



NUEVAS EXPERIENCIAS EN LA EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE PROCESOS DE SALINIZACIÓN Y SODIFICACIÓN DE SUELOS EN AMÉRICA LATINA

Ildelfonso Pla Sentís ✉

Universitat de Lleida,
Lleida (Spain)

✉ ipla@macs.udl.es

Palabras clave:
Salinidad, sodicidad,
hidrología, agua freática

RESUMEN

Los suelos afectados por sales, tanto salinos como sódicos, pueden desarrollarse tanto en condiciones de secano como de regadío, afectando las propiedades físicas y químicas del suelo, con consecuencias generalmente negativas sobre el ambiente, sobre la producción de cultivos y sobre la salud humana y animal. En ambos casos los procesos de desarrollo están relacionados con procesos hidrológicos, pero en el caso de suelos sódicos es necesario tomar en cuenta también algunas reacciones químicas y físico-químicas, que hacen más difícil su modelización y predicción. Esto es especialmente importante cuando hay que tomar en cuenta la composición y profundidad del agua freática. En esta contribución se presentan cinco estudios de casos en Latinoamérica, relacionados con el desarrollo de suelos salinos y sódicos bajo condiciones de secano y regadío, en la República Dominicana (caña bajo riego), en Cuba (horticultura bajo riego), en Venezuela (arroz bajo riego complementario), en Colombia (caña bajo riego complementario), y en Argentina (pastos bajo condiciones de secano). El desarrollo de condiciones de salinidad y sodicidad en el suelo superficial se relaciona en todos los casos con la composición del agua de riego, con la composición y nivel del agua freática, con las condiciones de drenaje y con el manejo y eficiencia del riego y del drenaje. Se demuestra cómo la más reciente versión del modelo de simulación SALSODIMAR, desarrollado por el autor, puede ser adaptado con éxito para el diagnóstico y predicción de los diferentes problemas analizados, y para la selección de alternativas para su prevención y recuperación. Dicho modelo está basado en los balances de agua y solutos, integrando los efectos del agua de riego, del agua freática y de la lluvia, bajo diferentes condiciones de clima y de manejo del agua y del suelo.

NEW EXPERIENCE IN EVALUATION AND DIAGNOSTIC OF SALINITY AND SODICITY PROCESS OF SOIL IN LATINAMERICA

Key words:
salinity, sodicity, hidrology,
groundwater

ABSTRACT

The soils affected by salts, both saline and sodic, can develop both under dry conditions and irrigation, affecting the physical and chemical properties of the soil, with generally negative consequences on the environment, on the production of crops and on human and animal health. In both cases, development processes are related to hydrological processes, but in the case of sodic soils it is necessary to take into account also some physico-chemical, and chemical reactions which make more difficult his modelling and prediction. This is especially important when it comes to taking into account the composition and depth of groundwater. This contribution presents five case studies in Latin America, related to the development of saline and sodic soils under conditions of rainfed and irrigation, in the Dominican Republic (cane under irrigation), in Cuba (horticulture under irrigation), Venezuela (rice under supplementary irrigation), in Colombia (cane under supplementary irrigation), and Argentina (pastures under rainfed conditions). The development of conditions of salinity and sodicity in surface soil is related in all cases with the composition of the irrigation water, the composition and level of groundwater, with the drainage conditions and management and efficiency of irrigation and drainage. It is demonstrated how the latest version of the SALSODIMAR simulation model, developed by the author, can be adapted successfully for diagnosis and prediction of the issues analyzed, and for the selection of alternatives for prevention and recovery. This model is based on the balance sheets of water and solutes, integrating the effects of irrigation water, groundwater and the rain, under different conditions of climate and soil and water management.

SUELOS
ECUATORIALES
44(2): 125-137

ISSN 0562-5351

INTRODUCCIÓN

La salinización y la sodificación son los principales procesos de degradación de suelos que afectan las tierras bajo riego. El creciente desarrollo de la agricultura de riego es necesario para la producción sostenible de los alimentos requeridos por la creciente población mundial. Hoy en día las áreas bajo riego en el Mundo alcanzan ya las 320 millones de ha (el doble de hace 50 años), y en ellas se produce el 40% de los alimentos, aunque sólo representen un 20% del total de tierras cultivadas. Para ello consumen alrededor del 70% del agua de calidad disponible en el mundo. Este desarrollo está limitado por la creciente escasez y baja calidad de los recursos hídricos disponibles, y por el uso competitivo de esos recursos para otros fines. Se presentan también problemas crecientes de contaminación de aguas superficiales y subterráneas a ser utilizadas para otros fines, por los aguas de drenaje efluentes de la agricultura bajo riego. Tomando en consideración las grandes inversiones en capital y trabajo para el desarrollo de la agricultura bajo riego, la decisiva contribución de este tipo de agricultura a la producción de alimentos en el mundo y la creciente escasez del recurso agua disponible, la degradación de tierras bajo riego por salinización y sodificación resulta muy importante, tanto del punto de vista económico como social y ambiental. Además, altas y crecientes proporciones de las tierras bajo riego en el Mundo (25-50 % dependiendo del tipo de evaluación) están siendo afectadas por excesiva salinidad y/o sodicidad. A esto habría que agregar grandes extensiones de tierras ya afectadas por salinidad o sodicidad en condiciones naturales, y a través de procesos bajo condiciones de secano, a partir de aguas freáticas poco profundas.

En América Latina el área bajo riego alcanza hoy en día unas 20-25 millones de ha (10-12% del total de área cultivada), en especial en las regiones Andina, Cono Sur y México, con un 25-30% fuertemente afectada por problemas de salinidad y sodicidad, que se incrementa en cerca de medio millón de ha al año (Pla, 1997), fundamentalmente por un deficiente manejo del riego y del drenaje. También están creciendo los problemas en condiciones de secano, por cambios en los niveles y composición de aguas freáticas, derivados de cambios en el uso y manejo de las tierras que afectan su hidrología (Pla, 2002).

