

## LA CALIDAD AGRONÓMICA DE LAS AGUAS DE RIEGO

Rafael Domingo<sup>1</sup>

### Introducción. Salinidad. Alcalinidad. Fitotoxicidad. Clasificación del agua de riego

#### INTRODUCCIÓN

Para determinar la disponibilidad de agua para el riego se precisa información tanto de cantidad como de calidad. La **cantidad** permite inferir el grado en el que el abastecimiento es capaz de satisfacer las necesidades y es un dato necesario en la planificación de cultivos y del riego. La **calidad** indica generalmente idoneidad de uso y es por tanto difícil de evaluar, a no ser que se realice en términos relativos a su uso específico. La idoneidad de un agua de riego se establece en relación a la evolución de la peligrosidad potencial sobre los suelos y cultivos que comporta su uso y a las estrategias de manejo del riego capaces de reducir los riesgos derivados de su calidad.

La creciente demanda de agua por la agricultura, industria y ciudades ha impuesto la utilización de aguas de riego de muy diferentes procedencias: superficiales, subterráneas y en algunos casos aguas reutilizadas y desaladas de características físico-químicas y biológicas muy diferentes, estas características son las que en definitiva definen su adecuación o no para el riego.

La evaluación de la calidad del agua de riego se suele realizar en función de 4 categorías de problemas relativos a ella:

- Riesgo de salinidad.
- Riesgo de sodicidad.
- Riesgo de fitotoxicidad.
- Problemas varios.

Diversos tipos de sales disueltas pueden estar presentes en un agua de riego afectando estas de forma diferente a los suelos y a los cultivos. De cara a evaluar el impacto sobre estos es necesario realizar un análisis de aguas en el que se determine la naturaleza y cantidad de las sales disueltas. Un análisis tipo de cara a evaluar la idoneidad de un agua incluye las siguientes determinaciones (Tabla 1):

- 1) Conductividad eléctrica ( $CE_{25^{\circ}C}$ ), es una medida indirecta de la sales disueltas totales (SDT).
- 2) Análisis químico de los cationes:  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ , y de los aniones:  $Cl^{-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^{-}$
- 3) Otros parámetros de calidad incluyen el pH y otros constituyentes químicos tales como el B,  $NO_3^{-}-N$ ,  $NH_4^{+}-N$ .

**Tabla 1.** Determinaciones analíticas necesarias para evaluar la calidad de un agua de riego

<b>LABORATORY DETERMINATIONS NEEDED TO EVALUATE COMMON IRRIGATION WATER QUALITY PROBLEMS</b>				
<b>Water parameter</b>	<b>Symbol</b>	<b>Unit<sup>1</sup></b>	<b>Usual range in irrigation water</b>	
<b>SALINITY</b>				
<u>Salt Content</u>				
Electrical Conductivity	ECw	dS/m	0 – 3	dS/m
(or)				
Total Dissolved Solids	TDS	mg/l	0 – 2000	mg/l
<u>Cations and Anions</u>				
Calcium	Ca <sup>++</sup>	me/l	0 – 20	me/l
Magnesium	Mg <sup>++</sup>	me/l	0 – 5	me/l
Sodium	Na <sup>+</sup>	me/l	0 – 40	me/l
Carbonate	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	me/l	0 – .1	me/l
Bicarbonate	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	me/l	0 – 10	me/l
Chloride	Cl <sup>-</sup>	me/l	0 – 30	me/l
Sulphate	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	me/l	0 – 20	me/l
<b>NUTRIENTS<sup>2</sup></b>				
Nitrate-Nitrogen	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg/l	0 – 10	mg/l
Ammonium-Nitrogen	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> -N	mg/l	0 – 5	mg/l
Phosphate-Phosphorus	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> -P	mg/l	0 – 2	mg/l
Potassium	K <sup>+</sup>	mg/l	0 – 2	mg/l
<b>MISCELLANEOUS</b>				
Boron	B	mg/l	0 – 2	mg/l
Acid/Basicity	pH	1–14	6.0 – 8.5	
Sodium Adsorption Ratio <sup>3</sup>	SAR	(me/l) <sup>1, 2</sup>	0 – 15	

dS/m = deciSiemen/metre in S.I. units (equivalent to 1 mmho/cm = 1 millimho/centi-metre)

mg/l = milligram per litre ≈ parts per million (ppm).

me/l = milliequivalent per litre (mg/l ÷ equivalent weight = me/l); in SI units, 1 me/l= 1 millimo/litre adjusted for electron charge.

<sup>2</sup> NO<sub>3</sub> -N means the laboratory will analyse for NO<sub>3</sub> but will report the NO<sub>3</sub> in terms of chemically equivalent nitrogen. Similarly, for NH<sub>4</sub>-N, the laboratory will analyse for NH<sub>4</sub> but report in terms of chemically equivalent elemental nitrogen. The total nitrogen available to the plant will be the sum of the equivalent elemental nitrogen. The same reporting method is used for phosphorus.

<sup>3</sup> SAR is calculated from the Na, Ca and Mg reported in me/l

## SALINIDAD

Las aguas de riego rara vez contienen suficiente cantidad de sales como para causar daño inmediato a los cultivos. Un intervalo normal de contenido en sales de una gran parte de las aguas de riego puede ser de 0,1 – 4 g/L de sales solubles, de modo que con volúmenes de aplicación de 5000 a 10000 m<sup>3</sup>/ha y año supone una aportación de 0,5 – 40 t de sales solubles/ha y año. Se trata de cantidades significativas para que el propio riego pueda convertirse en una de las principales fuentes de sales del medio de cultivo y en consecuencia de salinización del suelo.

La concentración de sales solubles en los suelos aumenta tras el riego ya que la mayor parte del agua aplicada se pierde por evaporación y transpiración quedando en el suelo las sales solubles. Cuando no se produce lavado, las sales se disuelven en el agua del suelo hasta que se alcanza una concentración tal que excede el producto de solubilidad de cada una de ellas.

Según el comportamiento de las sales y su efecto sobre los cultivos se las agrupa en dos categorías:

- Sales poco solubles, de producto de solubilidad bajo, que precipitan a concentraciones inferiores a las que pueden producir daños a las plantas como son: CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub> y CaSO<sub>4</sub>.
- Sales muy solubles o más solubles que el yeso como son: NaCl, MgCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, cuyas solubilidades son muy superiores a las cifras límites de tolerancia a la salinidad de la mayor parte de las plantas.

El problema de la salinidad del agua y por tanto, los daños y los efectos que originan surgen como consecuencia de la evolución que experimenta el agua de riego en el suelo. Así en el intervalo entre riegos se produce una progresiva concentración de sales en la solución del suelo, en donde los componentes muy solubles o perjudiciales tienden a mantenerse en disolución mientras que las poco solubles precipitan.

La salinidad del agua de riego puede expresarse de los siguientes modos:

- a) De forma ponderal en g/L o mg/L
- b) Como suma de meq/L de sus componentes
- c) Mediante la conductividad eléctrica a una temperatura de referencia (CE<sub>25°C</sub>). Las unidades en las que frecuentemente se expresa son dS/m que equivale a la antigua unidad de mmho/cm.

$$0.1 \text{ S/m} = 1 \text{ dS/m} = 1 \text{ mmho/cm} =$$

La conductividad específica o conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de un cuerpo o medio para conducir la corriente eléctrica y es una magnitud inversa a la resistencia específica. Ésta se obtiene con el conductímetro.

