluciones acuosas; pero de forma independiente y aislada (Gureghian, 1981; Yeh y Huff, 1985; Wagenet y Hutson, 1987; Liu y Narasimhan, 1989). En esta década se han comenzado a integrar los modelos hidrológicos para el flujo de agua con los de transporte de solutos y de equilibrio químico, desarrollándose modelos de transporte hidrogeoquímicos de multicomponentes químicos (Yen y Tripathi, 1989; Mangold y Chin-Fu Tsang, 1991). La mayoría de estos modelos son unidimensionales y se han estudiado en medios saturados, donde los cambios de la velocidad del agua, temperatura y pH son relativamente graduales y menos importantes que en medios no saturados o variablemente saturados (Valocchi et al., 1981; Jennings et al., 1982; Walsh et al., 1984; Cederberg et al., 1985; Kirkner et al., 1985; Bryant et al., 1986; Förster y Gerke, 1988).

Sólo recientemente se han publicado algunos trabajos que incluyen el transporte de solutos y el flujo de agua en medios no saturados (Yen y Tripathi, 1991; Simunek et al.,

1992; Simunek y Suárez, 1993b; Simunek y van Genuchten, 1993; Simunek y Suárez, 1994a y b).

Modelizando la distribución espacial y el flujo de CO₂ se ha encontrado una correlación con parámetros específicos como temperatura del aire, temperatura del suelo y contenido de agua en el suelo (Ouyang y Boersma, 1992; Simunek y Suárez, 1993a). Basado en ello, Simunek y Suárez (1993a) desarrollaron el modelo SOILCO2 con variables de flujo de agua en medio variablemente saturado, calor, transporte y producción biológica de CO₂.

Estos mismos autores acoplaron el modelo SWMS-2D bidimensional de transporte de solutos y flujo de agua en medio variablemente saturado (Simunek et al., 1992), con una versión expandida del modelo de especiación CARBCHEM (Suárez, 1977) y con el modelo de producción y transporte de CO₂ (SOILCO2 de Simunek y Suárez, 1993a). El resultado es un modelo de transporte de multicomponentes en medio poroso variablemente saturado, UNSATCHEM-2D (Simunek y Suárez, 1993b) que es aplicable en condiciones de pH > 6. Este modelo es el que se ha aplicado en este trabajo con objeto de simular la distribución en el suelo de las sales aportadas por el agua de riego, en un cultivo de tomates en regadío en la isla de Fuerteventura (I. Canarias).

2.- Material y métodos

El suelo de cultivo se ha clasificado entre los Calcisoles lépticos, el sistema de riego es localizado de alta frecuencia (goteo) con aguas de pozo que presentan un alto riesgo de salinización del suelo (CE = 7840 µS/cm) y el cultivo, como se ha dicho, tomates de la variedad Daniela. Las características químicas de la solución del suelo medidas en extracto de saturación aparecen en la Tabla 1, y en ella se observa que la muestra bajo goteros (TFG) corresponde a un suelo fuertemente salino, mientras que la situada entre los goteros (TFI) a uno extremadamente salino.

Tabla 1.-Propiedades químicas del suelo (extracto de saturación) TFG (muestra bajo goteros) TFI (muestra entre los goteros)

MUESTRA	CE (dS/m)	Ca ²⁺ (meq/L)	Mg ²⁺ (meq/L)	Na ⁺ (meq/L)	K ⁺ (meq/L)	SAR (meq/L) ^{0,5}
TFG	12,37	27,0	20,2	94,4	0,8	19,4
TFI	17,26	34,4	32,9	125,7	0,9	21,7

Los valores de SAR son siempre superiores a 10 (meq/L)^{0,5} y el porcentaje de sodio intercambiable supera el 8,6%, nivel en el que se ven afectadas las tasas de crecimiento de este cultivo.

