

## NOTA TÉCNICA

# SOSALRIEGO: UN PROCEDIMIENTO PARA DIAGNOSTICAR LOS RIESGOS DE SODIFICACIÓN Y SALINIZACIÓN DEL SUELO CON EL AGUA DE RIEGO

Roberto Villafañe<sup>1</sup>

## RESUMEN

Se propone un procedimiento que evalúa la calidad del agua de riego de acuerdo con los riesgos de sodificación y salinización del suelo, utilizando como índices de calificación la cantidad de enmienda necesaria y la magnitud del requerimiento de lavado. La evaluación parte del análisis de la composición iónica del agua, la tolerancia del cultivo a la salinidad, la eficiencia de lavado del suelo y la cantidad de lluvia del lugar. El procedimiento provee la composición salina del agua, la cantidad de enmienda en caso de riesgos de sodificación y el requerimiento de lavado en caso de riesgos de salinización. Además da recomendaciones adicionales de manejo relacionadas con el nivel freático, el descanso del suelo, el uso de riego de alta frecuencia y reemplazo del cultivo. La propuesta puede ser implementada en una hoja de Excel para facilitar su aplicación, y la misma puede solicitarse al autor, sin costo alguno, mediante correo electrónico.

**Palabras clave adicionales:** Calidad del agua de riego, salinidad, sodicidad

## ABSTRACT

### **SoSalRiego: A procedure for diagnosing soil sodicity and salinity hazards with irrigation water**

A procedure is proposed for assessing the irrigation water quality, based upon hazards of soil sodicity and salinity. The quality indexes used herein are the amount of amendment required and the leaching fraction values. The inputs are water ionic composition, crop salt tolerance, drainage condition of soil and rainfall quantity. The outputs are kinds of salts in the irrigation water as well as needs of amendment and leaching to control of soil sodicity and salinity, respectively. Moreover, the method suggests management strategies such as water table control, use of high-frequency irrigation, leaving the soil in fallow for a given time, and selection of more tolerant crops. This procedure can be organized in Excel to make easy its use. Anyone can request by e-mail the program file prepared by the author.

**Additional key words:** Irrigation water quality, salinity, sodicity

## INTRODUCCIÓN

Existen diferentes modelos y propuestas para evaluar los riesgos de sodificación y/o salinización del suelo con el agua de riego. Ellas van desde simples conceptos y ecuaciones hasta relaciones complejas que requieren el uso de programas para el análisis de la información. Entre ellos destacan, en orden cronológico, el método del carbonato de sodio residual (CSR) de Eaton (1950), el sistema de calificación del Staff del Laboratorio de Salinidad de Riverside (USSLS, 1954), el índice saturación (IS) de

Bower et al. (1965), la relación de adsorción de sodio ajustada (RASaj) para el suelo superficial (Rhoades, 1972), la propuesta de Pla y Dappo (1977), la relación de adsorción de sodio corregida por precipitación o solubilización de sales de calcio (RASo) sugerida por Suárez (1981), el programa Watsuit y su versión de uso manual (Rhoades, 1984; Rhoades et al., 1992), las pautas de la FAO (Ayers y Westcot, 1985), el modelo de simulación de la dinámica del movimiento del agua en la zona radical (Oster y Rhoades, 1990), el programa Sales.bas (Villafañe y Guarisma, 1998) y el modelo de van der Zee et al. (2010) sobre riesgos de

Recibido: Noviembre 13, 2009

Aceptado: Septiembre 6, 2010

<sup>1</sup> Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 4579. Maracay. Venezuela.  
e-mail: vr1905@cantv.net

sodificación del suelo para el caso de aguas alcalinas. Estos modelos y propuestas califican el agua y suministran recomendaciones de manejo, considerando los factores que determinan los riesgos de sodificación y/o salinización, tales como la precipitación de sales de calcio y magnesio de poca solubilidad, el aporte de sales por parte de los minerales del suelo, la solubilización de las sales precipitadas, la eficiencia de lavado, el aumento de la salinidad con la profundidad y el efecto de la lluvia en el desplazamiento y lavado de sales. Este último aspecto ha sido considerado por Villafañe y Pla (1994), Chhabra (1996) y Villafañe y Guarisma (1998), entre otros, y es de gran importancia estratégica porque permite reducir el lavado con agua de riego y en consecuencia aminorar el impacto que un lavado excesivo pudiera ocasionar al manto freático y a las aguas subterráneas.

