



REQUERIMIENTO DE LIXIVIACIÓN FUNCIONAL CONCEPTO, MÉTODO DE DETERMINACIÓN Y VALIDACIÓN BIOLÓGICA

FUNCTIONAL LEACHING REQUIREMENT AN EMPIRICAL APPROACH

José A. Maffei
León Nijensohn

Originales
Recepción: 21/11/2002
Aceptación: 06/02/2003

RESUMEN

Con la finalidad de mejorar el manejo de suelos regadíos se propone, en reemplazo de los modelos teóricos, un método empírico de laboratorio que pretende ofrecer una visión más realista de los cambios cuantitativos de la solución edáfica por la acumulación de agua de riegos sucesivos de reposición.

Para cada combinación específica agua-suelo se determina un *Requerimiento de Lixiviación Funcional* (RLF), definido como la inversa del número de veces, $1/n$, que una *cuota de riego* (CR) -o su equivalente como la cantidad de agua por volumen de suelo- podría ser aplicada consecutivamente hasta que fuere necesario lixiviar para limitar en la solución edáfica el nivel de salinidad total, o el de algún ión en particular.

El valor de n es determinado experimentalmente por el análisis de los extractos de saturación del suelo, cuyas condiciones iniciales son conocidas, después de evaporar en horno de microondas un número creciente de CR. Este método fue aplicado regionalmente en 40 combinaciones de 5 suelos y 8 aguas de riego y sus RLF fueron comparados con los RL calculados como simple consecuencia de la concentración, sin considerar otros fenómenos posibles durante el proceso. Los resultados muestran que en algunas combinaciones de agua-suelo los

ABSTRACT

In order to avoid the build-up of an excessive salinity by predicting in a specific system water-soil the changes in composition of the soil solution after consecutive water replacement irrigations, the following empirical approach was proposed:

1) For each particular water-soil combination a *Functional Leaching Requirement* (FLR) is defined as the inverse of the number of times, $1/n$, that a certain *Irrigation Quota* (IQ)- or its equivalent as total amount of water per volume of soil- might be applied consecutively until leaching is required to limit the total soil salinity or any of its components;

2) The value of n is found experimentally by analyzing the saturation extract of a soil, whose initial conditions are known, after evaporating in a microwave oven increasing number of IQ of a certain irrigation water. This method was tried regionally in 40 combinations of 5 soils and 8 different waters and their FLR were compared with a theoretical expected leaching requirement (LR) calculated as the simple consequence of concentration, without any provision for changes in chemical composition during the process. The results show that in some water-soil combinations the FLR may differ significantly from the theoretical LR for total salinity (CEs) and the soluble boron content

RLF pueden diferir significativamente de los teóricos simples, no sólo con respecto a la evolución de la salinidad total (ya prevista en los modelos citados) sino también en la concentración de boro en solución. Una primera prueba de aplicación en cultivo del método propuesto se realizó en un ensayo en macetas, con clones de vid de un año, empleando la misma agua de riego en dos suelos de características funcionales distintas, según la apreciación previa del RLF en laboratorio. Los resultados obtenidos validaron los esperados de acuerdo con el procedimiento indicado.

Complementariamente se analizaron las hojas y se calcularon regresiones entre los índices edáficos al final del ensayo y los contenidos foliares de B, Cl y Na, así como estos últimos entre ellos.

(Bs). A pot trial with grapevines in two different soils irrigated with the same water at two n values, and including a check irrigated only with demineralized water, validated the proposed method through the significant similarity found between the real final soil CEs and Bs and the predicted ones. Regressions were calculated among Bs, CEs, foliar boron (Bf), (Clf) and (Naf).