Tabla 2. Características físicas de las muestras de suelo (primeros 30 cm)

	θc (g/cm ³)	θm (g/cm ³)	DA (g/cm ³)	CHS (mm/h)
TFG	0,27	0,14	1,46	62
TFI	0,25	0,13	1,47	40

θc Contenido volumétrico de agua punto de marchitamiento DA Densidad aparente CHS Conductividad hidráulica saturada

En la Tabla 2 se pueden ver algunas características físicas de las muestras y en la Tabla 3, las características climáticas de la finca estudiada.

El análisis químico del agua de riego (Tabla 4) muestra que se trata de aguas salinas, con un predominio de sodio, cloruros y sulfatos en su composición iónica media.

Tabla 3.- Datos climáticos de la finca

Mes	S	O	N	D	E	F	M	A	M
Eo	210,8	176,7	99,2	96,1	93,0	127,1	148,8	186,0	176,7
ETP	49,6	65,1	49,6	58,9	62,0	83,7	99,2	124,0	117,8
Cc	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Co	0,35	0,55	0,75	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
P	1,4	4,5	12,7	18,9	10,4	11,4	6,3	2,4	0,4
Tmáx	25,9	24,5	21,5	19,1	18,7	19,4	20,4	20,6	22,7
Tmín	18,1	17,2	14,9	13,3	12,4	12,4	12,9	13,2	14,9

Eo Evaporación tanque clase A (mm) Granja Experimental de Pozo Negro del Cabildo Insular de Fuerteventura ETP Evapotranspiración del cultivo de tomate (mm) adaptado al estado vegetativo del cultivo (Hernández y Pérez, 1990a y 1990b) Cc Coeficiente del cultivo (ETP/Eo) Co Coeficiente de ocupación del cultivo (Hernández y Pérez, 1990a y 1990b) P Pluviometría media mensual (mm) de las estaciones Gran Tarajal y Faro Entellada Tmáx y Tmín Temperaturas máximas y mínimas medias mensuales de la estación Los Estancos

Tabla 4.- Análisis químico del agua de riego

CE (dS/m)	7,84
pH	7,7
Ca ²⁺ (meq/L)	14,4
Mg ²⁺ (meq/L)	16,5
Na ⁺ (meq/L)	52,2
K ⁺ (meq/L)	0,7
SAR (meq/L) ^{0,5}	13,3
Cl ⁻ (meq/L)	49,8
SO ₄ ²⁻ (meq/L)	28,3
CO ₃ ²⁻ (meq/L)	0,0
HCO ₃ ⁻ (meq/L)	5,5
NO ₃ ⁻ (meq/L)	0,0

Los inputs necesarios para el modelo UNSATCHEM-2D son las concentraciones de los iones mayores (calcio, magnesio, sodio, potasio, sulfatos, cloruros y nitratos), alcalinidad (carbonatos y bicarbonatos), concentraciones en las fases adsorbida y sólida, contenido de agua (capacidad de campo y punto de marchitamiento), densidad aparente y presión parcial de CO₂. La absorción de agua por las raíces depende de la diferencia de potencial hídrico entre dentro y fuera de la raíz. Los valores de potencial osmótico los obtiene el modelo usando los coeficientes osmóticos y la ecuación modificada de van't Hoff, y la absorción de solutos por las raíces de las plantas se considera despreciable.

Las concentraciones volumétricas de CO₂ en la fase líquida y en la fase gaseosa las calcula el modelo aplicando un programa de especiación (carbonatos, bicarbonatos y otras especies complejadas) y la ley de Henry (Simunek y Suárez, 1993b). Se consideran dos procesos de producción de CO₂, uno por los microorganismos del suelo y otro por la respiración de las raíces de las plantas. Se aplican también al modelo, coeficientes de reducción que dependen de la profundidad, temperatura, contenido de agua en el suelo, concentración de CO₂, potencial osmótico y tiempo.

El sistema químico incluye cinco grupos de especies químicas (especies en disolución, especies complejadas, especies precipitadas, especies adsorbidas y especies que constituyen el sistema CO₂-H₂O).