Si tenemos en cuenta que la resistencia que ofrece un conductor al paso de la corriente viene dada por la ley de Ohm:

$$\text{Ley de Ohm: } R = \rho \frac{L}{S}$$

donde:  $\rho$  es resistividad o resistencia específica ( $\Omega \text{ m}$ ); L la longitud del mismo (m) y S su sección ( $\text{m}^2$ )

Para el caso del conductímetro:

R: resistencia en Ohmios del medio (ohm,  $\Omega$ )

L: distancia entre electrodos (cm)

S: área entre electrodos ( $\text{cm}^2$ )

$\rho$ : resistencia específica ( $\text{Ohm cm}^{-1}$ )

$$CE = \frac{1}{\rho} = \frac{L \text{ (m)}}{S \cdot R \text{ (m}^2 \Omega)} = \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1} \quad \text{o} \quad \text{S m}^{-1}$$

El laboratorio de salinidad de los Estados Unidos (USSL) obtuvo una serie de correlaciones que permiten contrastar los resultados obtenidos del análisis del agua de riego. Estas correlaciones establecen:

1) La suma de cationes expresada en meq/L debe de ser igual a la de los aniones en meq/L

$$\sum \text{cationes (meq/L)} = \sum \text{aniones (meq/L)}$$

2) El valor numérico de la relación  $\frac{CE \text{ (}\mu\text{S/cm)}}{\sum \text{meq/L aniones o cationes}} = 100$

Para la mayoría de las aguas, este valor desciende a 80 en caso de aguas ricas en  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$  de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  mientras que en aguas con  $\text{Cl}^-$  y ricas en  $\text{Na}^+$  la relación llega a 110.

3) El valor total de los sólidos disueltos (SDT) en ppm es aproximadamente igual a

$$\text{SDT (ppm)} \approx 640 \times \text{CE (dS/m)}$$

4) El  $\psi_o$  generado por las sales expresado en atmósferas es aproximadamente igual a

$$\psi_o \text{ (atm)} \approx -0,36 \times \text{CE (dS/m)}$$

5) Un dS/m es aproximadamente igual a

$$1 \text{ dS/m} \approx 0,08\% \text{ sales solubles}$$

*Estas igualdades se cumplen aproximadamente hasta los 5 dS/m.*

Con objeto de asegurar la alimentación hídrica del cultivo, a medida que disminuye el potencial osmótico debe aumentarse el potencial matricial para que el potencial del agua en el suelo no sea prohibitivo para la planta. De modo que hay que establecer un régimen de riego que permita:

- 1) Reducir la concentración excesiva de sales.
- 2) Eliminar, mediante lavado, las sales aportadas por la propia agua de riego.

En consecuencia para reducir el riesgo de salinización secundaria originada por el agua de riego es preciso aplicar dosis de riego que cubran, a la vez, las necesidades de consumo y las de lavado.

La fracción de lavado (FL) se define como la fracción del agua de riego que debe percolar a través de la zona radicular para controlar la salinidad y queda expresada como:

$$FL = \frac{L_d}{L_r}$$

donde:  $L_d$  y  $L_r$  representan los volúmenes de agua, expresados como lámina o altura de agua que drena de la zona radicular y el aplicado en el riego respectivamente. Como la concentración, o lo que es lo mismo su CE, es inversamente proporcional al volumen de la solución la FL se puede expresar también como:

$$FL = \frac{L_d}{L_r} = \frac{C_{Er}}{C_{Ed}} = \frac{C_r}{C_d}$$

En donde  $C_{Ed}$  representa la CE que se alcanza en la solución del suelo por debajo de la zona radicular. Para su determinación hay que recurrir a la utilización de sondas de extracción de solución del suelo o más generalmente a la toma de muestras de tierra, para después en laboratorio crear una pasta saturada y a partir de ella obtener la CE del extracto de saturación ( $C_{Ee}$ ), ya que la conductividad eléctrica de la solución del suelo ( $C_{Ess}$ ) y la  $C_{Ee}$  guardan entre sí una relación del tipo:

$$C_{Ess} = \frac{P}{\theta_v} C_{Ee}$$

en donde  $\theta_v$  representa la humedad volumétrica en que se encuentra el suelo en el momento de la toma de la muestra (en este caso sería el suelo por debajo de la zona radicular).

Como para condiciones normales de suelo (suelos con buen drenaje y con texturas francas que pueden variar desde las franco-arenosas a las franco-arcillosas), se admite que la porosidad total es aproximadamente el doble que el volumen equivalente a su contenido de humedad a capacidad de campo ( $\theta_{vCC}$ ) se puede considerar bajo estas circunstancias que:

$$P_{TOTAL} \approx 2 \theta_{vCC} \Rightarrow C_{Ess} \approx 2 C_{Ee}$$

De modo que la salinidad que ha de tolerar un cultivo puede representarse mediante su correspondiente valor de la  $C_{Ee}$ . La salinidad promedio del agua contenida en la zona radicular ( $C_{Ezr}$ ) es la salinidad que debe de ser tolerada por las plantas y es difícil de medir directamente, de ahí que se recurra  $C_{Ee}$ .

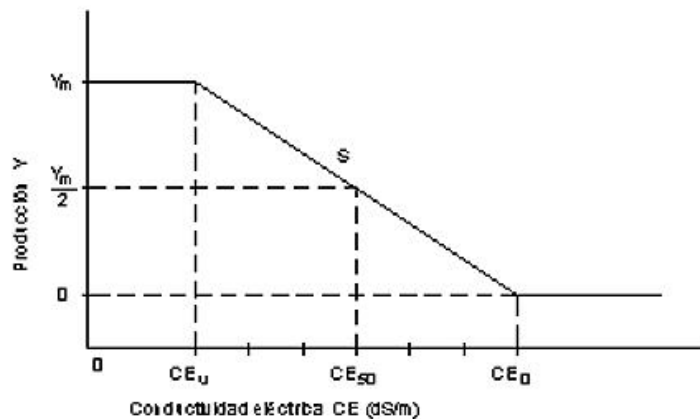
El promedio de salinidad del agua del suelo contenida en la zona radicular ( $CE_{zr}$ ) puede ser estimada mediante la ecuación.

$$FL = \frac{CE_r}{CE_d}$$

Siempre que se cumplan ciertos supuestos sobre el patrón de extracción de agua por los cultivos. Suponiendo un patrón de extracción normal (40, 30, 20 y 10% - modelo aplicable a cultivos en los que el riego moja la generalidad del suelo), el agua consumida por los cultivos será extraída en esa proporción desde la cuarta parte superior a la cuarta parte inferior de la zona radicular ( $ZR$ ) respectivamente y además suponiendo que la fracción de lavado,  $FL$ , es del 15-20% se tienen las siguientes aproximaciones (Ayers y Westcot (1987)).

$CE_{SSZR} = 3 CE_r$
$CE_e = 1,5 CE_r$
$CE_{SSZR} = 2 CE_e$

Por otro lado, la fórmula de Maas y Hoffman relaciona el grado de salinidad con los rendimientos potenciales de los cultivos. Su expresión y representación aparecen en la figura 1.