En general, los problemas de salinidad de suelos son una consecuencia de la acumulación de sales en zonas y profundidades donde el régimen de humedad del suelo se caracteriza por fuertes pérdidas de agua por evaporación y transpiración, y por un reducido lavado de las sales que quedan. Los problemas de sodicidad aparecen como una consecuencia de

cambios en la composición y concentración de las sales en solución, con cambios en los cationes intercambiables en equilibrio, conduciendo a una acumulación relativa de sodio en solución e intercambiable. Ambos procesos de salinización y sodificación están por lo tanto determinados por los balances de agua y solutos (Pla, 1997). El riego y el drenaje pueden causar cambios drásticos en el régimen y balance de sales y sodio en el perfil del suelo, resultando en problemas de salinización o sodificación dependiendo del clima, cultivos, suelos, profundidad del nivel freático, composición de las aguas de riego y freáticas, y del manejo del riego y del drenaje (Figura 7). Un drenaje restringido puede deberse tanto a la baja permeabilidad del suelo como a la presencia de niveles freáticos poco profundos. Aparte de ello, las aguas de drenaje provenientes de tierras bajo riego pueden contener no sólo sales naturales sino también residuos de fertilizantes químicos y pesticidas, los cuales se utilizan generalmente en cantidades relativamente altas en agricultura de riego, y también otros contaminantes derivados de residuos de animales y de materiales compostados utilizados como fertilizantes y enmiendas, y de aguas residuales (de origen urbano e industrial), más o menos tratadas, que se están utilizando en forma creciente para riego. Los principales problemas de sostenibilidad de la producción agrícola asociados con el uso de aguas residuales para riego, aparte de la posible contaminación por patógenos y metales pesados, son los de salinización y sodificación de los suelos (Halliwell y col, 2001; Pereira y col, 2009).

DESARROLLO DE SUELOS SALINOS Y SÓDICOS

Los suelos afectados por sales, tanto salinos como sódicos, pueden desarrollarse en condiciones de secano o regadío, afectando negativamente las propiedades físicas y químicas del suelo, la producción de cultivos y la salud humana y animal (Figura 1). En ambos casos los procesos de desarrollo están relacionados con procesos hidrológicos, pero en el caso de suelos sódicos es necesario tomar en cuenta también algunas reacciones químicas y fisico-químicas, que hacen más difícil su modelización y predicción. Los suelos salinos se caracterizan por la acumulación de electrolitos en la solución del suelo, que al subir la presión osmótica de dicha solución dificultan o reducen drásticamente la posibilidad de absorción de agua por las plantas u otros organismos vivos del suelo. Ca, Mg y Na entre los cationes, y bicarbonatos, cloruros y sulfatos entre los aniones, suelen ser los predominantes en la solución de suelos salinos. La salinidad del suelo se expresa

generalmente ya sea por la concentración de solutos (C en meq/litro o mmoles/litro), o por la conductividad eléctrica (CE en dS/m) de en la solución del suelo, proveniente de diferentes relaciones suelo/agua (Extracto Saturado (ES), 1:1, 1:2, 1:5).

Los suelos sódicos presentan altos niveles de Na (acompañado de Mg en algunos casos) en el complejo de intercambio del suelo. Ese nivel de Na suele expresarse como “Relación de Adsorción de Sodio” (RAS) (USDA, 1954): $RAS = Na / ((Ca + Mg)/2)^{1/2}$ (meq/litro)^{1/2} o por el “Porcentaje de Sodio Intercambiable” (PSI = 100 Na/CIC), ambos

relacionados uno con el otro. Es preferible y recomendable utilizar la RAS para fines prácticos, ya que el PSI es muy difícil de determinar correctamente en la mayoría de los suelos sódicos, y mucho más costoso, y por ello, según nuestra experiencia en muchos suelos sódicos, bajo muy diferentes condiciones, la RAS resulta más confiable como índice de sodicidad que el PSI.



Figura 1. Factores comunes en el desarrollo de suelos afectados por sales bajo condiciones de sequo y regadío

Dependiendo de diferentes factores, los suelos pueden ser considerados como sódicos con valores de PSI (y de RAS) que oscilan desde un 5% a un 40%. Precisamente, la falla generalizada de no entender ni evaluar adecuadamente los problemas de sodicidad de los suelos (Oster y Shainberg, 2001), se debe a la gran variabilidad en la definición de suelos sódicos, con diferentes valores límite de PSI o de RAS, debido a diferencias en texturas y mineralogía de los suelos y a la falta de consideración de la concentración y composición de los otros electrolitos en solución. La sodicidad provoca cambios en las propiedades físicas de los suelos, tanto por dispersión de las partículas de arcilla y limo y ulterior taponado de los poros por dichas partículas en el agua percolante, y por el bloqueo de los poros por las arcillas expandibles. El taponado de los poros del suelo superficial por las

partículas dispersas, suele provocar un sellado superficial del suelo que reduce la infiltración y provoca anegamiento superficial. Esto afecta el uso de la tierra y el crecimiento de las plantas, al reducir la permeabilidad al agua y al aire en el suelo superficial, con lo que se reduce la penetración de raíces. El impacto de estos mecanismos esta determinado por diferentes factores del suelo, en especial por la textura, la mineralogía de las arcillas, la salinidad total y el pH (Rengasamy y Olson, 1991). La dispersión afecta más los suelos con arcillas no expandibles, ilitas y caolinitas, incluso a valores muy bajos de RAS si los niveles de salinidad total (C) se mantienen bajos, mientras que los efectos de hinchamiento son más comunes en suelos con arcillas expandibles, tipo smectitas (Figura 2).

Las relaciones entre salinidad del suelo y sus efectos floculantes, y sodicidad del suelo y sus efectos dispersantes o de hinchamiento, sobre las propiedades físicas del suelo, especialmente las relacionadas con la velocidad de infiltración y la conductividad hidráulica, se requieren para predecir como un determinado suelo se comportará bajo diferentes combinaciones previstas de salinidad (C_{ES}) y sodicidad (RAS_{ES}). Estas relaciones dependen principalmente del tipo de arcilla, de ciertas reacciones químicas y de la textura del suelo. Entre las principales reacciones químicas en el suelo afectando esas relaciones salinidad/sodicidad están las que ocurren con los bicarbonatos y carbonatos de Ca, Mg y Na, y los sulfatos de Ca, que

conducen a disoluciones o precipitaciones, con cambios en los niveles de salinidad y sodicidad (Pla, 1967; 1968, 1998). Muchos errores en la evaluación y predicción de problemas de sodicidad y sus efectos se deben a una incorrecta consideración de esas reacciones químicas, bajo diferentes relaciones entre dichos cationes y aniones. Los principales errores se cometen al no considerar los efectos de la acumulación de bicarbonato de sodio en la solución del suelo, proveniente de las aguas de riego o de las aguas freáticas, o producido por reacciones bajo condiciones anaeróbicas como la contenida en la Figura 7.