La precipitación y disolución de la calcita se ve reducida por la presencia de inhibidores (arcilla, materia orgánica, etc.); Simunek y Suárez (1993b) desarrollaron también una función para tener en cuenta esta disminución debido a

interacciones con carbono orgánico disuelto, según datos experimentales de Inskeep y Bloom (1986); por tanto es un modelo que tiene en cuenta además la cinética de la precipitación de la calcita.

El cálculo de los coeficientes de actividad iónica lo realiza utilizando la ecuación extendida de Debye-Hückel (Truesdell y Jones, 1974) o las expresiones Pitzer (Pitzer, 1979).

3.- Resultados y discusión

Utilizando el modelo se hizo una simulación en el tiempo hasta 270 días (9 meses de cultivo), considerando que la implantación del cultivo fue en el mes de septiembre.

La simulación se hizo desde una zona de gotero (G), tomando una distancia de 100 cm hasta el pasillo y hasta una profundidad de 1 metro y considerando que se riega con un agua salina (Tabla 4) todos los días hasta la capacidad de campo (6,9 L/m²/día).

En las Figuras 1 a 3 se puede observar la distribución del agua en el suelo expresada como contenido volumétrico (θ) después de 25, 100, y 270 días de simulación. El rectángulo del vértice superior izquierdo se corresponde con la zona ocupada por el sistema radicular de la planta (7 x 20 cm). Podemos observar en las Figuras 1 y 2 como en la zona del gotero aparecen unos contenidos de humedad superiores al punto de marchitamiento hasta los 100 cm de profundidad simulados, mientras que en la Figura 3 (270 días) se observa humedad suficiente sólo hasta unos 75 cm de profundidad, a partir de los cuales ya se alcanzan valores por debajo del punto de marchitamiento. Si nos alejamos del gotero hacia el pasillo el contenido de humedad va disminuyendo rápidamente y a una distancia de unos 19 cm del gotero (100 días de cultivo, Figura 2) o de unos 7 cm (270 días de cultivo, Figura 3) ya se alcanzan valores de humedad por debajo del punto de marchitamiento.

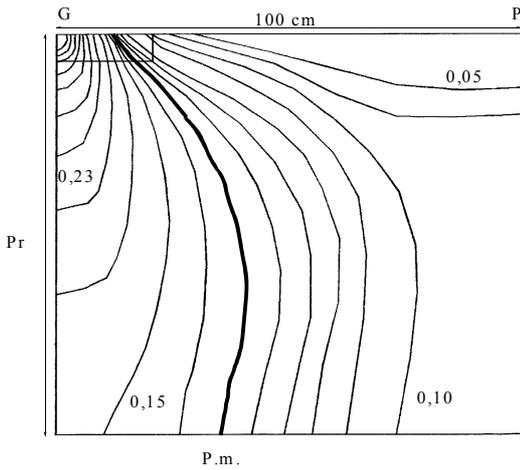


Fig. 1. Distribución del agua en el suelo (g/cm^3) después de 25 días de cultivo. Pr Profundidad (cm). P.m. Contenido volumétrico de agua en el punto de marchitamiento

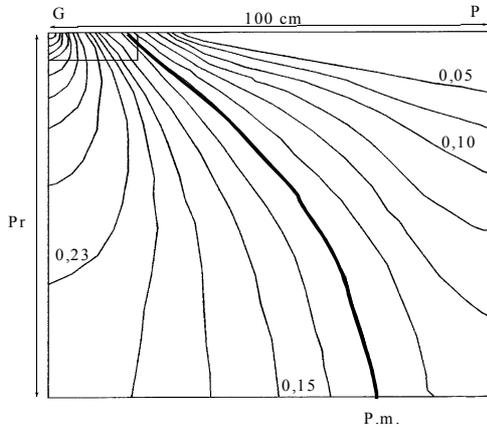


Fig. 2. Distribución del agua en el suelo (g/cm^3) después de 100 días de cultivo. Pr Profundidad (cm.). P.m. Contenido volumétrico de agua en el punto de marchitamiento.