**Figura 1.** Representación gráfica de la fórmula de Maas y Hoffman:  $Y = 100 - b(CE_e - a) \leq 100$

Ella informa sobre la disminución lineal que experimenta tanto el crecimiento vegetativo como los rendimientos potenciales conforme aumenta la salinidad del suelo, expresándose esta por medio de su valor equivalente de  $CE_e$ . El parámetro 'a' representa la salinidad umbral o grado de tolerancia del cultivo que no afecta al rendimiento final y con el que se esperan producciones del 100%. El parámetro 'b' expresa el nivel de sensibilidad del cultivo a la salinidad y, por lo tanto, la disminución del rendimiento por incremento unitario de aquella salinidad. Esta ecuación junto con la relación  $CE_e = 1,5 CE_r$  permitieron a Ayers y Westcot elaborar las tablas de tolerancia relativa de diferentes cultivos en relación con los rendimientos (Tabla 2).

Para la mayoría de los cultivos el período de germinación representa la fase más sensible a la salinidad.

**Tabla 2.-** Tolerancia a la salinidad de los cultivos en relación a su rendimiento potencial y salinidad del agua de riego o a la salinidad del suelo (Ayers y Westcot (1987)).

<b>Table 2 CROP TOLERANCE AND YIELD POTENTIAL OF SELECTED CROPS AS INFLUENCED BY IRRIGATION WATER SALINITY (<math>EC_w</math>) OR SOIL SALINITY (<math>EC_e</math>) YIELD POTENTIAL<sup>2</sup></b>										
FIELD CROPS	100%		90%		75%		50%		0%	
	"maximum" <sup>2</sup>									
	$EC_e$	$EC_w$	$EC_e$	$EC_w$	$EC_e$	$EC_w$	$EC_e$	$EC_w$	$EC_e$	$EC_w$
<b>Barley</b> ( <i>Hordeum vulgare</i> ) <sup>2</sup>	8.0	5.3	10	6.7	13	8.7	18	12	28	19
<b>Cotton</b> ( <i>Gossypium hirsutum</i> )	7.7	5.1	9.6	6.4	13	8.4	17	12	27	18
<b>Sugarbeet</b> ( <i>Beta vulgaris</i> ) <sup>2</sup>	7.0	4.7	8.7	5.8	11	7.5	15	10	24	16
<b>Sorghum</b> ( <i>Sorghum bicolor</i> )	6.8	4.5	7.4	5.0	8.4	5.6	9.9	6.7	13	8.7
<b>Wheat</b> ( <i>Triticum aestivum</i> ) <sup>2</sup>	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.3	13	8.7	20	13
<b>Wheat, durum</b> ( <i>Triticum turgidum</i> )	5.7	3.8	7.6	5.0	10	6.9	15	10	24	16
<b>Soybean</b> ( <i>Glycine max</i> )	5.0	3.3	5.5	3.7	6.3	4.2	7.5	5.0	10	6.7
<b>Cowpea</b> ( <i>Vigna unguiculata</i> )	4.9	3.3	5.7	3.8	7.0	4.7	9.1	6.0	13	8.8
<b>Groundnut (Peanut)</b> ( <i>Arachis hypogaea</i> )	3.2	2.1	3.5	2.4	4.1	2.7	4.9	3.3	6.6	4.4
<b>Rice (paddy)</b> ( <i>Oriza sativa</i> )	3.0	2.0	3.8	2.6	5.1	3.4	7.2	4.8	11	7.6
<b>Sugarcane</b> ( <i>Saccharum officinarum</i> )	1.7	1.1	3.4	2.3	5.9	4.0	10	6.8	19	12
<b>Corn (maize)</b> ( <i>Zea mays</i> )	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
<b>Flax</b> ( <i>Linum usitatissimum</i> )	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
<b>Broadbean</b> ( <i>Vicia faba</i> )	1.5	1.1	2.6	1.8	4.2	2.0	6.8	4.5	12	8.0
<b>Bean</b> ( <i>Phaseolus vulgaris</i> )	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2

Tabla 2.- (continuación)

<b>Table 2 CROP TOLERANCE AND YIELD POTENTIAL OF SELECTED CROPS AS INFLUENCED BY IRRIGATION WATER SALINITY (EC<sub>w</sub>) OR SOIL SALINITY (EC<sub>e</sub>)<sup>1</sup> YIELD POTENTIAL<sup>2</sup></b>										
FIELD CROPS	100%		90%		75%		50%		0%	
	EC <sub>e</sub>	EC <sub>w</sub>	EC <sub>e</sub>	EC <sub>w</sub>	EC <sub>e</sub>	EC <sub>w</sub>	EC <sub>e</sub>	EC <sub>w</sub>	"maximum" <sup>3</sup>	
VEGETABLE CROPS										
<b>Squash, zucchini (courgette)</b> <i>(Cucurbita pepo melopepo)</i>	4.7	3.1	5.8	3.8	7.4	4.9	10	6.7	15	10
<b>Beet, red</b> <i>(Beta vulgaris)</i> <sup>5</sup>	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15	10
<b>Squash, scallop</b> <i>(Cucurbita pepo melopepo)</i>	3.2	2.1	3.8	2.6	4.8	3.2	6.3	4.2	9.4	6.3
<b>Broccoli</b> <i>(Brassica oleracea botrytis)</i>	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14	9.1
<b>Tomato</b> <i>(Lycopersicon esculentum)</i>	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13	8.4
<b>Cucumber</b> <i>(Cucumis sativus)</i>	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10	6.8
<b>Spinach</b> <i>(Spinacia oleracea)</i>	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15	10
<b>Celery</b> <i>(Apium graveolens)</i>	1.8	1.2	3.4	2.3	5.8	3.9	9.9	6.6	18	12
<b>Cabbage</b> <i>(Brassica oleracea capitata)</i>	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12	8.1
<b>Potato</b> <i>(Solanum tuberosum)</i>	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
<b>Corn, sweet (maize)</b> <i>(Zea mays)</i>	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
<b>Sweet potato</b> <i>(Ipomoea batatas)</i>	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	11	7.1
<b>Pepper</b> <i>(Capsicum annuum)</i>	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	8.6	5.8
<b>Lettuce</b> <i>(Lactuca sativa)</i>	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.1	3.4	9.0	6.0
<b>Radish</b> <i>(Raphanus sativus)</i>	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	8.9	5.9
<b>Onion</b> <i>(Allium cepa)</i>	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	7.4	5.0
<b>Carrot</b> <i>(Daucus carota)</i>	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.0	8.1	5.4



Tabla 2.- (continuación)

