

EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE SALINIZACIÓN DE SUELOS BAJO RIEGO

ILDEFONSO PLA SENTÍS

Departament de Medi Ambient i Ciències del Sol. Universitat de Lleida

INTRODUCCIÓN

El riego de tierras agrícolas ha sido considerado ya desde hace varios milenios la manera más efectiva de incrementar y regular la producción agrícola, especialmente en climas áridos y semiáridos. La suplencia de los alimentos requeridos para la creciente población mundial en las próximas tres a cuatro décadas requerirá un incremento de más del 50% en la producción agrícola. Dicho incremento deberá basarse en gran parte en los aumentos de rendimientos y en una mayor intensificación de la producción en tierras ya cultivadas, en parte a través de la introducción del riego, y en la expansión del riego a nuevas tierras (FAO, 1988).

A pesar de que el desarrollo de la agricultura de riego ha estado asociada al desarrollo de grandes civilizaciones de la antigüedad, su rápida expansión a grandes áreas ha ocurrido en su mayor parte en los últimos tiempos. De unas ocho millones de hectáreas (Mha) bajo riego en todo el mundo en el año 1800, el área regada se extendió a alrededor de 50 Mha en 1900, y a casi 250 Mha hoy en día, con proyectos para su expansión a 350-400 Mha, especialmente en países en desarrollo, en los próximos 20-30 años. Ya hoy en día unas mil millones de personas en todo el mundo realizan actividades relacionadas con la agricultura de riego, la cual produce en

sólo un 15-18% de las tierras cultivadas un 35% del total de alimentos (Szabolcs, 1989; WRI-IIED-UNEP, 1988).

Los beneficios derivados de la agricultura de riego frecuentemente no han sido sostenibles por la salinización o desarrollo de suelos afectados por sales. Esta salinización puede conducir a una pérdida parcial o total de la capacidad productiva del suelo, al provocar una degradación interna, prácticamente irreversible, de sus propiedades químicas y físicas. Esto es conocido desde tiempos muy antiguos, habiéndose citado que la salinización de grandes áreas de las tierras regadas en la llanura aluvial de Mesopotamia, al conducir a descensos drásticos en la producción de alimentos, fué una de las principales causas de la caída de la civilización sumeria hace ya casi 5000 años. En todo el mundo más de un 10% de las tierras están afectadas en condiciones naturales por algún tipo o nivel de salinización, de las cuales unas 350 Mha están completamente desertificadas. Lamentablemente, el incremento reciente de áreas bajo riego ha estado y sigue acompañado del desarrollo de suelos afectados por sales, lo cual a su vez ha llevado a un descenso por debajo de lo previsto o deseable en el desarrollo de nuevas áreas de riego. A través de la historia se considera que por intervención del hombre, se han salinizado unas 25 Mha en tierras de

regadío, mientras que cada año alrededor de 1,5 Mha de tierras bajo riego pierden 25-50% de su capacidad productiva debido a la salinización, y ya un 50% o más de las tierras actualmente regadas en el mundo sufren algunas pérdidas de productividad por procesos de salinización incipientes. Aunque la extensión de tierras degradadas anualmente por otros procesos, especialmente por erosión (6-7 Mha) es superior, la degradación por salinización tiene una trascendencia igual o mayor desde los puntos de vista económico, social y ambiental, tomando en cuenta los costos de desarrollo de agricultura de riego, el alto consumo de recursos hídricos cada vez más escasos y su alta contribución a la producción local o mundial de alimentos. De ahí la gran importancia y urgencia que reviste una evaluación adecuada y precisa de los procesos de degradación de suelos por salinización que conduzca a la selección, desarrollo y aplicación de medidas eficientes para la prevención, control o reversión, según los casos, de dichos procesos. También deben considerarse en dichas evaluaciones la contribución creciente de las aguas de drenaje de las tierras bajo riego a otros problemas ambientales, como el anegamiento de tierras más bajas y la contaminación con sales, nitratos, y otros productos químicos de uso agrícola, de aguas freáticas o superficiales que necesiten utilizarse para otros fines.

PROCESOS Y CAUSAS DE LA SALINIZACIÓN DE SUELOS EN TIERRAS BAJO RIEGO

Los problemas de salinización de suelos son generalmente la 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 estaban disueltas en ella. A pesar de que estos procesos de salinización se pueden desarrollar en forma progresiva bajo condiciones naturales, donde existan combinaciones de aridez y drenaje restringido, generalmente solo

se aceleran cuando el régimen de humedad del suelo cambia drásticamente con intervención del hombre, especialmente con la introducción del riego sin una adecuada combinación de su manejo y de las condiciones de drenaje.

Las aguas de riego contienen siempre sales en solución, en variables cantidades y composiciones. Sus aportes de sales pueden alcanzar hasta 10 toneladas (Mg) por hectárea en un año. La mayoría de esas sales permanecen en el suelo cuando el agua de riego se pierde fundamentalmente por evapo-transpiración. Cuando dichas sales no son lavadas al subsuelo y eliminadas con el agua de drenaje interno, pueden acumularse en el suelo superficial hasta niveles que afecten el crecimiento de las plantas o las propiedades del suelo. Cuando el lavado requerido no es provisto por un exceso de agua de lluvia, lo cual es más común en climas áridos y semiáridos, se requerirá aplicar un exceso de agua de riego con dicho fin. Si dichos excesos de agua no son evacuados a través de sistemas naturales o artificiales de drenaje, las sales lavadas pueden volver a resalinizar el suelo superficial en el mismo sitio o en áreas adyacentes.

De los argumentos precedentes puede sacarse la conclusión de que la introducción de riego en zonas áridas, semiáridas e incluso subhúmedas, puede conducir a la salinización del suelo cuando no existen o no se proveen las condiciones adecuadas de drenaje. Las prácticas de drenaje para controlar los problemas de salinidad eran casi desconocidas hasta los inicios de este siglo, y solamente hasta 1945-50 no tuvieron una base científica (Boumans, 1987). El concepto de requerimiento de lavado, o lavado requerido para controlar la salinidad por debajo de límites tolerables (expresado como una fracción del agua de riego aplicada) sólo fué introducido en 1954 (USDA, 1954). El posterior desarrollo y aplicación de estos conceptos y prácticas han permitido en muchos casos llegar a controlar los procesos de salinización, e incluso recuperar tierras ya salinizadas, con lo que se ha terminado con el viejo axioma de que la agricultura de riego, tarde o temprano, y en cualquier circunstancia, conduce a la salinización de las tierras en que se aplica.

En muchos casos, las áreas con agricultura de riego están localizadas en zonas vecinas a desarrollos urbanos e industriales, que compiten por el uso del agua de buena calidad. En esas ocasiones a veces se deja el agua de peor calidad para el riego de cultivos, incluyendo aguas freáticas de alta salinidad, o aguas residuales de origen urbano e industrial más o menos tratadas. La sobreexplotación de acuíferos en llanuras costeras lleva con frecuencia a la intrusión de aguas salinas de mar hacia el acuífero, con lo que se incrementa la salinidad del agua extraída para riego. En algunos casos, aún en acuíferos que no están en contacto con aguas marinas, su sobreexplotación lleva a un descenso del nivel de bombeo y a la extracción de aguas freáticas más profundas y más salinas.

El exceso de agua requerida para lavar las sales del suelo, ya sea en proceso de recuperación o de prevención de salinidad, puede causar otros problemas ambientales derivados del desagüe y uso posterior de dichas aguas de drenaje. El problema se agrava a veces, porque esos efluentes contienen además de sales, residuos de fertilizantes y pesticidas, generalmente utilizados en grandes cantidades en agricultura intensiva de riego, e incluso metales pesados y otros contaminantes cuando se usan aguas residuales para riego. En ese caso, todos estos productos pueden llegar a contaminar otras aguas superficiales o subterráneas utilizadas para fines urbanos, industriales o agrícolas, y a restringir sus posibilidades de ser reutilizadas. En dichos casos, las prácticas y sistemas de riego y drenaje deben perseguir una máxima eficiencia en el uso del agua de riego, reduciendo las posibilidades de pérdidas y contaminación de otras aguas, manteniendo al mismo tiempo las sales a profundidades que no puedan ser alcanzadas por las raíces de los cultivos (Rhoades y Suárez; 1977). Esto tiene a veces que combinarse con sistemas para interceptar las aguas de drenaje antes de que se mezclen con otras aguas que puedan llegar a contaminar.

Se ha especulado acerca de la posible influencia de futuros cambios climáticos globales sobre el incremento de las áreas afectadas por

sales donde ya la salinización es un problema (Szabolcs, 1990). Para ello se plantean como posibles causas incrementos en el índice de aridez, que afectaría el régimen hídrico y balance de sales en el suelo, con menos lavado y más salinización; y el ascenso del nivel de los mares, con inundaciones de aguas salinas en las tierras bajas de los deltas, e incremento en la intrusión de aguas salinas en los acuíferos costeros.

CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES PARA EL DESARROLLO DE SUELOS SALINOS Y SÓDICOS

Todos los suelos con problemas derivados directa o indirectamente de la cantidad o tipo de sales presentes en la solución del suelo, se llaman genéricamente "**suelos afectados por sales**". Los problemas resultantes pueden ser muy diferentes dependiendo de los procesos geoquímicos que intervengan en el proceso de salinización, ya sea de origen primario (procesos naturales) o secundario (con intervención del hombre). En ambos casos los factores responsables son la concentración y la composición relativa de las sales en las aguas superficiales y subterráneas, y los cambios que puedan sufrir en la solución del suelo como consecuencia de la influencia del clima, del riego y del drenaje sobre el régimen hídrico del suelo. Los principales factores climáticos a considerar son la lluvia y la evapo-transpiración. El drenaje es el resultado de las propiedades hidráulicas del perfil del suelo, de la profundidad del nivel freático y de la posición en el paisaje. En cuanto al riego, interesan las cantidades de agua aplicar, el método y la frecuencia.

La mayor parte de las sales en aguas superficiales y subterráneas, y en la solución del suelo, son combinaciones de los cationes Ca^{++} , Mg^{++} y Na^+ , y de los aniones HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{--} . En algunos suelos con fuertes aplicaciones de fertilizantes, el anión NO_3^- puede acumularse también en concentraciones significativas en la solución del suelo. La principal fuente natural de las sales predominantes es la meteorización

de los minerales en la corteza terrestre, la lluvia en zonas costeras, y la disolución de sales fósiles en algunas formaciones geológicas de origen marino. Con la intervención del hombre hay aportes adicionales de sales con las aguas de riego, con las aguas residuales y con la fertilización. Las diferencias en cantidades y tipos de sales acumuladas en la solución del suelo dan como resultado "suelos afectados por sales" con diferentes propiedades químicas, físicas y fisico-químicas, los cuales a su vez tienen diferentes requerimientos de manejo tanto para la prevención de su desarrollo como para su uso y recuperación.

Basados en sus principales efectos sobre suelos y cultivos, la mayor parte de los "suelos afectados por sales" pueden clasificarse en "suelos salinos" y en "suelos sódicos". Además hay otros tipos de suelos afectados por sales con procesos de desarrollo y propiedades muy particulares, como son los "suelos salino-ácidos" (Pla y Florentino, 1983). Tradicionalmente los "suelos sódicos" han sido llamados "suelos alcalinos", refiriéndose a los suelos con presencia y acumulación de bicarbonatos y carbonatos de Na, y pH > 8,5-9. Sin embargo hay otros suelos con propiedades de "suelos sódicos", pero con pH inferiores y menores niveles relativos de Na que los llamados "suelos alcalinos" (Pla, 1988).

Los "suelos salinos" son aquellos en que el contenido de sales y la presión osmótica de la solución del suelo no permiten la absorción por el cultivo de una gran parte del agua del suelo, sin efectos negativos directos de las sales en las propiedades físicas del suelo. La principal consecuencia es una reducción parcial o total en el crecimiento de las plantas debido a déficits fisiológicos de agua. Para fines prácticos, la concentración de sales se expresa en unidades de "conductividad eléctrica" (dS/m: deciSiemen/metro a 25°C) en el extracto de saturación del suelo (USDA, 1954). Un dS/m es aproximadamente equivalente a una concentración de sales en solución de 10 meq/l y a una presión osmótica de 36 Kpascales.