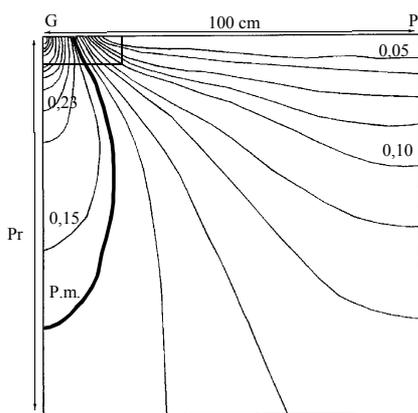


Fig. 3. Distribución del agua en el suelo (g/cm^3) al finalizar el cultivo (270 días). Pr Profundidad (cm). P.m. Contenido volumétrico de agua en el punto de marchitamiento.

En la Figura 4 se pueden observar las isolíneas de conductividad eléctrica después de 100 días de cultivo y vemos como se produce una acumulación de sales fundamentalmente en superficie y a una distancia de 35 cm

del gotero.

La simulación indica pues, que se produce una fuerte acumulación salina en los primeros 10 cm de profundidad a unos 35 cm de distancia del gotero, llegando a alcanzar la solución edáfica más de 300 dS/m en los primeros 2 cm superficiales (Figura 5).

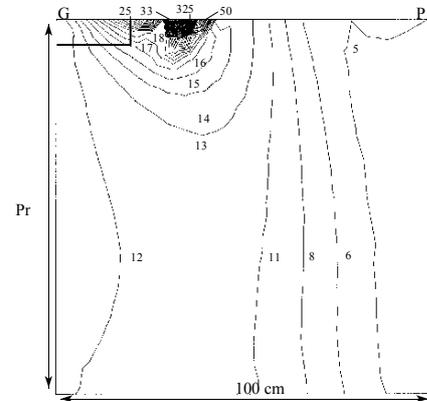


Fig. 4. Distribución de las sales (CE en dS/m) en el suelo después de 100 días de cultivo. Pr Profundidad (cm).

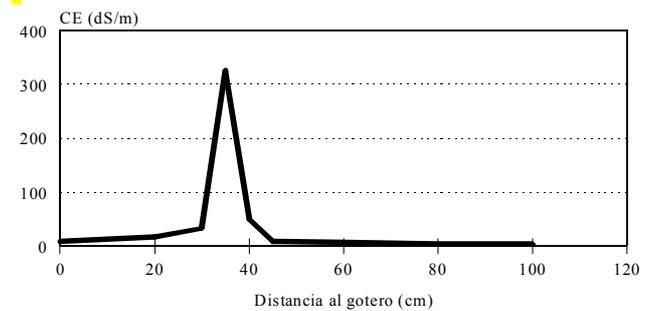


Fig. 5. Distribución de la variación de la CE (dS/m) en la solución del suelo a 0-2 cm de profundidad, después de 100 días de cultivo.

En la zona de máxima acumulación salina, los valores de conductividad eléctrica se encuentran en los primeros centímetros de la superficie del suelo, descendiendo rápidamente con la profundidad (Figura 6).

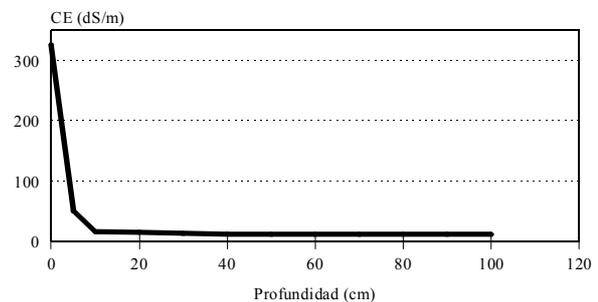


Fig. 6. CE vs. Profundidad a 35 cm de distancia del gotero después de 100 días de cultivo.

A un metro de profundidad, la salinidad (del orden de 13 dS/m) se mantiene constante hasta los 50 cm de distancia del gotero, a partir de donde desciende espectacularmente (hasta 5 dS/m) (Figura 7).

