

Colección Manuales No. 1

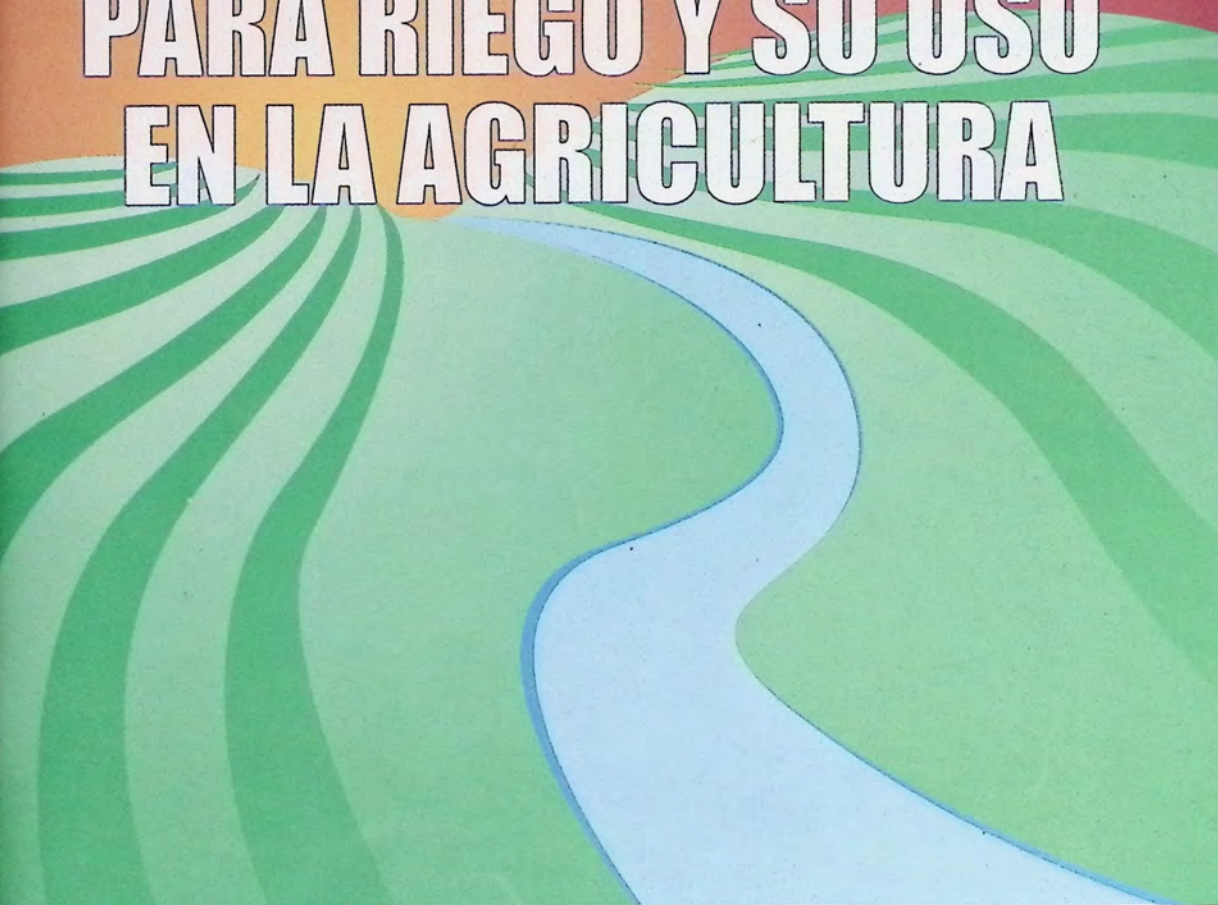
INGENIERÍA AGRONÓMICA



FACULTAD DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES

Reynaldo Lobato Pertúz

CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO Y SU USO EN LA AGRICULTURA



CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO Y SU USO EN LA AGRICULTURA

REYNALDO LOBATO PERTUZ
INGENIERO AGRÓNOMO
MASTER SCIENCE EN SUELOS Y AGUAS



FONDO EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA

Reynaldo Lobato Pertuz
Calidad del agua para riego y su uso en la agricultura

© **Reynaldo Lobato Pertuz**
© **Fondo Editorial Universidad del Magdalena**

Santa Marta, Colombia

ISBN: 958-97023-5-X

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA

Carlos Eduardo Caicedo Omar
Rector

José Manuel Pacheco Ricaurte
Vicerrector Académico

Denise Rangel Lozano
Vicerrectora Administrativa y Financiera

Anselmo Rafael Marín Perea
Decano Facultad de Ingeniería de Recursos Naturales

Favio Silva Vallejo
Director Fondo Editorial

Miembro de la Asociación Colombiana
de Editoriales Universitarias

Queda totalmente prohibida la reproducción total o en parte de esta
obra sin el previo consentimiento de su autor.

Diseño Carátula
Luis Fernando Escobar Restrepo

Preprensa e impresión
Gente Nueva Editorial
Bogotá, D.C.

PRIMERA EDICIÓN
Noviembre de 2002

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	COMPOSICIÓN DEL AGUA DE RIEGO	1
3.	CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS DE RIEGO	3
4.	RIESGO DE SALINIDAD	3
5.	NECESIDADES DE DRENAJE	6
6.	RIESGO DE IMPERMEABILIZACIÓN	7
7.	CONSTITUYENTES TÓXICOS	15
8.	CRITERIO DE SALINIDAD	16
	8.1 CLASIFICACIÓN DE RICHARD	17
	8.2 CLASIFICACIÓN DEL COMITÉ DE CONSULTORES U.C.	17
	8.3 CLASIFICACIÓN DE LA FAO	18
	8.4 INCONVENIENTES DE ESTAS CLASIFICACIONES	18
	8.5 CRITERIO DE SODICIDAD	20
9.	CRITERIO DE TOXICIDAD	27
10.	DETERMINACIONES ANALÍTICAS	29
	CALCIO Y MAGNESIO	29
	10.1 DETERMINACIÓN DE NITRATO	29
	10.2 DETERMINACIÓN DE pH (REACCIÓN DEL SUELO)	30
	10.3 DETERMINACIÓN: CE (CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA)	30
	10.4 DETERMINACIÓN DE CARBONATOS Y BICARBONATOS	30
	10.5 DETERMINACIÓN DE CARBONATOS Y BICARBONATOS	31
	10.6 DETERMINACIÓN DE SULFATOS EN EXTRACTOS DE SAL Y AGUA	31
	10.7 DETERMINACIÓN DE SULFATOS	33
	10.8 DETERMINACIÓN DE CARBONATOS Y BICARBONATOS	34
	10.9 DETERMINACIÓN DE CLORUROS (CL) POR TITULACIÓN CON NITRATO DE PLATA (AgNO_3)	35
11.	NORMAS DE CLASIFICACIÓN	37
	11.1 NORMA DE RIVERSIDE	37
12.	CRITERIO DE CALIDAD	38
	12.1 SALINIDAD EN SENTIDO RESTRINGIDO	38
13.	TOMA DE MUESTRAS DE AGUA	38

14. ÍNDICE DE SALINIDAD	38
14.1 SODICIDAD	38
14.2 TOXICIDAD	38
14.3 PROBLEMAS	39
15. PARÁMETROS A DETERMINAR	39
15.1 pH	39
15.2 CONTENIDO TOTAL DE SALES DISUELTAS (T.S.D.)	39
15.3 CONTENIDO DE POTASIO	41
15.4 CONTENIDO DE CLORUROS	41
15.5 CONTENIDO DE BORO	42
15.6 ÍNDICE DE MAGNESIO (IMG)	43
15.7 RELACIÓN DE ABSORCIÓN DE SODIO (R.A.S.)	43
15.8 CARBONATO DE SODIO RESIDUAL (CSR)	44
15.9 DUREZA	44
16. EJEMPLOS DE CALIDAD DE AGUA DE RIEGO	45
EJEMPLO 1	45
16.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS	45
16.2 COMPROBACIONES	45
16.3 ÍNDICES	46
16.4 CLASIFICACIÓN RIVERSIDE	47
EJEMPLO 2	47
1. PELIGRO DE SALES	47
2. PELIGRO DE SODIO	49
3. CONSTITUYENTES TÓXICOS	52
17. COMPROBACIONES DE RESULTADOS	53
18. OTROS CRITERIOS PARA CLASIFICAR AGUAS DE RIEGO	53
18.1 SÓLIDOS	53
18.2 TEXTURA DEL SUELO	53
18.3 CULTIVO	53
18.4 SISTEMA DE RIEGO	54
18.5 CLIMA	54
18.6 DIFERENCIAS	54
18.7 CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO POR GOTEO	54
BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. C.E. Y SU RELACIÓN CON LOS CULTIVOS	4
TABLA 2. DIFERENCIA ENTRE LA SALINIDAD TOTAL Y EFECTIVA (SEGÚN DONEEN)	5
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS DE RIEGO SOBRE LA BASE DE LA SALINIDAD (SEGÚN DONEEN)	5
TABLA 4. CULTIVOS INDUSTRIALES. REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO	7
TABLA 5. HORTALIZAS. REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO	9
TABLA 6. FRUTALES. REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO*	9
TABLA 7. $pK'2 - pK'c$	10
TABLA 8. $pCa = \log(1/(Ca \cdot (2)^{0.5}))$ DONDE Ca SON MEQ/L	11
TABLA 9. $pAlk = \log(1/(Alk))$ DONDE ALK SON MEQ/L	13
TABLA 10. BORO Y CLORURO	15
TABLA 11. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y SUS NIVELES	17
TABLA 12. ÍNDICE DE SALINIDAD	17
TABLA 13. ÍNDICE DE SALINIDAD	18
TABLA 14. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS CON RELACIÓN A LA SODICIDAD	22
TABLA 15.	23
TABLA 16. CE Y RAS _d	27
TABLA 17. NIVELES DE Na, Cl Y B	28
TABLA 18. CONCENTRACIÓN MÁXIMA DE OLIGOELEMENTO EN AGUA DE RIEGO (MEQ/L)	28
TABLA 19. CLASIFICACIÓN DEL AGUA DE RIEGO SEGÚN PCL	41
TABLA 20. AGUA DE RIEGO SEGÚN CONTENIDO DE CLORUROS	42
TABLA 21. TOLERANCIA RELATIVA DE LOS CULTIVOS AL CONTENIDO DE BORO EN AGUA DE RIEGO	42
TABLA 24. CLASIFICACIÓN AGUA DE RIEGO SEGÚN RIESGO DE SODICIDAD DEL SUELO (RAS)	43
TABLA 23. CLASIFICACIÓN DEL AGUA DE RIEGO SEGÚN C.S.R.	44
TABLA 18. CLASIFICACIÓN AGUA DE RIEGO SEGÚN DUREZA	44
TABLA 25. NIVELES DE ANIONES Y CATIONES	45
TABLA 26. ANÁLISIS DE AGUA	47
TABLA 27. CLASIFICACIÓN DE SUS AGUAS POR SU CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	48

TABLA 28. CLASIFICACIÓN DE LA SALINIDAD EFECTIVA Y DE LA SALINIDAD POTENCIAL (MEQ/L)	48
TABLA 29. CÁLCULOS DE LOS VALORES DE PHC DE AGUA EN EQUILIBRIO CON CaCO_3	51
TABLA 30. CLASIFICACIÓN DEL AGUA DE ACUERDO AL CSR	52
TABLA 31. CALIFICACIÓN DE LAS AGUAS POR EL CONTENIDO DE CLORO Y BORO	52
TABLA 32. ASPERSIÓN-PELIGRO DE QUEMADURAS EN ORNAMENTALES	52
TABLA 33. PELIGRO POTENCIAL DE OCLUSIÓN EN RIEGO POR GOTEO	55
TABLA 34. TOLERANCIA RELATIVA DE LOS CULTIVOS LAS SALES. CEE (MMHO/CM)	57
TABLA 35. TOLERANCIA RELATIVA DE LAS HORTALIZAS A LAS SALES. CEE (MMHO/CM)	57
TABLA 36. DETERMINACIÓN DE LABORATORIO NECESARIA PARA EVALUAR LA CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO	58
TABLA 37. CRITERIO PARA EVALUAR LA CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO	59
TABLA 38. TOLERANCIA RELATIVA DE ALGUNOS CULTIVOS A SALES CUANDO SE USA RIEGO POR ASPERSIÓN	59

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 4.1 y 4.2. CONCEPTO DE INCLINACIÓN DEL GRÁFICO 4.1	25
---	----

1. Introducción

El agua es un recurso vital para la vida y el desarrollo humano. Sin embargo, su disponibilidad y calidad están siendo afectadas por la contaminación y el cambio climático. En este contexto, es fundamental implementar estrategias de conservación y gestión sostenible del agua.

Todas las aguas de origen natural, ya sea superficial o subterránea, son susceptibles de contaminación. Sin embargo, la contaminación de las aguas subterráneas es más difícil de detectar y controlar. Por lo tanto, es necesario implementar medidas preventivas y de monitoreo para garantizar la calidad y disponibilidad de este recurso vital.

Cuando se habla de contaminación de aguas, se refiere a la presencia de sustancias nocivas en el agua que pueden afectar la salud humana y el medio ambiente. Estas sustancias pueden ser de origen natural o antropogénico, y su presencia en el agua puede ser detectada a través de análisis de laboratorio.

REYNALDO LOBATO PERTUZ

Nació en Ciénaga –departamento del Magdalena, Colombia. cursó estudios de bachillerato en el colegio Liceo Celedón de la ciudad de Santa Marta y estudios superiores en la Universidad del Magdalena, donde obtuvo el título de Ingeniero Agrónomo; posteriormente la Universidad Nacional de Colombia le otorgó el título de Magíster en Suelos y Aguas.

Su actividad Profesional la inicia en 1984, prestando asistencia técnica en varias fincas de la región en los diferentes cultivos, también se inicia como docente de la Universidad del Magdalena en el año 1993, siendo profesor catedrático y ocasional hasta la fecha; dictando las asignaturas de Química de Suelos, Conservación de Suelos, Agrogeología y Electivas.

1. INTRODUCCIÓN

El riego es un importante factor de salinización del suelo cuando no es manejado correctamente. Existen numerosos ejemplos, antiguos y modernos, de ricas regiones agrícolas que como consecuencia de un riego inadecuado se han salinizado, haciéndose totalmente improductivos.

Todas las aguas de riego tienen un contenido mayor o menor de sales solubles. Sin embargo, en las regiones que necesitan riego, esa salinidad es con frecuencia mucho mayor. En casos de agua subterránea, la salinidad puede ser más elevada que el agua de los ríos. En condiciones adecuadas de drenaje esas sales serán lavadas y eliminadas de la zona radicular. Cuando no ocurre así, el contenido de sales del suelo aumenta progresivamente hasta alcanzar niveles que hacen antieconómica su explotación.

Cuando se habla de calidad del agua se da por supuesto que se trata de calidad en relación con la salinidad, en el sentido amplio del término. Sin embargo, hay otros criterios de calidad. Por ejemplo, con agua procedente de depuradoras puede ser necesario considerar los desequilibrios nutricionales ocasionados por el exceso de Nitrógeno.

2. COMPOSICIÓN DEL AGUA DE RIEGO

Los principales elementos que componen el agua de riego son los cationes de Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio y los aniones Carbonatos, Cloruros, Sulfatos, Nitratos y Boratos.

El Calcio se encuentra en todas las aguas naturales. Un suelo saturado predominantemente con Calcio es friable y con buena estructura; el agua penetrará fácilmente a través de él, por lo que las aguas en cuya composición química predomine ese catión serán aguas de buena calidad.