Es bien conocido que el stres de la humedad del suelo para las plantas es un resultado de stres mátrico (negativo del potencial mátrico), el

cual se incrementa cuando disminuye la humedad del suelo, y de un stres osmótico, el cual aumenta al incrementarse la salinidad en la solución del suelo. Ambos streses son más o menos aditivos, y por lo tanto un sistema para reducir los efectos de la salinidad será mantener el stres mátrico lo más bajo posible, a través de riegos muy frecuentes o continuos (Pla, 1996). Otra alternativa es la de sembrar cultivos más tolerantes a las sales, los cuales sean capaces de crecer y producir rendimientos económicos aún a altos streses de humedad del suelo, a través de ajustes en sus tasas de transpiración o en la presión osmótica de sus células. Frecuentemente los efectos de la salinidad sobre los cultivos sólo son visibles después que han habido fuertes descensos en los rendimientos cosechables. Este efecto gradual de la salinidad en el rendimiento puede ser calculado (Mass y Hoffman, 1977):

$$R/R_{\text{máx.}} = 1 - b (CE_{\text{ES}} - CE_{\text{ES máx.}})$$

donde: R=Rendimiento con la salinidad CE_{ES} ; $R_{\text{máx.}}$ =Rendimiento en un suelo no salino; CE_{ES} =Conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo; $CE_{\text{ES máx.}}$ =Conductividad eléctrica en el extracto de saturación cuando R comienza a disminuir = intercepto en el eje y de la línea recta que relaciona $R/R_{\text{máx.}}$ y CE_{ES} ; b: pendiente de la línea que relaciona $R/R_{\text{máx.}}$ con CE_{ES} , la cual es característica para cada combinación de cultivo, clima y manejo del riego.

En algunos casos, como consecuencia de la acumulación selectiva de ciertos elementos específicos como cloro, sodio, boro, etc en la solución del suelo, se presentan problemas nutricionales específicos o efectos tóxicos, precediendo o asociados a los efectos más generales del stres osmótico. Estos efectos son específicos para ciertos cultivos sensibles, y deben ser considerados como tales en la evaluación de los procesos de salinización de los suelos.

El desarrollo de "suelos salinos" es más comun en climas áridos y semiáridos, con LPC <120 días (ver cuadro 1). Los métodos de prevención y recuperación de estos suelos se basan

Cuadro 1. Condiciones para el desarrollo potencial de salinidad o sodicidad en suelos bajo riego.

Condiciones				
AGUA DE RIEGO				
Concentración:	(Alta)	(Mediana)	(Baja)	
CE:	$\geq 2 \text{ dS/m}$	$1-2 \text{ dS/m}$	$< 1 \text{ dS/m}$	
Composición:	$\text{Cl} > \text{S} > \text{B}$ $\text{Na} \geq \text{CA}$	$\text{S} \geq \text{Cl} > \text{B}$ $\text{CA} > \text{Na}$	$\text{B} \geq \text{S} > \text{Cl}$ $\text{CA} \geq \text{Na}$	$\text{B} > \text{S} > \text{Cl} (\text{B} > \text{CA})$ $\text{Na} \geq \text{CA}$
DRENAJE	(Variable)	(Muy restringido)	(Restringido)	
Perm. Suelo (I):	1-50 mm/hora	$< 1 \text{ mm/hora}$	$< 5 \text{ mm/hora}$	
Prof. Freática (#):	$< 1,5 \text{ m}$	$< 0,5 \text{ m}$	$< 1,0 \text{ m}$	
CLIMA	(Ar. - SAr. S)	(Ar.-SAr.S)	(SAr.S.-SH.)	(Ar.-SAr.H)
IDA (P/ETP):	$< 0,5$	$< 0,5$	0,5-1	$< 0,8$
LPC (P>(ETP/2)):	$< 120 \text{ días}$	$< 120 \text{ días}$	$120-270 \text{ días}$	$< 180 \text{ días}$
Problema resultante				
SOLUCIÓN DEL				
SUELO (ES)	(Muy salina)	(Med.salina)	(Lig.salina)	(Var.salín.)
Concentración(CE):	$> 8 \text{ dS/m}$	$> 4 \text{ dS/m}$	$< 4 \text{ dS/m}$	$> 2 \text{ dS/m}$
Composición:	$\text{Cl} >> \text{S} >> \text{B}$ $\text{Na} > \text{CA}$	$\text{Cl} \geq \text{S} >> \text{B}$ $\text{Na} \geq \text{CA}$	$\text{S} > \text{Cl} > \text{B}$ $\text{Na} > \text{CA}$	(*) $\text{S} \geq \text{B} > \text{Cl}$ $\text{Na} >> \text{CA}$
pH:	$< 8,5$	$< 8,5$	$> 7,5$	$> 8,5$
SALES PRECIP:	CAC + CaS	CAC + CaS	CAC	CAC
PROBLEMA				
POTENCIAL:	"SALINIDAD"		"SODICIDAD"	

Cl, S, B, Na, Ca, CA: Cloruros, sulfatos, bicarbonatos, Na, Ca, y (Ca+Mg) respectivamente, en el agua de riego o en el extracto de saturación (ES) del suelo; CAC, CaS: Carbonatos de (Ca+Mg) y sulfato de Ca respectivamente, que precipitan en el suelo; CE: Conductividad eléctrica; I: Velocidad de infiltración; IDA: Índice de disponibilidad de agua = Precipitación efectiva (P)/Evapotranspiración potencial /ETP en el año; LPC: Longitud de período de crecimiento = Días con precipitación (P) mayor que la 1/2 de la ETP y con temperaturas medias superiores a 5° C; Climas: Árido (Ar.)(LPC<74 días), Semi-Árido Seco (SAr.S)(LPC 75-119 días), Semi-Árido Húmedo (SAr.H)(LPC 120-179 días), Sub-Húmedo (SH)(LPC 180-270 días).
 (#) Nivel freático permanente o presencia de estratos que impidan o restrinjan el drenaje interno
 (*) Cambio de composición bajo condiciones anaeróbicas ($2\text{Na}^+ + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{S}^{2-} + 2\text{NaHCO}_3$)

en el lavado del exceso de sales acumuladas, tomando máxima ventaja de los excesos temporales estacionales de agua de lluvia, y aplicando más agua de riego que los requerimientos del cultivo. Dependiendo de las circunstancias, este lavado puede buscar solamente el desplazamiento de las sales a profundidades en el perfil del suelo fuera del alcance de las raíces de las plantas, o su eliminación definitiva en las aguas de drenaje profundo. La primera alternativa requiere de un control muy cuidadoso en el manejo del agua de riego y del nivel freático, para evitar que las sales puedan regresar al suelo superficial. En algunos casos, el lavado de los "suelos salinos" puede resultar en el desarrollo de "suelos sódicos", como consecuencia de la composición de las sales en el suelo original o en el agua utilizada para el lavado, y de la textura y mineralogía del suelo, lo cual debe ser evaluado con antelación. Si ese es el caso, la recuperación debe seguir algunas de las prácticas recomendadas para la recuperación de suelos sódicos.

Los "suelos sódicos" incluyen aquellos donde la acumulación de altos niveles de Na, a veces acompañado de Mg, tanto en solución como intercambiable, en relación a los niveles de Ca+Mg y salinidad total, provoca un deterioro de sus propiedades físicas. Las principales consecuencias son reducciones drásticas tanto en la conductividad hidráulica saturada del suelo como en la velocidad final de infiltración. En la práctica ha resultado muy conveniente expresar los niveles de "sodificación" del suelo en valores de la "relación de adsorción de sodio" (RAS) en el extracto de saturación (ES) del suelo (USDA, 1954):

$$RAS_{ES} = Na_{ES} / (Ca_{ES} + Mg_{ES})^{1/2}$$

donde Na_{ES} , Ca_{ES} y Mg_{ES} son las concentraciones de estos elementos en el extracto de saturación del suelo en milimoles / litro.

Los efectos sobre las propiedades físicas del suelo están en ciertos casos relacionados con la dispersión de partículas de arcilla o limo en el suelo superficial. Esto produce un rápido sellado

de la superficie del suelo, y con el tiempo puede llevar a un taponado completo e irreversible de los poros por las partículas dispersas en una capa de suelo cercana a la superficie, la cual es casi impermeable al agua, y extremadamente compacta y dura al secarse. Estos efectos son más frecuentes en suelos con altos contenidos de limo y arcillas poco expandibles (micas hidratadas, caolinita) que pueden dispersarse a bajos niveles relativos (5-8 %) de sodio intercambiable, siempre que la salinidad de la solución del suelo superficial y del agua percolante se mantengan muy bajas (Pla, 1988).

En otras ocasiones, los efectos perjudiciales sobre las propiedades físicas de los suelos también incluyen el bloqueo de los poros por hinchamiento reversible de las arcillas al humedecerse. Esto requiere unos mayores niveles (10-15 %) de sodio intercambiable, y la presencia de arcillas expandibles, y va acompañado generalmente de altos valores de pH y de acumulación de sales (bicarbonatos y carbonatos de sodio) con hidrólisis alcalina. Estos suelos se corresponden con los que tradicionalmente han sido llamados "suelos alcalinos", y en algunos casos "suelos alcalinos negros", debido a la dispersión y deposición en superficie de materia orgánica del suelo. Cuando la superficie de estos suelos se seca y desaparece el efecto de hinchamiento, generalmente se desarrollan grietas profundas y una estructura prismática o columnar. Niveles altos de salinidad en la solución del suelo, o en el agua percolante, disminuyen los efectos de dispersión y de hinchamiento del sodio intercambiable. Por lo tanto, los efectos de la salinidad y del sodio conducentes a efectos de sodicidad dependen principalmente del contenido y naturaleza de la fracción arcilla del suelo, y del tipo de efectos predominantes (dispersión o hinchamiento).

Los principales efectos negativos de los suelos sódicos sobre los cultivos se deben a descensos en la infiltración y almacenamiento de agua en el suelo, a incrementos en la humedad del suelo en el punto de marchitamiento, a un desarrollo de raíces muy superficial y poco

denso, y a largos períodos de aireación deficiente del suelo. Todos estos efectos generalmente conducen en forma indirecta a restricciones en la suplencia de agua y nutrientes al cultivo. En algunos casos la máxima cantidad de agua que puede infiltrar en el suelo es incluso menor que la evapotranspiración potencial acumulada de las plantas (Pla, 1996), lo que hace imposible incluso su supervivencia. Algunos efectos adicionales se deben a diferentes problemas nutricionales provocados por el deficiente desarrollo radicular y los altos pH. También es frecuente que muchos suelos sódicos se transformen a la larga en salinos, debido a que la muy deficiente permeabilidad no permite un efectivo lavado de las sales que continuamente se incorporan con las aguas de riego.

Por todas las condiciones antes señaladas, la utilización de suelos sódicos está generalmente restringida a cultivos como el arroz o algunas cultivos herbáceos, que pueden desarrollarse en condiciones de anegamiento casi continuo. Su recuperación, y en muchos casos también las medidas de prevención de su desarrollo, requieren generalmente del uso de enmiendas químicas previo a su lavado. Estas enmiendas son principalmente sales ácidas de Ca ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), y productos ácidos o formadores de ácidos (H_2SO_4 ; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$; S; FeS_2), los cuales pueden ser agregados al agua de riego o directamente al suelo superficial. El Ca de la enmienda aplicada, o de los carbonatos de Ca precipitados en el mismo suelo y disueltos por los productos ácidos, reemplazan al sodio intercambiable, el cual debe ser posteriormente lavado del suelo. Para que dicho lavado sea efectivo, se requiere incrementar las tasas de infiltración y de percolación de agua en el suelo a valores superiores que las tasas de evaporación del agua. También es posible recuperar más lentamente suelos sódicos que contengan carbonatos de Ca y Mg precipitados, utilizando cultivos, sólo o conjuntamente con enmiendas químicas (Chhabra y Abrol, 1977; Sandhu y Abrol, 1981; Abrol y col, 1988). Los cultivos

utilizados (arroz y cultivos herbáceos, a veces combinados con especies forestales) tienen que ser tolerantes a altos niveles de sodio intercambiable, y además deben ser capaces de resistir condiciones prolongadas de exceso de humedad, y moderados niveles de salinidad. Estos sistemas pueden conducir a una continua y gradual disminución de la sodicidad, a través de la liberación de Ca de los carbonatos precipitados en el suelo, por incremento de la producción y retención (restricción en la difusión) de CO_2 en la solución del suelo, y por la mejora de las propiedades hidrológicas del suelo, todo ello derivado del desarrollo y actividad de los sistemas radiculares de los cultivos señalados.