El objetivo de este trabajo es proponer un procedimiento para evaluar los riesgos de sodificación y/o salinización del suelo con el agua de riego, basado en los lineamientos generales del programa Sales.bas de Villafañe y Guarisma (1998), con la incorporación de nuevos criterios de análisis y el ajuste de los cálculos de enmienda y de requerimientos de lavado. La propuesta puede ser manejada automáticamente si se edita en una hoja de Excel.

## MARCO TEÓRICO

Dentro del contexto de un manejo eficaz y eficiente de los fertilizantes, los principales aportes de sales de un área cultivada pueden provenir del agua de riego mientras la salida más importante estaría representada por la lixiviación. En consecuencia, en un suelo en equilibrio dinámico, es decir donde la entrada de sales por riego iguala la cantidad lixiviada, opera la siguiente ecuación:

$$Ld * Cd = Lr * Cr \quad (1)$$

donde:  $Ld$  = lámina de lavado;  $Cd$  = concentración salina del agua percolada;  $Lr$  = lámina neta de riego; y  $Cr$  = concentración salina del agua de riego.

Al relacionar entre sí las láminas de agua y concentraciones salinas de la Ecuación 1, y sustituir luego la concentración salina por la

conductividad eléctrica, se obtiene una relación que expresa la fracción de lavado (FL):

$$FL = \frac{Ld}{Lr} = \frac{Cr}{Cd} = \frac{CEr}{CEd} \quad (2)$$

donde:  $CEr$  = conductividad eléctrica del agua de riego y  $CEd$  = conductividad eléctrica del agua percolada o de drenaje.

El agua al desplazarse por la matriz del suelo no fluye de manera uniforme por todos sus poros porque todos no son de igual forma y tamaño y puede no existir adecuada interconexión entre ellos; de allí que Dieleman (1963) propuso como eficiencia de lavado de sales (Efl) la expresión siguiente:

$$Efl = \frac{CEd}{CEe} \quad (3)$$

donde:  $CEe$  = conductividad eléctrica en el extracto de la pasta saturada del suelo del fondo del perfil.

La Efl será mayor en la medida que el agua pueda moverse por todo el espacio poroso del suelo. En un suelo que se agriete, la mayor parte del agua fluirá por esas vías preferenciales, resultando baja la Efl, mientras en un suelo arenoso permeable, prácticamente todos los poros permitirán el flujo del agua y en consecuencia un lavado más eficiente de sales. Factores como capacidad de intercambio iónico del suelo, la tasa de aplicación del agua y la humedad antecedente del suelo pueden también afectar el valor de Efl (Shalhevet, 1974). En todo caso, cuando se está en condición de equilibrio, la  $CEd$  será menor que la  $CEe$ , o en el mejor de los casos igual a la  $CEe$  del fondo del perfil de suelo a no ser que el suelo sea extremadamente arenoso (datos no publicados).

Debido a que los reportes de tolerancia de los cultivos a la salinidad están basados en valores de  $CEe$  (Maas, 1990), es posible obtener el requerimiento de lavado (RL), combinando las Ecuaciones 2 y 3:

$$RL = \frac{CEr}{Efl * CEe} \quad (4)$$

Esta última expresión permite calcular el requerimiento de lavado conociendo la conductividad eléctrica del agua de riego, la tolerancia del cultivo a la salinidad y la eficiencia de lavado según la textura del suelo. Es de destacar que el RL es una expresión particular de la FL porque se le impone un valor límite a la conductividad eléctrica del extracto según la tolerancia a las sales del cultivo específico.

En un perfil de suelo la lixiviación no es de igual cuantía en cada sección delgada de suelo ya que la solución entrante en una sección delgada es la saliente de la sección inmediata superior, con lo cual la sección subsiguiente siempre recibirá más sales, resultando un aumento gradual de la salinidad con la profundidad (Bernstein y Francois, 1973; Villafañe et al., 2004).