El Magnesio lo contiene también en cantidades apreciables todas las aguas. En el suelo el Magnesio se comporta de forma parecida al Calcio.

Las sales de Sodio son muy solubles y por ello son abundantes en las aguas. Un suelo con grandes cantidades de Sodio en el complejo de cambio tendrá, como ya hemos indicado, propiedades físicas muy pobres. El agua apenas penetrará a través de él. Por ello algunas veces se añade yeso a las aguas de gran riqueza de Sodio, pues aunque el problema de sales aumente, y con ello las necesidades de drenaje, se compensa el peligro de convertir el suelo en sódico.

El Potasio está presente en cantidades pequeñas. Su conducta en el suelo es parecida a la del Sodio, pero al ser sus proporciones menores no representa grandes problemas.

El Bicarbonato no se suele encontrar en la naturaleza en estado sólido pero en disolución es muy abundante. Los Bicarbonatos de Sodio y Potasio pueden existir tanto en estado sólido como en disolución. Los de Calcio y Magnesio solo existen en solución. Cuando la humedad del suelo se reduce, ya sea por evaporación o extracción debida a las plantas, precipitan los Bicarbonatos de Calcio y de Magnesio.

Si un agua posee grandes cantidades de este anión, cuando el suelo comienza a secarse, tendrán lugar precipitaciones de Calcio y Magnesio, aquel formará compuestos insolubles con el Calcio del complejo de cambio; como consecuencia, el Sodio del agua pasará a ocupar el lugar de éste. De esta forma un suelo saturado con Calcio puede pasar a ser un suelo sódico por el uso de aguas altas en Bicarbonatos.

El anión Carbonato se encuentra en algunas aguas, ya que los Carbonatos de Calcio y algo menos el de Magnesio, son insolubles, el que un agua contenga este anión, significará que el catión acompañante será el Sodio. Durante el secado del suelo, el ion Carbonato podrá reaccionar con el Calcio cambiándole de forma similar al ion Bicarbonato. Así pues estos aniones son considerados como "*Ventosas*" químicas que enriquecen el complejo de cambio en Sodio y lo empobrecen en Calcio y Magnesio y han de ser tenidos en cuenta a la hora de juzgar la calidad de las aguas. La determinancia, ya en desuso, del Carbonato residual, se basa en estas propiedades.

El anión cloruro es muy abundante, en altas concentraciones es tóxico para las plantas. Todos los Cloruros comunes son solubles y contribuyen al contenido total de sales del suelo.

El anión Sulfato es abundante en la naturaleza. Los Sulfatos de Sodio, Magnesio y Potasio son solubles. El de Calcio tiene una solubilidad limitada. El sulfato no posee una acción característica en el suelo, excepto la contribución al contenido total de sales. Por lo común no es corriente encontrar nitratos en las aguas de riego. Si así ocurriera indicaría una contaminación de depósitos naturales de materia orgánica. Los Nitratos no tienen efecto sobre las propiedades físicas del suelo, excepto el contribuir ligeramente a la salinidad.

Los Boratos se encuentran en pequeñas cantidades en las aguas de riego. No tienen efectos medibles sobre las propiedades físicas del suelo pero deben ser evaluados ya que pueden causar toxicidad en las plantas.

3. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS DE RIEGO

En un esquema ideal de clasificación debería predecir los efectos que el uso de un agua determinada tendría sobre el suelo y el crecimiento de las plantas. También es dudoso que un sistema de clasificación pueda ser adecuado sin conocer de antemano cuánta agua se aplicará y qué proporción de la misma se perderá por debajo de la zona de influencia de la raíz. La sensibilidad del cultivo a las sales, la frecuencia de irrigación, las propiedades del suelo e incluso las condiciones climáticas.

En nuestra discusión acerca de los suelos salinos se evidenciaban dos tipos de alteraciones del suelo: salinidad y saturación excesiva del complejo de cambio con Sodio. Es lógico intentar clasificar las aguas según estos dos aspectos.

4. RIESGO DE SALINIDAD

Uno de los peligros de la agricultura de regadío es la posible acumulación de sales solubles en la zona radicular. Algunas plantas toleran más sales que otras, pero todas tienen un límite. Con prácticas razonablemente buenas de riego, el contenido de sales del suelo es entre una y media y tres veces mayor que la del agua de riego, aunque pueden rebasar ampliamente estos límites (incluso llegar a 20), si la política de riego no es adecuada. De esta forma, si se riega con largueza, la conductividad

eléctrica del suelo, medida en el estrato de saturación, será una y media veces la del agua de irrigación llegando a tres si el riego no es tan abundante.

El límite de una y media es el contenido inferior de la conductividad del suelo y resulta prácticamente imposible trabajarlo. De esta forma, una primera clasificación para medir el riesgo de salinidad que comporta el uso de una determinada agua, podría apoyarse en esta propiedad y en la conductividad del suelo para lo cual los cultivos sufren una depresión.

TABLA 1
C.E. Y SU RELACIÓN CON LOS CULTIVOS

Cultivos	C.E. mmhos/cm
Fresas	3
Cebollas, zanahoria, trébol, apio y rábano	4
Agrios, lechuga, pimentón, pepino	5
Patatas y maíz dulce	6
Maíz, coles, pimientos	7
Arroz, brócoli, tomate, melón, vid	8
Olivos, sorgo, higuera	9
Espárrago, espinaca	11
Sorgo, remolacha	12
Trigo, girasol	14
Algodón, palmera, cebada	16

Sin embargo, algunas sales del agua precipitan en el suelo y no contribuyen por ello a la salinidad, por lo que Doneen propone que no sean tenidas en cuenta a la hora de evaluar el riego "*riego de salinización*" de un agua para riego.

Este principio se explica mejor al estudiar los siguientes casos hipotéticos a que exponemos. Supongamos cuatro aguas cuyos análisis figuran en la tabla 2. Es de anotar que la concentración iónica de los cuatro ejemplos es igual, pero su salinidad efectiva es muy distinta. Considerando las varias aguas individualmente, la primera al agregarse al suelo perderá por precipitación 10 meq de Carbonato de Calcio y luego 10 meq de Carbonato de Magnesio, luego ambas sales son inofensivas. Quedan solamente 5 meq/l de sales dañinas, es decir 1 meq de Bicarbonato de Sodio, 3 meq de Sulfato de Sodio y 1 meq de Cloruro de Sodio.

TABLA 2
DIFERENCIA ENTRE LA SALINIDAD TOTAL Y EFECTIVA
(SEGÚN DONEEN)

Ejemplo	Ca	Mg	Na	HCO ₃	SO ₄	Cl	Total	Efectiva
1	10	10	5	21	3	1	25	5
2	3	15	7	4	20	1	25	21
3	20	3	2	2	23	0	25	5
4	3	4	18	20	2	3	25	18

En el segundo ejemplo se perderán 3 meq de Carbonato de Calcio, luego 1 meq de Carbonato de Magnesio, quedando 14 meq de Magnesio y 7 meq de Sodio, ó sea, un total de 21 meq de salinidad dañina. En el tercer caso 2 meq de Carbonato de Calcio y luego 18 meq de sulfato de Calcio se precipitarán, dejando 5 meq de sales peligrosas. En el último ejemplo habrá una pérdida de 3 meq de carbonato de Calcio, seguido de por 4 meq de Carbonato de Magnesio, dejando 18 meq de sales dañinas. Como se verá de esto, la regla es calcular las cantidades totales de Carbonato de Calcio, Carbonato de Magnesio y luego Sulfato de Calcio que pueden formarse por combinaciones de los aniones y cationes presentes. Esta suma se sustrae al total. Doneen propone que al residuo se le llame salinidad efectiva. Puesto que la conductividad eléctrica no puede distinguir entre los dos tipos de salinidad, propone el citado autor que su uso para asesoramiento en el agua de riego debe suprimirse.

Con base en estas consideraciones, Doneen ha propuesto las siguientes normas de clasificación en la tabla 3.

TABLA 3
CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS DE RIEGO
SOBRE LA BASE DE LA SALINIDAD (SEGÚN DONEEN)

Condiciones del suelo	Unidades	Clase I	Clase II	Clase III
Muy poco lavaje puede esperarse debido a la compactación	Meq/l	3	3 - 5	5
	Ppm	165	165 - 275	275
	Lb/ac ft (*)	420	420 - 720	750
Algún lavaje pero la percolación está aun restringida	Meq/l	5	5 - 10	10
	Ppm	275	275 - 550	550
	Lb/ac ft (*)	750	750 - 1500	1500
Suelos francos. Ninguna restricción de la percolación	Meq/l	7	7 - 15	15
	Ppm	388	285 - 825	825
	Lb/ac ft (*)	1050	1050 - 2250	2250

* Para convertir libras x área pie en Kg/ha habrá que multiplicar por 3.67.

5. NECESIDADES DE DRENAJE

El exceso de sales debe ser lixiviado para mantener el nivel más bajo posible de sales en el suelo que como mínimo será de una y media veces la del agua. Basados en los datos del *USDA Agricultura Information Bulletin*, 283 y de datos no publicados del doctor León Berustin, U.S. Salinity Laboratory Riverside, se han construido estas tablas donde se encuentran:

1. La reducción del rendimiento que se puede esperar debido a la conductividad eléctrica del agua de riego (CE_a).
2. El contenido de sales del extracto de saturación (CE_e) que es el mínimo posible cuando se lixivie el suelo con un porcentaje del agua de riego ND.
3. La máxima concentración de sales que las distintas especies pueden soportar antes de morir (CE_{max}).

Un ejemplo como se usan estas tablas puede ser el siguiente:

Supongamos que la cosecha de maíz. De las tablas:

$$CE_{max} = 18 \text{ mmhos}$$

Si el agua de riego tiene una conductividad de 2.2, 3.3, 4.0 y 4.7 mmhos/cm. Se observarán reducciones en la productividad de 0, 10, 25 y 50 por ciento. Supongamos que el agua de riego posee una $CE_a = 2.7$.

Así podremos esperar que la conductividad en el extracto sea $1.5 \times 2.7 = 4$ mmhos/cm, lo cual dará una reducción del rendimiento menor que un 10 por ciento, pero para alcanzar ese rendimiento hay que lixiviar el suelo con:

$$ND = \frac{CE_a}{CE_{max}} \times 100 = \frac{2.7}{18} \times 100 = 15\%$$

En la práctica para el calculo del agua necesaria en una irrigación es necesario conocer la densidad aparente, la capacidad de cambio y la humedad del suelo en el momento de iniciar el riego. Si se dispone de tensiómetros, estos dos factores no son necesarios, haciendo la suposición de que cuando el tensiómetro marca cero el suelo se encuentra a capacidad de campo.

TABLA 4
CULTIVOS INDUSTRIALES. REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO

Cultivo	C Ee	CEa	ND	C Ee	CEa	ND	C Ee	CEa	ND	C Ee	CEa	ND	CE max
		[0 %]			[10 %]			[25 %]			[50 %]		(máximo)
Cebada	8.0	5.3	12.0%	12.0	8.0	18.0%	16.0	10.7	21.0%	18.0	12.0	27.0%	44
Remolacha	6.7	4.5	11.0%	10.0	6.7	16.0%	13.0	8.7	21.0%	16.0	10.7	26.0%	42
Algodón	6.7	4.5	11.0%	10.0	6.7	16.0%	12.0	8.0	19.0%	16.0	10.7	26.0%	42
Azafran	5.3	3.5	12.5%	8.0	5.3	19.0%	11.0	7.3	26.0%	14.0	8.0	28.5%	28
Trigo	4.7	3.1	8.0%	7.0	4.7	12.0%	10.0	6.7	17.0%	14.0	9.3	23.0%	40
Sorgo	4.0	2.7	7.5%	6.0	4.0	11.0%	9.0	6.0	17.0%	12.0	8.0	22.0%	36
Soja	3.7	2.5	10.0%	5.5	3.7	14.0%	7.0	4.7	18.0%	9.0	6.0	23.0%	26
Arroz	3.3	2.2	9.0%	5.0	3.3	14.0%	6.0	4.0	16.0%	8.0	5.3	22.0%	24
Maiz	3.3	2.2	12.0%	5.0	3.3	18.0%	6.0	4.0	22.0%	7.0	4.7	26.0%	18
Lino	2.0	1.3	7.0%	3.0	2.0	11.0%	4.5	3.0	17.0%	6.5	4.3	24.0%	18
Judías	1.0	0.7	6.0%	1.5	1.0	8.0%	2.0	1.3	11.0%	3.5	2.3	19.0%	12

* USDA Agricultura Information Bulletin, 283.

6. RIESGO DE IMPERMEABILIZACIÓN

El otro riesgo que existe en la agricultura de regadío es convertir al suelo en sódico; como esto supone la pérdida de su estructura es por lo que se suele denominar a este peligro como "Riesgo de la Impermeabilización".

No es posible utilizar el RAS para evaluar este peligro debido a las precipitaciones de Calcio y Magnesio a causa de los Carbonatos. En su lugar se emplea el RAS ajustado que se define como:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} (1 + (8.4 - pHc))$$

en donde el pHc es un valor basado en la concentración de Calcio, Magnesio, Carbonato y Bicarbonato del agua y que se define como:

$$pHc = (pH'_2 - pK'_c) + pCa + pAlc$$

Los dos últimos términos son los logaritmos negativos de las concentraciones de Calcio y de Bicarbonato más Carbonato, respectivamente, mientras $pK'_2 - pK'_c$ son los logaritmos negativos de la constante para la segunda disociación del ácido carbónico y la constante de solubilidad del Carbonato de Calcio respectivamente, ambos corregidos para la fuerza iónica de la solución.

Los valores de pK'_2 - pK'_c se relacionan altamente y se obtienen de la concentración total de cationes. Las tablas preparadas por L.V. Wilcox del U.S. Salinity Laboratory Riverside, California permite el cálculo del pHc.

Como un ejemplo del cálculo supongamos un agua cuyo análisis sea:

$$Ca = 3.32 \text{ meq/l}$$

$$Mg = 1.44 \text{ meq/l}$$

$$Na = 0.73 \text{ meq/l}$$

$$K = 0.09 \text{ meq/l}$$

$$\text{suma} = 5.58 \text{ meq/l}$$

$$Ca_3 = 0.42 \text{ meq/l}$$

$$Ca_3H = 3.66 \text{ meq/l}$$

$$\text{suma} = 4.08 \text{ meq/l}$$

De las tablas:

$$pK_2 + pK_c = 2.22$$

$$pCa + Mg = 2.62$$

$$pAlc = 2.39$$

$$pHc(\text{suma}) = 7.23$$

$$RASaj = \frac{Na * (1 + 8.4 - pHc)}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} = 0.47 * (1 + 8.24 - 7.23) = 1.0$$

A partir de aquí es posible calcular el porcentaje de Sodio cambiabile en equilibrio con el suelo, el cual viene dado de forma aproximada por: $psc = 2RASaj$. Con valores del RASaj menores de 6 no deben existir problemas. Entre 6 y 9 los problemas aumentan y con más de 9.0 se podrán esperar severas complicaciones.