Key words

water quality • irrigation water-soil relations • irrigation quota • leaching requirement • boron • salinity • grapevine

Palabras clave

calidad del agua • relaciones suelo-agua de riego • cuota de riego • requerimiento de lixiviación • boro • salinidad • vid

INTRODUCCIÓN

En el manejo del riego orientado a preservar la capacidad productiva del suelo, el incremento de concentración de la solución edáfica, como consecuencia de la reposición del agua evapotranspirada, determina la necesidad del denominado *Requerimiento de Lixiviación* (RL) definido primeramente como "la fracción de agua de riego que debe atravesar la zona enraizada para mantener la salinidad en un determinado nivel" (10). Con posterioridad se han propuesto fórmulas en las que la variación de la solución edáfica por la acumulación de sucesivos riegos de reposición es predicha a partir de la composición iónica del agua y de algunas características del suelo (1, 8, 9). En lugar de predicciones teóricas como las que se obtienen con el uso del modelo computarizado Watsuit (9) se propone la determinación en laboratorio del RL mediante un procedimiento empírico que imita los efectos de la evapotranspiración para una cierta combinación específica agua de riego-suelo. En el planteo de dicho método se tuvo en cuenta que:

- a) la mayor parte de las nuevas plantaciones en la región de Cuyo: frutales, olivares y viñedos, se riegan con aguas de origen subterráneo de diferentes calidades y aplicadas por métodos de riego localizado;
- b) aunque todos los suelos regadíos son de origen aluvial, eólico o mixto, y tienen algunas características comunes (reacción neutra o levemente alcalina y presencia habitual, en variables proporciones, de calcáreo o de yeso) suelen diferir en otras propiedades fisicoquímicas, no consideradas en los modelos teóricos, y que pueden interactuar con las aguas de riego;
- c) el método de riego por goteo -el más común entre los localizados- permite conseguir una alta precisión en la cantidad de agua aplicada en un cierto volumen de suelo.

Consecuentemente, y apuntando hacia una apreciación más real de los cambios en la composición de la solución del suelo después de un cierto período de riego, se desarrolló la siguiente propuesta:

1) para cada combinación específica agua-suelo se determina un *Requerimiento de Lixiviación Funcional* (RLF), definido como la inversa del número de veces, $1/n$ que una *cuota de riego* (CR), o de cantidad de agua por volumen de suelo, podría ser aplicada consecutivamente hasta que fuere necesario lixiviar para limitar en la solución edáfica el nivel de salinidad total o el de algún ión en particular;

2) el valor de n se determina experimentalmente por el análisis de los extractos de saturación del suelo, cuyas condiciones iniciales son conocidas, después de evaporar en horno de microondas un número creciente de CR. Esta metodología fue aplicada regionalmente en 40 combinaciones de 5 suelos y 8 aguas de riego y sus RLF fueron comparadas con los RL calculados como simple consecuencia de la concentración, sin considerar otros fenómenos posibles durante el proceso. Los resultados muestran que en algunas combinaciones de agua-suelo los RLF pueden diferir significativamente de los teóricos simples, no sólo con respecto a la evolución de la salinidad total (ya prevista en los modelos citados) sino también en la concentración de boro en solución. Una primera validación de este método se ensayó en macetas empleando la misma agua de riego en dos suelos de características funcionales distintas, según la apreciación de laboratorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se usaron 5 muestras, secadas al aire y homogeneizadas, de suelos regadíos de la región de Cuyo, extraídas del volumen explorado por raíces. Sus respectivos orígenes fueron:

(CSJ) Casuarinas, San Juan

(ChC) C. de Coria, Mendoza

(ET) El Topón, La Rioja

(3M) 3 de Mayo, Lavalle, Mendoza

(TP) Tres Porteñas, San Martín, Mendoza

Las características más importantes de los suelos ensayados se muestran en la tabla 1 (pág. 4) y los datos de su equilibrio salino inicial, en la tabla 2 (pág. 4).

Las aguas de riego subterráneas usadas en el ensayo y cuya composición se consigna en la tabla 3 (pág. 4) provienen de:

(CP) Cruz de Piedra, Maipú, Mendoza

(ET) El Topón, La Rioja

(3M) 3 de Mayo, Lavalle, Mendoza

(JU) Medrano, Junín, Mendoza

(TI) Tinogasta, Provincia de Catamarca

(CSJ) Casuarinas, San Juan

(CHA) Chapanay, San Martín, Mendoza

(SL) Capital, San Luis (SL)

Cada suelo fue regado en proporciones crecientes con las 8 aguas de riego de acuerdo con el siguiente procedimiento, por duplicado, en 4 repeticiones para cada una de las 40 combinaciones suelo-agua:

a) en cada repetición y su duplicado, de 300 g de suelo seco al aire, en recipientes de vidrio o plástico, se le agregaron tres, o más, cuotas de riego

b) se llevó la repetición N° 1 hasta su capacidad de saturación con agua desmineralizada y se analizó su extracto (10);