Puede concluirse que no hay límites precisos de niveles de sales o de sodio para clasificar un suelo como salino o sódico, y que los límites propuestos en el pasado (USDA, 1954) y utilizados muchas veces en forma indiscriminada, sólo sirven como una referencia general, pero nunca para guiar prácticas específicas de manejo del riego o de recuperación. Los valores críticos pueden ser muy variables, dependiendo de las diferentes combinaciones particulares de suelo, clima, cultivo y manejo. Los mismos factores de variabilidad existen en las posibilidades de prevención y recuperación de suelos salinos y sódicos. En el cuadro 1 se presentan las principales condiciones generales que pueden conducir al desarrollo de diferentes tipos de suelos salinos y sódicos. Adicionalmente, algunas condiciones específicas previas al riego, como la presencia de sales fósiles a poca profundidad en el perfil del suelo, o en aguas freáticas poco profundas, pueden también influir en el tipo y grado de salinización del suelo.

METODOLOGÍA DISPONIBLE PARA LA CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE SALINIDAD ACTUAL

Entre los métodos disponibles y propuestos para la caracterización y evaluación de la

salinidad del suelo en un momento dado destacan los siguientes (USDA, 1954; Rhoades e Ingvalson, 1971; Nadler y Frenkel, 1980; Rhoades, 1982; Yadau y col, 1979; Dalton y van Genuchten, 1985; Rhoades, 1988):

- Muestras de suelo, en las que se pueden medir parámetros físicos, cationes intercambiables, y concentración y composición de sales solubles en suspensiones suelo:agua (1:1, 1:2, 1:5) y en extractos acuosos a diferentes relaciones suelo:agua (extracto saturado, 1:1, 1:2, 1:5). El extracto de saturación se utiliza generalmente como base para la interpretación de niveles de salinidad, y para expresar los valores de tolerancia de los cultivos a la salinidad.

- Muestras de la solución del suelo, recolectadas "in situ", generalmente con copas porosas y extractores al vacío. Permite medir concentración y composición de las sales en la solución del suelo en condiciones naturales, sólo a altos contenidos de humedad.

- Sensores de salinidad en bloques porosos, los cuales se entierran directamente en el suelo, absorbiendo y equilibrándose con el agua del suelo. Son útiles para seguir los cambios de salinidad total en lugares específicos, pero tardan mucho tiempo en alcanzar equilibrio y son poco precisos en suelos más secos.

- Sondas o sistemas con electrodos, los cuales se instalan directamente en el suelo, midiendo la resistencia al flujo de corriente eléctrica entre un par de electrodos mientras se provoca el flujo de corriente a través del suelo entre otro par de electrodos. Mide la salinidad total (conductancia eléctrica específica del conjunto de las tres fases (sólida, líquida y gaseosa) del suelo) "in situ", en volúmenes de suelo mayores que con otros métodos. Presenta problemas de calibración, y sólo sirve para un diagnóstico general de la salinidad de un área, y para guiar muestreos más detallados.

- Sensores de inducción electromagnética, que a través de la imposición de un campo electromagnético primario dentro del suelo inducen un flujo de corriente y un campo electromagnético secundario en el mismo suelo, el

cual es directamente proporcional a la conductividad eléctrica del suelo. Permite hacer mediciones de salinidad total desde la misma superficie del suelo, pero presenta problemas de calibración para diferentes suelos y diferentes contenidos de humedad.

- TDR (reflectometría en el dominio del tiempo), que permite deducir la constante dieléctrica aparente y la conductividad eléctrica del suelo en su conjunto a partir del tiempo que le toma a un pulso electromagnético de alta frecuencia para pasar a través del suelo guiado por un par de varillas o sondas paralelas de determinada longitud, insertadas en el suelo, y la atenuación del voltaje de dicho pulso, respectivamente. Tiene la ventaja de permitir medir simultáneamente y con registro continuo, humedad y salinidad total directamente en el campo y a diferentes profundidades, pero aún está en fase de prueba y perfeccionamiento en cuanto a las mediciones de salinidad.

Tomando en consideración las limitaciones aún existentes en los instrumentos de campo actualmente disponibles en el mercado para medir salinidad "in situ" (requerimientos de calibración de relaciones entre CE(suelo) y CE(solución del suelo) para cada suelo; influencia de las variaciones en humedad del suelo en el momento de la medición; dificultades para discriminar con precisión la profundidad de las diferentes mediciones; experiencias limitadas en el campo; costos), proponemos por ahora (mientras se logran resolver algunas de las limitaciones señaladas de los equipos actualmente disponibles en el mercado) utilizar la siguiente metodología, la cual resulta más práctica, más barata, e incluso más precisa para evaluar la salinidad en el campo. Ella consiste en preparar suspensiones suelo:agua aproximadamente 1:1 (utilizando una muestra disgregada de suelo de aproximadamente 100 g, la cual se mide "volumétricamente" en un pequeño recipiente de plástico de boca ancha y a la que se agregan 100 cc de agua destilada o de muy baja salinidad, para posteriormente mezclar bien mediante agitación el suelo y el agua), en

las que se mide salinidad total (CE 1:1), y si es posible pH, mediante equipos sencillos de campo disponibles en el mercado. Las muestras de suelo se van obteniendo siguiendo un patrón regular, o en puntos seleccionados, según sea el objetivo, desde la superficie y a diferentes profundidades, utilizando un barreno adecuado. La salinidad (CE) del extracto saturado (CE_{es}) puede deducirse aproximadamente:

$$CE_{es} \text{ (dS/m)} = f(d) \cdot CE \text{ (1:1) (dS/m)}$$

si no hay yeso precipitado en el suelo

$$CE_{es} \text{ (dS/m)} = f(d) \cdot (CE \text{ (1:1) } - 2) + 2 \text{ (dS/m)}$$

si hay yeso precipitado en el suelo

$f(d)$: factor de dilución (1,5 ; 2,0 ; 3,0 para suelos arenosos, francos y arcillosos respectivamente)

USO DE INDICES Y MODELOS DE SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN PREDICTIVA DE PROCESOS DE SALINIZACIÓN

La salinización secundaria inducida por el hombre se debe principalmente a un manejo no adecuado del agua (riego y drenaje) en relación a cada combinación particular de clima, suelo, cultivo, prácticas de fertilización, nivel freático y salinidad de sus aguas, calidad del agua de riego, y sistema de riego. Aunque hoy en día se conocen métodos y hay las posibilidades tecnológicas para recuperar suelos ya afectados por sales, raramente dichas recuperaciones pueden justificarse desde un punto de vista estrictamente económico. Incluso cuando las condiciones socioeconómicas provean dicha justificación, se presentan generalmente dificultades derivadas de la escasez de agua de buena calidad para el lavado, o de problemas potenciales de contaminación de otras aguas superficiales o subterráneas. Por lo tanto resulta más conveniente, cuando ello aún es posible, preestablecer a través del uso de índices y modelos predictivos adecuados, cuáles serían las mejores alternativas de manejo del agua de

riego y drenaje para evitar y controlar los problemas de salinización para cada combinación particular, actual o hipotética, de clima, suelo y agua de riego disponible. Esto aún resulta más evidente cuando hay una alta competencia por los recursos hídricos de buena calidad, cuando la calidad del agua disponible es baja, y cuando es necesario reducir a un mínimo los efluentes de agua de drenaje salina o contaminada.

La evaluación predictiva de los problemas de salinización no es fácil, debido a que las condiciones hidrológicas, químicas y fisicoquímicas con influencia en los procesos de desarrollo de suelos afectados por sales suelen ser complicadas y difícilmente controlables. Ello obliga a simplificar algunas de ellas para que los índices y modelos resultantes sean de posible utilización en la práctica.

Hay que partir del principio de que no es posible controlar la salinización de los suelos bajo riego sin un adecuado lavado de las sales y drenaje del agua de lavado, lo que a su vez requiere de un flujo neto de agua por debajo de la zona radicular del suelo. Es por ello que los índices y modelos de predicción deben basarse en la llamada "fracción de lavado" (L), la cual integra en un sólo número los balances actuales o requeridos de agua y sales. Este concepto, introducido originalmente en 1954 (USDA, 1954), como una expresión cuantitativa del lavado requerido para controlar la salinidad total del suelo por debajo de algún nivel crítico, se ha ido precisando más a través de los años (Pla, 1968, 1983, 1988, 1996; Rhoades, 1968, 1984; Pla y Dappo, 1975; FAO, 1976), y se ha extendido a la predicción de sodicidad del suelo. Estas mejoras han sido posibles gracias a un mejor conocimiento de las relaciones entre el riego, el drenaje y la salinidad, tomando en consideración en algunos casos las posibilidades de precipitación o disolución en el suelo de sales de solubilidad limitada (yeso y carbonatos de Ca y Mg), y las posibilidades de sodificación además de las de salinización. Esto ha permitido precisar y corregir errores que se estaban y están cometiendo en el cálculo de requerimien-

tos de riego y drenaje y en la planificación de las prácticas para cumplir con dichos requerimientos, al no evaluar y predecir adecuadamente dichos procesos. En cuanto a los niveles freáticos, la posibilidad de que las sales de las aguas subterráneas alcancen la superficie del suelo o la zona radicular por ascenso capilar o difusión, puede evitarse con un manejo adecuado del riego y drenaje, que no permitan su ascenso a niveles críticos y mantengan un flujo neto de agua hacia abajo en el suelo. Por ello, los problemas derivados del ascenso de los niveles freáticos debe verse más bien como una consecuencia del manejo del agua de riego que como una variable independiente que cause problemas de manejo del agua.

En el pasado, y aún hoy en día se siguen utilizando frecuentemente tablas de valores empíricos (USDA, 1954) para describir la calidad y posible utilización de aguas de riego bajo condiciones hipotéticas promedio. Conscientes de la insuficiencia de estos criterios genéricos para predecir y prevenir los problemas de salinización para cada caso particular, se han ido desarrollando diferentes índices y modelos para corregir dicha situación. Prácticamente todos ellos se basan en el cálculo e interpretación de los valores de requerimiento de lavado, utilizando diferentes criterios más o menos racionales o empíricos. Entre ellos destacan:

- **USSL60** (USDA, 1954): Concepto básico de requerimientos de lavado ($RL = H_D/H_R = ST_R/ST_{ES}$), sin consideración de los posibles cambios en la composición y concentración de la solución del suelo derivados de precipitación y disolución de sales, y del intercambio iónico.

- **FAO76** (Rhoades 1972; FAO, 1976): Para salinidad total se asume que el cultivo responde a promedio de salinidad en la zona radicular y no a extremos. Estos extremos se asumen iguales al agua de riego (CE_R) en la superficie del suelo, y al agua de drenaje ($CE_D = CE_R / RL$) en la parte inferior de las raíces, para sistemas de riego que mantengan continuamente un flujo neto descendente de agua en

el suelo. Asumiendo un patrón de uso del agua de 40% en el _ superficial del sistema radicular, y de 30%, 20% y 10% en los cuartos que siguen, se calcula el requerimiento de lavado (RL):

Para riego convencional:

$$RL = CE_R / (5CE_{ES} - CE_R)$$

($CE_{ES} = CE$ para 10% de pérdida de rendimiento)

Para riego de alta frecuencia:

$$RL = CE_R / 2CE_{ES}$$

($CE_{ES} = CE$ máximo para pérdida total del cultivo)

(CE: Sales totales expresadas en conductividad eléctrica)

Como índice de sodio propone calcular una relación de adsorción de sodio ajustada a las posibilidades de disolución o precipitación de carbonato de Ca, dependiente de P_{CO_2} (presión parcial estimada de CO_2):

$$RAS(A_j) = Na (1 + (8,4 - pHc)); pHc = (pK_2 - pKc) + p(Ca + Mg) + p(Alk)$$

pHc: pH calculado del agua de riego en contacto con $CaCO_3$ y en equilibrio con el CO_2 del suelo; p: -log; Alk: $CO_3^{2-} + HCO_3^-$; $pK_2 - pKc$: ($pK_2 = 2da$ constante de disociación del H_2CO_3 , $pKc =$ producto de solubilidad del $CaCO_3$)

- **FAO86** (Suárez, 1981; FAO, 1986): El cálculo de los requerimientos de lavado para control de sales totales es similar al FAO76. Cómo índice de Na se propone:

$$R_{Na}(A_j) = Na / (1/2 CaX + Mg)^{1/2}$$

en el que la relación de adsorción de sodio (R_{Na}) viene corregida por posibles efectos de la precipitación o disolución de $CaCO_3$, dependiendo de la concentración total de sales y del pCO_2 . CaX representa el Ca en el agua aplicada modificado por la salinidad total del agua aplicada (ST_R), por la relación Bicarbonatos/Ca en meq/l, y por la presión parcial estimada de CO_2 ($pCO_2 = 0,007$ Atm.) en los primeros mm superficiales del suelo.