VEGETABLE CROPS										
<b>Bean</b> ( <i>Phaseolus vulgaris</i> )	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2
<b>Turnip</b> ( <i>Brassica rapa</i> )	0.9	0.6	2.0	1.3	3.7	2.5	6.5	4.3	12	8.0
<b>Wheatgrass, tall</b> ( <i>Agropyron elongatum</i> )	7.5	5.0	9.9	6.6	13	9.0	19	13	31	21
<b>Wheatgrass, fairway crested</b> ( <i>Agropyron cristatum</i> )	7.5	5.0	9.0	6.0	11	7.4	15	9.8	22	15
<b>Bermuda grass</b> ( <i>Cynodon dactylon</i> ) <sup>z</sup>	6.9	4.6	8.5	5.6	11	7.2	15	9.8	23	15
<b>Barley (forage)</b> ( <i>Hordeum vulgare</i> ) <sup>a</sup>	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.4	13	8.7	20	13
<b>Ryegrass, perennial</b> ( <i>Lolium perenne</i> )	5.6	3.7	6.9	4.6	8.9	5.9	12	8.1	19	13
<b>Trefoil, narrowleaf birdsfoot</b> <sup>b</sup> ( <i>Lotus corniculatus tenuifolium</i> )	5.0	3.3	6.0	4.0	7.5	5.0	10	6.7	15	10
<b>Harding grass</b> ( <i>Phalaris tuberosa</i> )	4.6	3.1	5.9	3.9	7.9	5.3	11	7.4	18	12
<b>Fescue, tall</b> ( <i>Festuca elatior</i> )	3.9	2.6	5.5	3.6	7.8	5.2	12	7.8	20	13
<b>Wheatgrass, standard crested</b> ( <i>Agropyron sibiricum</i> )	3.5	2.3	6.0	4.0	9.8	6.5	16	11	28	19
<b>Vetch, common</b> ( <i>Vicia angustifolia</i> )	3.0	2.0	3.9	2.6	5.3	3.5	7.6	5.0	12	8.1
<b>Sudan grass</b> ( <i>Sorghum sudanense</i> )	2.8	1.9	5.1	3.4	8.6	5.7	14	9.6	26	17
<b>Wildrye, beardless</b> ( <i>Elymus triticoides</i> )	2.7	1.8	4.4	2.9	6.9	4.6	11	7.4	19	13

Tabla 2.- (continuación)

<b>Table 2 CROP TOLERANCE AND YIELD POTENTIAL OF SELECTED CROPS AS INFLUENCED BY IRRIGATION WATER SALINITY (EC<sub>w</sub>) OR SOIL SALINITY (EC<sub>e</sub>)<sup>1</sup></b>										
<b>FIELD CROPS</b>	<b>100%</b>		<b>90%</b>		<b>75%</b>		<b>50%</b>		<b>0%</b>	
									<b>“maximum”<sup>2,3</sup></b>	
	<b>EC<sub>e</sub></b>	<b>EC<sub>w</sub></b>	<b>EC<sub>e</sub></b>	<b>EC<sub>w</sub></b>	<b>EC<sub>e</sub></b>	<b>EC<sub>w</sub></b>	<b>EC<sub>e</sub></b>	<b>EC<sub>w</sub></b>	<b>EC<sub>e</sub></b>	<b>EC<sub>w</sub></b>
<b>VEGETABLE CROPS</b>										
<b>Cowpea (forage) (<i>Vigna unguiculata</i>)</b>	2.5	1.7	3.4	2.3	4.8	3.2	7.1	4.8	12	7.8
<b>Trefoil, big (<i>Lotus uliginosus</i>)</b>	2.3	1.5	2.8	1.9	3.6	2.4	4.9	3.3	7.6	5.0
<b>Sesbania (<i>Sesbania exaltata</i>)</b>	2.3	1.5	3.7	2.5	5.9	3.9	9.4	6.3	17	11
<b>Sphaerophysa (<i>Sphaerophysa salsula</i>)</b>	2.2	1.5	3.6	2.4	5.8	3.8	9.3	6.2	16	11
<b>Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)</b>	2.0	1.3	3.4	2.2	5.4	3.6	8.8	5.9	16	10
<b>Lovegrass (<i>Eragrostis sp.</i>)<sup>3</sup></b>	2.0	1.3	3.2	2.1	5.0	3.3	8.0	5.3	14	9.3
<b>Corn (forage) (maize) (<i>Zea mays</i>)</b>	1.8	1.2	3.2	2.1	5.2	3.5	8.6	5.7	15	10
<b>Clover, berseem (<i>Trifolium alexandrinum</i>)</b>	1.5	1.0	3.2	2.2	5.9	3.9	10	6.8	19	13
<b>Orchard grass (<i>Dactylis glomerata</i>)</b>	1.5	1.0	3.1	2.1	5.5	3.7	9.6	6.4	18	12
<b>Foxtail, meadow (<i>Alopecurus pratensis</i>)</b>	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12	7.9
<b>Clover, red (<i>Trifolium pratense</i>)</b>	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
<b>Clover, alsike (<i>Trifolium hybridum</i>)</b>	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
<b>Clover, ladino (<i>Trifolium repens</i>)</b>	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
<b>Clover, strawberry (<i>Trifolium fragiferum</i>)</b>	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6

**Tabla 2.-** (continuación)

<b>FRUIT CROPS<sup>10</sup></b>										
<b>Date palm</b> ( <i>Phoenix dactylifera</i> )	4.0	2.7	6.8	4.5	11	7.3	18	12	32	21
<b>Grapefruit</b> ( <i>Citrus paradisi</i> ) <sup>11</sup>	1.8	1.2	2.4	1.6	3.4	2.2	4.9	3.3	8.0	5.4
<b>Orange</b> ( <i>Citrus sinensis</i> )	1.7	1.1	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0	5.3
<b>Peach</b> ( <i>Prunus persica</i> )	1.7	1.1	2.2	1.5	2.9	1.9	4.1	2.7	6.5	4.3
<b>Apricot</b> ( <i>Prunus armeniaca</i> ) <sup>11</sup>	1.6	1.1	2.0	1.3	2.6	1.8	3.7	2.5	5.8	3.8
<b>Grape</b> ( <i>Vitis sp.</i> ) <sup>11</sup>	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12	7.9
<b>Almond</b> ( <i>Prunus dulcis</i> ) <sup>11</sup>	1.5	1.0	2.0	1.4	2.8	1.9	4.1	2.8	6.8	4.5
<b>Plum, prune</b> ( <i>Prunus domestica</i> ) <sup>11</sup>	1.5	1.0	2.1	1.4	2.9	1.9	4.3	2.9	7.1	4.7
<b>Blackberry</b> ( <i>Rubus sp.</i> )	1.5	1.0	2.0	1.3	2.6	1.8	3.8	2.5	6.0	4.0
<b>Boysenberry</b> ( <i>Rubus ursinus</i> )	1.5	1.0	2.0	1.3	2.6	1.8	3.8	2.5	6.0	4.0
<b>Strawberry</b> ( <i>Fragaria sp.</i> )	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4	2.7

1 Adapted from Maas and Hoffman (1977) and Maas (1984). These data should only serve as a guide to relative tolerances among crops. Absolute tolerances vary depending upon climate, soil conditions and cultural practices. In gypsiferous soils, plants will tolerate about 2 dS/m higher soil salinity (ECe) than indicated but the water salinity (ECw) will remain the same as shown in this table.

2 ECe means average root zone salinity as measured by electrical conductivity of the saturation extract of the soil, reported in deciSiemens per metre (dS/m) at 25°C. ECw means electrical conductivity of the irrigation water in deciSiemens per metre (dS/m). The relationship between soil salinity and water salinity ( $ECe = 1.5 ECw$ ) assumes a 15–20 percent leaching fraction and a 40-30-20-10 percent water use pattern for the upper to lower quarters of the root zone. These assumptions were used in developing the guidelines in Table 1.

3 The zero yield potential or maximum ECe indicates the theoretical soil salinity (ECe) at which crop growth ceases.

4 Barley and wheat are less tolerant during germination and seeding stage; ECe should not exceed 4–5 dS/m in the upper soil during this period.