TABLA 5
HORTALIZAS. REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO*

Cultivo	C Ee	CEa	ND	C Ee	CEa	ND	C Ee	CEa	ND	C Ee	CEa	ND	CE max
		[0 %]			[10 %]			[25 %]			[50 %]		(máximo)
Espinaca	3,7	2,5	12,5%	5,5	3,7	18,5%	7,0	4,7	23,5%	8,0	5,3	26,5%	20,0
Tomate	2,7	1,8	8,0%	4,0	2,7	12,0%	6,5	4,3	19,5%	8,0	5,3	24,0%	22,0
Brocoli	2,7	1,8	7,0%	4,0	2,7	10,0%	6,0	4,0	15,0%	8,0	5,3	20,0%	26,0
Repollo	1,7	1,1	4,0%	2,5	1,7	6,5%	4,0	2,7	10,0%	7,0	4,7	18,0%	26,0
Patata	1,7	1,1	5,5%	2,5	1,7	8,5%	4,0	2,7	13,5%	6,0	4,0	20,0%	20,0
Maíz Dulce	1,7	1,1	5,5%	2,5	1,7	8,5%	4,0	2,7	13,5%	6,0	4,0	20,0%	20,0
Patata dulce	1,7	1,1	5,5%	2,5	1,7	8,5%	3,5	2,3	11,5%	6,0	4,0	20,0%	20,0
Lechuga	1,3	0,9	5,0%	2,0	1,3	7,0%	3,0	2,0	11,0%	5,0	3,3	18,0%	18,0
Pepino	1,3	0,9	5,0%	2,0	1,3	7,0%	3,0	2,0	11,0%	5,0	3,3	18,0%	18,0
Cebolla	1,3	0,9	7,5%	2,0	1,3	11,0%	3,5	2,3	19,0%	4,0	2,7	22,5%	12,0
Zanahoria	1,0	0,7	6,0%	1,5	1,0	8,0%	2,5	1,7	14,0%	4,0	2,7	22,5%	12,0
Judías	1,0	0,7	7,0%	1,5	1,0	10,0%	2,0	1,3	13,0%	3,5	2,3	23,0%	10,0
Cantalupe	2,3	1,5	8,0%	3,5	2,3	12,0%	-	-	-	-	-	-	20 (*)
Melón	2,0	1,3	8,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20 (*)

* USDA Agricultural International Bulletin, 283. * Suponiendo CE max= 20 similar a la patata.

TABLA 6
FRUTALES. REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO*

Cultivo	C Ee	CEa	ND	C Ee	CEa	ND	C Ee	CEa	ND	CE max
		[0 %]			[10 %]			[50 %] (**)		(máximo)
Palmera datilera	5,3	3,5	7,0%	8,0	5,3	11,0%	16,0	10,0	21,0%	48,0
Higuera										
Olivo	2,7-4,0	1,8-2,7	6-10%	4,6	2,7-4,0	10-14%	9,0	6,0	21,0%	28,0
Granados										
Uva	2,7	1,8	7,5%	4,0	2,7	11,0%	8,0	5,3	22,0%	24,0
Pomelos										
Naranjos	1,7	1,1	7,0%	2,5	1,7	11,0%	5,0	3,3	33,0%	16,0
Limones										
Manzanos	1,7	1,1	7,0%	2,5	1,7	11,0%	5,0	3,3	33,0%	16,0
Perales										
Albaricoqueros										
Almendros	1,7	1,1	7,0%	2,5	1,7	11,0%	5,0	3,3	33,0%	16,0
Melocotoneros										
Ciruelos										
Nogales	1,7	1,1	7,0%	2,5	1,7	11,0%	5,0	3,3	33,0%	16,0
Aguacates	1,3	0,9	7,5%	2,0	1,3	11,0%	4,0	2,7	22,5%	12,0
Fresales	1,0	0,7	7,0%	1,5	1,0	10,0%	3,0	2,0	20,0%	10,0

* USDA Agricultural International Bulletin, 283.

** La reducción del 50 por 100 se ha calculado a base de duplicar los valores para los cuales se observa una reducción del 10 por 100 en el rendimiento.

TABLA 7
pK'2 - pK'c

Suma de Cationes (meq/l)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	2,03	-	-	-	-	2,11	2,11	2,12	2,12	2,13
1	2,13	2,13	2,14	2,14	2,14	2,14	2,15	2,15	2,15	2,16
2	2,16	2,16	2,16	2,16	2,17	2,17	2,17	2,17	2,18	2,18
3	2,18	2,18	2,18	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,20
4	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21
5	2,21	2,22	2,22	2,22	2,22	2,22	2,22	2,22	2,23	2,23
6	2,23	2,23	2,23	2,23	2,23	2,22	2,24	2,24	2,24	2,24
7	2,24	2,24	2,24	2,24	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
8	2,25	2,25	2,25	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26
9	2,26	2,26	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27
Suma de Cationes (meq/l)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	2,03	2,13	2,16	2,18	2,20	2,21	2,23	2,24	2,25	2,26
10	2,27	2,28	2,29	2,30	2,31	2,32	2,32	2,33	2,34	2,34
20	2,35	2,35	2,36	2,37	2,37	2,38	2,38	2,39	2,39	2,40
30	2,40	2,40	2,41	2,41	2,42	2,42	2,42	2,43	2,43	2,41
40	2,44	2,44	2,45	2,45	2,45	2,46	2,46	2,46	2,47	2,47
50	2,47	2,48	2,48	2,48	2,48	2,49	2,49	2,49	2,49	2,50
60	2,50	2,50	2,50	2,51	2,51	2,51	2,51	2,52	2,52	2,52
70	2,52	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,54	2,54	2,54	2,54
80	2,54	2,55		2,55			2,56			
90	2,56					2,57				
100	2,58									
110	2,60									
120	2,61									
130	2,62									

TABLA 8
 $PCa = \log(1/(Ca \cdot (2)^{0.5}))$ DONDE Ca SON MEQ/L

Ca (meq/l)	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	infinito	5,30	5,00	4,82	4,70	4,60	4,52	4,46	4,40	4,35
0,1	4,30	4,26	4,22	4,19	4,15	4,12	4,10	4,07	4,05	4,02
0,2	4,00	3,98	3,96	3,94	3,92	3,90	3,89	3,87	3,85	3,84
0,3	3,82	3,81	3,80	3,78	3,77	3,76	3,74	3,73	3,72	3,70
0,4	3,70	3,69	3,68	3,67	3,66	3,65	3,64	3,63	3,62	3,61
0,5	3,60	3,59	3,59	3,58	3,57	3,56	3,55	3,55	3,54	3,53
0,6	3,52	3,52	3,51	3,50	3,49	3,49	3,48	3,47	3,47	3,46
0,7	3,46	3,45	3,44	3,44	3,43	3,43	3,42	3,41	3,41	3,40
0,8	3,40	3,39	3,39	3,38	3,38	3,37	3,37	3,36	3,36	3,35
0,9	3,35	3,34	3,34	3,33	3,33	3,32	3,32	3,31	3,31	3,31
1,0	3,30	3,30	3,29	3,29	3,28	3,28	3,28	3,27	3,27	3,26
1,1	3,26	3,26	3,25	3,25	3,24	3,24	3,24	3,23	3,23	3,23
1,2	3,22	3,22	3,21	3,21	3,21	3,20	3,20	3,20	3,19	3,19
1,3	3,19	3,18	3,18	3,18	3,17	3,17	3,17	3,16	3,16	3,16
1,4	3,15	3,15	3,15	3,15	3,14	3,14	3,14	3,13	3,13	3,13
1,5	3,12	3,12	3,12	3,12	3,11	3,11	3,11	3,11	3,10	3,10
1,6	3,10	3,09	3,09	3,09	3,09	3,08	3,08	3,08	3,07	3,07
1,7	3,07	3,07	3,07	3,06	3,06	3,06	3,06	3,05	3,05	3,05
1,8	3,05	3,04	3,04	3,04	3,04	3,03	3,03	3,03	3,02	3,02
1,9	3,02	3,02	3,02	3,02	3,01	3,01	3,01	3,01	3,00	3,00
2,0	3,00	3,00	3,00	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99	2,98	2,98
2,1	2,98	2,98	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97	2,96	2,96	2,96
2,2	2,96	2,96	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95	2,94	2,94
2,3	2,94	2,94	2,94	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,92	2,92
2,4	2,92	2,92	2,92	2,92	2,91	2,91	2,91	2,91	2,90	2,90
2,5	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89
2,6	2,89	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,87	2,87	2,87
2,7	2,87	2,87	2,87	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86
2,8	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,84	2,84	2,84	2,84
2,9	2,84	2,84	2,84	2,83	2,83	2,83	2,83	2,83	2,83	2,83
3,0	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82	2,81	2,81	2,81
3,1	2,81	2,81	2,81	2,81	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
3,2	2,80	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,78
3,3	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,77	2,77	2,77	2,77
3,4	2,77	2,77	2,77	2,77	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76
3,5	2,76	2,76	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,50	2,75	2,75
3,6	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,73
3,7	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,72	2,72	2,72
3,8	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,71	2,71	2,71	2,71
3,9	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
4,0	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69
4,1	2,69	2,69	2,69	2,69	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68
4,2	2,68	2,68	2,68	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67

TABLA 8 (CONTINUACIÓN)
 $PCa = \log(1/(Ca \cdot (2)^{0.5}))$ DONDE Ca SON MEQ/L

Ca (meq/l)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	infinito	4,30	4,00	3,82	3,70	3,60	3,52	3,46	3,40	3,35
1	3,30	3,26	3,22	3,19	3,15	3,12	3,10	3,07	3,05	3,02
2	3,00	2,98	2,96	2,94	2,92	2,90	2,89	2,87	2,85	2,84
3	2,82	2,81	2,80	2,78	2,70	2,76	2,74	2,73	2,72	2,71
4	2,70	2,69	2,68	2,67	2,66	2,65	2,64	2,63	2,62	2,61
5	2,60	2,59	2,59	2,58	2,57	2,56	2,55	2,55	2,54	2,53
6	2,52	2,52	2,51	2,50	2,49	2,49	2,42	2,47	2,47	2,46
7	2,46	2,45	2,44	2,44	2,43	2,43	2,37	2,41	2,41	2,40
8	2,40	2,39	2,39	2,38	2,38	2,37	2,32	2,36	2,36	2,35
9	2,35	2,34	2,34	2,33	2,33	2,32	2,28	2,31	2,31	2,31
10	2,30	2,30	2,29	2,29	2,28	2,28	2,24	2,27	2,27	2,26
11	2,26	2,26	2,25	2,25	2,24	2,24	2,20	2,23	2,23	2,23
12	2,22	2,22	2,21	2,21	2,21	2,20	2,17	2,20	2,19	2,19
13	2,19	2,18	2,18	2,18	2,17	2,17	2,14	2,16	2,16	2,16
14	2,15	2,15	2,15	2,15	2,14	2,14	2,11	2,13	2,13	2,13
15	2,12	2,12	2,12	2,12	2,11	2,12	2,11	2,11	2,10	2,10
16	2,10	2,09	2,09	2,09	2,09	2,08	2,08	2,08	2,08	2,07
17	2,07	2,07	2,07	2,06	2,06	2,06	2,05	2,05	2,05	2,05
18	2,05	2,04	2,04	2,04	2,04	2,03	2,03	2,03	2,03	2,02
19	2,02	2,02	2,02	2,02	2,01	2,01	2,01	2,01	2,00	2,00
20	2,00	2,00	2,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,98	1,98

TABLA 9
 $P_{ALK} = \log(1/(ALK))$ DONDE ALK SON MEQ/L

Alk (meq/l)	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	infinito	5,00	4,70	4,52	4,40	4,30	4,22	4,15	4,10	4,05
0,1	4,00	3,96	3,92	3,89	3,85	3,82	3,80	3,77	3,74	3,72
0,2	3,70	3,68	3,66	3,64	3,62	3,60	3,59	3,57	3,55	3,54
0,3	3,52	3,51	3,49	3,48	3,47	3,46	3,44	3,43	3,42	3,41
0,4	3,40	3,39	3,38	3,37	3,36	3,35	3,34	3,33	3,32	3,31
0,5	3,30	3,29	3,28	3,28	3,27	3,26	3,25	3,24	3,24	3,23
0,6	3,22	3,21	3,21	3,20	3,19	3,19	3,18	3,17	3,17	3,16
0,7	3,15	3,15	3,14	3,14	3,13	3,12	3,12	3,11	3,11	3,10
0,8	3,10	3,09	3,09	3,08	3,08	3,07	3,07	3,06	3,06	3,05
0,9	3,05	3,04	3,04	3,03	3,03	3,02	3,02	3,01	3,01	3,00
1,0	3,00	3,00	2,99	2,99	2,98	2,98	2,97	2,97	2,97	2,96
1,1	2,96	2,95	2,95	2,95	2,94	2,94	2,94	2,93	2,93	2,92
1,2	2,92	2,92	2,91	2,91	2,91	2,90	2,90	2,90	2,89	2,89
1,3	2,89	2,88	2,88	2,88	2,87	2,87	2,87	2,86	2,86	2,86
1,4	2,85	2,85	2,85	2,84	2,84	2,84	2,84	2,83	2,83	2,83
1,5	2,82	2,82	2,82	2,82	2,81	2,81	2,81	2,80	2,80	2,80
1,6	2,80	2,79	2,79	2,79	2,79	2,78	2,78	2,78	2,77	2,77
1,7	2,77	2,77	2,76	2,76	2,76	2,76	2,75	2,75	2,75	2,75
1,8	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,73	2,73	2,73	2,73	2,72
1,9	2,72	2,72	2,72	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,70	2,70
2,0	2,70	2,70	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,68	2,68	2,68
2,1	2,68	2,68	2,65	2,67	2,67	2,67	2,67	2,66	2,66	2,66
2,2	2,66	2,65	2,63	2,65	2,65	2,65	2,65	2,64	2,64	2,64
2,3	2,64	2,64	2,62	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,62	2,62
2,4	2,62	2,62	2,60	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,60
2,5	2,60	2,60	2,58	2,60	2,60	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59
2,6	2,59	2,58	2,57	2,58	2,58	2,58	2,58	2,57	2,57	2,57
2,7	2,57	2,57	2,55	2,57	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,55
2,8	2,55	2,55	2,53	2,55	2,55	2,55	2,54	2,54	2,54	2,54
2,9	2,54	2,54	2,52	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,52
3,0	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,51	2,51	2,51	2,51
3,1	2,51	2,51	2,51	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
3,2	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,48	2,48
3,3	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47
3,4	2,47	2,47	2,47	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46
3,5	2,46	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,44
3,6	2,44	2,41	2,44	2,44	2,44	2,44	2,44	2,44	2,43	2,43
3,7	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43	2,42	2,42	2,42	2,42
3,8	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
3,9	2,41	2,41	2,41	2,41	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40
4,0	2,40	2,40	2,40	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39

TABLA 9 (CONTINUACIÓN)
 $p_{ALK} = \log(1/(ALK))$ DONDE ALK SON MEQ/L

Alk (meq/l)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	infinito	4,00	3,70	3,52	3,40	3,30	3,22	3,15	3,10	3,05
1	3,00	2,96	2,92	2,89	2,85	2,82	2,80	2,77	2,74	2,72
2	2,70	2,68	2,66	2,64	2,62	2,60	2,59	2,57	2,55	2,54
3	2,52	2,51	2,49	2,48	2,47	2,46	2,44	2,43	2,43	2,41
4	2,40	2,39	2,38	2,37	2,36	2,35	2,34	2,33	2,32	2,31
5	2,30	2,29	2,28	2,28	2,27	2,26	2,25	2,21	2,24	2,23
6	2,22	2,21	2,21	2,20	2,19	2,19	2,18	2,17	2,17	2,16
7	2,15	2,15	2,14	2,14	2,13	2,12	2,12	2,11	2,11	2,10
8	2,10	2,09	2,09	2,08	2,08	2,07	2,07	2,06	2,06	2,05
9	2,05	2,04	2,04	2,03	2,03	2,02	2,02	2,01	2,01	2,00
10	2,00	2,00	1,99	1,99	1,98	1,98	1,97	1,97	1,97	1,96
11	1,96	1,95	1,95	1,95	1,94	1,94	1,94	1,93	1,93	1,92
12	1,92	1,92	1,91	1,91	1,91	1,90	1,90	1,90	1,89	1,89
13	1,89	1,88	1,88	1,88	1,87	1,87	1,87	1,86	1,86	1,86
14	1,85	1,85	1,85	1,84	1,84	1,84	1,84	1,83	1,83	1,83
15	1,82	1,82	1,82	1,82	1,81	1,81	1,81	1,80	1,80	1,80
16	1,80	1,79	1,79	1,79	1,79	1,78	1,78	1,78	1,77	1,77
17	1,77	1,77	1,76	1,76	1,76	1,76	1,75	1,75	1,75	1,75
18	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,73	1,73	1,73	1,73	1,72
19	1,72	1,72	1,72	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,70	1,70
20	1,70	1,70	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	1,68	1,68	1,68

7. CONSTITUYENTES TÓXICOS

El Boro y los cloruros son los principales constituyentes tóxicos para las plantas que contienen el agua de riego. En la siguiente tabla se observa la calibración para estos constituyentes:

TABLA 10
BORO Y CLORURO

	B (ppm)	Cl (meq/l)
Satisfactoria para todos los cultivos	0.5	2
Cultivos sensibles para mostrar daños	0.5-1.0	2 – 4
Cultivos semitolerantes pueden mostrar daño	1.0-2.0	4 – 10
Solo cultivos muy tolerantes muestran daño	2.0-4.0	10

Para el riego por aspersión a los sistemas de humidificación usados en cultivos ornamentales, el agua debe ser especialmente baja en sales. Así para evitar quemaduras en las hojas debe contener menos de 3 meq/l de Sodio o cloruros. El Bicarbonato también puede constituir un problema grave, sobre todo en plantas ornamentales, debido a los depósitos de carbonato que forma sobre las flores. Niveles por debajo de 1.5 meq/l de Bicarbonato no causan problemas. Niveles entre 1.5 y 8.5 meq/l incrementan los problemas pudiéndose resolver en parte por la adición de Ácido Sulfúrico. Por encima de 8.5 meq/l no es posible el uso de esta agua para humidificar el ambiente.