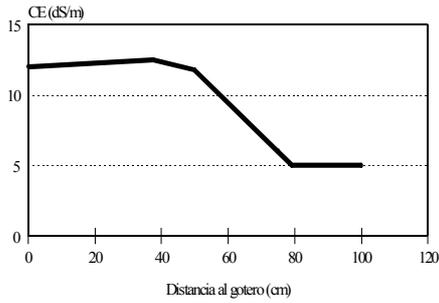


Fig. 7. Variación de la CE en la solución del suelo a 100 cm de profundidad, luego de 100 días de cultivo.

La distribución de isolíneas de conductividad eléctrica al finalizar el cultivo (270 días), muestra una distribución más homogénea de la salinidad que la obtenida para los 100 días de cultivo y además ya la zona de máxima acumulación de sales (300 dS/m) aparece mucho más cerca del punto de goteo (18-20 cm) (Figuras 8 y 9).

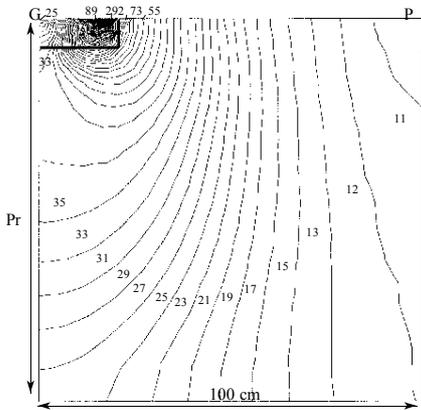


Fig. 8. Distribución de las sales (CE en dS/m) en el suelo al finalizar el cultivo (270 días). Pr Profundidad (cm).

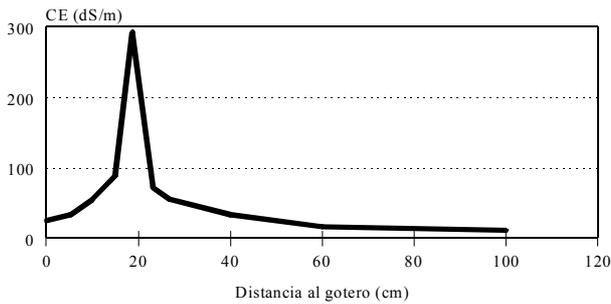


Fig. 9. Variación de la CE en la solución del suelo a 0-2 cm de profundidad, al finalizar el cultivo (270 días)

En esta zona de acumulación de sales, los valores más altos de conductividad eléctrica se encuentran en la superficie, descendiendo rápidamente con la profundidad.

Los contenidos volumétricos de agua en los distintos tiempos simulados y para valores de humedad mayores o iguales al punto de marchitamiento, delimitan una circunferencia en la superficie del suelo de unos 10 cm de radio y cuyo centro es el punto de goteo.

La superficie de esta circunferencia o zona de humectación varía con la evaporación (E_o), evapotranspiración (ETP), pluviometría (P) y coeficiente

de ocupación del cultivo (C_o), de tal forma que alcanza el valor máximo en el mes de Diciembre (100 días de simulación, 19 cm de radio) (Figura 10), en el cual y como podemos ver en la Tabla 3 los valores de evaporación son bajos y los de pluviometría altos.

La menor superficie de humectación la encontramos al finalizar el cultivo (mes de Mayo, 7 cm de radio) en el que las tasas de evaporación y evapotranspiración del cultivo son altas y los valores de pluviometría son los más bajos (Figura 11).

La acumulación de sales en la superficie del suelo tiene lugar, en la simulación de 100 días (Figura 10), en una franja situada entre 30 y 40 cm de distancia al gotero y al final del cultivo (270 días) vemos como la zona de acumulación se ha desplazado hacia el gotero, en una franja situada entre 15 y 25 cm del punto de goteo (Figura 11), debido, como hemos comentado anteriormente a las menores dimensiones del bulbo hídrico en estas condiciones.

Además, no sólo existe un desplazamiento de la zona de acumulación de sales hacia el punto de goteo, sino que se observa que esta franja se sitúa a unos 8-11 cm (depende de la época) alejada de la zona, donde la humedad en la superficie del suelo alcanza el punto de marchitamiento.