5 Beets are more sensitive during germination; ECe should not exceed 3 dS/m in the seeding area for garden beets and sugar beets.

6 Semi-dwarf, short cultivars may be less tolerant.

7 Tolerance given is an average of several varieties; Suwannee and Coastal Bermuda grass are about 20 percent more tolerant, while Common and Greenfield Bermuda grass are about 20 percent less tolerant.

8 Broadleaf Birdsfoot Trefoil seems less tolerant than Narrowleaf Birdsfoot Trefoil.

9 Tolerance given is an average for Boer, Wilman, Sand and Weeping Lovegrass; Lehman Lovegrass seems about 50 percent more tolerant.

10 These data are applicable when rootstocks are used that do not accumulate Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> rapidly or when these ions do not predominate in the soil. If either ions do, refer to the toxicity discussion in Section 4.

11 Tolerance evaluation is based on tree growth and not on yield.

### **Alternativas de manejo con problemas de salinidad**

El objetivo principal en la elección de la estrategia es mejorar la disponibilidad del agua en el suelo de cara al cultivo. Algunas de estas prácticas incluyen:

- Riego más frecuente de cara a mantener un mejor suministro de agua desde el suelo al cultivo.
- Empleo de plantas tolerantes a la salinidad existente o presumible
- Aplicar volúmenes de agua extra para satisfacer los RL.
- Cambio del método de riego a otro que realice un mejor control salino.
- Cambio de prácticas culturales.

Prácticas más drásticas para mejorar o recuperar la productividad de suelos afectados por las sales incluirían:

- Lavar cuando sea necesario para reducir la concentración de sales acumuladas.
- Nivelación de tierras con pendientes uniformes que permitan aplicaciones uniformes de agua.
- Modificar el perfil del suelo para mejorar la permeabilidad.
- Instalar un sistema de drenaje cuando se dan problemas derivados de capas freáticas altas.
- Cambio de la fuente de agua o mezclas.

## ALCALINIDAD.

Un alto contenido de sodio en el agua de riego puede inducir a elevados valores del porcentaje de sodio intercambiable en el suelo (PSI), con los efectos ya conocidos en relación al poder dispersante que tiene el sodio sobre la fracción coloidal del suelo.

$$\text{PSI} = \frac{[\text{Na}^+]_{\text{adsorbido}}}{\text{CIC}}$$

CIC es la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

Al ir acumulándose el sodio en los primeros centímetros de profundidad del suelo sus agregados experimentan procesos de humectación e hinchamiento logrando taponar los poros y de este modo reducir la permeabilidad superficial. Como resultado final surge el deterioro de la estructura y la aparición de horizontes compactados que dificultan la infiltración del agua.

La posibilidad de que un agua de riego ocasione estos problemas puede predecirse mediante el índice RAS (Relación de Adsorción de Sodio) cuya expresión es del tipo:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\left[ \frac{(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})}{2} \right]^{1/2}}$$

Los cationes se expresan en meq/L.

Este índice representa la actividad relativa del  $\text{Na}^+$  contenido tanto en la solución del suelo, como en el agua de riego, en las reacciones de intercambio catiónico. La figura 2 permite la determinación gráfica de RAS de las aguas de riego y la estimación del valor correspondiente al PSI del suelo en equilibrio con el agua de riego.

El RAS ha sido muy utilizado para predecir y evaluar el riesgo de alcalinización y problemas de infiltración que se origina por el uso de aguas de elevado contenido en Na. Sin embargo este índice presenta ciertos inconvenientes como son:

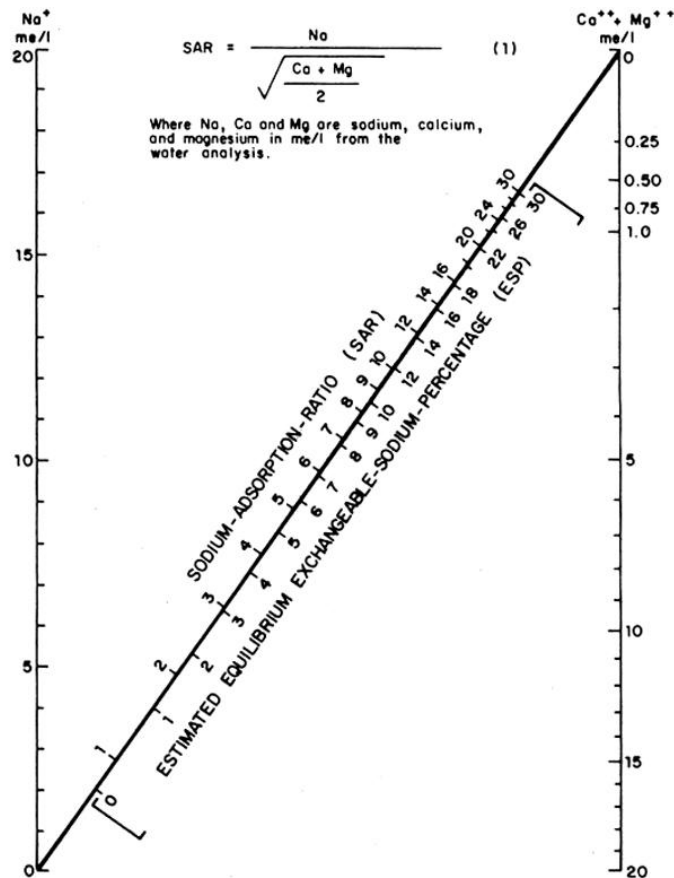
- 1) Se considera que el  $\text{Ca}^{++}$  y el  $\text{Mg}^{++}$  presentan la misma selectividad de intercambio, lo que no es exacto, ya que el Ca tiende a ser más enérgicamente retenido, así los problemas de infiltración se acentúan cuando para un mismo RAS la relación  $\text{Ca}/\text{Mg} < 1$ .
- 2) No tienen en cuenta la posibilidad de formación de precipitados de sales poco solubles, como son los  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$ , los que se producen al concentrarse el agua de riego una vez incorporada al suelo, estos precipitados retiran cationes de Ca y Mg aumentando el RAS. Así que se puede decir que mientras las sales poco solubles mejoran la calidad del agua de riego desde el punto de vista salino, la disminuyen desde el punto de vista de la salinidad.
- 3) Esta expresión no tiene en cuenta el efecto floculante y global del resto de las sales del agua de riego que se opone al efecto dispersante del Na. Por lo tanto, para un mismo valor de RAS, el riesgo de sodicidad será menor cuanto mayor sea la CE del agua de riego (Figura 3).

A causa de estos inconvenientes que presenta la expresión original del parámetro RAS para evaluar correctamente la peligrosidad del  $\text{Na}^+$  que aporta el agua de riego, Bower (1968) modificó este índice y definió el  $\text{RAS}_{aj}$ . El cual se ha visto que sobreestima el riesgo de alcalinización del agua de riego. Por todo ello la FAO aconseja actualmente predecir estos problemas mediante el denominado RAS corregido, propuesto por Suárez (1981) y cuya expresión es:

$$RAS = \frac{Na^+}{\left[\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}\right]^{1/2}}$$

Donde  $Ca^0$  es el calcio corregido en función de la salinidad y  $HCO_3^-/Ca$  del agua, así como por la presión parcial del  $CO_2$  del suelo (Tabla 3).