Como la lluvia también puede producir desplazamiento y lavado de sales, el nivel de salinidad alcanzado en el perfil puede ser menor si el suelo tiene mejor drenaje interno y la magnitud de la lluvia es mayor (Chhabra, 1996), pudiendo lograrse un equilibrio dinámico caracterizado por una condición de máxima acumulación en el perfil al final del período de riego y máximo lavado al final del período lluvioso (Villafañe et al., 2004).

Entre las sales más frecuentes en las aguas de riego los carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio y sulfato de calcio son las menos solubles, y el aumento de la concentración de sales en la solución del suelo como resultado de la evapotranspiración es menor que con las sales

más solubles debido a que las menos solubles alcanzan primero su límite de solubilidad (USSLS, 1954; Pla y Dappo, 1977). En caso que la percolación sea poca, las posibilidades de acumulación de sales en el fondo del perfil aumentan (Villafañe y Pla, 1994; Chhabra, 1996). En el caso de abundancia de sales de sodio, dada su alta solubilidad, las posibilidades de su concentración en la solución del suelo con respecto a las de calcio y magnesio se elevan y con ello los riesgos de sodificación.

## DESARROLLO DE LA PROPUESTA

Basado en las consideraciones anteriores, se ideó un procedimiento que ofrece recomendaciones de manejo del agua de riego de acuerdo con los riesgos de sodificación y salinización, el primero según la composición salina del agua y el segundo según la concentración total de sólidos solubles. La composición salina se obtiene partiendo de la solubilidad relativa de las sales señaladas en el Cuadro 1, implementando la secuencia de cálculos aquí propuesta e indicada en el Cuadro 2.

**Cuadro 1.** Sales frecuentes en aguas de riego y suelos (Adaptado de Doneen, 1975, y Pizarro, 1990)

| Sal   | Categoría de solubilidad (propuesta)                              |
|---|---|
| Carbonato de calcio [CaCO <sub>3</sub> ]<br>Carbonato de magnesio [MgCO <sub>3</sub> ]  | Muy baja (<10 mmol <sub>c</sub> ·L <sup>-1</sup> )                |
| Bicarbonato de calcio [Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ]<br>Bicarbonato de magnesio [Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ]  | Baja (entre 10 y 20 mmol <sub>c</sub> ·L <sup>-1</sup> )          |
| Sulfato de calcio [CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O]  | Intermedia (entre 20 y 1.000 mmol <sub>c</sub> ·L <sup>-1</sup> ) |
| Bicarbonato de sodio [NaHCO <sub>3</sub> ]<br>Sulfato de magnesio [MgSO <sub>4</sub> ]<br>Cloruro de sodio [NaCl]<br>Sulfato de sodio [Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ]<br>Carbonato de sodio [Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ] | Alta (entre 1.000 y 10.000 mmol <sub>c</sub> ·L <sup>-1</sup> )   |
| Cloruro de magnesio [MgCl <sub>2</sub> ]<br>Cloruro de calcio [CaCl <sub>2</sub> ]  | Muy alta (> 10.000 mmol <sub>c</sub> ·L <sup>-1</sup> )           |

Esta secuencia de cálculo parte del principio básico que las sales van precipitando en ese orden, de acuerdo con sus límites de solubilidad; primero precipita la menos soluble y luego la que le sigue en solubilidad, quedando en último lugar la más soluble. Con la composición salina así obtenida, se puede precisar la

posibilidad de precipitación de sales de poca solubilidad y en consecuencia los riesgos de sodificación.

En el Cuadro 2 se incluyen dos sales de potasio, no reportadas en el Cuadro 1, que son frecuentes en las aguas de drenaje y en aguas de riego donde se practica la fertirrigación.