La calidad del agua se define en función de tres criterios: salinidad en sentido restringido, sodicidad y toxicidad. El criterio de salinidad evalúa el riesgo de que el uso del agua ocasione altas concentraciones de sales, con el correspondiente efecto osmótico y disminución de rendimiento de los cultivos. El criterio de sodicidad analiza el riesgo de que se induzca un elevado PSI, con deterioro de la estructura. El criterio de toxicidad estudia los problemas que pueden crear determinados iones.

En cada caso lo que se valora es el riesgo potencial del uso del agua. Es decir, la mayoría de las aguas consideradas peligrosas tienen un contenido actual de sales que en sí mismo no es demasiado perjudicial; el problema se presenta cuando esas aguas evolucionan en el suelo. En efecto, la evapo-

transpiración disminuye la humedad del suelo pero prácticamente no elimina sales, de forma que la solución del suelo se hace más salina a medida que el suelo se seca. Por este procedimiento, un agua que inicialmente tuviera una concentración salina aceptable puede alcanzar valores elevados.

Pero, además se presentan otros fenómenos: al concentrarse las sales, algunas de ellas pueden alcanzar su límite de solubilidad y precipitar, retirando de la solución del suelo determinados cationes y alterando las proporciones iniciales. Esto suele ocurrir con algunas sales de Calcio de baja solubilidad (CO_3Ca y SO_4Ca), lo que tiene como consecuencia un aumento de la proporción de sodio en el agua del suelo y del PSI del mismo.

Los índices que a continuación vamos a estudiar pretenden evaluar la posibilidad de que el agua de riego evolucione en el suelo creando alguno de los problemas citados. La cuestión es compleja porque esa evolución no depende solo del agua sino también de cómo se maneja (riegos frecuentes o distanciados, lavados fuertes o débiles, etc.) y del suelo, ya que intervienen fenómenos de cambio de cationes, las sales se concentran con distinta velocidad en terrenos arenosos que en arcillosos, etc.

La dificultad del tema hace que se hayan establecido muchos criterios de calidad. En este capítulo se va a tratar de los que consideremos más acertados, pero señalando sus puntos débiles. Así mismo en algún caso se describirán algunos criterios anticuados pero de uso muy divulgado.

8. CRITERIO DE SALINIDAD

Un alto contenido de sales disueltas en el suelo disminuye el potencial osmótico y exige a las raíces un esfuerzo adicional para absorber agua, lo que ocasiona una reducción en los rendimientos de los cultivos los cuales disminuyen casi linealmente con la concentración de sales. Por tanto, los criterios que analizan el riesgo de salinidad se basan en índices que expresan la concentración de sales del agua de riego, y de ellos el más frecuentemente utilizado es la CE de dicha agua.

La CE de una solución es directamente proporcional a su concentración. Cuando la solución se diluye, la CE disminuye en la misma proporción, y al contrario cuando la solución se concentra. Por ejemplo, si a un litro de una solución de $\text{CE}=1$ mmhos/cm se añade un litro de agua destilada ($\text{CE}=0$), la solución resultante tendrá un $\text{CE}=2$ mmhos/cm. Esta relación se altera en

presencia de sales poco solubles, como veremos más adelante, lo cual es el principal inconveniente de este índice como medida del riesgo de salinidad.

8.1 CLASIFICACIÓN DE RICHARD

En 1954 Richard, del U.S. Salinity Laboratory (Riverside California) estableció la siguiente clasificación de riego en función de su CE:

TABLA 11
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y SUS NIVELES

Índice de Salinidad	CE ($\mu\text{mhos/cm}$)	Riesgo de Salinidad
1	100-250	Bajo
2	250-750	Medio
3	750-2250	Alto
4	>2250	Muy alto

Esta clasificación ha sido tal vez la más divulgada y extendida de todas.

Además mediante el gráfico 4.1, se combina con el criterio de sodicidad dando lugar a las populares clasificaciones de C_1-S_1 , C_2-S_2 , etc, que comentaremos más adelante.

8.2 CLASIFICACIÓN DEL COMITÉ DE CONSULTORES U.C.

La experiencia demostró que la clasificación anterior era muy conservadora y el propio Richard la modificó posteriormente. En 1972, el Comité de Consultores de la Universidad de California propuso la siguiente clasificación:

TABLA 12
ÍNDICE DE SALINIDAD

Índice de Salinidad	CE (mmhos/cm)	Riesgo de salinidad
1	< 0.75	Bajo
2	0.75-1.5	Medio
3	1.5-3.0	Alto
4	> 3.0	Muy alto

8.3 CLASIFICACIÓN DE LA FAO

En 1976 Ayers y Westcot establecieron la clasificación de la FAO, que en realidad es la misma que la del Comité de Consultores de la Universidad de California pero agrupando los niveles 2 y 3 en uno solo:

TABLA 13
ÍNDICE DE SALINIDAD

Índice de Salinidad	CE (mmhos/cm)	Riesgo de salinidad
1	< 0.75	Sin problemas
2	0.75-1.5	Problemas crecientes
3	> 3.0	Problemas serios

Esta clasificación quizá simplifica excesivamente el problema ya que se reúnen en un mismo grupo las aguas del intervalo 0.75-3.0 mmhos/cm parece algo excesivo. En nuestra opinión es preferible la clasificación del Comité de Consultores de la tabla 12.

Este puede ser el momento de aclarar que no hay que confundir la CE aceptable en un agua de riego con la CE que toleran los cultivos: la segunda es la CE del agua del suelo y se expresa normalmente por CE_e , es decir la correspondiente al extracto de saturación. Esta CE_e es la que figura en la tabla 6 donde se muestra la resistencia de los distintos cultivos por ejemplo, una salinidad definida por 1.5 mmhos/cm es baja si se trata de la CE_e ; en cambio empieza a ser alta para agua de riego.

8.4 INCONVENIENTES DE ESTAS CLASIFICACIONES

Las clasificaciones de las tablas 12 y 13 se han hecho a partir de las hipótesis siguientes:

- La CE de la solución real del suelo es el doble de la del extracto de saturación y triple de la del agua de riego.
- La fracción de lavado está comprendida entre el 15 y el 20% del agua aplicada.

Por una serie de razones en cuyo detalle no nos podemos detener, estas hipótesis no siempre se cumplen.

Pero el principal defecto de estas clasificaciones basadas únicamente en la CE es que no tiene en cuenta la posibilidad de que las sales precipiten al concentrarse en el suelo. Un ejemplo puede ser de utilidad. Consideremos un agua que corresponde a un caso real (pozo A-2 Morro dos cávalos, Simplicio, Mendes, Piavi, Brasil), cuya composición es la siguiente:

Cationes	meq/l	Aniones	meq/l
Ca	19.8	Cl	1.02
Mg	3.28	SO ₄	18.01
Na	9.86	CO ₃ +CO ₃ H	2.62
K	0.39	Total	21.65
Total	24.33		

$$CE = 1.75 \text{ mmhos/cm}$$

Se trata de agua con mucho Yeso (SO₄Ca), su evolución en el suelo dará lugar a una CE menor que la que se podría esperar: supongamos que como consecuencia de la evapotranspiración, el agua se concentra 10 veces. Si no se produjera precipitados las concentraciones serían:

Cationes	meq/l	Aniones	meq/l
Ca	19.8	Cl	10.2
Mg	32.8	SO ₄	180.1
Na	8.6	CO ₃ +CO ₃ H	26.2
K	3.9	Total	216.5
Total	24.33		

Algunas de estas consideraciones superan los límites de solubilidad, por lo que se producen precipitados. En primer lugar precipitan los carbonatos de Ca y Mg cuyo límite de solubilidad es de 10 meq/l. Por tanto precipitan $26.2 - 10 = 16.2$ meq/l de CO₃ que suponemos que se unen por partes iguales a Ca y a Mg; de cada uno de estos cationes precipitan $16.2/2 = 8.1$ meq/l, quedando en la solución:

$$Ca : 19.8 - 8.1 = 11.7 \text{ meq/l}$$

$$Mg : 32.8 - 8.1 = 24.7 \text{ meq/l}$$

Después de precipitar los carbonatos de Ca y Mg, aún se supera el límite de solubilidad del SO_4Ca , que es de 30 meq/l, por lo que esta sal precipita quedando en la solución 30 meq/l y pasando al precipitado $180.1-30=150$ meq/l de SO_4 y la misma cantidad de Ca; de este catión permanecen en la solución los 30 meq/l no disueltos, más el exceso que no ha encontrado SO_4 para precipitar y que vale:

$$189.9-30-150.1=9.80 \text{ meq/l}$$

$$\text{Total Ca: } 30+9.8 = 39.8 \text{ meq/l}$$

La solución final después de concentrada 10 veces es:

Cationes	meq/l	Aniones	meq/l
Ca	19.8	Cl	10.2
Mg	24.7	SO_4	30.0
Na	8.6	$\text{CO}_3+\text{CO}_3\text{H}$	10.0
K	3.9	Total	50.2
Total	77.00		

Esta solución tiene una CE que se puede calcular según la relación:

$$CE = \frac{\text{meq/l}}{12} = \frac{77}{12} = 6.42 \text{ mmhos/cm}$$

En cambio, si no se produjeran precipitados (por ejemplo, si todos los aniones fueran Cl), la CE final sería de $1.75 \times 10 = 17.5$ mmhos/cm, es decir, casi el triple de la real, y las plantas enfrentarían en la solución del suelo una salinidad mucho mayor que la que efectivamente se va a presentar.

Este ejemplo demuestra que el efecto de los precipitados es mejorar la calidad del agua desde el punto de vista de la salinidad, aunque, como veremos más adelante, desde el punto de vista de sodicidad ocurre lo contrario.

8.5 CRITERIO DE SODICIDAD

8.5.1 RAS. Su relación con el PSI del suelo. Un alto contenido de sodio en el agua de riego puede inducir elevados valores de PSI en el suelo, con sus efectos consiguientes de pérdida de estructura por dispersión molecular e

hinchamiento. La posibilidad de que un agua ocasione estos problemas intentó evaluarse por medio del índice RAS y cuya expresión se repite:

$$RAS = \frac{14.1}{\sqrt{\frac{6.8+3.2}{2}}} = 6.3 \quad (2)$$

Donde los cationes se expresan en meq/l.

Ejemplo:

Cationes	meq/l
Ca	6.8
Mg	3.2
Na	14.1
Total	24.10

$$RAS = \frac{14.1}{\sqrt{\frac{6.8+3.2}{2}}} = 6.3$$

RAS son las iniciales de Relación de Absorción de Sodio. En la literatura inglesa este índice se denomina SAR, iniciales de Sodium Adsorption Ratio. El RAS de la solución del suelo (RAS_{ss}) define en forma adecuada el PSI, según la relación:

$$PSI = \frac{1.475 * RAS_{ss} - 1.26}{0.01475 * RAS_{ss} + 0.9874}$$

$$r^2 = 0.852$$

8.5.2 Clasificación de Richards. La clasificación de un agua de riego en función de su RAS (RAS_{ar}) pretende relacionar el RAS_{ar} con el RAS_{ss} y a partir de la fórmula (2) con el PSI. Esto es lo que hizo Richards (1954) con su clasificación que se muestra en la tabla 11 y a la que corresponde el famoso gráfico de la figura 4.1.

TABLA 14

CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS CON RELACIÓN A LA SODICIDAD

Clasificación	RAS para $CE=100 \mu\text{mhos/cm}$	RAS para $CE=750 \mu\text{mhos/cm}$
S.1 baja sodicidad	0 - 10	0 - 6
S.2 media sodicidad	10 - 18	6 - 123
S.3. alta sodicidad	18 - 26	12 - 18
S.4 muy alta sodicidad	>26	>18

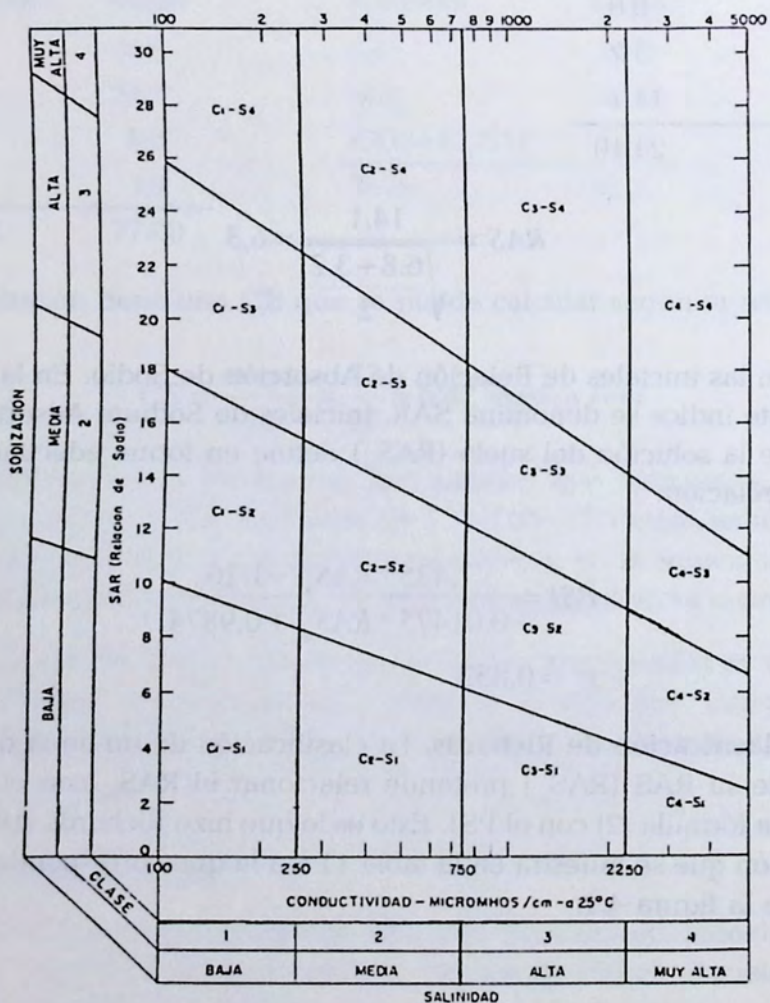


TABLA 15

Suma de concentración (meq/l)	pK'2-pK'c	p(Ca+Mg)	p(Alk)
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
0,75	2,1	3,4	3,2
1,00	2,1	3,3	3,1
1,25	2,1	3,2	3,0
1,50	2,1	3,1	2,9
2,00	2,2	3,0	2,8
2,50	2,2	2,9	2,7
3,00	2,2	2,8	2,6
4,00	2,2	2,7	2,5
5,00	2,2	2,6	2,4
6,00	2,2	2,5	2,3
8,00	2,3	2,4	2,2
10,00	2,3	2,3	2,1
12,50	2,3	2,2	2,0
15,00	2,3	2,1	1,9
20,00	2,4	2,0	1,8
30,00	2,4	1,8	1,7
50,00	2,5	1,6	1,5
80,00	2,5	1,4	1,3

Vale la pena detenerse a analizar los inconvenientes de esta clasificación, ya que su amplia divulgación la han hecho muy utilizada a pesar de las nuevas clasificaciones más adecuadas.