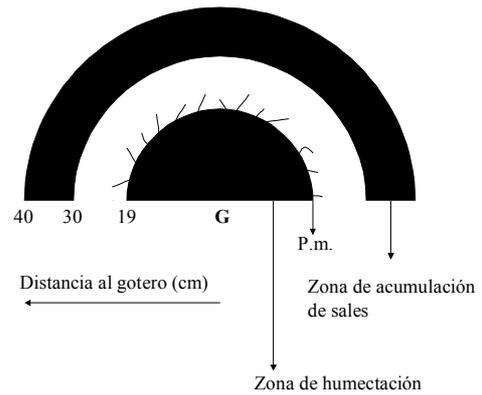


Fig. 10. Representación de las zonas de humectación y de acumulación de sales, después de 100 días de cultivo.

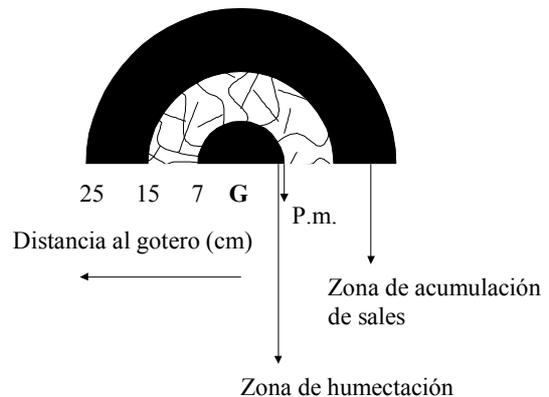


Fig. 11. Representación de las zonas de humectación y de acumulación de sales, al finalizar el cultivo (270 días)

Con objeto de comprobar la validez del modelo se realizó un muestreo casi finalizando el cultivo, tomando muestras por duplicado a dos profundidades, 0-2 cm y 10-14 cm en

la zona del gotero y a 25, 50, 75 y 100 cm de distancia al gotero en dirección al pasillo. Si comparamos la distribución de la CE simulada y la obtenida en este muestreo (Figuras 12 y 13) podemos observar que:

-La zona de acumulación de sales simulada a 270 días (finalizando el cultivo) se sitúa entorno a los 20 cm de distancia del gotero en la simulación superficial (0-2 cm) o en la franja 10-20 cm en la simulación a 10-14 cm de profundidad, mientras que en la finca esta zona se encontró a partir de 75-100 cm de distancia al punto de goteo.

-Los valores de CE máximos simulados son el doble de los encontrados en la realidad en la superficie del suelo (0-2 cm) y unas cuatro veces a 10-14 cm de profundidad.

Cuando se realizó este último muestreo, el agricultor había añadido una capa de picón de unos 2-3 cm de espesor, aproximadamente unos 20 cm a cada lado de la hilera de goteros. El mulching aumenta los contenidos volumétricos de agua a capacidad de campo y punto de marchitamiento (Tejedor et al., 1999a,b), y como ya vimos en las Figuras 10 y 11 la zona de acumulación de sales se aleja más del bulbo hídrico cuanto mayor sea éste. El aumento de los contenidos de humedad, como consecuencia de la aplicación de mulching a esta finca, puede explicar el alejamiento que sufre la zona de acumulación de sales, ya que además a partir de los 25 cm es cuando empieza a observarse un aumento de la CE en la superficie del suelo.

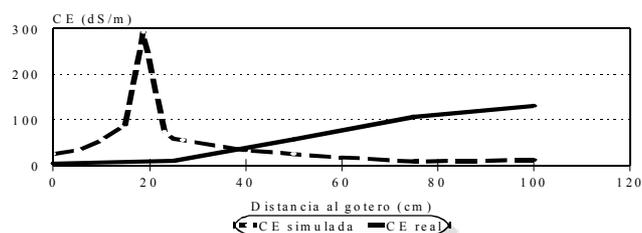


Fig. 12. Comparación entre la CE simulada y real en la superficie del suelo (0-2 cm), al finalizar el cultivo.