**Cuadro 2.** Secuencia de cálculos para obtener la composición salina del agua a partir de la composición iónica

| Sal                                | Secuencia de cálculos  |
|------------------------------------|--|
| CaCO <sub>3</sub>                  | Si $[Ca^{2+}] > [CO_3^{=}]$ , entonces $[CaCO_3] = [CO_3^{=}]$ , de lo contrario, $[CaCO_3] = [Ca^{2+}]$   |
| MgCO <sub>3</sub>                  | Si $[Mg^{2+}] > [CO_3^{=} - CaCO_3]$ , entonces $[MgCO_3] = [CO_3^{=} - CaCO_3]$ , de lo contrario, $[MgCO_3] = [Mg^{2+}]$   |
| Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | Si $[HCO_3^{-}] > [Ca^{2+} - CaCO_3]$ , entonces $[Ca(HCO_3)_2] = [Ca^{2+} - CaCO_3]$ , de lo contrario, $[Ca(HCO_3)_2] = [HCO_3^{-}]$   |
| Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | Si $[HCO_3^{-} - Ca(HCO_3)_2] > [Mg^{2+} - MgCO_3]$ , entonces $[Mg(HCO_3)_2] = [Mg^{2+} - MgCO_3]$ , de lo contrario, $[Mg(HCO_3)_2] = [HCO_3^{-} - Ca(HCO_3)_2]$   |
| CaSO <sub>4</sub>                  | Si $[Ca^{2+} - CaCO_3 - Ca(HCO_3)_2] > [SO_4^{=}]$ , entonces $[CaSO_4] = [SO_4^{=}]$ , de lo contrario, $[CaSO_4] = [Ca^{2+} - CaCO_3 - Ca(HCO_3)_2]$   |
| NaHCO <sub>3</sub>                 | Si $[HCO_3^{-} - Ca(HCO_3)_2 - Mg(HCO_3)_2] > [Na]$ , entonces $[NaHCO_3] = [Na]$ , de lo contrario, $[NaHCO_3] = [HCO_3^{-} - Ca(HCO_3)_2 - Mg(HCO_3)_2]$   |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>     | Si $[K^{+}] > [SO_4^{=} - CaSO_4]$ , entonces $[K_2SO_4] = [SO_4^{=} - CaSO_4]$ , de lo contrario, $[K_2SO_4] = [K^{+}]$   |
| KCl                                | Si $[Cl^{-}] > [K^{+} - K_2SO_4]$ , entonces $[KCl] = [K^{+} - K_2SO_4]$ , de lo contrario, $[KCl] = [Cl^{-}]$   |
| MgSO <sub>4</sub>                  | Si $[SO_4^{=} - CaSO_4 - K_2SO_4] > [Mg^{2+} - MgCO_3 - Mg(HCO_3)_2]$ , entonces $[MgSO_4] = [Mg^{2+} - MgCO_3 - Mg(HCO_3)_2]$ , de lo contrario, $[MgSO_4] = [SO_4^{=} - CaSO_4 - K_2SO_4]$                     |
| NaCl                               | Si $[Na^{+} - NaHCO_3] > [Cl^{-} - KCl]$ , entonces $[NaCl] = [Cl^{-} - KCl]$ , de lo contrario, $[NaCl] = [Na^{+} - NaHCO_3]$   |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | Si $[Na^{+} - NaHCO_3 - NaCl] > [SO_4^{=} - CaSO_4 - K_2SO_4 - MgSO_4]$ , entonces $[Na_2SO_4] = [SO_4^{=} - CaSO_4 - K_2SO_4 - MgSO_4]$ , de lo contrario, $[Na_2SO_4] = [Na^{+} - NaHCO_3 - NaCl]$             |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>    | Si $[Na^{+} - NaHCO_3 - NaCl - NaSO_4] > [CO_3^{=} - CaCO_3 - MgCO_3]$ , entonces $[Na_2CO_3] = [CO_3^{=} - CaCO_3 - MgCO_3]$ , de lo contrario, $[Na_2CO_3] = [Na^{+} - NaHCO_3 - NaCl - NaSO_4]$               |
| MgCl <sub>2</sub>                  | Si $[Mg^{2+} - MgCO_3 - Mg(HCO_3)_2 - MgSO_4] > [Cl^{-} - KCl - NaCl]$ , entonces $[MgCl_2] = [Cl^{-} - KCl - NaCl]$ , de lo contrario, $[MgCl_2] = [Mg^{2+} - MgCO_3 - Mg(HCO_3)_2 - MgSO_4]$                   |
| CaCl <sub>2</sub>                  | Si $[Ca^{2+} - CaCO_3 - Ca(HCO_3)_2 - CaSO_4] > [Cl^{-} - KCl - NaCl - MgCl_2]$ , entonces $[CaCl_2] = [Cl^{-} - KCl - NaCl - MgCl_2]$ , de lo contrario, $[CaCl_2] = [Ca^{2+} - CaCO_3 - Ca(HCO_3)_2 - CaSO_4]$ |