1. Supone que el Ca y el Mg tienen la misma selectividad de intercambio, lo que no es exacto: para un mismo RAS, la absorción de Na crece al aumentar la relación Mg/Ca debido a la menor energía de enlace del Mg.
2. La relación entre RAS_{ar} y RAS_{ss} no es sencilla debido a la forma en que el RAS varía con la dilución. En efecto, si llamamos X_{Na} , X_{Ca} y X_{Mg} al número de meq/l de Na, Ca y Mg contenido en una solución de volumen H_1 litros, la concentración de esos cationes de meq/l y el RAS será:

$$Na_1 = \frac{x_{Na}}{H_1} \quad Ca_1 = \frac{x_{Ca}}{H_2} \quad Mg_1 = \frac{x_{Mg}}{H_1}$$

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca_1 + Mg_1}{2}}} = \frac{x_{Na}}{\sqrt{\frac{x_{Ca} + x_{Mg}}{2}}} * \frac{1}{\sqrt{H_1}} \quad (3)$$

Si el volumen varía pasando a H_2 litros sin que cambie el contenido de sales, el nuevo RAS_2 es:

$$RAS_2 = \frac{x_{Na}}{\sqrt{\frac{x_{Ca} + x_{Mg}}{2}}} * \frac{1}{\sqrt{H_2}} \quad (4)$$

de donde:

$$RAS_2 = RAS_1 \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \quad (5)$$

Relación que demuestra que cuando una solución se diluye ($H_2 > H_1$), su RAS disminuye. Esta es una de las razones por las que en climas húmedos son menos frecuentes los suelos sódicos: la solución del suelo está normalmente más diluida, el RAS es más bajo y en consecuencia también lo es el PSI.

3. No tienen en cuenta la posibilidad de precipitación de sales, fenómeno que puede aumentar el riesgo de sodicidad, ya que los cationes que pueden precipitar son el Ca (en forma de CO_3Ca y SO_4Ca) y el Mg (en forma de CO_3Mg). Tomando el ejemplo estudiado en la sección 8.4, agua rica en yeso, vemos que si no se formaran precipitados, al concentrarse el agua 10 veces, el RAS sería:

$$RAS = \frac{8.6}{\sqrt{\frac{198 + 32.8}{2}}} = 0.80$$

En realidad, después de formarse los precipitados de Ca y Mg, el RAS vale:

$$RAS = \frac{8.6}{\sqrt{\frac{39.8 + 24.7}{2}}} = 1.51 \quad (6)$$

Finalmente la clasificación de Richards incluye un error de concepto. Las sales de la solución del suelo tienen un efecto floculante que se opone al efecto dispersante del Sodio. Por tanto, para un mismo valor del RAS, el riesgo de sodicidad será menor cuanto mayor sea la CE del agua de riego. En el gráfico de la figura 2 muestra la inclinación de las rectas. La figura a) muestra la inclinación según Richard y la figura (b) la inclinación correcta.

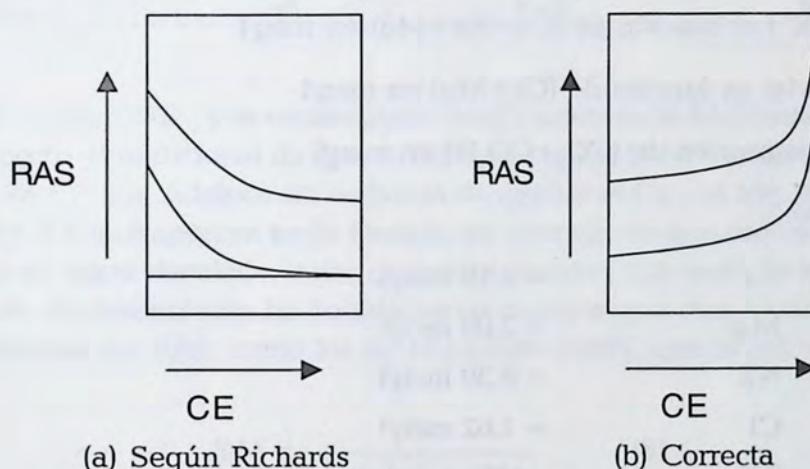


FIGURA 2. CONCEPTO DE INCLINACIÓN DEL GRÁFICO

8.5.3 Clasificación de la FAO. RAS_{ad} . El inconveniente del índice de RAS de no reflejar el efecto de los precipitados dio lugar a distintos índices que intentaban subsanar dicho problema. Así Donan (1967) introdujo un índice de permeabilidad y Eaton el índice RSC (Carbonato Sódico Residual).

En 1968 Bower et al crearon una modificación del índice RAS, el RAS_{ad} , el cual ha sido recogido por Ayers y Westeat (1976) en un trabajo encargado por la FAO. El RAS ajustado (RAS_{ad}) se define según:

$$RAS_{ad} = \frac{Na * (1 + (8.4 - pHc))}{\sqrt{\frac{(Ca + Mg)}{2}}}$$

Es decir, es igual al RAS multiplicado por un factor de ajuste que depende del pHc, el cual a su vez viene dado por la expresión:

$$\text{pHc} = (\text{pK}'_2 - \text{pK}'_c) + \text{p}(\text{Ca} + \text{Mg}) + \text{p}(\text{Alk}) \quad (7)$$

Donde pK'_2 y pK'_c son los logaritmos con signos cambiados de la segunda constante de disociación del CO_3H_2 y de la constante de solubilidad del CO_3Ca , ambos corregidos por el valor de la fuerza iónica; $\text{p}(\text{Ca} + \text{Mg})$ es el logaritmo negativo de la concentración molar de $(\text{Ca} + \text{Mg})$ y $\text{p}(\text{Alk})$ es el logaritmo negativo de la concentración molar equivalente de $\text{CO}_3 + \text{CO}_3\text{H}$. El valor del pHc se puede calcular utilizando la tabla 15 en la que:

$(\text{pK}'_2 - \text{pK}'_c)$ es función de $(\text{Ca} + \text{Na} + \text{Mg})$ en meq/l

$\text{p}(\text{Ca} + \text{Mg})$ es función de $(\text{Ca} + \text{Mg})$ en meq/l

$\text{p}(\text{Alk})$ es función de $(\text{CO}_3 + \text{CO}_3\text{H})$ en meq/l

Ejemplo:

$$\text{Ca} = 3.18 \text{ meq/l}$$

$$\text{Mg} = 2.09 \text{ meq/l}$$

$$\text{Na} = 9.30 \text{ meq/l}$$

$$\text{Cl} = 1.62 \text{ meq/l}$$

$$\text{SO}_4 = 10.8 \text{ meq/l}$$

$$\text{CO}_3 + \text{CO}_3\text{H} = 1.95 \text{ meq/l}$$

$$\text{RAS} = \frac{9.30}{\sqrt{\frac{(3.18 + 2.09)}{2}}} = 5.7$$

$$\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} = 14.57 \text{ meq/l}; \text{pK}'_2 - \text{pK}'_c = 2.3$$

$$\text{Ca} + \text{Mg} = 5.27 \text{ meq/l}; \text{p}(\text{Ca} + \text{Mg}) = 2.6$$

$$\text{CO}_3 + \text{CO}_3\text{H} = 1.95 \text{ meq/l}; \text{p}(\text{Alk}) = 2.7$$

$$\text{RAS}_{\text{ad}} = 5.7 \cdot (1 + (8.4 - 7.6)) = 10.3$$

El CO_3Ca en agua destilada da un $\text{pH} = 8.4$. Por esta razón en la fórmula (6) aparece el término $(8.4 - \text{pHc})$. Cuando ese término es positivo indica

tendencia a precipitar el CO_3Ca del agua aplicada; cuando es negativo indica tendencia a disolver el CO_3Ca del suelo.

La clasificación de la FAO relaciona el riego de pérdida de estructura no solo con el RAS_{ad} sino también con la CE del agua de riego (tabla 16).

TABLA 16
CE y RAS_{ad}

	Sin problema	Problema creciente	Problema grave
CE (mmhos/cm)	>0.5	0.5 – 0.2	0.2
RAS_{ad}	<6	6 - 9	9

Este índice RAS_{ad} y la consecuente clasificación de la FAO tiene la ventaja respecto al tradicional de que se tiene en cuenta la formación de precipitados de CO_3Ca . Adolece sin embargo de ignorar el Ca y el Mg. Así mismo, el valor 8.4 que aparece en la fórmula (6) procede de que ese es el pH del CO_3Ca en agua destilada, valor que en la realidad del suelo no siempre se cumple. Recientemente ha habido varios trabajos que dan lugar a nuevas expresiones del RAS, como los de Miyamoto (1980), que lo calcula según:

$$\text{RAS} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca - X) + Mg}{2}}} \quad (8)$$

Donde X representa a los cationes Ca precipitados cuyo cálculo exige unos datos no siempre disponibles. Suárez (1981), ha propuesto una nueva expresión del RAS en la que interviene la relación $\text{Co}_3\text{H}/\text{Ca}$.

9. CRITERIO DE TOXICIDAD

Los efectos tóxicos de determinados iones para evaluar el riesgo de inducir toxicidad de un agua de riego, seguimos la clasificación de la FAO (Ayers y Westcot, 1976) en cuanto al Sodio, Cloruros y Boro (tabla 8). En cuanto a otros oligoelementos seguimos las recomendaciones de la Academia Nacional de Ciencias de Inglaterra (1972), advirtiéndole que se ha realizado poca experimentación de campo sobre la materia (tabla 17).

TABLA 17
NIVELES DE Na, Cl y B

Ión	Inexistente	Creciente	Graves
Na (meq/l)	< 3	3 – 9	> 9
Cl (meq/l)	< 4	4 – 10	> 10
B (meq/l)	< 0.7	0.7 – 2.0	> 2.0

TABLA 18
CONCENTRACIÓN MÁXIMA DE OLIGOELEMENTO EN AGUA DE RIEGO (MEQ/L)

Elementos	Agua usada continuamente en todos los suelos	Para utilizar hasta 20 años en suelo de textura fina y pH de 6 a 8.5
Aluminio (Al)	5.0	20.0
Arsénico (As)	0.1	2.0
Berilio (Be)	0.1	0.5
Cadmio (Cd)	0.01	0.05
Cromo (Cr)	0.1	1.0
Cobalto (Co)	0.05	5.0
Cobre (Cu)	0.2	5.0
Fluor (F)	1.0	15.0
Hierro (Fe)	5.0	20.0
Plomo (Pb)	5.0	10.0
Litio (Li)	2.5	2.5
Manganeso (Mn)	0.2	10.0
Molibdeno (Mo)	0.01	0.05
Níquel (Ni)	0.2	2.0
Selenio (Se)	0.02	0.02
Vanadio (V)	0.1	1.0
Zinc (Zn)	2.0	10.0

En caso de riego por aspersión sobre el follaje, Na y Cl son muy tóxicos, sobre todo para los árboles. Para este se recomienda no utilizar agua de más de 3 meq/l de cualquiera de estos dos iones. Así mismo, los cítricos son muy sensibles al Litio, que mg/l no debe encontrarse en el agua de riego a más de 0.075 mg/l.

10. DETERMINACIONES ANALÍTICAS

CALCIO Y MAGNESIO

- Determine el Calcio y el Magnesio solubles directamente en el agua con E.D.T.A. 0.01N, siguiendo la técnica utilizada para Calcio y Magnesio intercambiable alternativamente, determinar el Calcio y Magnesio por absorción atómica en presencia de Lantano al 1% con llama de $\text{Na}_2\text{O}-\text{C}_2\text{H}_2$
- Determine Sodio y Potasio por fotometría de llama

10.1 DETERMINACIÓN DE NITRATO

Equipo: pipeta, centrífuga, frasco volumétrico de 100 ml, colorímetro.

Reactivos

- Ácido Fenolfdisulfónico: disuelva 25g de Fenol en 150 ml de Ácido Sulfúrico concentrado y 75 ml de Sulfúrico Fumante (13 a 15% de SO_3), caliente a 100°C por dos horas.
- Nitrato Potásico de 0.010 N: disuelva 1.011 g de KNO_3 seco en un litro de agua.
- Sulfato de Plata 0.20N: disuelva 3.12 g de Ag_2SO_4 en un litro de agua.
- Hidróxido de Amonio: aproximadamente 7N (1:1)
- Óxido de Calcio

Procedimiento

Determine primero los cloruros. Tome una alícuota que contenga 0.004 a 0.04 m.e. de nitratos en frascos de 25 ml. Agregue una cantidad equivalente de Sulfato de Plata para precipitar los cloruros; lleve a volumen, mezcle y centrifugue en tubos de 50 ml, pase el líquido a otro tubo de centrífuga; flocule la materia orgánica presente con 0.1 ml de Óxido de Calcio y centrifugue de nuevo. Tome una alícuota de 10 ml y evapore a sequedad en cápsula de 80 cm de diámetro. Disuelva el residuo seco y frío en 2 ml de Ácido Fenolfdisulfónico. Después de 10 minutos de contacto pase a frascos de 100 ml y lleve a volumen con agua, agregando aproximadamente unas

gotas de Hidróxido de Amonio para alcalinizar la solución. Lea la transmitancia en fotocolorímetro, usando filtro de 410 mm y con un blanco de agua.

La concentración de NO_3^- se lee en una curva calibrada con patrones obtenidos a partir de la solución de Nitrato Potásico 0.01 N tomando alícuotas de 0-0,2-0,4-0,8-1, 2 y 16 llevándolos a sequedad y tratándolas en la misma forma que las muestras, pero sin agregar Ag_2SO_4 ni CaO .

Cálculos: $\text{NO}_3^- = (\text{m.e. NO}_3^- \text{ encontrado en alícuota} \times 1.000) / (\text{ml alícuota})$

10.2 DETERMINACIÓN DE PH (REACCIÓN DEL SUELO)

Equipo: potenciómetro y vasos.

10.3 DETERMINACIÓN: CE (CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA)

Equipo: puente de Wheatstone o copa electrodo.