Tabla 1. Propiedades de los suelos

Características		Suelos				
		CSJ	TP	ET	ChC	3M
pHs ¹		7.64	7.62	8.26	7.86	8.23
VS ²	mL%g	96	114	82	92	110
CaCO ₃	g/kg	38.2	72.0	7.0	64	22
Ws ³	g/kg	366.0	474.5	315.0	361.0	415.8
Wc ⁴	g/kg	214.0	280.0	145.1	175.0	255.0
W ₁₅ ⁵	g/kg	95.0	154.9	70.9	90.6	141.0
Wd ⁶	g/kg	119.0	125.1	74.2	84.4	114.0
CR ⁷	g/kg	59.5	62.5	37.1	42.2	57.0
CR / Ws		0.1626	0.1317	0.1178	0.1169	0.1371
Ws / Wc		1.71	1.69	2.17	2.06	1.63

1 pH de pasta saturada

2 Volumen de sedimentación

3 Capacidad de saturación

4 Capacidad de campo

5 Capacidad a 15 bares

6 Capacidad de agua disponible

7 CR (50% de Wd)

Tabla 2. Salinidad inicial en los extractos de saturación

Características		Suelos				
		CSJ	TP	ET	ChC	3M
CE	dS/m	3.78	2.1	0.96	2.73	3.82
CEP ¹	dS/m	6.56	3.21	1.17	4.58	5.28
Σ ccat ²	me/L	52.5	25.7	9.4	36.6	42.2
Ca	me/L	25.6	13.8	3.8	21.3	21.2
Mg	me/L	5.8	4.7	0.4	4.8	6.8
Na	me/L	19.5	4.3	5.2	10.1	16.0
K	me/L	0.85	1.8	0.3	0.35	0.35
Σ cat	me/L	51.8	24.6	9.65	36.5	44.4
HCO ₃	me/L	3.5	6.5	2.5	1.1	1.3
Cl	me/L	9.6	4.8	6.0	8.5	10.2
SO ₄	me/L	38.7	13.3	1.2	27.0	32.9
B	mg/L	0.51	0.76	0.96	0.12	1.02
RAS	(me/L) ^½	4.92	1.41	3.59	2.8	4.28

1 conductividad eléctrica potencial

2 cálculo de cationes totales (6)

Tabla 3. Propiedades de las aguas de riego

Características	CP	ET	3M	JU	TIN	CSJ	CHA	SL
pHs	7.65	7.78	7.53	7.56	7.52	6.95	7.74	8.29
CE	dS/m	2.05	0.83	2.76	2.93	1.71	1.86	1.16
CEP	dS/m	3.12	1.1	4.16	4.11	2.19	2.43	1.54
Σ ccat	me/L	25.0	8.8	33.3	32.9	17.5	19.4	12.3
Ca	me/L	16.2	3.05	25.2	13.2	4.5	8.0	2.1
Mg	me/L	4.3	0.5	1.5	2.8	0.7	1.2	0.7
Na	me/L	4.1	4.9	7.8	16.5	11.6	10.5	8.4
K	me/L	0.2	0.32	0.34	0.60	0.22	0.30	0.3
Σ cat	me/L	24.8	8.77	34.84	33.1	17.02	20.0	11.45
HCO ₃	me/L	2.2	2.4	1.6	2.5	1.5	3.5	2.8
Cl	me/L	3.6	3.1	5.2	16.5	9.3	5.8	6.1
SO ₄	me/L	19	3.3	28.0	14.1	5.8	10.7	2.1
B	mg/L	0.36	0.39	0.42	0.67	1.84	1.26	0.29
RAS	(me/L) ^½	1.28	3.68	2.13	5.83	7.19	4.90	7.1

c) después de determinar el peso inicial de las otras 3 repeticiones se colocaron en horno de microondas el tiempo necesario para evaporar el exceso de agua de riego agregada;

d) a las restantes repeticiones se les agregó igual número de CR que en a).