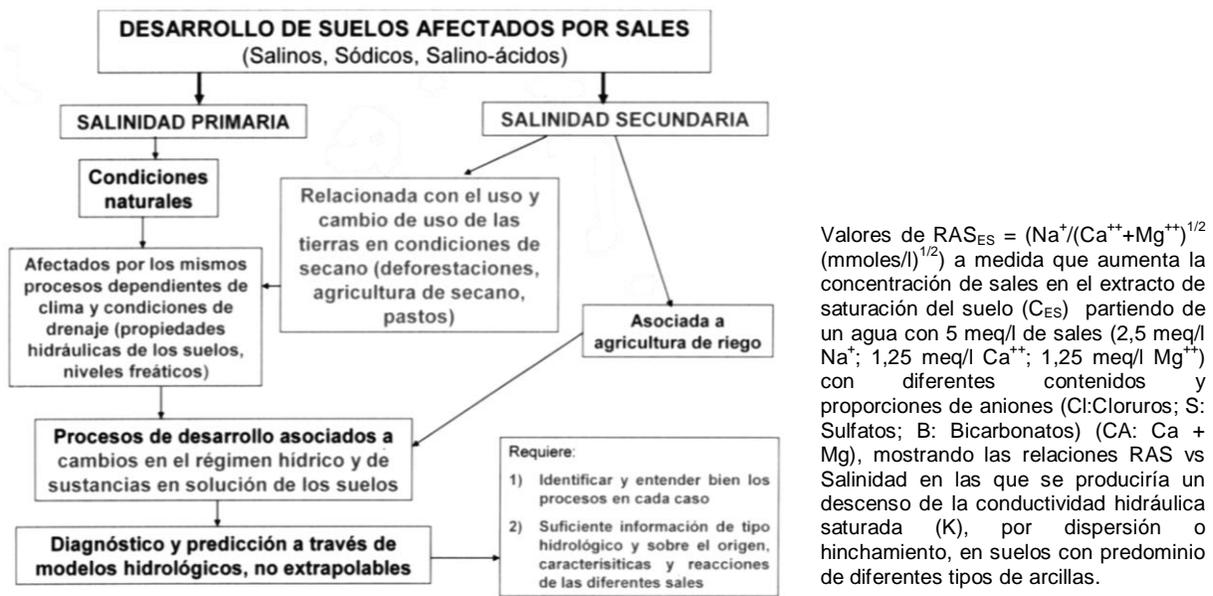


Figura 2. Relaciones entre salinidad y sodicidad en la solución del suelo, y sus efectos sobre la dispersión o hinchamiento de arcillas y sobre la conductividad hidráulica saturada del suelo, para diferentes composiciones aniónicas del agua original y diferentes tipos de arcillas.

La adición de agua de riego y de lluvia, y los cambios en la profundidad y composición del agua freática, pueden causar cambios drásticos en los balances de agua y solutos en el perfil del suelo. El uso de modelos puede ser útil para el diagnóstico y predicción de dichos cambios, y para la selección de las mejores prácticas y sistemas de riego y drenaje para un uso más eficiente del agua de riego y para reducir las pérdidas y contaminación de aguas superficiales y subterráneas, así como para controlar la salinización y sodificación del suelo. Se espera que en el futuro se incremente el uso para riego de aguas más salinas y sódicas, tales como las aguas residuales tratadas de origen urbano y aguas de drenaje. Esto requerirá que se modifiquen algunas prácticas de manejo de suelos, aguas y cultivos, tomando en

consideración la interacción entre manejo de suelos y aguas y la sodicidad bajo diferentes niveles de salinidad. El principal objetivo final debe ser incrementar la producción con menos agua, reduciendo y controlando al mismo tiempo los impactos ambientales negativos sobre las aguas superficiales y freáticas. La mayoría de los conceptos y aproximaciones más utilizados actualmente (índices estáticos de calidad de aguas, límites fijos para niveles críticos de salinidad y sodicidad en suelos, modelos predictivos empíricos basados en relaciones estadísticas o en métodos de laboratorio que no reflejan las condiciones de campo), pueden ser aplicables únicamente a las condiciones bajo las cuales fueron desarrollados, pero no confiables si se extrapolan a condiciones diferentes.

En este trabajo se presenta una adaptación del modelo SALSODIMAR (Figuras 8, 9), incluyendo nuevos componentes hidrológicos específicos del balance de agua y solutos, para predecir los procesos

de salinización y sodificación en condiciones de secano originados a partir del agua freática, y los efectos de riego y agua freática, con o sin cobertura viva o muerta (Figuras 4, 5, 6, 7).

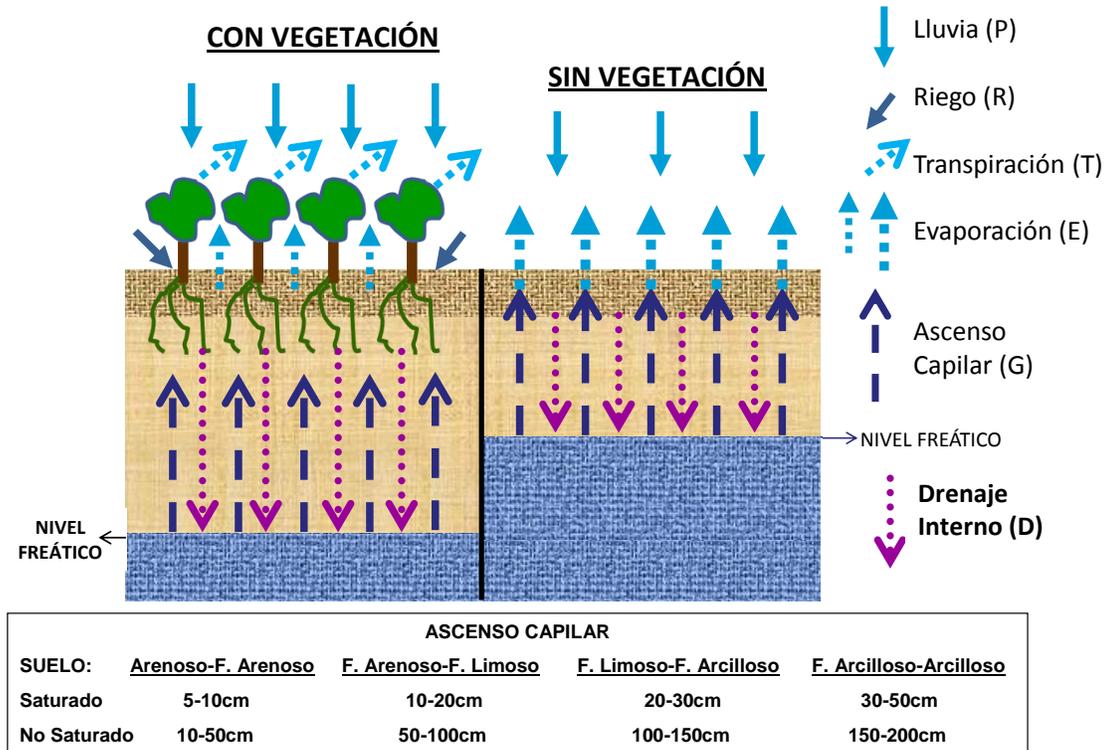


Figura 4. Componentes del balance de agua del suelo con la presencia de un nivel freático poco profundo, con o sin cubierta vegetal.