### Control de la sodificación

Para eliminar o reducir el riesgo de sodificación es necesario el uso de enmiendas. Estos requerimientos se pueden calcular mediante un procedimiento de tanteo, agregando al agua de riego calcio y sulfato en cantidades equivalentes hasta que la relación de adsorción de sodio esperada en el suelo superficial (RASo) sea igual o inferior al límite permisible que da la ecuación mostrada en la Figura 1.

La ecuación se generó con los datos reportados en las directrices de manejo de la FAO (Ayers y Westcot, 1985) para aguas que no tienen riesgo de pérdida de la infiltración. Si el par ordenado cae por debajo de la recta no hay riesgo de pérdida de la infiltración. En

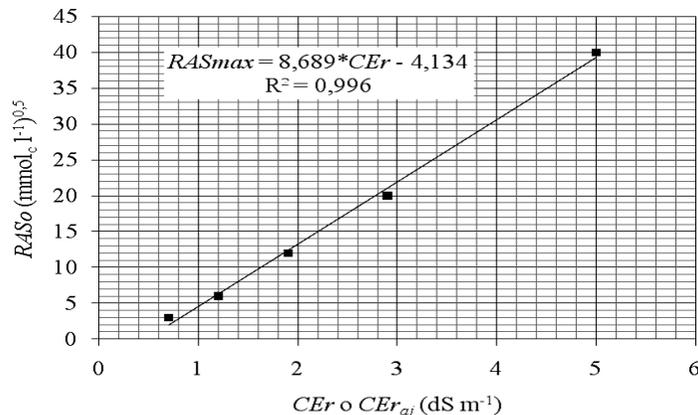
consecuencia, el valor de RASmax (RAS máximo permisible del agua una vez que ha infiltrado en el suelo) obtenido según la ecuación se adoptó como el valor límite de referencia para compararlo con el RASo calculado según Suárez (1981).

Para calcular  $CEr_{aj}$  se utilizó la expresión siguiente:

$$CEr_{aj} = CEr (dS \cdot m^{-1}) + 0,1Y + 0,1Z(5)$$

donde: Y y Z son el calcio y el potasio agregados al agua de riego ( $mmol_c \cdot L^{-1}$ ), y el coeficiente 0,1 es un factor de conversión de concentración ( $mmol_c \cdot L^{-1}$ ) a conductividad eléctrica ( $dS \cdot m^{-1}$ ).

Los valores de RASo son promedios de los rangos señalados en la publicación indicada. La  $CEr_{aj}$  es la conductividad eléctrica del agua de riego ajustada según la cantidad de enmienda y/o de sales de potasio aplicadas al agua.



**Figura 1.** Valores límites de RASo (RASmax) según la conductividad eléctrica del agua de riego (pura o mezclada), deducidos de la publicación de Ayers y Westcot (1985)

La relación de adsorción de sodio del agua en el suelo superficial (RASo), propuesto por Suarez (1981), considera la precipitación del calcio del agua o la solubilización de éste del suelo, según la siguiente ecuación, donde Cax es la concentración corregida del calcio:

$$RASo = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Cax + Mg^{2+}}{2}}} \quad (6)$$