La N° 2 es saturada y se analizó su extracto;

e) se repite desde c) a d) a las otras dos repeticiones remanentes. En cada caso, la composición del extracto de saturación de las repeticiones N° 1, 2, 3 y 4 responden a un efecto creciente de acumulación de las CR. La CE y la determinación de los iones fueron realizadas con los métodos estándares (12) y el boro, con una adaptación del método de la azometina-H. La suma de cationes determinada fue comparada con la calculada a partir de la conductividad eléctrica potencial de la solución (6). Para cada combinación suelo-agua de riego, el número de CR que puede acumularse antes de alcanzar el valor límite propuesto, n , se calcula por inter o extrapolación cercana de los datos analíticos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los resultados de los análisis de los extractos de saturación -no explicitados en este trabajo- se calcularon los índices de importancia diagnóstica y que son modificados mediante la acumulación de CR. Se estableció el número empírico de CR acumuladas para alcanzar el valor límite predeterminado para un factor de riesgo, el que indicaría la exigencia de un tratamiento de lixiviación. Para fijar dichos valores, se consideró que la mayor parte de las nuevas plantaciones de Cuyo son viñedos y olivares. Para otras especies con distintos grados de tolerancia a la salinidad total o específica podrían ser adoptados diferentes valores límites. De acuerdo con los objetivos propuestos, los valores experimentales de RLF para cada combinación suelo-agua de riego fueron comparados con los RL teóricos respectivos (calculados como simplemente proporcionales a la concentración producida por la acumulación de CR). A continuación se detallan consideraciones para los índices de peligrosidad calculados.

A. ENSAYOS DE LABORATORIO

• Conductividad Eléctrica

Los valores teóricos esperados de la *conductividad eléctrica teórica* en el extracto de saturación (CE_t) después de cierto número de cuotas de riego: n_{CR} fueron calculados con:

$$CE_t \text{ dS m}^{-1} = CE_{si} \text{ dS m}^{-1} + n_{CR} * CE_w \text{ dS/m} * (CR \text{ g \%} / W_s \text{ g \%}) \quad (I)$$

donde CE_{si} es la CE inicial del extracto de saturación del suelo antes de la aplicación de la primera cuota de riego y CE_w es la CE del agua de riego.

De (I) se puede deducir la ecuación general:

$$n_t = (CE_{sf} - CE_i) / K \quad (II)$$

donde: n_t es el número teórico de cuotas de riego necesarias para alcanzar cierta conductividad eléctrica final en el extracto de saturación (CE_{sf}) y $K = CE_w * (CR / W_s)$ es una constante propia de cada combinación suelo-agua de riego.

La CR depende no sólo de las características del suelo sino también del porcentaje de agua disponible fijado como umbral de riego. En el presente trabajo se adoptó un 50 % de agua disponible, que asegura buenas condiciones de alimentación hídrica y de aireación (tabla 1, pág. 4). En la tabla 4 se consignan los valores redondeados de n para cada combinación suelo-agua de riego, tanto los experimentales: n_e como los teóricos: n_t , calculados con la ecuación (II) y para el valor límite adoptado de 5 dS/m. En la casi totalidad de los casos, los valores experimentales de n son mayores que los teóricos. Por consiguiente la RLF resulta menor que la RL. Se comprobaron excepciones en el suelo de ChC con algunas aguas.

Tabla 4. Valores teóricos (t) y experimentales(e) de n y sus respectivos RL y RLF para un máximo de salinidad de CEs 5 dS m⁻¹

Aguas	Suelos									
	CSJ		TP		ET		ChC		3M	
	t	e	t	e	t	e	t	e	t	e
CP										
n	5	10	10	17	16	18	9	5	4	9
RL RLF	0.20	0.10	0.10	0.06	0.06	0.06	0.11	0.20	0.25	0.11
ET										
n	9	12	26	42	41	63	23	9	10	10
RL RLF	0.11	0.08	0.04	0.02	0.02	0.02	0.04	0.11	0.10	0.10
3M										
n	2	8	8	13	12	19	7	20	3	10
RL RLF	0.5	0.13	0.13	0.08	0.08	0.05	0.14	0.05	0.33	0.10
JU										
n	2	4	7	10	11	13	6	6	3	3
RL RLF	0.5	0.25	0.14	0.10	0.09	0.08	0.17	0.17	0.33	0.33
TIN										
n	4	9	13	18	20	35	11	14	5	7
RL RLF	0.25	0.11	0.08	0.06	0.05	0.03	0.09	0.07	0.20	0.14
CSJ										
n	4	7	11	28	18	38	10	13	4	7
RL RLF	0.25	0.14	0.09	0.04	0.06	0.03	0.10	0.08	0.25	0.14
ChA										
n	3	6	10	14	16	23	9	14	4	7
RL RLF	0.33	0.17	0.10	0.07	0.06	0.04	0.11	0.07	0.25	0.14
SL										
n	6	10	19	26	29	57	16	12	7	8
RL RLF	0.17	0.10	0.05	0.04	0.03	0.02	0.06	0.08	0.14	0.13