Se han desarrollado ecuaciones (no incluidas en este trabajo) para calcular los balances de agua y sales en el suelo superficial, que nos permiten predecir los procesos de salinización y sodificación bajo muy diferentes condiciones, incluyendo los efectos del agua freática, riego y cobertura del suelo. Un ejemplo de cálculo referido al caso de un suelo cubierto con vegetación, con riego y flujo neto ascendente de agua desde el nivel freático al suelo superficial sería:

Balance hídrico: $L_F = (H_P + H_R) / (H_E - H_T - H_P - H_R)$

Balance de sales: (Si: $CA_F \geq B_F$ y Si: $(CAB_F/L_F) \geq 10$ y $(CaS_F/L_G) \geq 30$)

$CA_{ES} = ((CA_F - CAB_F - CaS_F) / L_F) + 40$; $Na_{ES} = Na_F / L_F$

Salinidad: $C_{ES} = CA_{ES} + Na_{ES}$; Sodicidad: $RAS_{ES} = Na_{ES} / (CA_{ES} / 2)^{1/2}$

(Donde: H: Lámina de agua en mm; F: Agua freática; R: Agua de riego; ET: Evapotranspiración; E: Evaporación; CA: Ca + Mg (meq/litro); Ca: Calcio (meq/litro); Na: Sodio (meq/litro); C: Concentración de sales (meq/litro); RAS: Relación de Adsorción de Sodio; ES: Extracto de Saturación del suelo; B: Bicarbonatos (meq/litro); S: Sulfatos (meq/litro))

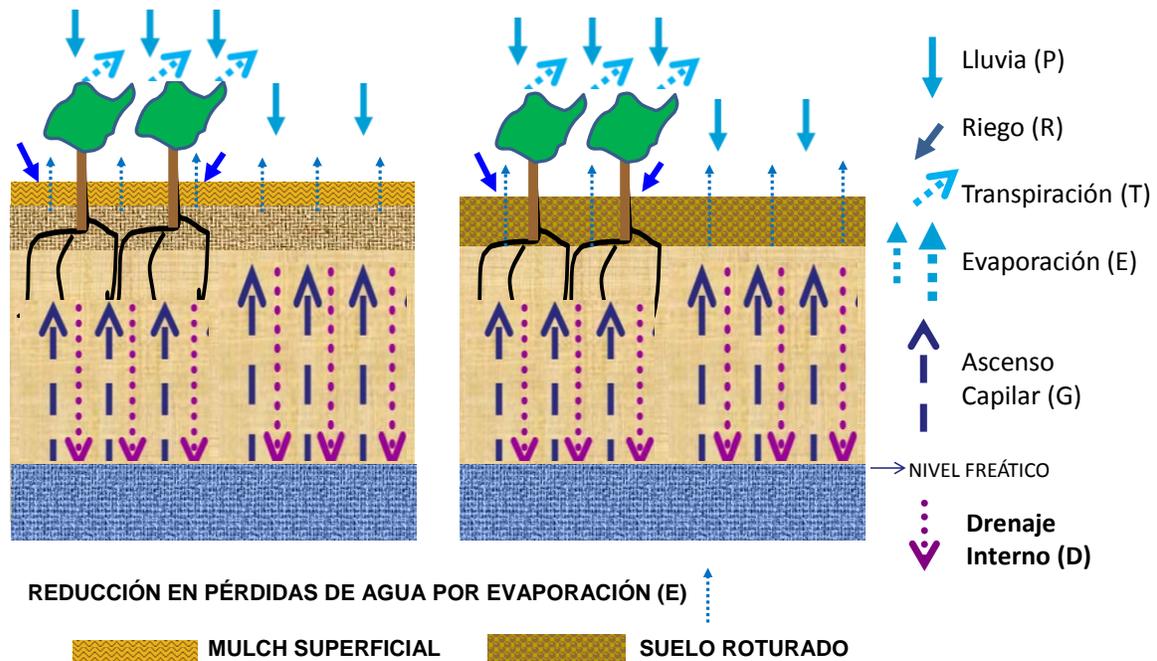


Figura 5. Efectos de una cobertura muerta o mulch (residuos vegetales, arena, suelo disgregado) superficial en el balance hídrico del suelo, con la presencia de agua freática a poca profundidad, reduciendo o cortando las pérdidas de agua por evaporación (E) en la superficie

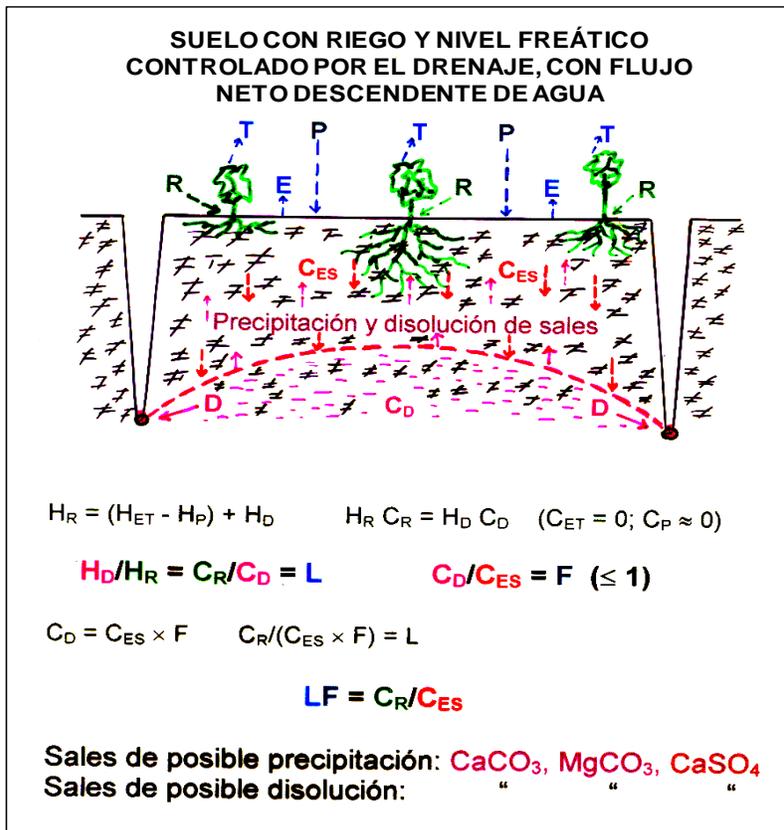


Figura 6. Balances generales de agua y sales totales en el suelo, sin consideración de la composición iónica de dichas sales ni las reacciones de solución o precipitación.