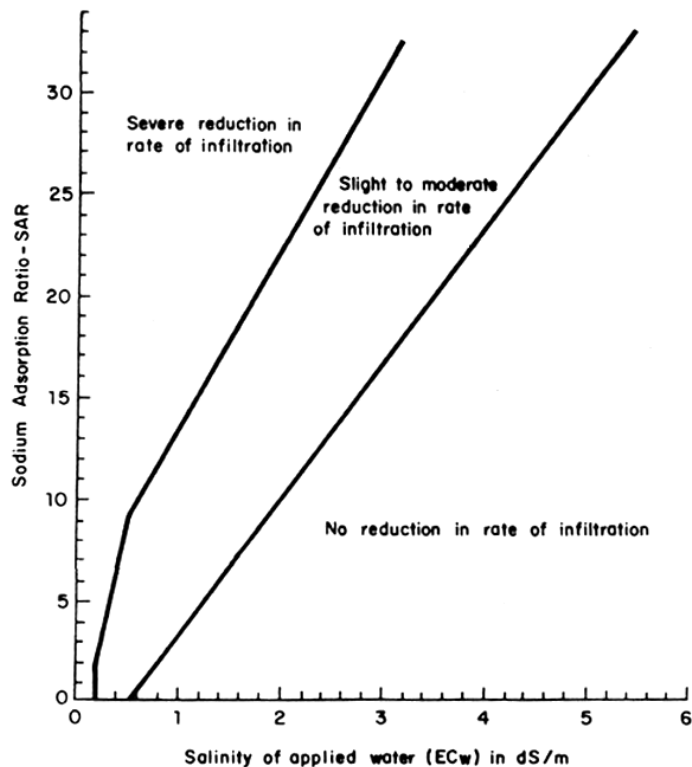
Los sistemas de riego localizado están diseñados para aplicar el agua muy lentamente a través de pequeños orificios que constituyen los emisores. Estos emisores pueden obstruirse por sedimentos, formación de precipitados debidos a las sustancias químicas y organismos biológicos contenidos frecuentemente en las aguas de riego. Las obstrucciones provocadas por las precipitaciones químicas de compuestos como el carbonato y sulfato de calcio se producen lentamente y por lo tanto son difíciles de localizar. Las altas temperaturas y los valores altos de pH favorecen la precipitación química, la que se origina por exceso de carbonatos o sulfatos de Ca o Mg, o por la oxidación del hierro. La precipitación del Ca en el agua puede ser anticipada mediante el índice de saturación de Langelier, el que está muy bien explicitado en Ayers y Westcot (1987). Ver anexo apuntes.



**Figura 2.-** Nomograma para determinar el RAS de las aguas de riego y para estimar el valor correspondiente del PSI del suelo en equilibrio con el agua.

## Soluciones a los problemas de infiltración

Los problemas inducidos por la falta de permeabilidad del suelo son: formación de costras en la superficie de los suelos, podredumbres radiculares, trastornos nutricionales, falta de aireación, mala germinación, etc.



**Figura 3.** Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio.

Tratamientos para facilitar o mejorar la entrada de agua al suelo:

Químicos --- adición de enmiendas (yeso) para modificar la composición química del suelo o del agua.

$$\text{Agua} = 75 - 370 \text{ kg yeso}/1000 \text{ m}^3$$

Yeso:

$$\text{Suelo} = 4,5 - 22 \text{ t/ha pudiendo llegar hasta } 45 \text{ t/ha}$$

Físicos -----incluyen prácticas de cultivo para mejorar la infiltración: labranza (solución temporal), adición de residuos orgánicos (estiércol >40 t/ha), frecuencia de riegos, cambio de sistema de riego por superficie a riegos presurizados para adecuar pluviometrías a la infiltración y mezclas de aguas.

**Tabla 3.** Concentración de calcio ( $\text{Ca}^\circ$ ) en el agua del suelo próxima a la superficie que resultaría de regar con aguas de un determinado valor  $\text{HCO}_3/\text{Ca}$  y conductividad eléctrica del agua de riego (CEr).

		Salinidad del agua aplicada (ECa) (dS/m)											
		0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0
0,05		13,20	13,61	13,92	14,40	14,79	15,26	15,91	16,43	17,28	17,97	19,07	19,94
0,10		8,31	8,57	8,77	9,07	9,31	9,62	10,02	10,35	10,89	11,32	12,01	12,56
0,15		6,34	6,54	6,69	6,92	7,11	7,34	7,65	7,90	8,31	8,64	9,17	9,58
0,20		5,24	5,40	5,52	5,71	5,87	6,06	6,31	6,52	6,86	7,13	7,57	7,91
0,25		4,51	4,65	4,76	4,92	5,06	5,22	5,44	5,62	5,91	6,15	6,52	6,82
0,30		4,00	4,12	4,21	4,36	4,48	4,62	4,82	4,98	5,24	5,44	5,77	6,04
0,35		3,61	3,72	3,80	3,94	4,04	4,17	4,35	4,49	4,72	4,91	5,21	5,45
0,40		3,30	3,40	3,48	3,60	3,70	3,82	3,98	4,11	4,32	4,49	4,77	4,98
0,45		3,05	3,14	3,22	3,33	3,42	3,53	3,68	3,80	4,00	4,15	4,41	4,61
0,50		2,84	2,93	3,00	3,10	3,19	3,29	3,43	3,54	3,72	3,87	4,11	4,30
0,75		2,17	2,24	2,29	2,37	2,43	2,51	2,62	2,70	2,84	2,95	3,14	3,28
1,00		1,79	1,85	1,89	1,96	2,01	2,09	2,16	2,23	2,35	2,44	2,59	2,71
Valor de $\text{HCO}_3/\text{Ca}$	1,25	1,54	1,59	1,63	1,68	1,73	1,78	1,86	1,92	2,02	2,10	2,23	2,33
	1,50	1,37	1,41	1,44	1,49	1,53	1,58	1,65	1,70	1,79	1,86	1,97	2,07
	1,75	1,23	1,27	1,30	1,35	1,38	1,43	1,49	1,54	1,62	1,68	1,78	1,86
	2,00	1,13	1,16	1,19	1,23	1,26	1,31	1,36	1,40	1,48	1,54	1,63	1,70
	2,25	1,04	1,08	1,10	1,14	1,17	1,21	1,26	1,30	1,37	1,42	1,51	1,58
	2,50	0,97	1,00	1,02	1,06	1,09	1,12	1,17	1,21	1,27	1,32	1,40	1,47
	3,00	0,85	0,89	0,91	0,94	0,96	1,00	1,04	1,07	1,13	1,17	1,24	1,30
	3,50	0,78	0,80	0,82	0,85	0,87	0,90	0,94	0,97	1,02	1,06	1,12	1,17
	4,00	0,71	0,73	0,75	0,78	0,80	0,82	0,86	0,88	0,93	0,97	1,03	1,07
	4,50	0,66	0,68	0,69	0,72	0,74	0,76	0,79	0,82	0,86	0,90	0,95	0,99
	5,00	0,61	0,63	0,65	0,67	0,69	0,71	0,74	0,76	0,80	0,83	0,88	0,93
	7,00	0,49	0,50	0,52	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,64	0,67	0,71	0,74
	10,00	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,45	0,47	0,48	0,51	0,53	0,56	0,58
	20,00	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37
	30,00	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,27	0,28

1 Fuente: Suárez (1981).

2 Supone: a) una fuente de calcio proveniente de silicatos o caliza ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ); b) no existe precipitación del magnesio; y c) la presión relativa al  $\text{CO}_2$  cerca de la superficie del suelo es 0,0007 atmósferas.