10.4 DETERMINACIÓN DE CARBONATOS Y BICARBONATOS

Reactivos

- Solución valorada de Ácido Sulfúrico 0.01N
- Solución de Fenolftaleína al 1% en Etanol al 60%
- Solución acuosa de Anaranjado de Metilo al 0.01%

Procedimiento

Tome 10 ml del extracto de saturación agregue tres gotas de fenolftaleína. Si la solución adquiere color rosa, valore con Ácido Sulfúrico 0.01N. Agregando una gota de ácido cada cinco segundos hasta que desaparezca el color rosado. Anote los mililitros gastados de CO_3 . Agregue cuatro gotas de solución acuosa de anaranjado de metilo y valore hasta el cambio de color del indicador, sin volver a cargar la bureta. Anote los mililitros totales gastados (ml de CO_3H).

Calcule: $\text{meq/l de CO}_3 = 2(\text{ml CO}_3) \times f$

$\text{Meq/l de CO}_3\text{H} = (\text{ml CO}_3\text{H}) - 2(\text{ml CO}_3) \times f$

En donde:

F=factor del Ácido Sulfúrico 0.01N

10.5 DETERMINACIÓN DE CARBONATOS Y BICARBONATOS

Reactivos indicador mixto: disuelva 0.02 g de metil y 0.10 g de bromocresol verde en 100 ml de alcohol de 95°. Fenolftaleína al 1% en etanol al 50%. Ácido Sulfúrico 0.01N.

Procedimiento

Tome una alícuota del extracto en una cápsula de porcelana. Agregar una gota de Fenolftaleína y si la solución enrojece, agregue gota a gota H_2SO_4 0.01N de una micro bureta y a intervalos de 5 segundos, hasta cuando desaparezca el color. Anote esta lectura como Y.

Agregue luego 3 gotas de indicador mixto y continúe la titulación con H_2SO_4 hasta la obtención de un color rosa pálido. Designe esta lectura como Z. Lleve un blanco de reactivos con agua destilada hervida.

Cálculos

$$CO_{3,meq/lit} = \frac{2Y \times \text{normalidad del } H_2SO_4 \times 1000}{\text{ml de alícuota}}$$

$$HCO_{3,meq/lit} = \frac{(Z - 2Y) \times \text{normalidad del } H_2SO_4 \times 1000}{\text{ml de alícuota}}$$

10.6 DETERMINACIÓN DE SULFATOS EN EXTRACTOS DE SAL Y AGUA

Reactivos

- Solución salina ácida: disuelva 240g (60g) de NaCl en aproximadamente 900 ml (200 ml) de agua, agregue 20 ml (5ml) de HCl concentrado y diluya a un litro (250 cc).
- Solución estabilizadora: diluya 500 ml (25 ml) de glicerina pura a 1000 ml (250ml) con agua destilada.
- Cristales de Cloruro de Bario de 20 a 30 ml solución de H_2SO_4 0.02N

Procedimiento

En un erlenmeyer de 125 ml, medir una alícuota de extracto y agregar el agua destilada necesaria para llevar a volumen de 50 ml. Con una pipeta

de Mohr agregar 5ml de solución salina ácida y mezclar. Añadir 10 ml de solución estabilizadora con una pipeta de Mohr y agitar. Con una cucharadita de cristales de Cloruro de Bario, inmediatamente agitar el erlenmeyer y continuar la agitación hasta que los cristales estén completamente disueltos. Anotar el tiempo y dejar en reposo por 5 minutos. Preparar un blanco mezclando 50 ml de agua destilada, 5 ml de solución salina-ácida, 10 ml de solución estabilizadora y cristales de Cloruro de Bario.

Transferir la solución resultante a la celda del colorímetro y leer inmediatamente, utilizando el blanco para ajustar el aparato al 100% de transmitancia.

Curva patrón

De una solución 0.02N de H_2SO_4 , tomar alícuota de 0-5-10-15-20-25-30-35-40-50 ml en erlenmeyers de 125 ml, llenar con agua destilada a 50 ml y adicionar los reactivos, y leer en el colorímetro como se describió en el procedimiento ajustando con el blanco del 100% de transmitancia. Dibuja la curva % temperatura vs. meq/lit o ppm. De sulfatos en la muestra sobre la base de una alícuota de 50 ml.

Lee entonces, la concentración del problema directamente sobre la curva. Si toma una cantidad diferente de alícuota que multiplique por el factor apropiado.

Determinación de sulfatos.

$$\text{Ecuación: Concentración (meq/litro)} = \frac{ABS - 0.171952}{0.041577}$$

Concent	Absorbancia
0	0
240	0.495
80	0.745
Concent	Absorbancia
720	0.834
960	0.854
1200	1.222

Regresión Output:

Constant	0.171952
Std Error of y Est	0.151246
R Squared	0.892071
No. of Observations	6
Degrees of freedom	4
X Coefficient (s)	0.041577
Std Err of Coef.	0.007231

10.7 DETERMINACIÓN DE SULFATOS

MÉTODO TURBIDIMÉTRICO

Reactivos

- *Solución de acondicionamiento*

Mezclar 50 ml de glicerina con una solución conteniendo 30 ml de HCl concentrado, 300 ml de agua destilada, 100 ml de etanol del 95% y 75 gramos de cloruro de sodio.

- *Cloruro de Bario p.a.*

Procedimiento

- Ajustar el colorímetro a la longitud de onda de 415 nm
- Insertar en el porta muestras un tubo con la muestra y ajustar 100% de transmitancia. Esta medida opera como blanco.
- Llenar otro tubo con 10 ml de muestra, adicionar 0.5 ml de reactivo A y agitar.
- Agregar 0.1 gramos de reactivo B, disolver por agitación y dejar reaccionar durante 5 minutos.
- Mezclar e insertar el tubo en el colorímetro.
- Registrar el porcentaje de temperatura cuando la lectura se estabiliza.
- Calcular la curva de calibración de la concentración de sulfatos (ppm).

$$\text{PPM (sulfatos)} = 93.84 - 1.12(\%T) / 48.03 = \text{meq/lit}$$

Otra manera de preparar la solución A

Reactivo

- 0.5 ml de glicerina
- 0.3 ml de HCl (concentrado)
- 3 ml de agua destilada
- 1 ml de etanol
- 0.75 gr de Cloruro de Sodio

10.8 DETERMINACIÓN DE CARBONATOS Y BICARBONATOS

Reactivos

- Fenoftaleína 10g/ha en etanol del 60%
- Naranja de metilo 1g/lt en agua
- Ácido Sulfúrico 0.01N reactivo estandarizado

Procedimiento

Tomar 5 ml del extracto y agregar 2 gotas de fenolftaleína si la solución adquiere color rosa se titula con H_2SO_4 0.01N hasta que el color desaparezca. Si al agregar el indicador la solución permanece incolora, no hay carbonato. Añadir entonces 3 gotas de metil naranja y titular con H_2SO_4 0.01N hasta el punto final (rosado) del naranja de metilo. Si al adicionar este último, la solución se colorea de rosado no hay HCO_3 (esta solución se puede reservar para la determinación de cloruros).

Preparar un blanco de reactivos con agua destilada hervida para hacer correcciones. El contenido de carbonato de la muestra se calcula como el doble de miliequivalentes de ácido utilizado para obtener el punto final de fenolftaleína. El contenido de bicarbonatos es igual al total de miliequivalentes de ácido utilizado para obtener el punto final de naranja de metilo menos la cantidad de carbonato presente.

Cálculos

$$CO_3, meq / lit = \frac{2YxNx1000}{V}$$

$$HCO_3, meq / lit = \frac{(Z - 2Y)xNx1000}{V}$$

En donde:

Y= ml de H_2SO_4 0.01N utilizado con el indicador de fenolftaleína

Z= ml de H_2SO_4 0.01N utilizado con el naranja de metilo

N= Normalidad del H_2SO_4 0.01N

V= volumen de la alícuota

10.9 DETERMINACIÓN DE CLORUROS (CL) POR TITULACIÓN CON NITRATO DE PLATA (AgNO_3)

Reactivos

- Nitrato de Plata AgNO_3 1M disolver 169.87 g de AgNO_3 en agua y completar a volumen de 1 litro. Almacenar la botella ambar sin exponer a la luz.
- Nitrato de Plata 0.005M disolver 0.8495 g de AgNO_3 en agua y completar a volumen de 1 litro. Almacenar en la oscuridad.
- Cromato de Potasio (K_2CrO_4) al 5% disolver 5 g de K_2CrO_4 en 50 ml de agua y agregar gota a gota una solución de K_2CrO_3 1M hasta que se produzca un precipitado estable y ligeramente rojo. Filtrar y diluir 100 ml.

Procedimiento

A una alícuota de 12 ml del extracto se añaden 2 a 4 gotas de K_2CrO_4 al 5% con la cual la solución toma un color amarillo. Titular con K_2CrO_3 0.005M hasta obtener un cambio a color rojo que debe ser estable. Para agilidad en las determinaciones y aumento en la eficiencia del laboratorio puede usarse la misma alícuota en la que se determinan el HCO_3 y CO_3 .

Hacer un blanco de reactivo y titularlo.

Cálculos

$$Cl, meq/lit = \frac{(V_M - V_B) \times N \times 1000}{V_a}$$

V_M = ml de AgNO_3 utilizado en la titulación de la alícuota.

V_B = ml de AgNO_3 utilizado en el blanco

N = Normalidad de AgNO_3

V_a = Volumen de la alícuota

10.9.1 Determinación de sulfatos como precipitado de Sulfato de Bario

Reactivos

- Ácido Clorhídrico 6N aproximadamente
- Cloruro de Bario (BaCl) en cristal
- Goma acacia en solución: presenta 0.5 g de goma en balón de 100 mililitros y añadanse 50 ml de ácido acético complétese a volumen con agua destilada.

Procedimiento

Pipétese alícuota de 10 ml del extracto de saturación en un erlenmeyer de 50 ml agréguese 1 ml de goma de acacia en solución y 1 ml de Ácido Clorhídrico 6N, agítese el erlenmeyer, añadanse 0.5 g de Cloruro de Bario en cristales y déjese en reposos por un minuto agítese hasta que los cristales se disuelvan.

Entre 2 y 8 minutos léase el porcentaje de transmitancia en un colorímetro usando una longitud de onda de 420 mv.

Nota: la concentración de sulfato se encuentra mediante una curva patrón.

Nota: forma de hacer la curva de una solución de HCl 6N. Tomar alícuota de 0-10-15-20-25-30-35-40-45-50 ml y llenar con agua destilada a 50 ml de volumen y adicionar los reactivos empleado en las muestras.

Leer el colorímetro ajustado con el blanco a 100% de transmitancia, dibujar la curva en porcentaje de temperatura versus me/lit o ppm, de sulfato en la muestra sobre la base de una alícuota de 50 ml.

Leer entonces, la concentración del problema directamente sobre la curva. Si toma una cantidad diferente de alícuota multiplique por el factor apropiado.

10.9.2 Determinación del total de Sólido Disuelto (T.S.D.)

Este parámetro se utiliza inicialmente para apreciar la salinidad de las aguas de riego. Para su determinación se procede a evaporar un volumen conocido de agua hasta la sequedad, la presencia de agua hidroscópica en la mezcla de sales resultante hace que el T.S.D. dependa de las condiciones usadas para el secamiento. La concentración de las sales en su mayoría de las aguas de riego es menor de 100 mg/l pero las aguas subterráneas pueden tener valores de T.S.D. menores.

Procedimiento

Tomar un recipiente de 600 ml y pesarlo. Colocar un volumen de muestra de agua de 250 a 500 ml. Evaporar a sequedad, dejar enfriar en desecador y pesar nuevamente. La diferencia de pesos es el total de sólidos disueltos en la muestra.

$$\text{Cálculo: T.S.D. (mg/l)} = \frac{\text{mg} / 1000}{\text{Vol. Alícuota}}$$

11. NORMAS DE CLASIFICACIÓN

11.1 NORMA DE RIVERSIDE

- Elaborada por Richard, del Laboratorio Riverside en California.
- Considera CE y RAS
- Es bastante estricta y a veces produce calificaciones desfavorables.
- Es la norma más utilizada.

Existen otras normas como la H. Greene y la norma Wileox, pero no son muy usadas.

12. CRITERIO DE CALIDAD

12.1 SALINIDAD EN SENTIDO RESTRINGIDO

Permite evaluar que el uso del agua ocasione altas concentraciones de sales con el correspondiente efecto osmótico u disminución del rendimiento de los cultivos. Se evalúa con los parámetros:

- a. Conductividad eléctrica = CE (umhos/cm)
- b. Total de sales disueltas = T.S.D. (mgr/l)

13. TOMA DE MUESTRAS DE AGUA

- El recipiente ha de ser de vidrio o plástico.
- Contenido mínimo: 1 litro lleno hasta el tope para remover el aire. Tapar con un corcho recubierto en papel aluminio.
- Profundidad: a medio fondo.

14. ÍNDICE DE SALINIDAD

14.1 SODICIDAD

Analiza el riesgo de que se induzca un elevado PSI, con deterioro de la estructura del suelo. Se evalúa con los índices:

- Relación de absorción de Sodio (RAS)
- Carbonato de Sodio residual (CSR)

14.2 TOXICIDAD

Estudia los problemas que pueden ocasionar ciertos iones específicos como el Boro (B), cloruros (Cl) y el mismo Sodio (Na), aunque en algunos casos se presentan toxicidades por Mg, L y elementos trazas (Fe, Cu, Al).

14.3 PROBLEMAS

Los inconvenientes de toxicidad difieren de uno de salinidad porque su efecto ocurre dentro de la planta misma y no se debe a un déficit de absorción de agua (causado por la presión osmótica de la solución salina).

15. PARÁMETROS A DETERMINAR

15.1 pH

- Generalmente no es importante, pero es un buen índice de detección cuando se sospecha que son aguas contaminadas por residuos industriales. pH normal: 6 - 7.5.

15.2 CONTENIDO TOTAL DE SALES DISUELTAS (T.S.D.)

- Generalmente cuando T.S.D. es mayor de 1.0 gr/l, se restringe su uso.
- Tiene relación con la CE y la presión osmótica de la solución de suelo (Poe).
- A mayor contaminación de sales, se tiene mayor conductividad eléctrica (mmhos/cm, umhos/cm, ds/m). 1 mmho/cm=1 ds/cm (deciseiemens/metro).

$$\text{T.S.D. (mgr/l)} = 0.64 \times \text{CE (umho/cm)}$$

$$\text{CE (mmho/cm)} = \frac{\text{meq/l}}{12} * \sum (\text{Aniones o Cationes})$$

- TSD (ppm)=64X $\sum$ Cat (meq/l) ppm=mgr/1000 gr y tratándose de agua se puede admitir que 1000 gr = 1 litro, luego: ppm=mgr/l.
- Por tanto, la CE representa la concentración de sales que tiene el agua, que causan una presión osmótica (POE) en la solución del suelo.

$$a > \text{CE}_e \text{ } p \text{ Poe}$$

$$\text{Poe (atm)} = 0.36 \times \text{CE}_e \text{ (mmho/cm)}, \text{ en los límites de 3 a 30 mmhos/cm.}$$

$$Po = \frac{n}{Ch(b.v.)} \times Poe$$

CE_e = conductividad eléctrica extracto de saturación del suelo (mmhos/cm)

Poe = presión osmótica extracto de saturación (atm)

Po = presión osmótica solución del suelo en humedad con siderada (atm)

Ch = Contenido de humedad considerada del suelo (%b.v.)

N = porosidad total del suelo (%).

Nota : a mayor salinidad del aguas, mayor es la dosis de riego (para lavar sales).