P: Lluvia; **G:** Agua freática; **ES:** Extracto de pasta saturada del suelo; **R:** Riego
H: Lámina de agua; **L_G:** Fracción de lavado; **F:** Eficiencia de lavado
S: Sulfatos; **Cl:** Cloruros; **B:** Bicarbonatos; **C:** Carbonatos; **Y:** Yeso (CaS precipitado);
CA: Ca + Mg; **NA:** Sodio; **K:** Potasio (todos en meq/litro); **L_G = [(H_P + H_R).F] / H_G**

SALES EN SOLUCIÓN (meq/litro)

$NA_{ES} = NA_G / L_G$
 Si $(B_G > CA_G) : CA_{ES} = CA_G$
 Si $(B_G \leq CA_G) : CA_{ES} = 10 + [(CA_G - B_G) / L_G]$ (Si: $B_G / L_G \geq 10$)
 Si $(B_G \leq CA_G) : CA_{ES} = CA_G / L_G$ (Si: $B_G / L_G < 10$)

$Cl_{ES} = Cl_G / L_G$
 $S_{ES} = S_G / L_G$ (Si: $CaS_G / L_G < 30$)
 $S_{ES} = 30 + [(S_{ES} - CaS_{ES}) / L_G]$ (Si: $CaS_G / L_G \geq 30$) ($CaS_G = CA_G - B_G$ si: $CaS_G \geq 0$)
 Si $(B_G > CA_G) : B_{ES} = CA_G + [(B_G - CA_G) / L_G]$
 Si $(B_G \leq CA_G) : B_{ES} = B_G / L_G$ (Si: $B_G / L_G < 10$)
 Si $(B_G \leq CA_G) : B_{ES} = 10$ (Si: $B_G / L_G \geq 10$)

SALES PRECIPITADAS (meq/litro)

(CAC : Carbonatos de Ca + Mg; CaS (Y) : Yeso)
 Si $(B_G > CA_G) : CAC = (CA_G / L_G) - CA_G$
 Si $(B_G \leq CA_G) : CAC = (CA_G / L_G) - 10$ (Si: $CA_G / L_G > 10$)
 Si $(B_G \leq CA_G) : CAC = 0$ (Si: $CA_G / L_G \leq 10$)
 $CaS (Y) = (CaS_G / L_G) - 30$ (Si: $CaS_G / L_G > 30$)
 $CaS (Y) = 0$ (Si: $CaS_G / L_G \leq 30$)
 $CaS (Y) = 0$ (Si: $CaS_G = 0$)

SALES TOTALES EN SOLUCIÓN (ES) = NA_{ES} + CA_{ES} = Cl_{ES} + S_{ES} + B_{ES}
 $RAS = NA_{ES} / (CA_{ES} / 2)^{1/2}$; $RACM = [(NA_{ES} + 0,56 K_{ES})] / [(CA_{ES} + 0,6 Mg_{ES}) / 2]^{1/2}$

Figura 7. Cálculos de balances de sales y de los diferentes iones tomando en cuenta las reacciones de disolución y precipitación, en condiciones de riego, control del nivel freático y con flujo neto descendente de agua.

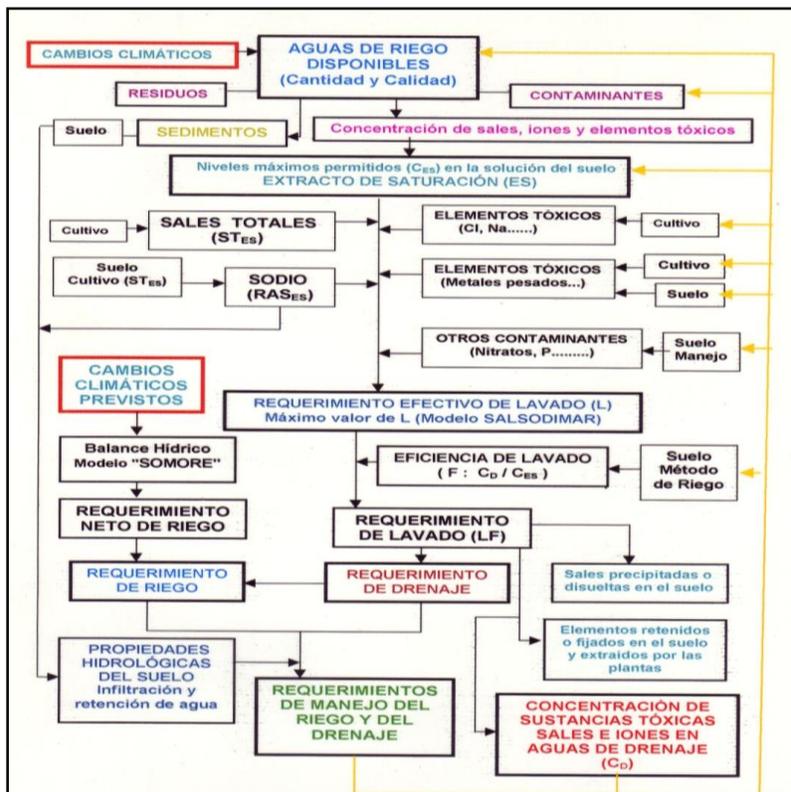


Figura 8. Diagrama de flujo de un modelo conceptual de balance de sales y sustancias tóxicas en suelos bajo riego (RAS: Relación de Adsorción de Sodio = $Na^+ / (Ca^{++} + Mg^{++}) / 2$)^{1/2} (meq/litro)^{1/2} (Modelo "SOMORE": Pla 2006; Modelo "SALSODIMAR": Pla 1997)