3  $\text{Ca}^\circ$ ,  $\text{HCO}_3/\text{Ca}$  expresados en me/l y la ECa en dS/m.

## FITOTOXICIDAD

Algunos iones producen efectos tóxicos en las plantas, incluso en concentraciones muy inferiores a las necesarias para perjudicar a los cultivos vía efecto osmótico o vía dispersión de coloides. Se habla de toxicidad específica de iones cuando los daños ocasionados en las plantas o la disminución de rendimiento experimentado están relacionados con la absorción



de determinados iones que la planta extrae conjuntamente con el agua del suelo, induciendo a alteraciones en el metabolismo y ocasionando la acumulación de productos tóxicos.

En principio todos los iones presentes en el agua de riego:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , y  $\text{CO}_3^{--}$ , etc, son capaces de producir toxicidad cuando se encuentran en concentraciones elevadas.

Los iones que con mayor frecuencia producen efectos tóxicos son:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y B. El mecanismo de toxicidad se inicia con la absorción de cantidades significativas de estos elementos que una vez transportados o traslocados a las hojas se concentran a causa de la transpiración. Esta es la razón por la que los síntomas de toxicidad se expresan, en primer lugar, en aquellas zonas de transpiración intensa, como son las puntas y los bordes de las hojas.

Por lo general, los problemas de fitotoxicidad surgen con mayor frecuencia en las especies arbóreas o plantas leñosas de hoja perenne que en las especies anuales que resultan ser más tolerantes que las primeras.

### **Sodio**

Cada cultivo tiene un límite de tolerancia al Na diferente. En muchas especies arbóreas la toxicidad se presenta cuando el Na representa un porcentaje superior al 0,25 – 0,50% del peso seco de la hoja.

Los síntomas consisten en sequedad o quemadura del tejido en los bordes exteriores de las hojas, a medida que el daño aumenta las quemaduras avanzan entre los nervios hacia el centro de la hoja. Estos síntomas se observan antes en las hojas más antiguas.

La tolerancia de los cultivos al Na se relaciona con el PSI del suelo (Ayers y Westcot, 1987).

### **Cloruros**

Es un anión que no es adsorbido por el complejo de cambio, pero está disuelto en la solución del suelo, de donde es absorbido por las raíces y conducido a las hojas, donde puede ser acumulado hasta niveles perjudiciales, estos generalmente son del orden del 0,3 – 0,5% respecto al peso seco de la hoja. Al igual que con el Na las especies arbóreas son las principalmente afectadas, si bien los síntomas son diferentes a los del Na. En el caso del  $\text{Cl}^-$  los síntomas se inician en la punta extrema de la hoja y se van extendiendo por los bordes, en hojas viejas. La quemadura intensa va acompañada de caída prematura del follaje. Una planta muy sensible al  $\text{Cl}^-$  es la del tabaco. El  $\text{Cl}^-$  puede ser fácilmente lavado.

### **Boro**

Elemento esencial que en cantidades excesivas se vuelve tóxico. Los problemas de toxicidad por boro son debidos a la incorporación de este con el agua de riego, más que por el propio contenido de boro presente en el suelo, y los niveles de toxicidad son más frecuentes en las aguas subterráneas que en las aguas superficiales. La lixiviación es más difícil que para los anteriores (Ayers y Westcot, 1987).

En caso de riego por aspersión sobre el follaje, Na y Cl son muy tóxicos, sobre todo para árboles. Para este caso se recomienda no utilizar agua de más de 3 meq/L de cualquiera de estos iones.

Además de estos cabría señalar algunos casos particulares como son los excesos de nitrógeno muy asociados a la reutilización de las aguas residuales para el riego, en las que son frecuentes contenidos elevados de  $N-NH_4^+$ , este elemento puede dar lugar a retrasos en la maduración, sobreestimulación del crecimiento o merma de la calidad de las cosechas.

Otro caso sería el de las aguas ricas en sales poco solubles como los carbonatos y sulfatos de Ca y Mg, cuando se utilizan por aspersión estas sales pueden producir incrustaciones y depósitos blancos sobre las hojas, rebajando la calidad de los productos.

La tabla 4 proporciona una guía para la interpretación de la calidad del agua de riego de acuerdo a los problemas que pueden derivar del empleo continuado de un agua de riego de una calidad determinada.

**Tabla 4.** Guía para la interpretación de la calidad del agua de riego

Potential Irrigation Problem		Units	Degree of Restriction on Use			
			None	Slight to Moderate	Severe	
<b>Salinity</b> ( <i>affects crop water availability</i> )						
	<b>EC<sub>w</sub></b>	dS/m	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0	
	(or)					
	<b>TDS</b>	mg/l	< 450	450 – 2000	> 2000	
<b>Infiltration</b> ( <i>affects infiltration rate of water into the soil. Evaluate using EC<sub>w</sub> and SAR together</i> )						
<b>SAR</b>	= 0 – 3	<b>and EC<sub>w</sub></b>	=	> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
	= 3 – 6		=	> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
	= 6 – 12		=	> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
	= 12 – 20		=	> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
	= 20 – 40		=	> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
<b>Specific Ion Toxicity</b> ( <i>affects sensitive crops</i> )						
	<b>Sodium (Na)</b> <sup>1</sup>					
	surface irrigation	SAR	< 3	3 – 9	> 9	
	sprinkler irrigation	me/l	< 3	> 3		
	<b>Chloride (Cl)</b> <sup>2</sup>					
	surface irrigation	me/l	< 4	4 – 10	> 10	
	sprinkler irrigation	me/l	< 3	> 3		
	<b>Boron (B)</b> <sup>3</sup>	mg/l	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0	
	<b>Trace Elements</b> (see Table 21)					
<b>Miscellaneous Effects</b> ( <i>affects susceptible crops</i> )						
	<b>Nitrogen (NO<sub>3</sub> - N)</b> <sup>4</sup>	mg/l	< 5	5 – 30	> 30	
	<b>Bicarbonate (HCO<sub>3</sub>)</b>					
	( <i>overhead sprinkling only</i> )	me/l	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5	
	pH		<b>Normal Range 6.5 – 8.4</b>			

<sup>1</sup> Adapted from University of California Committee of Consultants 1974.

<sup>2</sup> EC<sub>w</sub> means electrical conductivity, a measure of the water salinity, reported in deciSiemens per metre at 25°C (dS/m) or in units millimhos per centimetre (mmho/cm). Both are equivalent. TDS means total dissolved solids, reported in milligrams per litre (mg/l).

<sup>3</sup> SAR means sodium adsorption ratio. SAR is sometimes reported by the symbol RNa. See Figure 1 for the SAR calculation procedure. At a given SAR, infiltration rate increases as water salinity increases. Evaluate the potential infiltration problem by SAR as modified by EC<sub>w</sub>. Adapted from Rhoades 1977, and Oster and Schroer 1979.