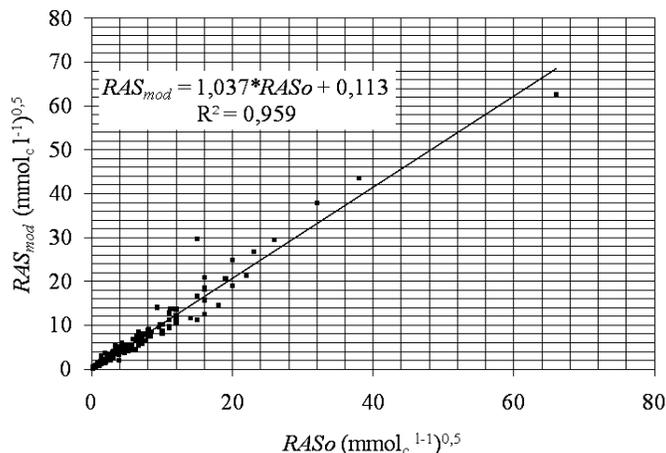
En nuestro caso, se propone un procedimiento alternativo de cálculo del RASo, denominado RAS modificado (RAS<sub>mod</sub>):

$$RAS_{mod} = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} - (CaCO_3 + 0,5 * Ca(HCO_3)_2) + Mg^{2+} - (MgCO_3 + 0,25 * Mg(HCO_3)_2)}{2}}} \quad (7)$$

donde: RASo y RASmod representan el RAS en el agua de riego una vez infiltrada en el suelo, en la que la concentración de todos los iones y sales se expresan en  $mmol_c \cdot L^{-1}$

Para probar la bondad de nuestra ecuación se realizó una regresión entre los valores de RASo

de la Ecuación 6, propuesta por Suárez (1981) y los de RASmod (Ecuación 7) obtenidos ambos a partir de 249 aguas de las 250 reportadas en la publicación de Ayers y Westcot (1985). En la Figura 2 se muestra el gráfico de dispersión obtenido, con la ecuación de predicción y su  $R^2$ .



**Figura 2.** Regresión entre el RASo (Suárez, 1981) y el RASmod propuesto como alternativa

La similitud observada entre RASo y RASmod permite la utilización del RASmod en lugar del RASo por su facilidad de cálculo cuando se tiene la composición salina del agua. Se asume que los carbonatos de calcio y magnesio precipitan totalmente mientras los bicarbonatos de calcio y magnesio lo hacen de manera parcial, precipitando proporcionalmente más bicarbonato de calcio que bicarbonato de magnesio por la menor solubilidad del primero. Cabe destacar que el RASo no considera cambios en el ion magnesio.

Retomando el uso de fuentes de calcio como enmiendas para reducir los riesgos de sodificación, una vez que la cantidad del ion  $Ca^{+2}$  añadida al agua permita un RASmod igual o ligeramente inferior al RASmax establecido en la Ecuación 6, se aplica la expresión siguiente para calcular la cantidad de enmienda requerida:

$$M = 86 * Y \quad (8)$$

donde: M es la cantidad necesaria de yeso puro en el agua de riego ( $g \cdot m^{-3}$ ) y Y es la concentración de calcio ( $mmol \cdot L^{-1}$ ).

En caso que el agua contenga sulfato de calcio pero su CE sea muy baja que da un RASmod superior al RASmax, se puede considerar la aplicación de sales de potasio al agua para aumentar su fuerza iónica, garantizando que el RASmod pueda quedar por debajo del RASmax. Obviamente la cantidad de potasio agregada no debe superar los requerimientos del cultivo. En todo caso las dosis de potasio a aplicar en el agua están por el orden de sólo décimas de  $mmol \cdot L^{-1}$ . Puede también combinarse el uso de enmiendas con la aplicación de fertilizantes potásicos.

La calificación del agua obtenida mediante este procedimiento según el riesgo de sodificación del suelo varía desde muy baja, sin limitación de uso, y sin requerimiento de yeso, hasta muy alta, en la que se debe descartar el agua o mezclarla con otra que baje el riesgo de sodio, y en la que los requerimientos de yeso superan los  $387 g \cdot m^{-3}$  es conveniente mezclarla con otra que permita reducir el RASmod o descartarla por el riesgo elevado de sodificación y/o por los requerimientos altos de enmienda.

La aplicación de enmienda conduce obligatoriamente a planificar lavados para remover el sodio del suelo que constituye el

peligro de sodificación.