Rhoades (1983) propuso un programa de ordenador (WALSUIT), para calcular la composición y concentración de sales e iones a

cinco profundidades radiculares (superficie, 1/4, 1/2, 3/4, y profundidad total de raíces), asumiendo también un patrón de uso del agua del 40, 30, 20 y 10%, y pCO_2 de 0,0007; 0,005; 0,015; 0,023 al incrementarse la profundidad. En la práctica resulta difícil predecir el patrón de distribución de las raíces y los cambios de salinidad con la profundidad de las raíces, por la cantidad de factores influyentes, entre ellos las prácticas y el manejo del riego, la profundidad del nivel freático, las propiedades hidrológicas y químicas del perfil del suelo, el clima, etc.

Suárez y col (1996) propusieron un modelo como "herramienta de manejo" para predecir la distribución de sales y sodio (solubles e intercambiables) con profundidad y tiempo. El modelo combina flujo saturado de agua variable, con producción (respiración de microorganismos y raíces) y transporte de CO_2 (en fase líquida y gaseosa), transporte de solutos, un submodelo genérico de crecimiento de plantas, y un modelo principal de química de jones (reacciones equilibrio como complexación, intercambio de cationes y precipitación-disolución). Este modelo, como otros de naturaleza y complejidad similar, resulta muy difícil de aplicar por falta de la información requerida, y por la casi imposibilidad de precisar en la práctica las condiciones variables en tiempo y espacio que permitirían su aplicación.

Como una alternativa práctica a los anteriores índices y modelos, se presenta y propone el modelo "SALSODIMAR", el cual ha sido desarrollado como producto de sucesivas aproximaciones basadas en experiencias y validaciones acumuladas en diferentes zonas agroecológicas, durante los últimos treinta años (Pla, 1968; 1983; 1988; 1996; Pla y Dappo, 1977).

DESCRIPCIÓN DEL MODELO "SALSODIMAR"

El modelo "SALSODIMAR" (ver diagrama de flujo) se basa en un balance independiente de los iones más comunes en las aguas de

riego y en la solución del suelo, hasta alcanzar equilibrio, de acuerdo a la fracción efectiva lavado, y a las solubilidades máximas de las diferentes sales bajo diferentes condiciones. Para ello se toman en consideración los niveles críticos de salinidad y cloruros para diferentes cultivos y climas, y los niveles críticos de sodio para diferentes suelos y niveles de salinidad concurrentes. El modelo permite:

1) Prever las condiciones bajo las cuales se pueden desarrollar suelos afectados por sales tipo "salino", o tipo "sódico", y sus variantes (cuadro 1).

2) Predecir la acumulación de ciertos elementos como Cl, Na, Mg, etc., que pueden crear algunos problemas específicos.

3) Determinar bajo qué condiciones y en qué niveles se favorece la precipitación o disolución en el suelo de sales de solubilidad limitada (carbonatos de Ca y Mg, y sulfatos de Ca).

4) Calcular los requerimientos de agua de riego y de drenaje para control de la salinidad o sodicidad, en relación a los requerimientos de agua del cultivo en un clima determinado, y a partir de ellos deducir las alternativas más convenientes o posibles de manejo del agua de riego para cada suelo.

5) Cuando la simulación de unas condiciones dadas nos lleva a:

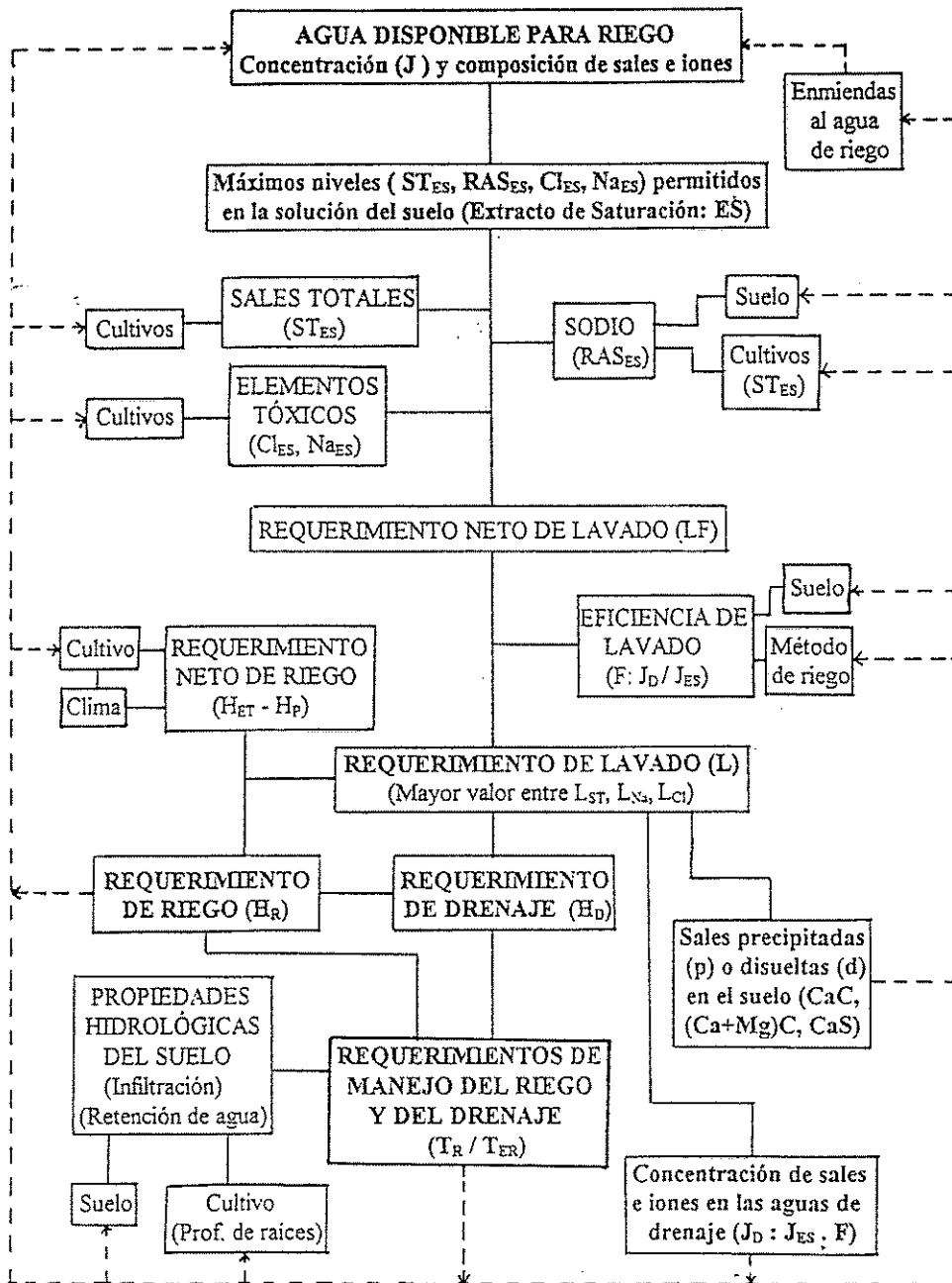
a) Requerimientos excesivos de agua de riego en relación a las tierras a regar

b) Requerimientos excesivos de drenaje en relación a la existencia, posibilidad y capacidad de sistemas naturales o artificiales de drenaje, y posibilidades de contaminación de aguas superficiales o subterráneas

c) Dificultades técnicas en el manejo del riego, derivadas de excesivos requerimientos de riego y drenaje, o de las propiedades hidrológicas del suelo

d) Niveles excesivos de sales o de elementos tóxicos en las aguas de drenaje que vayan a contaminar aguas superficiales o subterráneas a ser utilizadas con otros fines

DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO "SALSODIMAR"



----> Posibles alternativas de suelos, aguas de riego, enmiendas al agua de riego, cultivos y métodos de riego para diferentes requerimientos y limitaciones en el riego, drenaje y concentraciones de sales e iones en el agua de drenaje

el modelo permite prever:

a) Alternativas en cuanto a cambios o modificaciones (tratamientos, enmiendas) del agua de riego

b) Cambios en los cultivos buscando mayores tolerancias a sales y a algunos componentes en particular

c) Cambios, o uso de enmiendas, en los suelos utilizados para riego, buscando propiedades hidrológicas más favorables para el manejo del riego y del drenaje, y mayor resistencia a deterioro de ellas por efecto del sodio

Información requerida:

- Cationes y aniones más comunes en aguas de riego (meq/litro)

(Ca^{++} (Ca), Mg^{++} (Mg), Na^+ (Na), $\text{CO}_3^{=} + \text{HCO}_3^-$ (B), SO_4^- (S), Cl^- (Cl))

- Sales en el agua de riego ($\text{NaB} = \text{B} - \text{Ca} - \text{Mg}$ si $\text{NaB} > 0$; $\text{MgB} = \text{B} - \text{Ca} - \text{NaB}$ si $\text{MgB} > 0$; $\text{CaCl} = \text{Ca} - \text{B} - \text{S}$ si $\text{CaCl} > 0$; $\text{CaS} = \text{Ca} - \text{B} - \text{CaCl}$ si $\text{CaS} > 0$)

- Niveles críticos de sales totales (ST_{ES}).

cloruros (Cl_{ES}), sodio (Na_{ES}) u otros elementos tóxicos en el extracto de saturación del suelo (ES) para diferentes cultivos. Cuando los cálculos indiquen la posibilidad de precipitación de carbonato y sulfato de Ca en el suelo, los niveles críticos de ST_{ES} pueden incrementarse en 20 meq/l.

- Valores críticos de "Relación de Adsorción de Sodio" ($\text{RAS}_{\text{ES}} = \text{Na}_{\text{ES}} / ((\text{Ca}_{\text{ES}} + \text{Mg}_{\text{ES}})/2)^{1/2}$) en el extracto de saturación (ES) del suelo, para diferentes suelos y niveles concurrentes de ST_{ES} .