Fenómenos químicos y fisicoquímicos resultantes de la progresiva concentración de la solución edáfica, tales como la precipitación parcial de CaCO_3 y CaSO_4 , formación de pares iónicos, cambios en el equilibrio entre cationes libres y adsorbidos y disminución de la actividad iónica, paralela ésta al aumento de la fuerza iónica, explican el menor que proporcional crecimiento de la CEs con el número de CR acumuladas. Características iniciales edáficas tales como mayores CEs y contenidos de Ca , SO_4 , HCO_3 , unidas a similares variables en las aguas de riego, acentúan las diferencias entre la RLF y la simple RL. Ver, por ejemplo, el efecto sobre n de las interacciones suelo-agua 3M-ET y ChC-ET (tabla 4). La relativamente baja CE y contenido de SO_4 del agua de riego de ET podrían ser la razón de las inexistentes o negativas diferencias ($n_e \leq n_t$) encontradas en algunas interacciones, como en 3M-ET y ChC-ET, mientras que los altos e iguales valores de RL y RLF en los mismos suelos

con el agua de JU podrían ser debidos a la elevada salinidad total, con predominancia de NaCl, en la composición iónica de esta combinación.

• **Concentración de boro**

Como en el caso de la CE, para calcular la concentración teórica de boro en el extracto de saturación después de un cierto número de CR, y cuántas de ellas podrían ser acumuladas hasta que deba recurrirse a una lixiviación, son aplicables las ecuaciones (I) y (II) que, por substitución de términos correspondientes, se convierten en:

$$B_t \text{ mg.L}^{-1} = B_{si} \text{ mg.L}^{-1} + n_{CR} [B_w \text{ mg.L}^{-1} (\text{IQ g \%} / W_s \text{ g \%})] \tag{III}$$

$$n_t = (B_{sf} - B_{si}) / K \tag{IV}$$

donde K representa lo mismo que en (II).

Considerando la sensibilidad de la vid y la semitolerancia de las plantas de olivo al boro, se adoptó como máximo aceptable de concentración final: B_{sf} un valor de 1.5 mg L^{-1} en el extracto de saturación. Los diferentes tipos de interacciones entre suelo y agua de riego con respecto a la concentración de B en los extractos de saturación se aprecian en la tabla 5, donde se comparan los valores de n_t y n_e y sus respectivos RL y RLF para cada combinación suelo-agua de riego. Pueden distinguirse, durante la acumulación de CR, distintos comportamientos de un mismo suelo frente a diferentes aguas. Por ejemplo: en el suelo ChC con agua 3M se observa una aparente fijación de B, con agua CP una liberación, mientras que con agua JU no se observa ninguna interacción suelo-agua.

Tabla 5. Valores teóricos (t) y experimentales(e) de n y sus respectivos RL y RLF para un máximo de 1.5 mg L^{-1} de boro en el extracto de saturación