Condiciones				
AGUA DE RIEGO O AGUA FREÁTICA				
Concentración:	(Alta)	(Media)	(Baja)	
CE	<u>>2dS/m</u>	<u>1-2 dS/m</u>	<u><1dS/m</u>	
Composición	Cl>S>B <u>Na ≥CA</u>	S≥Cl>B <u>CA>Na</u>	B≥S>Cl <u>CA>Na</u>	B>S>Cl (B<CA) <u>Na≥CA</u>
DRENAJE	(Variable)	(Muy restringido)	(Restringido)	
Perm Suelo (I)	1-50 mm/hour	< 1mm/hour	< 5mm/hour	
Prof. Nivel Freático#	<u>< 1,5 m</u>	<u>< 0,5 m</u>	<u>< 1,0 m</u>	
CLIMA	(Ar.-SAr.Seco)	(Ar.-SAr.Seco)	(SAr.Seco-SH.)	(Ar.-SAr.H)
IMA (P/ETP)	< 0,5	< 0,5	0,5-1,0	< 0,8
LGP (P>(ETP/2))	<u>< 120 días</u>	<u>< 120 días</u>	<u>120-270 días</u>	<u><180 días</u>
Problema Resultante				
SOLUCIÓN DEL SUELO (ES)	(Muy Salina)	(Mod. Salina)	(Lig. Salina)	(Var. Salinidad)
Concentración (CE)	<u>> 8 dS/m</u>	<u>≥ 4 dS/m</u>	<u>< 4 dS/m</u>	<u>≥ 2 dS/m</u>
Composición	Cl>>S>>B <u>Na>CA</u>	Cl≥S>>B <u>Na≥CA</u>	S>Cl>B <u>Na>CA</u>	S≥B>Cl (*)> B≥S>Cl <u>Na>>CA</u>
pH	< 8,5	< 8,5	> 7,5	> 8,5
SALES PRECIPITADAS	CAC + CaS	CAC + CaS	CAC	CAC
PROBLEMA POTENCIAL	SALINIDAD		SODICIDAD	
(*) Cambio en composición bajo condiciones anaeróbicas ($2Na^{+}+SO_{4}^{-}+2C+2H_{2}O = S^{-}+2NaHCO_{3}$)				
# Profundidad de un nivel freático permanente o presencia de capas de suelo que restringen el drenaje interno. Profundidades para suelos de texturas medias a finas. Pueden ser menores para suelos de texturas gruesas.				
(CE: Conductividad Eléctrica; Cl: Cloruros ; S: Sulfatos; B: Bicarbonatos; Na: Sodio; CA: Calcio+Magnesio; CAC: Carbonatos de Ca+Mg; CaS: Sulfato de Ca; SE: Extracto de Saturación; I: Velocidad de Infiltración; P: Lluvia; ETP: Evapo-Transpiración Potencial; Ar.: Clima Árido; SÁr. Seco: Clima Semi-Árido Seco; SH: Clima Sub-Húmedo; Sar.H: Clima Semi-Árido Húmedo)				

Figura 9. Combinación de condiciones conducentes al desarrollo de diferentes tipos de suelos salinos y sódicos, aplicando el modelo SALSODIMAR (Pla 1997).

ESTUDIO DE CASOS EN LATINOAMÉRICA

En esta contribución se presentan como ejemplos cinco estudios de casos recientes en Latinoamérica (Figura 10).

- (1) **Guantánamo** (Cuba): Clima semiárido-húmedo tropical. Riego en surcos para hortalizas, con agua con contenido relativamente bajo en sales y sodio, pero donde un mal manejo del agua de riego y del drenaje ha llevado a niveles freáticos con agua muy salina a poca profundidad, y con yeso y carbonatos de Ca y Mg precipitados en el suelo.
- (2) **Barahona** (República Dominicana): Clima semiárido-húmedo tropical. Riego en surcos de caña de azúcar (para producción de azúcar), con

agua baja en sales y sodio y con alta proporción de bicarbonatos de Ca y Mg. Deficiencias en el manejo del riego y drenaje, lo que provoca en algunos casos la presencia de agua freática con bicarbonato de Na en lugares con drenaje deficiente. Los suelos tienen generalmente altos contenidos de yeso precipitado. Las lluvias muy concentradas en la época de lluvias tienen un efecto de lavado de sales en el suelo superficial, con buena infiltración, con ascenso temporales en los niveles freáticos.

- (3) **Acarigua** (Venezuela): Clima sub-húmedo tropical, con marcada distribución estacional de las lluvias. Riego de arroz por inundación, con práctica de batido de suelos, sin drenajes, y uso complementario (a los aportes de agua de lluvia) de agua de riego con un ligero contenido de

bicarbonato de sodio y bajo contenido de sales. Los problemas de sodicidad sólo se manifiestan cuando se seca el suelo superficial entre cultivos de arroz o al dejar de cultivar arroz.

- (4) **Cauca** (Colombia): Clima sub-húmedo tropical, con marcada distribución estacional de las lluvias. Riego complementario (a los aportes de agua de lluvia) en surcos, de caña de azúcar (para producción de azúcar y de etanol), con agua de riego baja en sales pero con un ligero contenido de bicarbonato de sodio, y en algunos casos con contenido de Mg (García, 2002) relativamente alto en relación al de Ca. Problemas de anegamiento temporal por baja infiltración y por manejo inadecuado del riego y sistema de drenaje poco eficiente, provocando en algunos casos presencia de niveles freáticos a menos de un metro de la superficie (Madero y col, 2004).
- (5) **Pampa** (Argentina): Clima templado sub-húmedo, con lluvias muy variadas en cantidad y distribución según los años, provocando grandes variaciones en los niveles freáticos, que alcanzan la superficie en algunas ocasiones. Tierras en las

partes más bajas y peor drenadas de la región Pampeana, ocupadas por pastos naturales, generalmente sobre-pastoreados, para la producción ganadera, que dependen para su alimentación hídrica del agua de lluvia y de los aportes de agua freática por ascenso capilar. La hidrología de la zona, con inundaciones temporales y ascensos en los niveles freáticos, está determinada por el drenaje del exceso de agua de las zonas más elevadas de la región Pampeana, provocado en parte por el extensivo cambio de uso y cobertura del suelo en las últimas décadas, con el cultivo de soya sustituyendo el uso y la cobertura original con pastos o con rotaciones de pastos con otros cultivos como maíz, trigo y girasol. La dificultad de mejorar las condiciones de drenaje con instalaciones de drenajes subterráneos o por bombeo del agua freática, ha llevado a buscar soluciones alternativas que modifiquen el balance de agua y sales en el suelo superficial, como el establecimiento y mantenimiento de buenas coberturas vegetales con especies tolerantes a las sales y el control del pastoreo (Casas y Pittaluga, 1984, 1990).