- Láminas mensuales, quincenales, diarias... de precipitación efectiva (H_p) y de evapotranspiración (H_{ET}) para cada clima, cultivo, variedad, etapa de desarrollo del cultivo... en mm

- Eficiencia de lavado ($F = \text{ST}_D / \text{ST}_{\text{ES}}$; $F = \text{Na}_D / \text{Na}_{\text{ES}}$) (D: agua de drenaje) para cada suelo y método de riego

- Características y propiedades de cada suelo:

a) Profundidad efectiva (R) en mm

b) Densidad aparente (DA) en g/cc

c) Capacidad de campo (CC) en g/cc

d) **Infiltración básica (I) en mm/hora**

Cálculos:

- **Requerimientos netos de lavado para control de sales totales LF(ST), cloruros LF(Cl), y sodio LF(Na)**

- **Concentraciones equilibrio (J) en el extracto de saturación del suelo (ES) de sales totales (ST_{ES}), sodio (Na_{ES}), calcio (Ca_{ES}), magnesio (Mg_{ES}), cloruros (Cl_{ES}) y bicarbonato de sodio (NaB_{ES})**

- **Carbonatos de calcio (CaC) y de calcio y magnesio ((Ca+Mg)C), y sulfatos de calcio (CaS) precipitados (p) o de posible disolución (d) en el suelo**

Si en el agua de riego: $\text{B} \leq (\text{Ca} + \text{Mg})$ (a)

$$\text{LF}(\text{ST}) = (\text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg}) / (\text{ST}_{\text{ES}})$$

$$\text{LF}(\text{Cl}) = \text{Cl} / \text{Cl}_{\text{ES}}$$

$$\text{LF}(\text{Na}) = (2\text{Na}^2) / ((\text{RAS}_{\text{ES}})^2 \times (\text{Ca} + \text{Mg}))$$

$$\begin{aligned} \text{LF(a)} &= \text{LF(ST)} \quad \text{si} \quad \text{LF(ST)} > \text{LF(Cl)} \quad \text{y} \quad \text{LF(ST)} > \text{LF(Na)} \\ \text{LF(a)} &= \text{LF(Cl)} \quad \text{si} \quad \text{LF(Cl)} > \text{LF(ST)} \quad \text{y} \quad \text{LF(Cl)} > \text{LF(Na)} \\ \text{LF(a)} &= \text{LF(Na)} \quad \text{si} \quad \text{LF(Na)} > \text{LF(ST)} \quad \text{y} \quad \text{LF(Na)} > \text{LF(Cl)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Na}_{\text{ES}} &= \text{Na} / \text{LF(a)} & \text{Ca}_{\text{ES}} &= \text{Ca} / \text{LF(a)} & \text{Mg}_{\text{ES}} &= \text{Mg} / \text{LF(a)} & \text{Cl}_{\text{ES}} &= \text{Cl} / \text{LF(a)} \\ (\text{Ca} + \text{Mg})\text{Cd} &= 10 \text{LF(a)} - \text{B} & \text{CaSd} &= 30 \text{LF(a)} - \text{CaS} \end{aligned}$$

$$\text{Si: } 10 \text{LF(a)} < \text{B} \quad \text{y} \quad 30 \text{LF(a)} \geq \text{CaS} \quad \text{(b)}$$

$$\begin{aligned} \text{LF(ST)} &= (\text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} - \text{B}) / (\text{ST}_{\text{ES}} - 10) \\ \text{LF(Cl)} &= \text{Cl} / \text{Cl}_{\text{ES}} \\ \text{LF(Na)} &= \frac{((\text{RAS}_{\text{ES}})^2 \times (\text{Ca} + \text{Mg} - \text{B})^2) + (80 \text{Na}^2)^{1/2}}{20 \text{RAS}_{\text{ES}}} - \frac{(\text{Ca} + \text{Mg} - \text{B})}{20} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LF(b)} &= \text{LF(ST)} \quad \text{si} \quad \text{LF(ST)} > \text{LF(Na)} \quad \text{y} \quad \text{LF(ST)} > \text{LF(Cl)} \\ \text{LF(b)} &= \text{LF(Cl)} \quad \text{si} \quad \text{LF(Cl)} > \text{LF(ST)} \quad \text{y} \quad \text{LF(Cl)} > \text{LF(Na)} \\ \text{LF(b)} &= \text{LF(Na)} \quad \text{si} \quad \text{LF(Na)} > \text{LF(ST)} \quad \text{y} \quad \text{LF(Na)} > \text{LF(Cl)} \end{aligned}$$

$$\text{Na}_{\text{ES}} = \text{Na} / \text{LF(b)} \quad \text{Ca}_{\text{ES}} = \frac{10(\text{Ca} + \text{Mg} - \text{MgB}) + (\text{CaS} + \text{CaCl})}{(\text{Ca} + \text{Mg}) \text{LF(b)}}$$

$$\begin{aligned} \text{Mg}_{\text{ES}} &= 10 + \frac{(\text{Ca} + \text{Mg} - \text{B}) - \text{Ca}_{\text{ES}}}{\text{LF(b)}} & \text{Cl}_{\text{ES}} &= \text{Cl} / \text{LF(b)} \\ (\text{Ca} + \text{Mg})\text{Cp} &= \text{B} - 10 \text{LF(b)} & \text{CaSd} &= 30 \text{LF(b)} - \text{CaS} \end{aligned}$$

$$\text{Si: } 10 \text{LF(a)} < \text{B} \quad \text{y} \quad 30 \text{LF(a)} < \text{CaS} \quad \text{(c)}$$

$$\begin{aligned} \text{LF(ST)} &= (\text{Na} + \text{Mg} + \text{CaCl}) / (\text{ST}_{\text{ES}} - 40) \\ \text{LF(Cl)} &= \text{Cl} / \text{Cl}_{\text{ES}} \\ \text{LF(Na)} &= \frac{((\text{RAS}_{\text{ES}})^2 \times (\text{Mg} + \text{CaCl})^2) + (320 \text{Na}^2)^{1/2}}{80 \text{RAS}_{\text{ES}}} - \frac{(\text{Mg} + \text{CaCl})}{80} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LF(c)} &= \text{LF(ST)} \quad \text{si} \quad \text{LF(ST)} > \text{LF(Cl)} \quad \text{y} \quad \text{LF(ST)} > \text{LF(Na)} \\ \text{LF(c)} &= \text{LF(Cl)} \quad \text{si} \quad \text{LF(Cl)} > \text{LF(ST)} \quad \text{y} \quad \text{LF(Cl)} > \text{LF(Na)} \\ \text{LF(c)} &= \text{LF(Na)} \quad \text{si} \quad \text{LF(Na)} > \text{LF(ST)} \quad \text{y} \quad \text{LF(Na)} > \text{LF(Cl)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Na}_{\text{ES}} &= \text{Na} / \text{LF(c)} & \text{Ca}_{\text{ES}} &= 40 + (\text{CaCl} / \text{LF(c)}) & \text{Mg}_{\text{ES}} &= \text{Mg} / \text{LF(c)} \\ \text{Cl}_{\text{ES}} &= \text{Cl} / \text{LF(c)} \\ (\text{Ca} + \text{Mg})\text{Cp} &= \text{B} - 10 \text{LF(c)} & \text{CaSp} &= \text{CaS} - 30 \text{LF(c)} \end{aligned}$$

Si: $10 \text{ LFa} \geq \text{B}$ y $30 \text{ LFa} < \text{CaS}$ (d)

$$\text{LF(ST)} = (\text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} - \text{CaS}) / (\text{ST}_{\text{ES}} - 30)$$

$$\text{LF(Cl)} = \text{Cl} / \text{Cl}_{\text{ES}}$$

$$\text{LF(Na)} = \frac{((\text{RAS}_{\text{ES}})^2 \times (\text{Ca} + \text{Mg} - \text{CaS})^2) + (240 \text{ Na}^2)^{1/2}}{60 \text{ RAS}_{\text{ES}}} - \frac{(\text{Ca} + \text{Mg} - \text{CaS})}{60}$$

$$\text{LF(d)} = \text{LF(ST)} \quad \text{si} \quad \text{LF(ST)} > \text{LF(Cl)} \quad \text{y} \quad \text{LF(ST)} > \text{LF(Na)}$$

$$\text{LF(d)} = \text{LF(Cl)} \quad \text{si} \quad \text{LF(Cl)} > \text{LF(ST)} \quad \text{y} \quad \text{LF(Cl)} > \text{LF(Na)}$$

$$\text{LF(d)} = \text{LF(Na)} \quad \text{si} \quad \text{LF(Na)} > \text{LF(ST)} \quad \text{y} \quad \text{LF(Na)} > \text{LF(Cl)}$$

$$\text{Na}_{\text{ES}} = \text{Na} / \text{LF(d)} \quad \text{Ca}_{\text{ES}} = 30 + ((\text{Ca} - \text{CaS}) / \text{LF(d)}) \quad \text{Mg}_{\text{ES}} = \text{Mg} / \text{LF(d)}$$

$$\text{Cl}_{\text{ES}} = \text{Cl} / \text{LF(d)}$$

$$(\text{Ca} + \text{Mg})\text{Cd} = 10 \text{ LF(d)} - \text{B} \quad \text{CaSp} = \text{CaS} - 30 \text{ LF(d)}$$

Si en el agua de riego: $\text{B} > (\text{Ca} + \text{Mg})$ (e)

$$\text{LF(ST)} = \text{Na} / (\text{ST}_{\text{ES}} - \text{Ca} - \text{Mg})$$

$$\text{LF(Cl)} = \text{Cl} / \text{Cl}_{\text{ES}}$$

$$\text{LF(Na)} = \text{Na} / (\text{RAS}_{\text{ES}} \times ((\text{Ca} + \text{Mg})/2)^{1/2})$$

$$\text{LF(e)} = \text{LF(ST)} \quad \text{si} \quad \text{LF(ST)} > \text{LF(Cl)} \quad \text{y} \quad \text{LF(ST)} > \text{LF(Na)}$$

$$\text{LF(e)} = \text{LF(Cl)} \quad \text{si} \quad \text{LF(Cl)} > \text{LF(ST)} \quad \text{y} \quad \text{LF(Cl)} > \text{LF(Na)}$$

$$\text{LF(e)} = \text{LF(Na)} \quad \text{si} \quad \text{LF(Na)} > \text{LF(ST)} \quad \text{y} \quad \text{LF(Na)} > \text{LF(Cl)}$$

$$\text{Na}_{\text{ES}} = \text{Na} / \text{LF(e)} \quad \text{Ca}_{\text{ES}} = \text{Ca} \quad \text{Mg}_{\text{ES}} = \text{Mg} \quad \text{Cl}_{\text{ES}} = \text{Cl} / \text{LF(e)}$$

$$\text{NaB}_{\text{ES}} = \text{NaB} / \text{LF(e)}$$

$$(\text{Ca} + \text{Mg})\text{Cp} = (\text{Ca} + \text{Mg}) \times (1 - \text{LF(e)})$$

- Concentraciones en las aguas de drenaje de sales totales (ST_{D}), cloruros (Cl_{D}), sodio (Na_{D}), calcio (Ca_{D}), magnesio (Mg_{D}).....

$$\text{ST}_{\text{D}} = \text{ST}_{\text{ES}} \cdot \text{F} \quad \text{Cl}_{\text{D}} = \text{Cl}_{\text{ES}} \cdot \text{F} \quad \text{Na}_{\text{D}} = \text{Na}_{\text{ES}} \cdot \text{F} \quad \text{Ca}_{\text{D}} = \text{Ca}_{\text{ES}} \cdot \text{F} \quad \text{Mg}_{\text{D}} = \text{Mg}_{\text{ES}} \cdot \text{F}$$

- Requerimientos de riego (H_{R}) y requerimientos de drenaje (H_{D}) en mm/mes, mm/día....., para satisfacer necesidades del cultivo y controlar niveles de sales,

cloruros, sodio.....en la solución del suelo y aguas de drenaje por debajo de los niveles críticos preestablecidos

- Requerimientos de manejo de riego (T_R / T_{ER}) para cumplir con los requerimientos de riego y drenaje (H_R, H_D), deducidos de la relación entre duración del riego (T_R : tiempo en horas o días que tarda en infiltrar en el suelo el agua de cada riego) y el intervalo máximo entre riegos (T_{ER} en horas o días) para cada suelo (P, DA, CC e I).

$$L = LF / F$$

$$H_R = (H_{ET} - H_P) / (1 - L) \quad H_D = (L (H_{ET} - H_P)) / (1 - L)$$

$$T_R / T_{ER} = (H_{ET} - H_P) / (720 I (1-L)) \quad T_{ER} \leq T_{ER(máx.)}$$

$$T_{ER(máx.)} = (15 \times DA \times P \times CC) / (H_{ET} - H_P)$$

PROBLEMAS POTENCIALES DOMINANTES:

Si: $LF(ST) \geq LF(Cl)$ y $LF(ST) > LF(Na)$	SALINIDAD
Si: $LF(Cl) > LF(ST)$ y $LF(Cl) > LF(Na)$	TOXICIDAD CLORUROS
Si: $LF(Na) \geq LF(ST)$ y $LF(Na) \geq LF(Cl)$ $Na_{BES} = 0$ y $Ca_{ES} \geq Mg_{ES}$	SODICIDAD
Si: $LF(Na) \geq LF(ST)$ y $LF(Na) \geq LF(Cl)$ $Na_{BES} = 0$ y $Mg_{ES} > Ca_{ES}$	SODICIDAD - MAGNESIO
Si: $LF(Na) \geq LF(ST)$ y $LF(Na) \geq LF(Cl)$ $Na_{BES} > 0$	SODICIDAD - ALCALINIDAD

LIMITACIONES:

AGUA DE RIEGO

Si: $H_R/H_{ET} > 1.5$	FUERTE LIMITACIÓN
Si: $H_R/H_{ET} = 1.2 - 1.5$	MODERADA LIMITACIÓN

Si: $H_D/H_{ET} > 0.30$
 y: $LF(ST) > LF(Na)$

USAR: **-AGUA MENOS SALINA**
 INSTALAR: **-DRENAJE ARTIFICIAL**

Si: $H_D/H_{ET} > 0.30$
 y: $LF(Na) \geq LF(ST)$
 y: $NaB_{ES} = 0$

USAR: **-AGUA CON MENOS Na**
 INSTALAR: **-DRENAJE ARTIFICIAL**

Si: $H_D/H_{ET} > 0.30$
 y: $LF(Na) \geq LF(ST)$
 y: $NaB_{ES} > 0$

USAR: **-AGUA SIN NaB**
 AGREGAR: **-ENMIENDAS AL AGUA DE RIEGO**
 INSTALAR: **-DRENAJE ARTIFICIAL**

EJEMPLO DE CÁLCULO Y APLICACIÓN

Para ilustrar el uso de índices y modelos predictivos, y en particular el modelo "SALSODIMAR", para evaluar los procesos de salinización en suelos bajo riego, se han seleccionado cuatro aguas de riego de diferentes características en cuanto a concentración y composición de sales en solución (Cuadro 2), para ser utilizadas en el riego de cultivos sensibles (ST_{ES} : 40 meq/l) y tolerantes (ST_{ES} : 120 meq/l) a las sales, en un suelo con valores críticos correspondientes de RAS_{ES} de 10 y 20 mmoles/l^{1/2}, respectivamente, con una eficiencia de lavado (F) de 0,6, y en un clima mediterráneo semiárido.