Aguas	Suelos									
	CSJ		TP		ET		ChC		3M	
	t	e	t	e	t	e	t	e	t	e
CP										
n	17	11	16	15	13	10	64	19	10	6
RL RLF	0.06	0.09	0.06	0.07	0.08	0.10	0.02	0.05	0.10	0.17
ET										
n	16	12	14	25	12	4	23	26	9	7
RL RLF	0.06	0.08	0.07	0.04	0.08	0.25	0.04	0.04	0.11	0.14
3M										
n	15	24	14	6	11	10	28	35	8	7
RL RLF	0.07	0.04	0.07	0.17	0.09	0.10	0.04	0.03	0.13	0.14
JU										
n	9	10	8	10	7	7	18	19	5	7
RL RLF	0.11	0.10	0.13	0.10	0.14	0.14	0.06	0.05	0.2	0.14
TIN										
n	3	4	3	6	2	12	6	10	2	5
RL RLF	0.33	0.25	0.33	0.16	0.5	0.08	0.17	0.1	0.5	0.2
CSJ										
n	5	8	5	9	4	8	10	9	3	8
RL RLF	0.2	0.13	0.2	0.11	0.25	0.13	0.1	0.11	0.33	0.13
ChA										
n	20	10	19	14	16	25	38	23	12	22
RL RLF	0.05	0.1	0.05	0.07	0.06	0.04	0.03	0.04	0.08	0.04
SL										
n	27	14	25	20	21	5	52	59	16	14
RL RLF	0.04	0.07	0.04	0.05	0.05	0.20	0.02	0.02	0.06	0.07

También se detecta que la misma agua puede interactuar de diferente forma con relación a diferentes suelos. Por ejemplo, cuando el agua 3M es aplicada al suelo CSJ hay una aparente fijación de B. Esa misma agua libera B del suelo TP, mientras que frente al suelo ET no es aparente ninguna interacción.

- **Concentración de cloruros**

Dado que los cloruros tienen prácticamente una solubilidad ilimitada y sus iones no están sujetos a ningún efecto de adsorción en estos suelos ligeramente alcalinos, sus concentraciones en los extractos de saturación y el número de CR acumulables pueden describirse por ecuaciones como (III) y (IV), respectivamente, donde B es reemplazado por Cl_s^- , expresado en me/L. Como n_i y n_e para Cl tienen el mismo valor, el RLF y el simple RL coinciden. En algunos casos, como en el suelo TP regado con el agua JU, el RL para Cl resultaría más alta que el RLF para CE o B si se aplicara a especies como la vid y los árboles frutales, menos tolerantes que el olivo a dicho ión.

- **Relación de adsorción de sodio**

La *Relación de Adsorción de Sodio* (RAS) en el extracto de saturación es un índice muy usado con respecto no sólo en la toxicidad específica del ión Na para cultivos sensibles, sino también con la estimación del riesgo de deterioro de las condiciones físicas del suelo. Adoptamos un valor conservador de RAS o de RAS^0 de 10 como límite crítico (11), pero en ninguna de las combinaciones analizadas de suelo-agua el RLF para la RAS o la RAS^0 sobrepasó al determinado para la CE.

- **Observaciones adicionales**

La principal ventaja del concepto de RLF y del método empírico para su determinación es que en vez de hipotetizar las modificaciones a producirse en la solución del suelo durante su progresiva concentración, sobre la base del conocimiento de la composición química del agua de riego, el procedimiento propuesto remeda el real funcionamiento de dichos procesos bajo un manejo de riego por reposición y para cada combinación suelo-agua específica, lo que permite programar las lixivitaciones del volumen radical humedecido.

Las ecuaciones (II) y (IV) subrayan la influencia de la relación CR / W_s . La CR depende tanto del criterio para fijar el porcentaje de agua disponible en el umbral de riego -el que podría ser diferente del adoptado en este trabajo- como de los valores de W_c y de W_{15b} del suelo. Por otra parte, la relación W_s / W_c que es propia de cada suelo, puede ser importante al considerar la interpretación de ciertos factores de riesgo cuyos valores se expresan en el extracto de saturación. Los datos de la literatura (4) adoptan o suponen que el valor de W_s / W_c es de ca.2 y, consecuentemente, la concentración en el extracto de saturación sería la mitad de la solución del suelo en capacidad de campo. Si en un cierto suelo la relación W_s/W_c se separa considerablemente de 2 (tabla 1, pág. 4), la concentración de riesgo en la solución del suelo en W_c diferiría de la citada en la literatura como valor general y, en ese caso, sería aconsejable modificarlo.