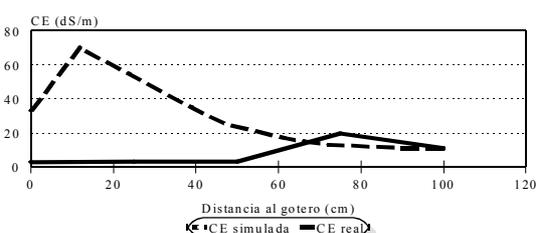


Fig. 13. Comparación entre la CE simulada y real a 10-14 cm de profundidad, al finalizar el cultivo

Este efecto se amplifica con la profundidad, ya que el mulching también mejora la infiltración (entrada de agua al sistema) y por tanto el lavado de las sales de la zona radicular. Como podemos ver en la Figura 13 la conductividad eléctrica real es cuatro veces inferior a la simulada y ésta, comienza a aumentar a partir de los 50 cm de distancia al gotero.

Además, hay que señalar que este último muestreo fue realizado después de una lluvia fuerte, la que podría explicar el lavado de sales y por tanto los valores de CE más bajos que los previstos por la simulación.

4.- Conclusiones

Se ha encontrado que en la zona de desarrollo radicular de las plantas, las condiciones de salinidad se mantienen por debajo de los niveles críticos para el crecimiento del cultivo, debido al sistema de riego utilizado que favorece la formación de un bulbo hídrico donde se produce un desplazamiento de las sales hacia las zonas superficiales de los espacios entre goteros. Sin embargo las sales continúan existiendo y acumulándose en los primeros 50 cm del suelo, lo que conlleva a una *salinización oculta*, proceso en el que la utilización de modelos como el UNSATCHEM-2D u otros similares podrían ser de gran utilidad para predecir las zonas de acumulación de sales y diseñar las prácticas de manejo más adecuadas para el suelo.

Nuestro objetivo ha sido realizar una aproximación a estos modelos complejos, siendo conscientes de que en el futuro sería necesario realizar experiencias más amplias y controladas, para validar su funcionamiento en nuestras condiciones.

5.- Referencias

- Anlauf, R., K.Ch. Kersebaum, Liu Ya Ping, A. Nuske-Schüler, J. Richter, G. Springob, K.M. Syring y J. Utermann. 1990. Models for processes in the soil. Programs and Exercises. Catena Verlag. 227 p.
- Bresler, E. 1977. Trickle-drip irrigation: Principles and application to soil water management. *Adv. Agronomy*, 29:343-393.
- Bryant, S.L., R.S. Schechter y L.W. Lake. 1986. Interactions of precipitation/dissolution waves and ion exchange in flow through permeable media. *A.I.Ch.E.J.*, 32(5): 751-764.
- Cederberg, G.A., R.L. Street y J.O. Leckie. 1985. A groundwater mass transport and equilibrium chemistry model for multicomponent systems. *Water Resour. Res.*, 21(8):1095-1104.
- Dasberg, S. y D. Or. 1999. Drip irrigation. Springer-Verlag.
- Förster, R. y H. Gerke. 1988. Integration von Modellen des Wasser- und Stofftransports sowie physikochemischer Wechselwirkungen zur Analyse von Agrar-Ökosystemen, Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie. Band XVIII. Essen.
- Gureghian, A.B. 1981. A two-dimensional finite-element solution for the simultaneous transport of water and multi solutes through a nonhomogeneous aquifer under transient saturated-unsaturated flow conditions. *Sci. Total Environ.*, 21:329-337.
- Hernández Abreu, J.M. Y A. Pérez Regalado. 1990a. Manejo del riego localizado en tomate. *Ciclos de Seminarios V Curso Internacional de riego localizado. Consejería de Agricultura y Pesca del Gobierno Autónomo de Canarias*. p:100-114.
- Hernández Abreu, J.M. Y A. Pérez Regalado. 1990b. El riego del tomate para la exportación en Canarias. III Jornadas de Transferencia Tecnológica, Guía de Isora, Tenerife. *El cultivo del Tomate. Ediciones y Promociones L.A.V.* p:179-195.
- Inskeep, W.P. y P.R. Bloom. 1986. Kinetics of calcite precipitation in the presence of water soluble organic ligands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, p:1167-1172.
- Jennings, A.A., D.J. Kirkner y T.L. Theis. 1982. Multicomponent equilibrium chemistry in groundwater quality models. *Water Resour. Res.*, 18(4):1089-1096.
- Kirkner, D.L., A.A. Jennings y T.L. Theis. 1985. Multisolute mass transport with chemical interaction kinetics. *J. Hydrol.*, 76:107-117.
- Liu, C.W. y T.N. Narasimhan. 1989. Redox-controlled multiple-species reactive chemical transport. I. Model development. *Water Resour. Res.*, 25(5):869-882.
- Mangold, D.C. y Chin-Fu Tsang. 1991. A summary of subsurface hydrological and hydrochemical models. *Reviews of Geophysics*, 29(1).
- Ouyang, Y. y L. Boersma. 1992. Dynamic oxygen and carbon dioxide exchange between soil and atmosphere: I. Model development. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1695-1702.