En las figuras 1-4 aparecen las relaciones entre fracciones efectivas de lavado (LF) calculadas según el modelo SALSODIMAR, y los correspondientes valores equilibrio de sales totales (ST_{ES}), cloruros (Cl_{ES}), y relación de adsorción de sodio (RAS_{ES}) en el extracto de saturación del suelo, y de sales precipitadas o de posible disolución, para las aguas de riego I, II, III y III(E). La figura 5 muestra cómo cambian los requerimientos de agua de riego (H_R) y drenaje (H_p) a medida que se incrementan las

fracciones de lavado (L), con fuertes incrementos a partir de valores de L de 0,5 que hacen impráctico en la mayoría de los casos superar ese valor. Las figuras 6-9 muestran los requerimientos de riego y drenaje en los diferentes meses del año para los valores de lavado efectivo (LF) limitantes calculados con el modelo "SALSODIMAR", para las aguas de riego I, II, III y III(E) y los valores críticos de salinidad (ST_{ES} : 40 y 120 meq/l) y sodicidad (RAS_{ES} : 10 y 20 mmoles/l^{1/2}) seleccionados. La figura 10 muestra las relaciones entre requerimientos de manejo de riego (T_R / T_{ER}) y los requerimientos de lavado (L) para diferentes combinaciones de tasa de infiltración de agua en el suelo (I) con el método de riego seleccionado, y requerimientos netos de riego ($H_{ET} - H_p$).

En la figura 11 se muestran los valores aproximados de requerimientos netos de lavado (LF) que resultarían de la aplicación de algunos de los índices y modelos de predicción más utilizados, y descritos anteriormente, en comparación con los calculados con el modelo "SALSODIMAR" (SSDIMAR), para las aguas de riego I y III, y para valores limitantes de ST_{ES} de 40 y 120 meq/l, y de RAS_{ES} de 10 y 20 mmoles/l^{1/2}. En general se observa que la apli-

Cuadro 2. Concentración y composición iónica de las sales presentes en aguas de riego seleccionadas

	meq/litro						<u>NaB</u>	<u>MgB</u>	<u>CaCl</u>	<u>CaS</u>
	<u>Na</u>	<u>Ca</u>	<u>Mg</u>	<u>Cl</u>	<u>S</u>	<u>B</u>				
I	11,5	5,6	3,9	9,7	4,5	6,7	0	1,1	0	0
II	2,1	9,0	3,1	1,4	10,3	2,3	0	0	0	6,7
III	2,0	1,0	1,0	1,0	0,5	2,5	0,5	1,0	0	0
III(E)	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	2,5	0	1,0	0	0

(III(E) es el agua III más una enmienda de yeso de 0,5 meq/litro o 43 g/m³)

cación del concepto original de requerimiento de lavado, sin considerar la posible precipitación de carbonatos de Ca y Mg y de sulfato de Ca, resulta en valores más altos de LF para control de sales totales, y valores inferiores de LF para control de sodicidad, especialmente en el caso del agua III con bicarbonato de Na. La utilización de los índices FAO76 y FAO86 para riego convencional y de alta frecuencia respectivamente, resulta siempre en valores mucho más bajos de LF para control de sales totales que aplicando SSDIMAR. Esto es debido principalmente a que SSDIMAR utiliza como base para el cálculo los valores equilibrio de sales totales en el extracto de saturación del suelo ($ST_{1:5} = ST_1 / F$), mientras que en FAO76 y FAO86 los valores de sales totales en el suelo bajan mucho al promediar los de ST_d con la salinidad del agua de riego (ST_r), por asumir que esa será la condición a alcanzar siempre que con el manejo del riego se pueda mantener un flujo continuo neto de agua hacia abajo en el suelo. En cuanto a los valores de LF para control de sodicidad, el índice FAO76 da valores muy parecidos a los de SSDIMAR para el agua I, mientras que FAO86 da valores mucho más bajos, por considerar que con el manejo del riego antes señalado, el valor de RAS que se mantendrá cerca de la superficie del suelo será

parecido al del agua de riego. Tanto FAO76 como FAO86 dan valores de LF mucho más bajos que SSDIMAR para el control de sodicidad (RAS) en el caso del agua III, debido a que dichos índices no toman en consideración el efecto que tiene la acumulación de bicarbonato y carbonato de Na en la solución del suelo sobre el fuerte descenso en la solubilidad de los carbonatos de Ca y Mg.

En base a la experiencia acumulada en la validación del modelo "SALSODIMAR", resultante de la comparación entre lo que se esperaría con su aplicación y los problemas de salinidad y sodicidad desarrollados, o en proceso de desarrollo, bajo muy diferentes condiciones agroecológicas y de manejo de riego, podemos concluir lo siguiente:

- El modelo "SALSODIMAR" resulta en todos los casos más seguro y eficiente en la evaluación y predicción de los procesos y problemas de sodicidad, en especial los derivados del uso de agua con altos contenidos o proporción de bicarbonatos de Ca y Mg, y de aguas conteniendo, aún en pequeñas cantidades, bicarbonato de Na.

- Los valores de requerimientos de lavado para control de sales totales calculados con "SALSODIMAR" están más acordes con la

Figura 1. Niveles equilibrio de sales totales (STES), de cloruros (CIES) y de relación de adsorción de sodio (RASES) en el extracto de saturación del suelo para diferentes fracciones efectivas de lavado (LF)

(CACp: carbonatos de Ca+Mg precipitados en meq/l de agua de riego; CaSd: disolución potencial de yeso en meq/l)

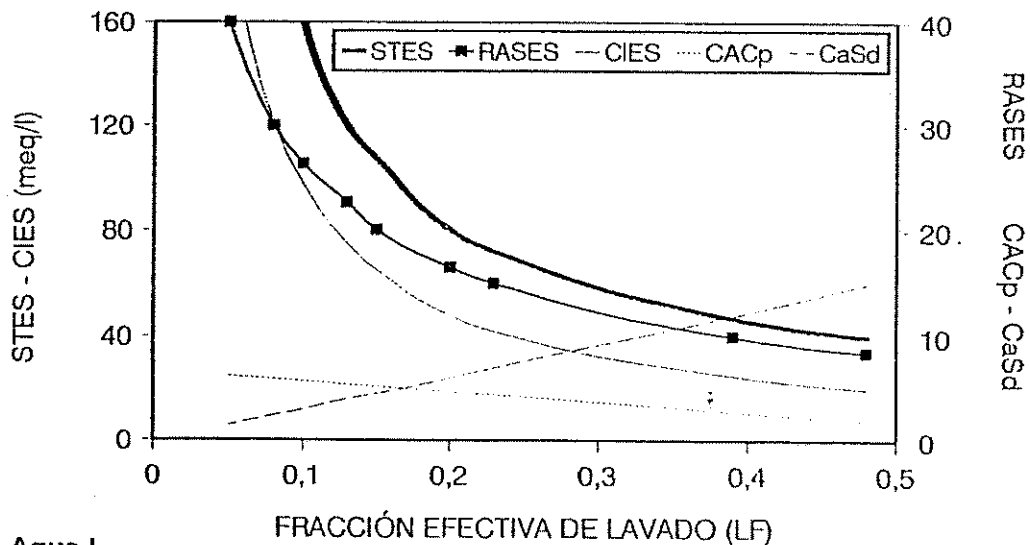


Figura 2. Niveles equilibrio de sales totales (STES), de cloruros (CIES) y de relación de adsorción de sodio (RASES) en el extracto de saturación del suelo para diferentes fracciones efectivas de lavado (LF)

(CaCp: carbonato de Ca precipitado en meq/l de agua de riego; CaSp: yeso precipitado en meq/l de agua de riego)

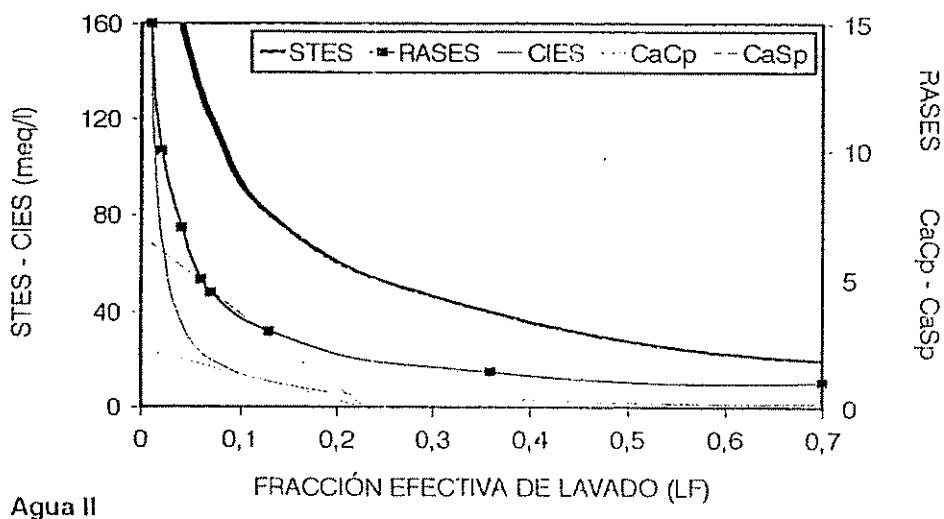


Figura 3. Niveles equilibrio de sales totales (STES), de cloruros (CIES) y de relación de adsorción de sodio (RASES) en el extracto de saturación del suelo para diferentes fracciones efectivas de lavado (LF)

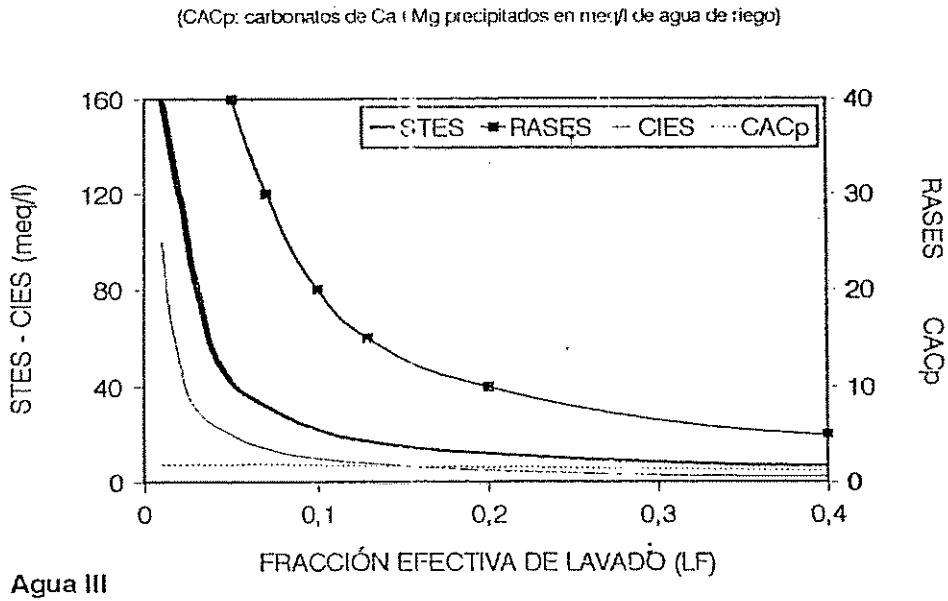


Figura 4. Niveles equilibrio de sales totales (STES), de cloruros (CIES) y de relación de adsorción de sodio (RASES) en el extracto de saturación del suelo para diferentes fracciones efectivas de lavado (LF)