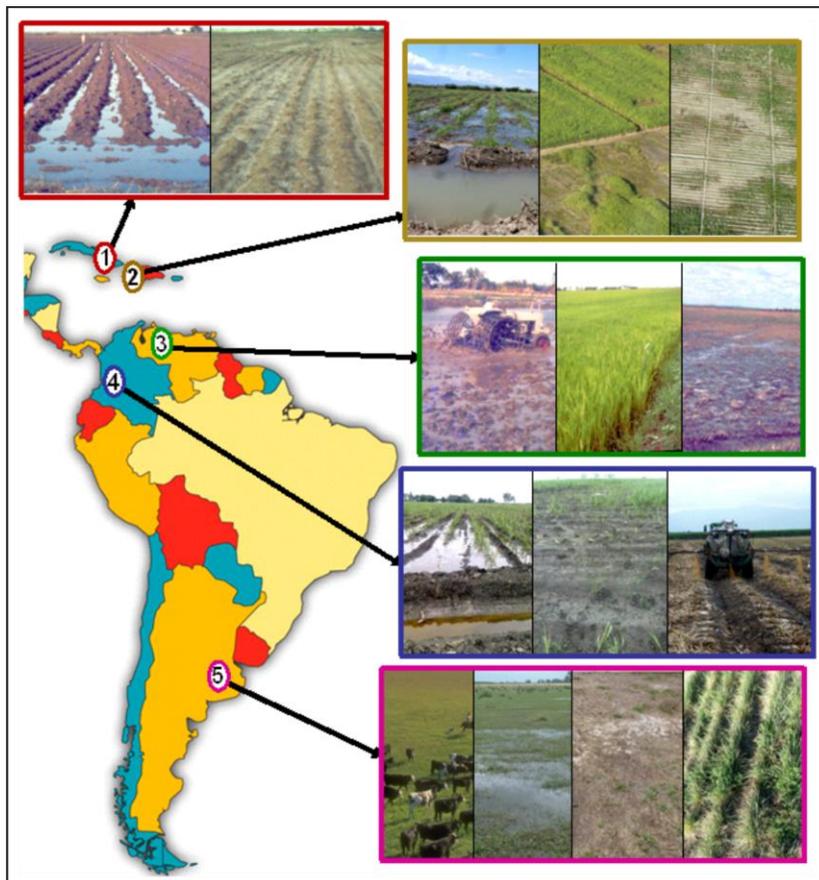


Figura 10. Localización de los diferentes estudios de casos reportados, con fotografías ilustrando los diferentes sistemas de uso y manejo, problemas de salinización y sodificación, y algunas de las prácticas de manejo para su recuperación.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el estudio de algunos puntos seleccionados en los cinco casos reportados (Cuadro 1) indican que el modelo SALSODIMAR (Figuras 8, 9) y sus recientes adaptaciones, puede ser utilizado exitosamente para el diagnóstico y predicción de los problemas de salinidad y sodicidad que se presentan. Ello permite determinar las causas y procesos conducentes a los diferentes problemas y con ello poder seleccionar las mejores alternativas para su manejo o recuperación. Esta modelización es, y será aún más en el futuro, de particular importancia, con el

uso creciente de aguas de riego de peor calidad, incluyendo aguas residuales con diferentes niveles de pre-tratamiento, en suelos con mal drenaje y con niveles freáticos fluctuantes. Para ello, el modelo SALSODIMAR simula los procesos responsables del balance de agua y solutos aportadas por el agua de riego y el agua freática en el suelo, y las influencias del clima, cultivos y manejo del riego y del drenaje sobre dicho balance. El modelo incluye los efectos de las reacciones químicas y fisico-químicas sobre las relaciones entre niveles de salinidad y sodicidad en la solución del suelo.

<u>Lugar</u>	<u>Cultivo</u> (Suelo)	<u>Riego</u> (Nivel freático)	<u>Agua de riego (R)</u> <u>Agua freática (F)</u> (meq/litro)					<u>Problema resultante</u> (Suelo 0-30 cm)						
			<u>CA</u> <u>Na</u>		<u>B</u> <u>S</u> <u>Cl</u>			<u>pH</u>	<u>CE_{ES}</u>		<u>RAS_{ES}</u>			
			M	C	M	C	M		C					
GUANTANAMO (1) (CUBA)	Hortalizas (Entisol) (F. Arcilloso)	Surcos (R) (F: 100-120cm) (F)	4,6 111	3,4 240	3,7 12	0,6 238	3,7 98	7,2	12	10	20	24*	13**	21**
BARAHONA (2) (REP. DOMINICANA)	Caña (Entisol) (F. Arc-Limoso)	Surcos (R) (F: > 150 cm) (F: 100 cm) (F)	3,6 5,2	1,8 20,3	3,5 8,0	1,1 5,2	0,8 11,6	8,1 9,0	11 (x)7	12* 8*	21 24	45* 42*	11** 8**	22** 25**
ACARIGUA (3) (VENEZUELA)	Arroz (Vertisol) (Arcilloso)	Inundación (R) (F)	3,5 3,0	2,7 16	4,3 9,6	1,2 4,0	0,6 4,6	9,7	12	13	54	65		
CAUCA (4) (COLOMBIA)	Caña (Mollisol) (F. Limoso)	Surcos (R) (F: 50-120 cm) (F)	2,8 3,0	2,5 3,0	3,6 11,2	1,4 17,4	0,4 5,0	7,8	2,5	2,2	21	16		
PAMPA (5) (ARGENTINA)	Pastos (Mollisol) (F. Limoso)	Secano (F: 0-160 cm) (F)	4,2	8,3	6,0	2,5	4,0	8,7 9,3 8,2	3,5 12 2,6	3,0	22 ⁺ 54 ⁺⁺ 12 ⁺⁺⁺	26 45 15		

M: Medido; C: Calculado; (x): Afectado por el ascenso capilar del agua freática; * Sin yeso en el suelo; ** Con yeso en el suelo; + Cobertura natural; ++ Suelo desnudo (0-15 cm); +++ Cobertura verde sembrada (0-15 cm).

En los casos (1), (3), (4) y (5) pueden ocurrir reacciones para la formación de bicarbonato de sodio como la mostrada en la Figura 6, en suelo que se mantiene saturado o cerca de saturación, en condiciones anaeróbicas, por encima del nivel freático.