- Los iones considerados en el análisis son cationes: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ ; aniones Cl^- , CO_3H^- , $SO_4^{=}$, $CO_4^{=}$, $CO_3^{=}$, NO_3^- . Los más abundantes son Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- y $SO_4^{=}$.
- En general, las aguas cuya CE sea menor de 750 umhos/cm son satisfactorias para el riego por lo que respecta a sales, aún cuando los cultivos sensibles pueden tener ciertos perjuicios.
- En algunos casos agua con CE superior a 2500 umho/cm, da buenas cosechas. "Al cultivo no le molesta tanto la concentración de sales en el agua de riego, como la acumulación de estas en la zona de raíces".
- Para un contenido determinado de sales, la concentración será menor, cuanto mayor sea el contenido de humedad del suelo.
- La humedad máxima que un suelo retiene corresponde a la capacidad de campo y ésta es mayor en suelos pesados (arcillosos), que en suelos livianos (arenosos), por tanto, las presiones osmóticas de los suelos francos son inferiores a la de los suelos arenosos, para un mismo contenido de sales.
- Comparando dos estados de humedad diferentes, existe la siguiente relación entre sus conductividades eléctricas:

$$CE_e X n = CE_{cc} X CC = CE_{pmp} X PMP$$

CE_{ce} = conductividad eléctrica a capacidad de campo (mmhos/cm).

CE_{pmp} = conductividad eléctrica a punto de marchitez (mmho/cm).

PMP = Humedad suelo en punto de marchitez (% b.v.)

CC = Humedad suelo a capacidad de campo (% b.v.).

- En sentido práctico se acepta que:

$CE_{cc} = 2CE_e = 3CE_{ar}$ no siempre se cumple.

CE_{ar} = conductividad eléctrica agua de riego (mmho/cm)

15.3 CONTENIDO DE POTASIO

Se puede considerar el aporte de este elemento como nutriente del suelo.

15.4 CONTENIDO DE CLORUROS

Este ion no es absorbible y permanece libre en la solución de éste, moviéndose hasta las hojas donde se acumula provocando clorosis acentuadas que pueden degenerar en necrosis foliar. Se recomienda un contenido máximo de 500 ppm en aguas de riego. Se utiliza el índice porcentaje de cloruro (PCI). Tablas 19 y 20.

$$PCI = \frac{Cl + NO_3}{CO_3 + CO_3H + SO_4 + Cl + NO_3} \times 100$$

Iones en meq/l.

TABLA 19
CLASIFICACIÓN DEL AGUA DE RIEGO SEGÚN PCI

PCI	Clase
0- 4	Excelente
4 - 7	Buena
7 - 12	Media
12 - 20	Mala
>20	Inútil

Fuente: Pizarro F. 1978.

TABLA 20
AGUA DE RIEGO SEGÚN CONTENIDO DE CLORUROS

Concentración (meq/l)	Peligro Cloruros
> 2.0	Generalmente seguros aun con plantas sensibles
42.0 – 4.0	Plantas sensibles mostraron ligeros a moderados daños
4.0 – 8.0	Plantas medianamente tolerantes tendrán ligeros a moderados daños
< 8.0	Ligeros a moderados daños para algunas plantas tolerantes.

Fuente: Biggar, S. y Neelsen, D.R. 1975.

15.5 CONTENIDO DE BORO

Es constituyente de la mayoría de las aguas de riego. Para algunos autores es tóxico cuando es mayor de 0.5 ppm, no siendo aconsejable usar aguas que superen 2.5 ppm. Tabla 21.

TABLA 21
TOLERANCIA RELATIVA DE LOS CULTIVOS AL CONTENIDO DE BORO
EN AGUA DE RIEGO

Tolerantes (4-2 ppm)	Semitolerantes (2-1 ppm)	Sensibles < 1 ppm
Espárragos	Girasol	Nogal
Palma Datilera	Papa	Ciruela
Remolacha de mesa	Algodón	Peral
Gladiolo	Tomate	Manzano
Haba	Rábano	Vid
Cebolla	Olivo	Higuera
Nabo	Cebada	Níspero
Col	Trigo	Cerezo
Lechuga	Maíz	Durazno
Zanahoria	Sorgo	Naranja
	Avena	Aguacate
	Calabaza	Toronja
	Pimiento	Llimonar
	Fríjol	

* La tolerancia disminuye de arriba hacia abajo.

Fuente : Richar, L.A. 1954.

15.6 ÍNDICE DE MAGNESIO (IMg)

Una absorción excesiva de Mg afecta al suelo y puede inducir deficiencia de Ca en los cultivos. Además si se encuentra en altas concentraciones en la solución del suelo produce efectos tóxicos.

$$\text{IMg} = \frac{\text{Mg}}{\text{Ca} + \text{Mg}} \times 100 \text{ cationes en meq/l}$$

Contenido IMg > 50 $\Rightarrow$ agua peligrosa.

15.7 RELACIÓN DE ABSORCIÓN DE SODIO (R.A.S.)

Expresa la posibilidad de que el agua provoque la sodificación del suelo.

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{1/2 * (\text{Ca} + \text{Mg})}} \text{ Iones en meq/l}$$

El Ca ejerce una acción contraria al Na. Si el agua está provista de buen Ca, este puede dominar en el complejo de cambio y el suelo adquiere buenas características de permeabilidad, si el ion dominante es el Na, el suelo se dispersa perdiendo su estructura y adquiere malas características físicas. (ver tabla 22.)

TABLA 22
CLASIFICACIÓN AGUA DE RIEGO SEGÚN RIESGO
DE SODICIDAD DEL SUELO (RAS)

Clasificación	RAS	
	CE = 100 umho/cm	CE = 750 umho/cm
Agua baja en Sodio S ₁	0 – 10	0 - 6
Agua media en Sodio S ₂	10 – 18	6 – 12
Agua alta en Sodio S ₃	18 – 26	12 – 18
Agua muy alta en Sodio S ₄	> 26	> 18

15.8 CARBONATO DE SODIO RESIDUAL (CSR)

Estima la cantidad de Carbonato de Na que permanece en la solución del suelo después de que el Ca y Mg han precipitado como Carbonato y Bicarbonato. (Ver tabla 23). Es un compuesto tóxico para las plantas y causa modificaciones perjudiciales al suelo.

$$\text{CSR} = (\text{CO}_3 + \text{CO}_3\text{H}) - (\text{Ca} + \text{Mg}) \text{ iones de m.e.q./l}$$

TABLA 23
CLASIFICACIÓN DEL AGUA DE RIEGO SEGÚN C.S.R.

CSR (meq/l)	Clasificación
< 1.25	Recomendable
Entre 1.25 y 2.5	Recomendable con reservas
> 2.5	No recomendable

15.9 DUREZA

Se refiere al contenido en Ca. En general las aguas muy duras no son recomendables en suelos compactos. Se baja la dureza aireando el agua para provocar la precipitación del Ca. Una forma de tratar suelos con alto Na es la aplicación de aguas duras.

$$\text{Dureza} = (2.5\text{XCa} + 4.12\text{XMg}) / 10 \text{ Iones en ppm}$$

- Índice calculado a partir de los datos obtenidos en el análisis de laboratorio.

TABLA 24
CLASIFICACIÓN AGUA DE RIEGO SEGÚN DUREZA

Tipo de agua	Dureza
Muy dulce	< 17
Dulce	7 – 14
Medianamente dulce	14 – 22
Medianamente dura	22 – 32
Dura	32 – 54
Muy dura	> 54

Fuente: Canovas (1980)

16. EJEMPLOS DE CALIDAD DE AGUA DE RIEGO

EJEMPLO 1

16.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

pH	8.1
CE	2.800 umho/cm
Boro	0.57 ppm
Cultivo agregar	Algodón
Suelo	Franco arenoso

TABLA 25
NIVELES DE ANIONES Y CATIONES

Cationes	Meq/l	mgr/l	Aniones	Meq/l	mgr/l
Ca ⁺⁺	26.4	529.06	CO ₃ ⁼	0.00	0.00
Mg ⁺⁺	6.83	83.05	CO ₃ H ⁻	2.60	158.60
Na ⁺	3.87	89.01	SO ₄ ⁼	31.71	1523.03
K ⁺	0.11	4.30	Cl ⁻	1.20	42.55
			NO ₃ ⁻	0.00	0.00
Total	37.21	705.42		35.51	1724.18

16.2 COMPROBACIONES

1. (a) $\Sigma \text{ catión} = 37.21 \text{ meq/l}$

(b) $\Sigma \text{ anión} = 35.51 \text{ meq/l}$

Diferencia = 1.7

Tolerante = $0.05 \cdot 35.51 = 1.77 > 1.7$ OK

2. $\frac{CE}{\Sigma Cat} = \frac{2800}{37.21} = 75.2$

Cercano a 80 OK

3. $CE = \frac{\Sigma Aniones}{12} = \frac{35.51}{12} = 2.96 \text{ mmho / cm}$

Cercano al real

(2.8 mmho / cm) OK

4. T.S.D.(ppm) = $0.64 \times 2800 = 1792 \text{ ppm}$

T.S.D. (ppm) = $64 \times 37.21 = 2381 \text{ ppm}$ Valores Cercanos

16.3 ÍNDICES

1. Relación de absorción de Sodio (R.A.S.)

$$RAS = \frac{3.87}{\sqrt{\frac{(26.4 + 6.83)}{2}}} = 0.949$$

Agua de bajo poder alcalino

2. Carbonato de Sodio residual (C.S.R.)

$$C.S.R. = 2.60 - (26.4 + 6.83)$$

$$C.S.R. = -30.63 < 1.25$$

Agua recomendables

3. Dureza

$$D = (2.5 \times 529.06 + 4.12 \times 83.05 / 10)$$

$$D = 166.48$$

Agua de clasificación muy dura

4. Porcentaje de Cloro (PCI)

$$PCI = \frac{1.2 + 0.0}{0.0 + 2.6 + 31.71 + 1.2 + 0.0} \times 100$$

$$PCI = 3.4\% \text{ agua excelente}$$

5. Boro (B)

$$B = 0.57 \text{ ppm. Sin problema para el algodón.}$$

6. Indice de Magnesio (I.Mg)

$$I.Mg = \frac{6.86}{2.64 + 6.86} \times 100$$

$$I.Mg = 20.6\% < 50 \text{ sin peligro}$$

16.4 CLASIFICACIÓN RIVERSIDE

CE = 2800 $\mu\text{mho/cm}$

RAS = 0.95

Según figura 4.1. C_4S_1

C_4S_1 = agua con muy alta salinidad y sin peligro de sodicidad del suelo.

No es apropiado para riego bajo condiciones normales, pero puede usarse en suelos permeables, de drenaje adecuado (como es el presente caso), debiéndose aplicar un exceso de agua para un buen lavado.

Se puede regar el cultivo de algodón, ya que es una planta tolerante a las sales: en agua de riego admite hasta una CE=4000 $\mu\text{mho/cm}$ (tabla 2) y en el extracto de saturación del suelo hasta 10 mmho/cm (Anexo tabla 1). El contenido de Sodio y los demás elementos analizados no presentan peligro de alcalinización del suelo regado con esta agua. El valor de 89.01 mgr/l de Na encontrado en el agua, es bajo y no provocará seguramente toxicidad al cultivo. El contenido de Cloruro (1.2 meq/l) no representa ningún riesgo aun en planta sensible. El Boro encontrado en el agua de 0.57 ppm, tampoco trae problemas para este cultivo, ya que tolera hasta 2 ppm.

EJEMPLO 2

TABLA 26
ANÁLISIS DE AGUA

CE ($\mu\text{mhos/cm}$)	Ca	Mg	K	Na	Suma de Cationes
	Me/l				
1.080	2.6	6.0	0.1	3.0	11.7
	$\text{CO}_3^{=}$	$\text{HCO}_3^{=}$	Cl^{-}	$\text{SO}_4^{=}$	$\text{NO}_3^{=}$
	Me/l				Suma de Aniones
	1.2	4.0	1.5	7.0	13.7

1. PELIGRO DE SALES

- Para evaluar las aguas por su contenido de sales se considera:
- La conductividad eléctrica
- La salinidad efectiva
- La salinidad potencial

TABLA 27

CLASIFICACIÓN DE SUS AGUAS POR SU CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Clasificación	CE X 10 ⁶ (μmhos/cm)
Baja	0 – 250
Moderada	250 – 750
Media	750 – 2250
Alta	2250 – 4000
Muy alta	4000 – 6000
Excesiva Alta	> 6000

La salinidad efectiva (SE) se obtiene sumando los cationes y restándole los Carbonatos de Calcio y de Magnesio y el Sulfato de Calcio, los cuales precipitan.

$$SE = \text{Cationes} - (\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{CaSO}_4) \cdot$$

$$SE = 11.7 - (2.6 + 2.6 + 0)$$

$$SE = 6.5 \text{ meq/l}$$

- Para el cálculo súmese los Carbonatos y Bicarbonatos.

Salinidad potencia, se obtiene sumando los Cloruros más la mitad de los Sulfatos así:

$$SP = \text{Cl}^- + 0.5 \text{ SO}_4$$

$$SP = 1.5 + = 5.0 \text{ meq/l}$$

Estos valores se comparan en las tablas especiales

TABLA 28

CLASIFICACIÓN DE LA SALINIDAD EFECTIVA
Y DE LA SALINIDAD POTENCIAL (MEQ/L)

Clase	SE o SP
Buena	Menor a 3.0
Condicionada	3.0 – 5.0
No recomendable	Mayor a 5.0

En este caso el agua no es recomendable de acuerdo con los tres criterios para salinidad.

2. PELIGRO DE SODIO

Para calificar el riesgo por el contenido de Sodio se utilizan los siguientes criterios:

RAS (Relación Absorción de Sodio)

CSR (Carbonato de Sodio Residual)

% Na posible

2.1 Calculo del RAS del agua de irrigación

El otro riesgo que existe en la agricultura de regadío es convertir al suelo en sódico; como esto supone la pérdida de estructura, es por lo que se suele denominar a este peligro como riesgo de impermeabilización.

No es posible usar el RAS para evaluar este peligro debido a la precipitación de Ca y Mg a causa de los carbonatos. En su lugar se emplea el RAS ajustada que se define como:

$$RAS_{aj} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} [1 + (8.4 - pHc)]$$

En donde el pHc es un valor basado en la concentración de Calcio, Magnesio, Carbonato y Bicarbonato del agua, y que se define como:

$$pHc = ((pK_2^1 - pK_c^1) + pCa + pAlC)$$

Los dos últimos términos son los logaritmos negativos de las concentraciones de Calcio y de Bicarbonatos respectivamente, mientras pK_2^1 y pK_c^1 son los logaritmos negativos de la constante para la segunda disociación del Ácido Ascórbico y la constante de solubilidad del Carbonato de Calcio respectivamente, ambos corregidos para la fuerza iónica de la solución.

Los valores de $(pK_2^1 - pK_c^1)$ se relacionan altamente y se obtienen de la concentración total de cationes.

La tabla preparada por L.V. Wilcox, del U.S. Salinity Laboratory Riverside, California, permite el cálculo del pHc; estas tablas fueron publicadas por Bower y colaboradores en *Soil Science Society of America Proceeding*, No. 19, paginas 91-92 y aparecen en la tabla 29.

Como un ejemplo del cálculo suponga un agua cuyo análisis sea:

Ca	=	3.34 meq/l	
Mg	=	1.44 "	CO ₃ ⁼ = 0.42 meq/l
Na	=	0.73 "	HCO ₃ ⁼ = 3.66 meq/l
K	=	0.09 "	Suma = 4.08 meq/l
Suma	=	5.60 meq/l	

$$\frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}} = \frac{0.73}{\sqrt{\frac{3.34+1.44}{2.0}}} = 0.47$$

Tomado de Bower et al SSSAP 19; 91-92

(1) Nota: para el cálculo de $(pK_2^1 - pK_c^1)$ usar $(Ca+Mg+Na)$.