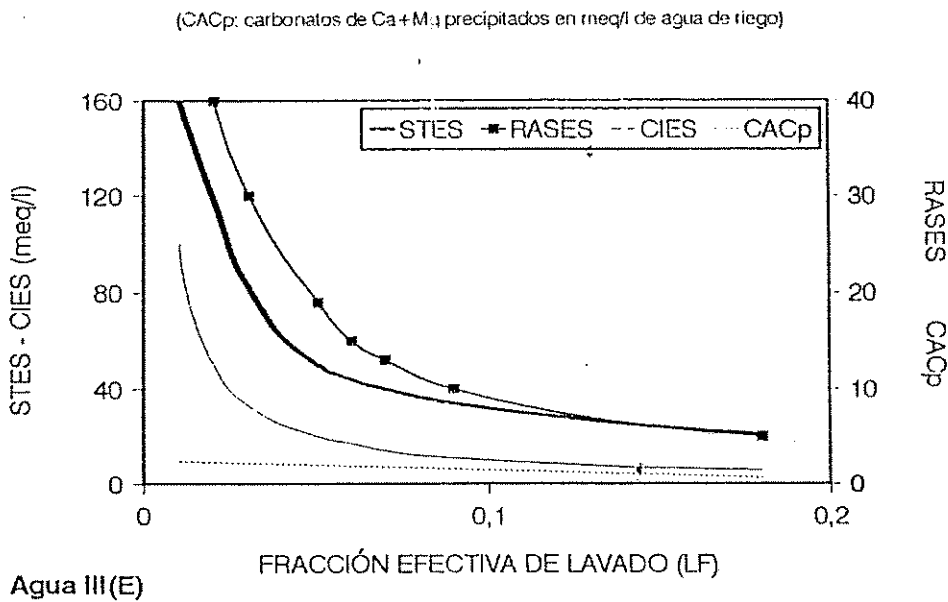


Figura 5. Requerimientos de agua de riego (HR), (en relación a la demanda neta de riego (HET-HP) para diferentes fracciones de lavado (L)

(HET: evapo-transpiración; HP: precipitación efectiva; HD: requerimiento de drenaje)

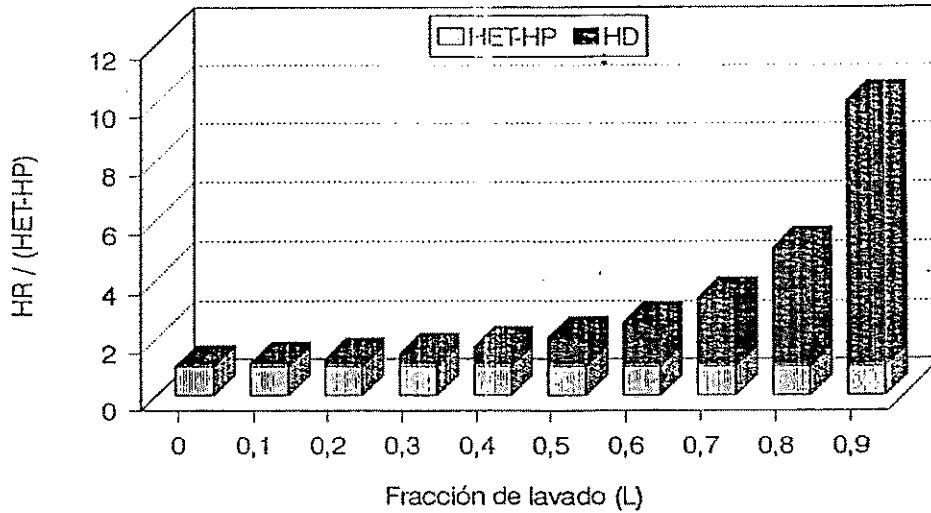


Figura 6. Requerimientos de riego (HR = HET-P+HD) y de drenaje (HD) para cultivos sensibles (STES: 40 meq/l) (HD40) y tolerantes (STES: 120 meq/l) (HD120) en un clima mediterráneo semiárido

AGUA I (LFST40 = 0,48; LFST120 = 0,13; F = 0,6)

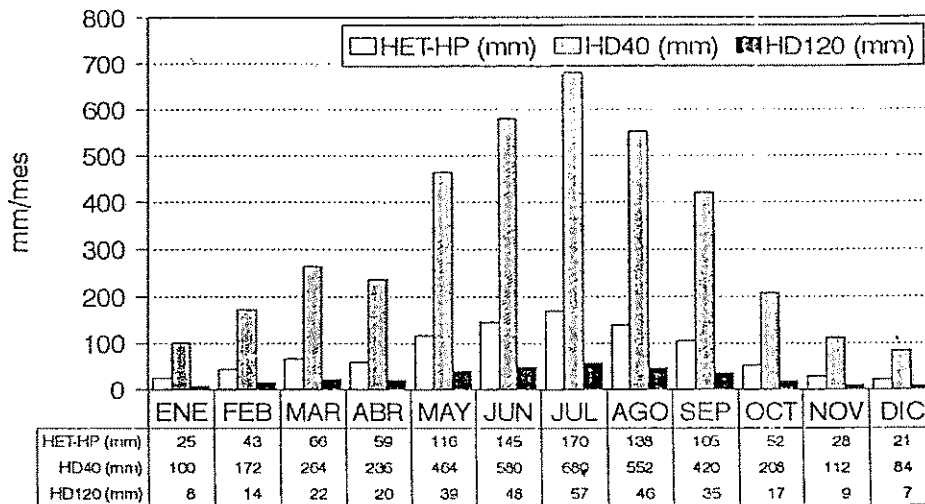


Figura 7. Requerimientos de riego (HR = HET-P+HD) y de drenaje (HD) para cultivos sensibles (STES: 40 meq/l) (HD40) y tolerantes (STES: 120 meq/l) (HD120) en un clima mediterráneo semiárido

AGUA II (LFST40 = 0,36; LFST120 = 0,07; F = 0,6)

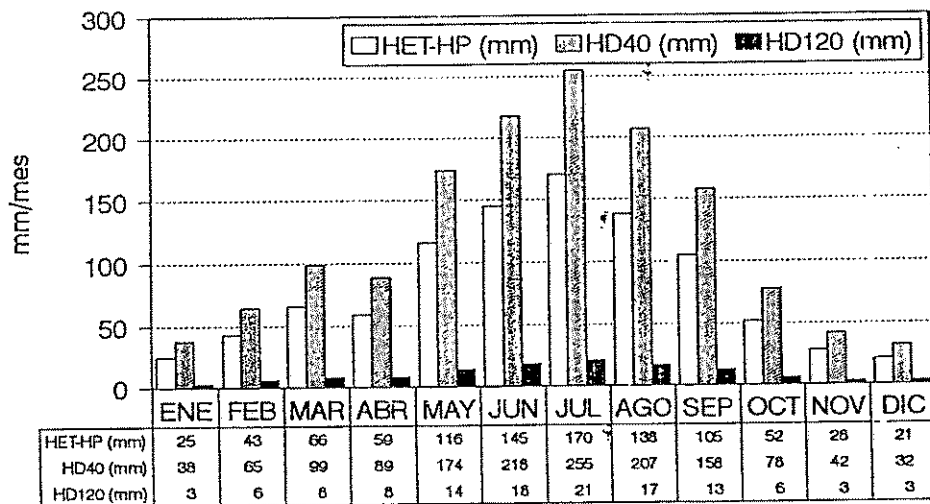


Figura 8. Requerimientos de riego (HR = HET-P+HD) y de drenaje (HD) para valores límites de RASES: 10 (HD10) y de RASES: 20 (HD20) en clima mediterráneo semiárido

AGUA III (LFNa10 = 0,20; LFNa20 = 0,10; F = 0,6)

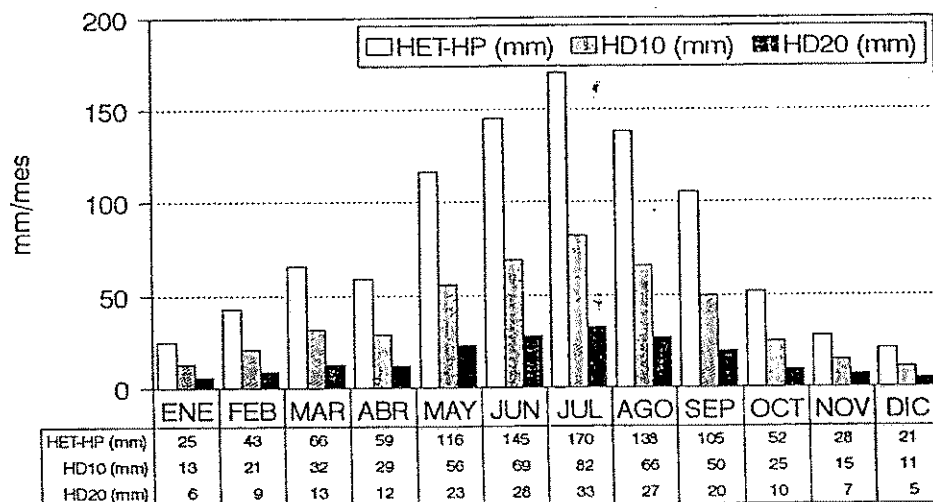


Figura 9. Requerimientos de riego (HR = HET-P+HD) y de drenaje (HD) para valores límites de RASES: 10 (HD10) y de RASES: 20 (HD20) en clima mediterráneo semiárido

AGUA III(E) (LFNa10 = 0,09; LFNa20 = 0,05; F = 0,6)

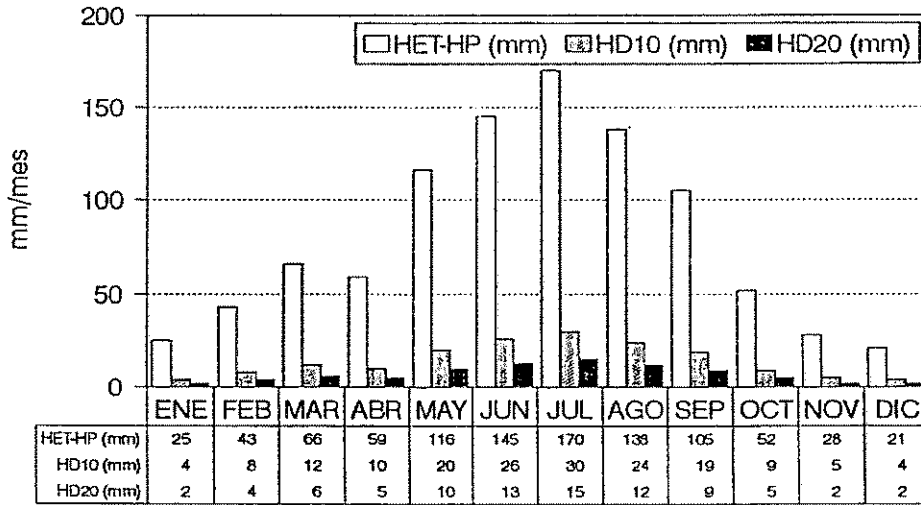


Figura 10. Requerimientos de manejo de riego (TR/TER) para diferentes combinaciones de fracciones de lavado:L (cultivo, suelo, agua de riego), tasa de infiltración:I (suelo, agua de riego), y requerimientos netos de riego:HET-HP (cultivo,clima) (TR: duración del riego; TER: Intervalo entre riegos; HET: evapotranspiración; HP: precipitación efectiva)