Cuadro 1. Niveles de salinidad y sodicidad resultantes, medidos o calculados (previstos) por el modelo SALSODIMAR (Figuras 8, 9), bajo las diferentes condiciones de clima, suelos, cultivos, sistemas de riego y composición de las aguas de riego y freáticas en los cinco estudio de casos reportados.

REFERENCIAS

- CASAS, R. R., Y A. PITTALUGA. 1984. Efecto de una pastura de Agropiro bajo clausura en la recuperación de suelos salinizados en el Partido de Carlos Tejedor. INTA; ACINTACNIA; año 1, N° 12. Castelar (Argentina)
- CASAS, R. R., YA. PITTALUGA. 1990. Anegamiento y salinización de los suelos en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. EN: Manejo de tierras Anegadizas. PROSA, FECIC. Gráfica Guadalupe. Buenos Aires (Argentina)
- DE PAZ, J. M., F. VISCONTI; R. ZAPATA Y J. SÁNCHEZ. 2004. Integration of two simple models in a geographical information system to evaluate salinization risk in irrigated land of the Valencian Community, Spain. *Soil Use and Management* 20: 333-342
- GARCÍA, A. 2002. Magnesium affected soils in Colombia. Proc. 17th WCSS, Bangkok (Thailand) 2193-1-2193-6
- GONZÁLEZ, A. 2001. Efecto de la aplicación de aguas bicarbonatadas sobre las propiedades físicas y químicas de algunos suelos del Valle del Cauca y Tolima. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia, Palmira. 138 p.
- GUERRERO, J. P., I. PLA, Y R. G. CAMACHO. 2004. Génesis de un suelo sódico alcalino en Ghaguaramas, Venezuela. *Agronomía Trop.* 54 (4):433-460.
- GUERRERO J., I. PLA, R.CAMACHO, A.VALERA Y J. FERRER. 2007. Génesis de un suelo salino-sódico de Tucupido, estado Guárico-Venezuela. (Genesis of a saline-sodic soil in Tucupido (Guárico-Venezuela). *Agronomía Trop.* 57(3): 171-188
- HALLIWELL, D. J., K.M. BARLOW AND D. M. NASH.2001.A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. *Australian Journal of Soil Research* 39(6) 1259 - 1267
- MADERO, E., D. MALAGÓN Y A. GARCÍA. 2004. Una mirada al origen y las propiedades de los suelos magnésicos en el Valle del Cauca-Colombia. *Acta Agronómica* 53(3) 1-21
- OSTER, J. D., Y I. SHAINBERG. 2001. Soil responses to sodicity and salinity: challenges and opportunities. *Australian Journal of Soil Research* 39(6) 1219 – 1224
- Pereira, R. Y COL. 2009. Sodicity and salinity in a Brazilian Oxisol cultivated with sugarcane irrigated with wastewater . *Agricultural Water Management* 96(2):307-316
- PLA, I. 1967. Evaluación Cuantitativa de los Efectos de los Bicarbonatos en el Agua de Riego sobre las Propiedades Químicas y Físicas de los Suelos y Factores que Influyen sobre la Magnitud de Tales Efectos. *Rev. Fac. Agron. Alcance* N° 12. Maracay (Venezuela). 88p
- PLA,I. 1968. Evaluation of the quality of irrigation waters with high bicarbonate content in relation to the drainage conditions. *Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci. Soc. Adelaide (Australia)*. Vol 1:357-370
- PLA, I. 1972. Salt and water balances in irrigated soils under tropical conditions. En "Proc. Symposium on New Developments in the Field of Salt affected Soils.134-140.Cairo (Egypt)
- PLA, I .Y F. DAPPO.1977.Field testing of a new system for qualifying irrigation waters. En "Proceedings of the International Conference on Managing Saline Waters for Irrigation" .376-387.Lubbock.Texas (USA)
- PLA, I. 1983.Sistema integrado agua-cultivo-suelo-manejo para evaluar la calidad de agua de riego. En "Isotopes and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies".191-206.IAEA.Viena (Austria)
- PLA, I. 1985. Origen, distribución y diagnóstico de suelos afectados por sales en Venezuela. *Rev. Fac. Agron.* XIV(1-2):125-150.Maracay. (Venezuela)
- PLA, I. 1986. Diagnostic criteria for soil and water salinity in Venezuela. *Agrokémia és Talajtan.* 35(3-4<): 431-440. Budapest. (Hungría)
- PLA, I. 1988. Riego y desarrollo de suelos afectados por sales en condiciones tropicales. *Soil Technology.* 1(1):13-35
- PLA, I. 1997. Evaluación de los procesos de salinización de suelos bajo riego. *Edafología.* 241-267. SECS (Spain)
- PLA, I. 1998. Modelling the processes of dissolution an a precipitation of salts in soils as related to management of irrigation ana drainage. *Proc.16th World Congress of Soil Science.* I: 98-104. ISSS. Montpellier (France)

- PLA, I. 2002. Hydrological approach to soil and water conservation. En (J.L. Rubio y col, Ed) *Man and Soil at the Third Millenium*. I:65-87. Geofoma Ed. Logroño (España)
- PLA, I. 2006. Hydrological approach for assessing desertification processes in the Mediterranean region. In (Kepner et al Ed) "Desertification in the Mediterranean Region: A Security Issue". 579-600. Springer
- RAMIREZ, J. A. 2012. Evaluación general de la salinidad y modelización de los riesgos de salinización en suelos del Valle del Cauca: Uso práctico del modelo SALSODIMAR para evaluar el riesgo de salinización en tierras bajo riego de la parte plana del Valle del Cauca (Colombia). Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional. Palmira (Colombia)
- RAMÍREZ, J. A., E. MADERO, I. PLA, Y R. ZAPATA. 2014 .Salinidad en suelos dedicados a caña de azúcar en el Valle del Cauca. Parte 1: Salinidad actual (in press)
- RENGASAMY, P Y OLSSON, K.A.,1991. Sodicity and Soil Structure. *Australian Journal of Soil Research*, 22: 413-431
- SANCHEZ, E., E. MADERO Y I. PLA. 2014. Manejo de agua de riego bicarbonatada sodica para caña de azucar en un vertisol mal drenado, Valle del Cauca, Colombia (in press)
- USDA. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. (L.A. Richards, ed). *USDA Handbook 60*. Washington, D.C. (USA)
- VARGAS, G.E. 2001. Salinización inducida en los suelos agrícolas de Canarias: caracterización y prognosis. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna. Tenerife (Spain). 427 pp