### Control de la salinización

El control de la salinización es posible mediante lixiviación. Para ello se calcula el RL después de enmendar el agua si fuera el caso, considerando que la salinidad máxima del suelo superficial, donde está la mayor densidad de raíces, será la tolerada por el cultivo, permitiendo en consecuencia un aumento de la salinidad con la profundidad; en este caso se asumirá que la salinidad en el fondo de la zona radical efectiva pueda alcanzar el triple de su valor original; esto basado en las experiencias de Bernstein y Francois (1973), y Villafañe y Pla (1994), entre otras. Adicionalmente se considerarán las condiciones de drenaje del perfil y la magnitud de la lluvia anual. En relación con esto último se adopta como CE del agua que infiltra en el suelo, el promedio ponderado del agua de lluvia y el agua de riego, de acuerdo con lo sugerido por Chhabra (1996):

$$CE_i = \frac{CE_{r_{aj}} * RR + 0,7CE_p * P}{RR + 0,7P} \quad (9)$$

donde:  $CE_i$  = conductividad eléctrica promedio del agua que infiltra en el año;  $CE_{r_{aj}}$  = conductividad eléctrica del agua de riego o del agua de riego ajustada según la cantidad de enmienda y/o potasio aplicada; RR = requerimiento anual de riego;  $CE_p$  = conductividad eléctrica del agua de lluvia (estimada en  $0,15 dS \cdot m^{-1}$ ); y P = precipitación pluvial promedio anual en el lugar. El coeficiente 0,7 de la variable P es un valor adoptado para obtener la lluvia efectiva.

La evapotranspiración diaria de referencia ( $ET_o$ ) se estima a partir de la magnitud de la precipitación anual de la localidad, utilizando la siguiente ecuación de regresión que fue obtenida al relacionar pares de valores de P y  $ET_o$  de diferentes estaciones meteorológicas del país:

$$ET_o = - 0,004 * P + 9,142 \quad (10)$$

Los requerimientos de riego (RR) se pueden obtener con la expresión siguiente:

$$RR = 365 * ET_o - 0,7P \quad (11)$$

Y al sustituir la ecuación (10) en la (11) se obtiene que  $RR = 3.336,83 - 2,16P$

Finalmente se calcula el RL utilizando la expresión:

$$RL = \frac{CE_i}{3 * E_{fl} * CE_e} \quad (12)$$

El valor de  $CE_e$  es el esperado en el suelo

superficial y corresponde al nivel umbral del cultivo más sensible previsto a sembrar en el lugar. Se puede utilizar la lista reportada por Maas (1990) o cualquier otra fuente confiable.

La calificación del agua obtenida mediante este procedimiento según el riesgo de salinidad depende de la magnitud del RL y varía desde muy baja, con RL menor a 0,05, y en la que sólo es necesario controlar el nivel freático, hasta muy alta, con RL superior a 0,30, en la que se debe recurrir al uso de cultivos más tolerantes.

Como el riego se realiza cuando la lluvia es nula o escasa, el RL que se practique con el riego debe ser compensado con el que se realice con la lluvia. Será necesario en consecuencia el monitoreo de la situación en cada caso para realizar los ajustes de lavado con el agua de riego ya que en algunos casos es posible que la lluvia lave más de lo previsto o por el contrario su lavado sea insuficiente.

Toda esta propuesta ha sido organizada por el autor en una hoja Excel para facilitar su aplicación. Pueden además introducirse algunos condicionales para evaluar la calidad de los datos y dar señales de alarma para introducir correctivos. A continuación se indican algunos incorporados a la hoja de cálculo:

- Si  $\text{pH} > 8,2$ , entonces  $\text{CO}_3^{=} > 0$ .
- Si  $0,5 * (\text{cationes} + \text{aniones}) * 0,06 < \text{CEr} < 0,5 * (\text{cationes} + \text{aniones}) * 0,12$ , hay concordancia entre la CER y los  $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$  de cationes o aniones.
- La diferencia entre cationes y aniones no debe superar el 5% de la suma de cationes y aniones.
- Si  $\text{CaCO}_3 > 0,5 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ , entonces chequear calcio y carbonatos.
- Si  $\text{MgCO}_3 > 2,5 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ , entonces chequear magnesio y carbonatos.
- Si  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 > 12 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ , entonces chequear calcio y bicarbonatos.
- Si  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 > 20 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ , entonces chequear magnesio y bicarbonatos.
- Si  $\text{CaSO}_4 > 35 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ , entonces chequear calcio y sulfatos.
- Si para un valor de CER de  $2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  el RL supera 0,30 se considera que hay riesgo de salinización

La hoja de cálculo preparada por el autor puede ser solicitada en su dirección electrónica: vr1905@cantv.net.