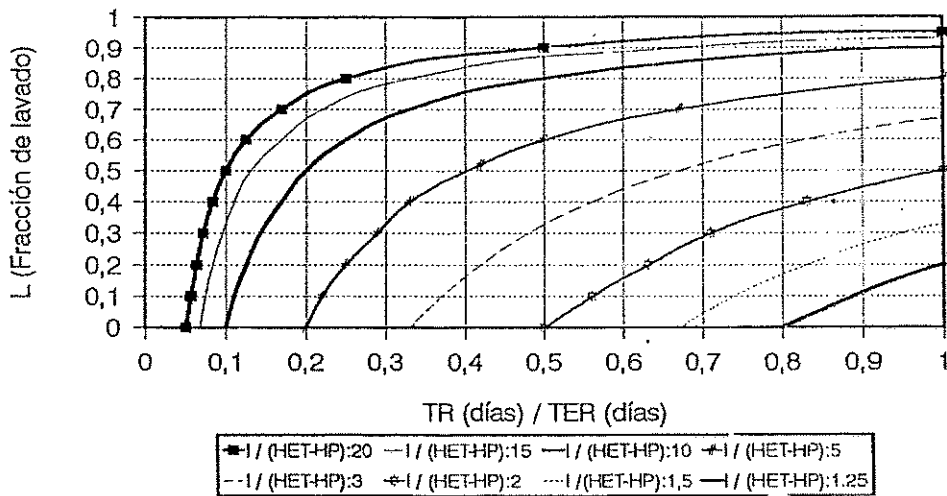
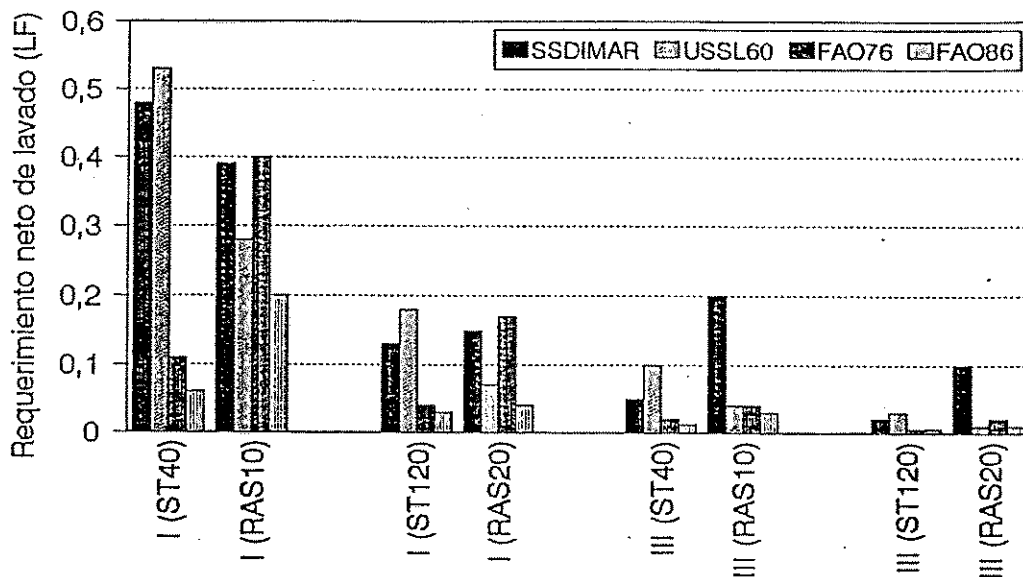


Figura 11. Requerimientos netos de lavado (LF) para valores límite en ejercicio de saturación del suelo, de sales totales (ST: 40 y 120 meq/l) y de relación de adsorción de sodio (RAS: 10 y 20), calculados según diferentes índices y sistemas de evaluación, para las aguas de riego I y III (Cuadro 2)

(SSDIMAR: Pla, 1968; 1996) (USSL60: USDA, 1954) (FAO76: Rhoades, 1972; FAO, 1976) (FAO86: Suárez, 1981; FAO, 1986)



forma en que se aplican los diferentes sistemas y prácticas de riego en gran parte de las zonas de riego del mundo, por lo que representan valores máximos para sistemas de riego con intervalos de varios días entre riegos. Aunque es muy difícil que en condiciones de campo se presente en forma uniforme una distribución de raíces que permitan un consumo escalonado de agua y efectos de la salinidad como lo previsto en los índices FAO76 y FAO86, sin embargo si podría esperarse que los requerimientos de lavado calculados por SSDIMAR puedan reducirse con un sistema de riego muy controlado, continuo o muy frecuente, que mantenga un flujo de agua y lavado continuo de sales hacia abajo en el perfil del suelo. De todas formas, esto también puede evaluarse con el modelo SSDIMAR, utilizando valores límite de ST_{ES} más bajos, en base a la dilución de sales que se preve mantener en la solución del suelo, hasta la profundidad donde se vayan a desarrollar gran parte de las raíces, con un sistema de riego

controlado de alta frecuencia o continuo. Adicionalmente, el modelo SSDIMAR permitirá una mayor precisión en el cálculo de la composición del agua de drenaje y de los aportes o pérdidas de sales disueltas o precipitadas en el suelo.

RESUMEN

La agricultura de riego es y ha sido considerada por varios milenios la manera más efectiva de incrementar y regular la producción de cultivos, especialmente en zonas con climas árido y semiárido. Todas las proyecciones de producción de alimentos para la creciente población futura del mundo preven un incremento considerable de las tierras agrícolas bajo riego. El problema de la salinización de los suelos ha sido y sigue siendo uno de los principales factores limitantes del desarrollo y sostenibilidad de la agricultura de riego en todo el mundo.

Dicho problema es una consecuencia de la inadecuada gestión del recurso agua en las prácticas de riego y drenaje para cada combinación de los factores clima, cultivos, suelos, fertilización, nivel freático, calidad del agua de riego, y sistema de riego. Las posibilidades de predecir las mejores condiciones y alternativas de gestión del riego y del drenaje para prevenir, controlar y reducir los problemas de salinización de pende de nuestra capacidad de evaluar los procesos de salinización y de modelar las interacciones de estas condiciones y alternativas de manejo para cada combinación de factores a considerar. Para ello, en este trabajo se presentan los criterios y metodologías de trabajo que deben considerarse en el proceso de evaluación, y después de analizar diferentes índices y modelos para predecir o simular los procesos de salinización y sodificación de los suelos se justifica, detalla y propone un nuevo modelo llamado "SALSODIMAR". Este es un modelo predictivo de simulación, sencillo y práctico, desarrollado por el autor a través de aproximaciones y validaciones sucesivas en los últimos 30 años, el cual permite predecir los posibles procesos y problemas de salinización de los suelos, y al mismo tiempo establecer los requerimientos de riego y drenaje, de prácticas de riego, y de cultivos para diferentes aguas de riego y suelos disponibles. Con ello se pueden seleccionar las mejores alternativas de manejo de riego y del drenaje para cada combinación de factores físicos, técnicos, sociales y económicos en cada región, zona o parcela. El modelo "SALSODIMAR" propuesto se basa en un balance independiente de los iones más comunes en aguas utilizadas para riego, en la zona radicular del suelo, hasta alcanzar equilibrio, de acuerdo a la fracción efectiva de lavado y a las solubilidades máximas de las diferentes sales para cada condición.

BIBLIOGRAFÍA

ABROL, I.P., J.S.P. YADAV y F.I. MASSOUD

- (1988): *Salt-affected soils and their management*. FAO Soils Bulletin 39. FAO. Roma (Italia)
- BOUMANS, J.H. (1987): Drainage in arid regions. En: *Proc. Symp. 25th Int. Course on Land Drainage* (Vos, ed). Publ.42. 22-41. ILRI. Wageningen (Holanda)
- CHHABRA, R. E I.P. ABROL (1977): Reclaiming effect of rice grown in sodic soils. *Soil Sci.* 124: 49-55
- DALTON, F.N. y M.TH. VAN GENUCHTEN (1985): The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma* 38 (1-4): 237-250
- FAO (1976) Rev. (1986): Water quality for agriculture. *Irrigation and Drainage Paper*, 29. FAO. Roma (Italia)
- FAO (1988): *World Agriculture Toward 2000: An FAO Study*. Bellhaven Press. Londres. 338p
- MASS, E.V. y G.J. HOFFMAN (1977): Crop salt tolerance-current assessment. *Journal of Irrigation and Drainage*. 103(IR2): 115-134
- NADLER, A. y H. FRENKEL (1980): Determination of soil solution electrical conductivity measurements by the four electrode method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1216-1221
- PLA, I. (1968): Evaluation of the quality of irrigation waters with high bicarbonate content in relation to the drainage conditions. *Trans. 9th Congress of the ISSS*. 1: 357-370. Adelaide (Australia)
- PLA, I. y F. DAPPO (1975): *Sistema racional para la evaluación de calidad de agua para riego*. Suplemento Técnico 12. FUDECO. Barquisimeto (Venezuela)
- PLA, I. y F. DAPPO (1977): Field testing of a new system for qualifying irrigation water. *Proc. Int. Conf. on Managing Saline Water for Irrigation*. Texas Tech. Univ. Lubbock (Texas. USA). 376-387
- PLA, I. (1983): Sistema integrado agua-cultivo-suelo-manejo para evaluar la calidad de agua para riego. En: *Isotopes and radiation techniques in soil physics*

- and irrigation studies. 191-206. IAEA. Viena (Austria)
- PLA, I. y A. FLORENTINO (1983): Características y diagnóstico de suelos salino-ácidos en Venezuela. *Proc. Int. Workshop on Salt-affected Soils in Latin America*. 123-132. SVCS-ISSS. Maracay (Venezuela)
- PLA, I. (1988): Riego y desarrollo de suelos afectados por sales en condiciones tropicales. *Soil Technology*. 1(1): 13-35
- PLA, I. (1996): Soil salinization and land desertification. En: *Soil degradation and desertification in Mediterranean environments*. 105-129. Geofoma Ediciones. Logroño (España)
- RHOADES, J.D. (1968): Leaching requirement for exchangeable sodium control. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:652-656
- RHOADES, J.D. y R.D. INGVALSON (1971): Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 35: 54-60
- RHOADES, J.D. (1972): Quality of water for irrigation. *Soil Sci.* 113:277-284
- RHOADES, J.D. y D. L. SUÁREZ (1977): Reducing water quality degradation through minimized leaching management. *Agric. Water Management* 1:127-142
- RHOADES, J.D. (1982): Soluble Salts. En : *Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. (A.L. Page y col, ed). *Agronomy Monograph* 9: 167-178
- RHOADES, J. D. (1984): Using saline waters for irrigation. *Proc. of the Int. Workshop on Salt-Affected Soils in Latin America*. (Pla, I. and A. Florentino, ed.), 22-52. SVCS-ISSS. Maracay (Venezuela)
- RHOADES, J.D., D.L. CORWIN y P.J. SHOUSE. (1988). Use of instrumental and computer assisted techniques to assess soil salinity. En : *Proc. Int. Symp. on Solonetz Soils. Problems, Properties, Utilization*. YSSS-AFUO-ISSS. Osijek (Yugoslavia)
- SANDHU, S.S. E.I.P. ABROL (1981): Growth responses of Eucalyptus tereticornis and Acacia nilotica to selected cultural treatments in a highly sodic soil. *Indian J. Agric. Sci.* 51: 437-443
- SUÁREZ, D. L. (1981): Relation between pHc and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an alternative Method of Estimating SAR of Soil and Drainage Waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:469-475
- SUÁREZ, D.L., J. SIMUNEK y M GUZY (1995): Practical Model for Predicting Soil Salinity and Sodicity under Transient Conditions. En: *Proc. of the Int. Workshop on Integrated Soil Management for Sustainable Use of Salt Affected Soils*. 39-54. FAO-ISSS-UNEP-BSWM. Manila (Filipinas)
- SZABOLCS, I. (1989): Amelioration of soils in salt-affected areas. *Soil Technology* 2(4): 331-344
- SZABOLCS, I. (1990): Impact of climatic change on soil attributes. Influence on salinization and alkalinization. En: *Soils on Warmer Earth* (Sharpenseel y col, ed). 61-71. Elsevier
- USDA (1954): *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. USDA. Washington
- WRI-IIED-UNEP (1988): *World resources 1988-89. An assessment of the resource base that supports the global economy*. New York (USA)
- YADAU, B.R. y COL. (1979): Comparison of different methods for measuring soil salinity under field conditions. *Soil Sci.* 127: 335-339 pp