- Pitzer, K.S. 1979. Activity coefficients in electrolyte solutions. Chap. 7. CRC Press. Boca Raton. Fl.
- Simunek, J. y D.L. Suárez. 1993a. Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 1. Model development. *Water Resour. Res.*, 29(2):487-497.
- Simunek, J. y D.L. Suárez. 1993b. The UNSATCHEM-2D code for simulating two dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport, and multicomponent solute transport with major ion equilibrium and kinetic chemistry. Versión 1.1. *Research Report N° 128. U.S. Salinity Laboratory. USDA.* ARS. Riverside. California. 218 p.
- Simunek, J. y D.L. Suárez. 1994a. Modeling unsaturated water flow, and CO₂ and solute transport with major ion chemistry. J.D. Etchevers (ed.). 15th World Congress of Soil Science. Acapulco. Mexico. 2a:127-145.
- Simunek, J. y M. TH. Van Genuchten. 1993. The CHAIN_2D code for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated soils. *Agronom. Abs.* 217.
- Simunek, J., T. Vogel y M. TH. Van Genuchten. 1992. The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Version 1.1. *Research Report N°126. U.S. Salinity Laboratory. USDA.* ARS. Riverside. California.
- Suárez, D.L. 1977. Ion activity products of calcium carbonate in waters below the rootzone. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:310-315.
- Truesdell, A.H. y B.F. Jones. 1974. Wateq, a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters. *J. Res. U. S. Geol. Surv.*, 2(2):233-248.
- Valocchi, A.J., R.L. Street y P.V. Roberts. 1981. Transport of ion-exchanging solutes in groundwater: Chromatographic theory and field simulation. *Water Resour. Res.*, 17(5):1517-1527.
- Wagenet, R.J. y J.L. Hutson. 1987. LEACHM: Leaching Estimation And Chemistry Model, A process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. Continuum 2. Water Resour. Inst. Cornell University. Ithaca. N.Y.
- Walsh, M.P.; S.L. Bryant; R.S. Schechter y L.W. Lake. 1984. Precipitation and dissolution of solids attending flow through porous media. *A.I.Ch.E.J.*, 30(2):317-328.
- Yeh, G.T. y D.D. Huff. 1985. FEMA: A finite element model of material transport through aquifers. Rep. ORNL-6063. Oak Ridge Natl. Lab. Oak Ridge. Tenn.
- Yeh, G.T. y V.S. Tripathi. 1989. A critical evaluation of recent developments in hydrogeochemical transport models of reactive multichemical components. *Water Resour. Res.*, 25(1):93-108.
- Yeh, G.T. y V.S. Tripathi. 1991. A model for simulating transport of reactive multispecies components: Model development and demonstration. *Water Resour. Res.*, 27(12):3075-3094.