Para el cálculo de $p(Ca+Mg)$ usar $(CO_3^{=}+HCO_3^-)$

Los respectivos valores de $(pK_2^1 - pK_c^1)$, $p(Ca+Mg)$ y $PAlk$ se obtienen directamente de las columnas 2, 3 y 4 respectivamente de tales tablas.

$$\begin{aligned} p(K_2-pK_c) &= 2.22 \\ p(Ca) &= 2.62 \\ pAlc &= 2.39 \\ \hline pHc &= 7.23 \\ RASaj &= 0.47(1+(8.4-7.23)) \\ RASaj &= 1.0 \end{aligned}$$

A partir de aquí es posible calcular el porcentaje de Sodio cambiante en equilibrio con el suelo, el cual viene dado de forma aproximada por:

$$\begin{aligned} PSI &= 2RASaj \\ PSI &= 2 \times 1 = 2 \end{aligned}$$

Con los valores del RASaj menores de 6 no deben existir problemas; entre 6 y 9 los problemas aumentan y con más de 9 podrán esperar severas complicaciones. Con valores del RAS y la CE utilizamos el diagrama 1 para calificar el agua.

TABLA 29

CÁLCULOS DE LOS VALORES DE pH_c DE AGUA EN EQUILIBRIO CON CaCO₃

Cationes (Ca+Mg+Na) (1) o (Ca+Mg)		p (Ca+Mg)	p(CO ₃ +HCO ₃)
1	2	3	4
0,10	-	4,30	4,00
0,25	2,10	3,90	3,60
0,50	2,11	3,60	3,30
0,75	2,12	3,42	3,12
1,00	2,13	3,30	3,00
1,25	2,14	3,20	2,90
1,50	2,15	3,12	2,80
2,00	2,16	3,00	2,40
2,50	2,17	2,92	2,60
3,00	2,18	2,82	2,50
3,50	2,19	2,76	2,45
4,00	2,20	2,70	2,40
4,50	2,21	2,64	2,34
5,00	2,22	2,58	2,28
6,00	2,23	2,52	2,22
7,00	2,24	2,46	2,16
8,00	2,25	2,40	2,10
9,00	2,26	2,36	2,05
10,00	2,27	2,30	2,00
15,00	2,32	2,12	1,82
20,00	2,35	2,00	1,70
25,00	2,38	1,90	1,60
30,00	2,40	1,82	1,52
35,00	2,42	1,76	1,46
40,00	2,44	1,70	1,40
50,00	2,47	1,60	1,30

2.2 Cálculo de los Carbonatos de Sodio residuales (C.S.R.)

$$CSR = (CO_3 + HCO_3) - (Ca + Mg)$$

$$CSR = (1.2 + 4.0) - (2.6 + 6.0)$$

$$CSR = 5.2 - 8.6 = -3.1$$

Este valor se compara en la tabla 30.

TABLA 30
CLASIFICACIÓN DEL AGUA DE ACUERDO AL CSR

Clasificación	CSR (meq/l)
Buena	Menor a 1.25
Condicionada	1.25 a 2.5
No recomendable	Mayor a 2.5

De acuerdo a la tabla el agua no presenta riesgo por Sodio.

2.3 Porcentaje de Sodio posible

$$\%Na \text{ posible} = \frac{Na \times 100}{SE} = \frac{3.0 \times 100}{6.5} = 46\%$$

El porcentaje de Sodio posible se considera perjudicial cuando este valor es mayor del 50%, luego no presenta riesgo.

3. CONSTITUYENTES TÓXICOS

El Boro y los cloruros son los principales constituyentes tóxicos para las plantas que contienen el agua de riego. En la siguiente tabla figura la calibración para estos constituyentes.

TABLA 31
CALIFICACIÓN DE LAS AGUAS POR EL CONTENIDO DE CLORO Y BORO

Especificaciones	B (ppm)	Cl (meq/l)
Satisfactoria para todos los cultivos	< 0.5	< 2
Cultivos sensibles muestran daños	0.5 – 1.0	2.0 – 4.0
Cultivos semitolerantes pueden mostrar daños	1.0 – 2.0	4.0 – 10
Solo cultivos muy tolerantes resisten	2.0 – 4.0	> 10

TABLA 32
ASPERSIÓN-PELIGRO DE QUEMADURAS EN ORNAMENTALES

	Na - Cl	$CO_3^{=} + HCO_3^{-}$
Bien	< 3.0 meq/l	Normal < 1.5
		Condicionada 1.5 + 8.5
		Alto > 8.5

17. COMPROBACIONES DE RESULTADOS

1. Error Admisible = $\pm 5\%$
2. $[CE(\text{umho/cm})]/[\Sigma \text{ Cat (meq/l)}] = 100$ 80 para agua con CO_3H o SO_4 , donde el Ca y Mg son altos.
110 para aguas con Cl pero rica en Na.
3. $CE (\text{mmho/cm}) = (\text{meq/l})/12 \times (\Sigma \text{ Cat. O anion})$
4. $\text{T.S.D. (ppm)} = 0.64 \times \text{CE (umho/cm)}$
 $\text{T.S.D. (ppm)} = 0.64 \times (\Sigma \text{ Cationes (meq/l)})$

18. OTROS CRITERIOS PARA CLASIFICAR AGUAS DE RIEGO

Además de considerar su composición química, es importante tener en cuenta otros aspectos.

18.1 SÓLIDOS

18.2 TEXTURA DEL SUELO

- Sobre el cual se va a cultivar y regar. Un agua cuyo contenido de sales es inadecuado para riego en suelo arcilloso, puede muy bien ser apta en suelo arenoso.
- Permeabilidad y capacidad de campo
- CE del extracto de saturación
- Grado de fertilización (fertilizantes aportan más sales)

18.3 CULTIVO

- Resistencia a la salinidad. Existe un fenómeno de adaptación ecológica de las plantas a un medio particular. Se puede aprovechar variedades con resistencia a la salinidad en zonas áridas donde las aguas salinas son frecuentes.

18.4 SISTEMA DE RIEGO

- Condiciona en cierto modo la acción del agua sobre el suelo y las plantas.
- En aspersión se considera el riesgo de obturación de equipos y la acción nociva del agua salina sobre las hojas de las plantas. En goteo se considera el aspecto anterior.

18.5 CLIMA

- Lavado de sales por agua lluvia.

18.6 DIFERENCIAS

1. CE tolerada por el cultivo. Es la CE del agua de la solución del suelo, hallada en el extracto de saturación.
2. CE aceptable en agua de riego. Es generalmente de menor valor que la anterior.
3. No confundir el RAS del agua de riego con el de la solución del suelo. Ejemplo: Una CE = 3 mmho/cm (3000 umho/cm) del extracto de saturación es apta para la mayoría de los cultivos, exceptuando los sensibles, pero se consideraría muy alta en agua para riego.

18.7 CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO POR GOTEO

En múltiples ocasiones, los serios problemas en riego por goteo no obedecen a deficiencias en el diseño hidráulico, sino a la falta de un cuidadoso análisis de la fuente de agua a usar.

El agua de riego debe estar libre de sólidos suspendidos muy finos y sólidos disueltos como Fe y Mn que pueden precipitarse ocasionando problemas de obstrucción.

Los problemas principales que inciden en la obstrucción de equipos son:

18.7.1 Físicos. Sólidos en suspensión: arena, limo, arcilla, materia orgánica, algas y bacterias.

18.7.2 Químicos. Precipitación de:

TABLA 33

PELIGRO POTENCIAL DE OCLUSIÓN EN RIEGO POR GOTEO

Problema potencial	Unidad	Grado de restricción en el uso		
		Ninguno	Ligero a moderado	Severo
Físico				
Sólidos en suspensión	mgr/l (ppm)	< 50	50 – 100	> 100
Químico				
PH		< 7.0	7 – 8	> 8
Sólidos disueltos	mgr/l (ppm)	< 500	500 – 2000	> 2000
Manganeso	mgr/l (ppm)	< 0.1	0.1 – 1.5	> 1.5
Hierro	mgr/l (ppm)	< 0.1	0.1 – 1.5	> 1.5
Sulfuro de Fe	mgr/l (ppm)	< 0.5	0.5 – 2.0	> 2.0
Biológico				
Poblaciones bacteriales	No. max/ml	< 10000	10000-50000	> 50000

Fuente: FAO (1985), adaptación de Nakayama (1982).

- Carbonatos de Ca y Mg.
- Sulfato de Ca.
- Oxidos, hidróxidos, silicatos, sulfuros de metales pesados.

18.7.3 Biológicos. Bacterias, huevos de caracoles, larvas, filamentos, descomposición bacterial de Fe, S y Mn.

El pH incide en las reacciones químicas sucedidas en el agua y el suelo. El pH del agua de riego determina el que varios sólidos estén o no disuelto, tales como, Fe y CaCO_3 , los cuales, podrían precipitar y causar taponamiento.

BIBLIOGRAFÍA

Allison, L. E. La salinidad y su relación con el riego. *Reimpresos de adelantos en agronomía*. Academia Press. New York. 1969.

Ayers. R.S. y D.W. Westeot: *Calidad de Agua para Agricultura* (FAO, Roma.1974).

Black, C.A. *Relación suelo-planta*. Editorial Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina. 1ª edición. 1975

Dastane, N.G, *Precipitación Efectiva en la Agricultura de Regadío* (FAO, Roma.1974)

Drovinéau, G Guide Pour L'etude Experimentale du Soul. París. (1952).

Doneen, L.D.: *Trans. Amer. Geophys.Union*,35.1954.

Eaton, F.M.: *Agric. Res.*, 64.357.1942.

Hernández Abreo, S.M. Rodrigo et al. *Curso Internacional de Riego Localizado* (INIA, Canarias 1983).

Jackson, M.L. *Soil Chemical Analisis*. Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, N.J. 49 pags. (1958).

Klute, A. En *Methods of Soil Analysis*. Port 1.210-221. American Society of Agronomy. (1965).

Kramer, P.5, *Relaciones hídricas de suelos y plantas* (Edutex, S.A., México, 1974).

Nélson, R.E. *Estimation of Fifteen - Bar Percentage by Desortion of Soil on Hectorite*, *Soil Sci.*, 119, 269-273. (1975).

López Ritas. *Estudio de los suelos venezolanos*, Fund, Shell., 1961.

_____, R. S. y J. López. *El diagnostico de suelo y plantas*. Edición Mundi-prensa Madrid. 3ª edición. 1978.

Pizarro F. *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*, editorial Agrícola Española, S.A. Madrid. 1978.

ANEXOS

TABLA 34

TOLERANCIA RELATIVA DE LOS CULTIVOS LAS SALES. CE_e (MMHO/CM)

Cultivo	Disminución de la producción (%)			Clasificación
	10	25	50	
Cebada	12.0	16.0	18.0	Tolerante
Remolacha Azucarera	10.0	13.0	16.0	
Algodón	10.0	12.0	16.0	
Centeno	8.0	-	-	
Trigo	7.0	10.0	14.0	Media N. Tolerante
Sorgo	6.0	9.0	12.0	
Soya	5.0	7.0	9.0	
Arroz	5.0	6.0	8.0	
Maíz	5.0	6.0	7.0	
Avena	4.0	8.0	10.0	Poco tolerante
Haba	4.0	5.0	7.0	
Fríjol	1.0	2.0	3.0	

Fuente: Palacios y Aceves. 1966

TABLA 35

TOLERANCIA RELATIVA DE LAS HORTALIZAS A LAS SALES. CE_e (MMHO/CM)

Cultivo	Disminución de la producción (%)			Clasificación
	10	25	50	
Espárrago	6.0	8.0	10.0	Median. tolerante
Espinaca	5.0	7.0	8.0	
Tomate	4.0	6.5	8.0	
Brócoli	4.0	6.0	8.0	
Col	2.5	3.0	7.0	Poco tolerante
Coliflor	2.5	4.0	7.0	
Papa	2.5	4.0	6.0	
Melón	2.0	3.0	3.5	
Lechuga	2.0	3.0	5.0	
Pimienta	2.0	3.0	5.0	
Cebolla	2.0	3.5	4.0	
Zanahoria	2.5	3.0	4.0	
Pepino	2.0	2.5	3.0	
Apio	2.0	2.5	3.0	

Fuente: Palacios y Aceves. 1966.

TABLA 36

DETERMINACIÓN DE LABORATORIO NECESARIA PARA EVALUAR

LA CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO

Parámetro	Símbolo	Unidad	Rango usual
Contenido de Sales			
Conductividad eléctrica	CE _a	ds/m*	0 – 3
Total de sólidos disueltos	TDS	mg/l**	0 – 2000
Cationes y Aniones			
Calcio	Ca ⁺⁺	me/l	0 – 20
Magnesio	Mg ⁺⁺	me/l	0 – 5
Sodio	Na ⁺	me/l	0 – 40
Potasio	K	me/l	0 – 0.2
Carbonatos	CO ₃	me/l	0 – 0.1
Bicarbonatos	HCO ₃	me/l	0 – 10
Cloruros	Cl ⁻	me/l	0 – 30
Sulfatos	SO ₄ ⁼	me/l	0 – 20
Nitratos	NO ₃ ⁻	me/l	0 – 5
Misceláneo			
Boro	B	me/l	0 - 2
Reacción	PH	-	6 – 8.5
Relación absorción de Sodio	RAS***	(me/l) ^{1/2}	0 – 15

Fuente: Adaptado de FAO, 1985

* ds/m = mmhos/cm

** mg/l=ppm

*** RAS=Na/[(Ca⁺⁺+Mg⁺⁺)/2]^{1/2}

TABLA 37

CRITERIO PARA EVALUAR LA CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción en el uso		
		Ninguno	Ligero a moderado	Severo
Salinidad (2)				
CE _a	ds/m	< 0.9	0.7 – 3.0	> 3.0
TDS	mg/l	< 450	450 – 200	> 2000
Infiltración (3)				
RAS = 0 –3 y CE _a =		> 7.0	0.7 – 0.2	< 0.2
RAS = 3 –6 y CE _a =		> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
RAS = 6 –12 y CE _a =		> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
RAS = 12 –20 y CE _a =		> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
RAS = 20 –40 y CE _a =		> 5.0	5.0 – 2.9	<2.9
Toxicidad de Iones Específicos				
Sodio (Na ⁺) (4)				
Riego Superficial (RAS)	me/l	< 3.0	3.1 – 9.0	> 9.0
Riego por Aspersión	me/l	< 3.0	3.0	
Cloruro (Cl ⁻) (5)				
Riego superficial	me/l	< 4.0	4.0 - 10	> 10
Riego por aspersión	me/l	< 3.0	> 3.0	
Boro (B) (6)				
Nitratos (N-NO ₃) (7)	me/l	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
Bicarbonatos (HCO ₃)	me/l	< 5.0	5.0 – 3.0	> 30
PH			6.5 – 8.4	

TABLA 38

TOLERANCIA RELATIVA DE ALGUNOS CULTIVOS A SALES CUANDO SE USA RIEGO POR ASPERSIÓN

Concentración de Na ⁺ o Cl ⁻ (me/l) que puede causar daño foliar*			
< 5	5 – 10	10 - 20	> 20
Almendro	Vid	Alfalfa	Coliflor
Albaricoque	Pimienta	Cebada	Algodón
Cítricos	Papa	Maíz	Remolacha
Ciruelos	tomate	Pepino	girasol
		Ajonjolí	
		Sorgo	

Fuente: Maas. E, (1984)

*Daño ocasionado por acumulación directa sobre las hojas.