<sup>4</sup> For surface irrigation, most tree crops and woody plants are sensitive to sodium and chloride; use the values shown. Most annual crops are not sensitive; use the salinity tolerance tables (Tables 4 and 5). For chloride tolerance of selected fruit crops, see Table 14. With overhead sprinkler irrigation and low humidity (< 30 percent), sodium and chloride may be absorbed through the leaves of sensitive crops. For crop sensitivity to absorption, see Tables 18, 19 and 20.

<sup>5</sup> For boron tolerances, see Tables 16 and 17.

<sup>6</sup> NO<sub>3</sub>-N means nitrate nitrogen reported in terms of elemental nitrogen (NH<sub>4</sub>-N and Organic-N should be included when wastewater is being tested).

## Anexo

### Dureza

La dureza del agua, expresada en grados hidrotimétricos franceses, se obtiene a partir de la fórmula siguiente:

$$\text{Dureza (}^\circ\text{F)} = \frac{(\text{Ca}^{2+} \times 2,5) + (\text{Mg}^{2+} \times 4,12)}{10}$$

Tanto el  $\text{Ca}^{2+}$  como el  $\text{Mg}^{2+}$  deben ir expresados en mg/L. Su clasificación vendría dada por la tabla 5:

**Tabla 5.** Clasificación de las aguas en función de su dureza (grados hidrotimétricos franceses,  $^\circ\text{F}$ ).

DUREZA EN $^\circ\text{F}$	CLASIFICACIÓN
<7	Muy dulce
7 – 14	Dulce
14 – 22	Medianamente dulce
22 – 32	Medianamente dura
32 – 54	Dura
>54	Muy dura

Ejemplo: supongamos que el agua de riego presenta 253,75 mg/L de  $\text{Ca}^{2+}$  y 158,55 de  $\text{Mg}^{2+}$ . Estas concentraciones llevadas a la fórmula dan un valor de 128,76 ( $^\circ\text{F}$ )

$$\text{Dureza (}^\circ\text{F)} = \frac{(253,75 \times 2,5) + (158,55 \times 4,12)}{10} = 128,76 \text{ (}^\circ\text{F)}$$

En este caso el agua queda clasificada como MUY DURA y por tanto de alto riesgo de obturación de emisores por su posible tendencia a la formación de precipitados. Al ser un agua muy dura es recomendable la determinación del índice de saturación de Langelier de cara a prevenir la obturación de emisores, cuando se trata de riegos localizados de alta frecuencia (RLAF). El procedimiento para la determinación del índice de saturación de Langelier está muy bien explicitado en Ayers y Westcot (1987) y se reproduce en estos apuntes.

### **Índice de saturación de Langelier (Is)**

El índice Is viene dado por la expresión:

$$\text{Is} = \text{pHa} - \text{pHc}$$

Donde: pHc, es el pH al cual un agua con una determinada alcalinidad y contenido en calcio, está en equilibrio (ni sobresaturada ni subsaturada de carbonato cálcico).

Los valores positivos del  $I_s$  indican la tendencia del  $\text{CaCO}_3$  a precipitar, mientras que los valores negativos sugieren que el  $\text{CaCO}_3$  se mantiene en solución. La tabla 6 indica el procedimiento para calcular el pHc, el valor de pHa se obtiene directamente de los análisis del laboratorio.

Una expresión que de forma aproximada permite calcular el pHc es:

$$\text{pHc} = (\text{pK}_2 - \text{pK}_c) + \text{p}(\text{Ca}) + \text{p}(\text{Alc})$$

$K_2$  y  $K_c$  son, respectivamente, las constantes de la segunda disociación del ácido carbónico y el producto de solubilidad del carbonato cálcico. Ambas dependen del contenido total de sólidos y de la temperatura.

$\text{p}(\text{Ca})$  es la expresión logarítmica de la concentración molal de Ca.

$\text{p}(\text{Alk})$  es la expresión logarítmica de la alcalinidad total expresada como equivalentes de  $(\text{CO}_3^{=} + \text{HCO}_3^-)$ .

### Procedimiento a seguir

- 1.-Realizar un análisis de agua que incluya las determinaciones: pH, CE ó SDT y  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{CO}_3^{=}$  y  $\text{HCO}_3^-$  (meq/L).
- 2.-Calcular el pHc (pH calculado):

$$\text{pHc} = (\text{pK}_2 - \text{pK}_c) + \text{p}(\text{Ca}) + \text{p}(\text{Alc})$$

- 2.1.-A partir de la suma de las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ , expresadas en meq/L, se obtiene en la columna 2 (Tabla 6) el sumando  $(\text{pK}_2 - \text{pK}_c)$ . Al depender este término de la temperatura, los valores recogidos en la tabla 6 tan sólo son válidos para 25°C. En el rango entre 15 y 40°, el término  $(\text{pK}_2 - \text{pK}_c)$  debe incrementarse un 1% por cada °C de descenso por debajo de 25°C, y debe disminuirse un 1% por cada °C de aumento por encima de 25°C.
- 2.2.- $\text{p}(\text{Ca})$  se obtiene en la tercera columna de la tabla 6 a partir de la concentración de calcio en meq/L.
- 2.3.- $\text{p}(\text{Alc})$  se obtiene en la cuarta columna de la tabla 6 a partir de la concentración en meq/L de  $\text{CO}_3^{=} + \text{HCO}_3^-$ .

**Tabla 6.** Procedimiento para calcular el pH<sub>c</sub> de las aguas de riego.

$\text{pH}_c = (\text{pK}_2 - \text{pK}_c) + \text{p}(\text{Ca}) + \text{p}(\text{Alc})$			
Concentración (meq/l)	$\text{pK}_2 - \text{pK}_c$	$\text{p}(\text{Ca})$	$\text{p}(\text{Alc})$
0,05	2,0	4,6	4,3
0,10	2,0	4,3	4,0
0,15	2,0	4,1	3,8
0,20	2,0	4,0	3,7
0,25	2,0	3,9	3,6
0,30	2,0	3,8	3,5
0,40	2,0	3,7	3,4
0,50	2,1	3,6	3,3
0,63	2,1	3,5	3,2
0,75	2,1	3,4	3,1
1,00	2,1	3,3	3,0
1,25	2,1	3,2	2,9
1,50	2,1	3,1	2,8
2,00	2,2	3,0	2,7
2,50	2,2	2,9	2,6
3,00	2,2	2,8	2,5
4,00	2,2	2,7	2,4
5,00	2,2	2,6	2,3
6,00	2,2	2,5	2,2
8,00	2,3	2,4	2,1
10,00	2,3	2,3	2,0
12,50	2,3	2,2	1,9
15,00	2,3	2,1	1,8
20,00	2,4	2,0	1,7
30,00	2,4	1,8	1,5
50,00	2,5	1,6	1,3
80,00	2,5	1,4	1,1

Entrando en la primera columna con las concentraciones en meq/L, de i)  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+$ ; ii) Ca; y iii)  $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ , se obtienen los valores de  $(\text{pK}_2 - \text{pK}_c)$ ,  $\text{p}(\text{Ca})$  y  $\text{p}(\text{Alc})$ , respectivamente.

#### **Bibliografía recomendada:**

##### **Básico**

AYERS, R. S.; WESTCOT D. W. 1987. *La calidad del agua en la agricultura*. Estudio FAO, Riegos y Drenajes 29. 174 pp.

##### **Consulta**

URBANO, P. 2002. *Fitotecnia. Ingeniería de la Producción Vegetal*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 528 pp.