## LITERATURA CITADA

1. Ayers, R. y D. Westcot. 1985. Water quality for agriculture. FAO. Irrigation and Drainage Paper 29. Rev. 1. Rome.
2. Bernstein, L. y L. Francois. 1973. Leaching requirement studies: Sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 37: 931-943.
3. Bower, C., L. Wilcox, G. Akin y M. Keyes. 1965. An index of tendency of the  $\text{CaCO}_3$  to precipitate from irrigation waters. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29: 91-92.
4. Chhabra, R. 1996. Soil Salinity and Water Quality. Balkema Pub. Brookfield, VT.
5. Dieleman, P. 1963. Reclamation of salt-affected soils in Irak. ILRI Publication 11. Wageningen, The Netherlands. 175 p.
6. Doneen, L. 1975. Water quality for irrigated agriculture. In: A. Poljakoff-Mayber y J. Gale (eds.). Plant in Saline Environments. Ecological Studies, V. 15. Springer Verlag. New York. pp. 56-76.
7. Eaton, F. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. Soil Sci. 69: 123-133.
8. Maas, E. 1990. Crop salt tolerance. In: K. Tanji (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management Manual. ASCE. New York. pp. 262-304.
9. Oster, J. y J. Rhoades. 1990. Steady state root zone salt balance. In: K. Tanji (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management Manual. ASCE. New York. pp. 469-481.
10. Pizarro, F. 1990. Riego Localizado de Alta Frecuencia. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
11. Pla, I. y F. Dappo. 1977. Field testings of a new system for qualifying irrigation water. Proc. Int. Conf. on Managing Saline Water for irrigation. Texas Tech. Univ. Lubbock, Tx. pp. 376-387.
12. Rhoades, J. 1972. Quality of water for irrigation.

- Soil Sci. 173: 277-284. 469-475.
13. Rhoades, J. 1984. Using saline waters for irrigation. *In*: I. Pla y A. Florentino (eds.). Proceedings of International Workshop on Salt-Affected Soils of Latin America. Facultad de Agronomía, UCV. Maracay, Venezuela. pp. 22-52.
14. Rhoades, J., A. Kandiah y A. Marshali. 1992. The use of saline waters for crop production. FAO. Irrigation and Drainage Paper 48. Rome.
15. Shalhevet, J. 1974. Aspects of soil salinity and sodicity in relation to irrigation and reclamation. Symposium Israel-France. Recherches Ecologiques au Développement des Zones Arides (Déserts) Méditerranéens à Précipitations Hivernales. Volcani Center. Bet-Dagan, Israel. Special Publication 39: 117-140.
16. Suárez, D. 1981. Relation between pHc y sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil and drainage waters. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 469-475.
17. USSLS (United States Salinity Laboratory Staff). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Handbook 60. Riverside, CA. 160 p.
18. Van der Zee, S., S. Shah, C. van Uffelem, P. Raats y N. dal Ferro. 2010. Soil sodicity as result of periodical drought. Agricultural Water Management 97: 41-49.
19. Villafañe, R. e I. Pla. 1994. Efectos del riego y la lluvia sobre el desplazamiento vertical de sales en un suelo arcillosos de Venezuela. Agronomía Tropical 44: 707-729.
20. Villafañe, R. y R. Guarisma. 1998. Propuesta para calificar y manejar el agua de riego según su salinidad. Agronomía Tropical 48: 251-273.
21. Villafañe, R., N. De León, F. Camacho, R. Ramírez y L. Sánchez. 2004. Acumulación y lavado de sales en columnas de suelo regadas con agua salina procedente de un pozo petrolero. Agronomía Tropical 54: 93-120.