B. ENSAYO BIOLÓGICO DE VALIDACIÓN

Se llenaron 38 recipientes con 1.2 kg suelo/maceta: 19 con suelo ET y 19 con suelo ChC. En cada uno se colocó una planta de vid cv Malbec de un mismo clon y de un año de crecimiento. Se plantearon tres tratamientos para cada suelo. En el T1 (testigo), por triplicado, se regó únicamente con agua desmineralizada. En los T2 y T3, cada uno por octuplicado, los riegos se efectuaron con agua CSJ hasta que el contenido de B_t calculado de acuerdo con la ecuación (IV) alcanzara en el extracto de saturación una concentración de 2 y 4 mg/L respectivamente, y la salinidad total (CEs), los valores correspondientes, siguiendo luego con agua desmineralizada. Las macetas se ubicaron en un sector del campo experimental de la Cátedra de Genética de la Facultad sobre una planchada, ordenadas al azar y reubicadas varias veces durante el tiempo del ensayo tratando de equilibrar las influencias de luz y temperatura, debajo de un techo de policarbonato opaco para protegerlas de las posibles precipitaciones torrenciales de granizo o lluvia. Durante la experiencia se controló mediante pesadas la humedad del suelo de las macetas manteniendo la misma entre capacidad de recipiente y el 50 % de la humedad disponible. Se regó sin permitir la percolación del agua. A los 15 días se fertilizaron todas las macetas con N y P. A los 40 días, y al azar, se removieron y analizaron las tierras de una maceta del T1 y dos de los otros tratamientos para controlar la marcha del ensayo. La experiencia se dio por finalizada a los 100 días, cuando se observó detención del crecimiento. En cada maceta se determinaron pH en pasta, salinidad (CEs) y concentración de Bs. Se extrajeron las hojas de cada planta de vid las que también se analizaron: Cl y Na en un extracto acuoso y boro en extracto clorhídrico de cenizas.

- **En los suelos**

En las tablas 6 y 7 (pág. 10) se sintetizan los resultados obtenidos donde se comparan los valores teóricos, los realmente determinados y los pronosticados de acuerdo con el método propuesto para el RLF. De su examen surgen los siguientes comentarios:

1. *Con respecto a la concentración de Boro:*

a) Interacción del suelo-cultivo-riego con agua desmineralizada (T1): los efectos difirieron según el suelo. Mientras que al finalizar el cultivo en el suelo ChC se observó un importante aumento respecto a la concentración de B original -0.82 y 0.12 mg/L respectivamente- lo que indica una liberación de boro a partir de la fase sólida. En el suelo ET se constató una ligera disminución (-0.32 mg/L). Estos distintos comportamientos eran previsibles de acuerdo con los respectivos $RLF_{N\&M}$ los que mostraron una tendencia a la liberación de B por la fase sólida en el suelo Chacras de Coria y de fijación en ET. Las variaciones netas observadas serían el resultado de las interacciones entre la actividad radical por un lado y la capacidad de fijación, o de liberación por el otro.

b) Interacción del suelo-cultivo-agua de riego (T2 y T3): mientras que en El Topón la concentración final de B encontrada fue menor que la teórica, especialmente en el tratamiento T3, en el suelo Chacras de Coria las diferencias, aunque no significativas, mostraron una tendencia de distinto signo, la que se acentúa en el tratamiento T3.

Esto se compadece con las propiedades de los respectivos suelos manifestadas en el $RL_{N\&M}$ comentadas en a). La fijación de Boro depende fuertemente del pH del suelo siendo máxima en el rango de 8.5 a 9.0 tal como lo evidencian muchos autores (5). El suelo ET presenta un pHs de 8.26 superior al de ChC que es de 7.86. Además, en el suelo ET se evidencian óxidos de hierro y arcilla dispersa lo que permitiría a las partículas actuar en forma individual (2, 3), adsorbiendo B en sus bordes.

c) Relaciones entre las concentraciones finales pronosticadas por el método empírico propuesto y las encontradas después del cultivo con agua CSJ: la coincidencia entre los valores pronosticados por el método del $RLF_{N\&M}$ fue excelente, no sobrepasando el error porcentual el 6% y el absoluto de 0.16 mg L^{-1} .

Tabla 6. Correspondencia de valores de boro en extractos de saturación encontrados en los ensayos en maceta y los pronosticados de acuerdo el método empírico de Nijensohn y Maffei ($RLF_{N\&M}$)

Aguas	Suelo y tratamiento	B teórico ¹ mg/L	B encontrado ² mg/L	B esperado ³ mg/L	Error ⁴ %	Diferencia 2-3 mg/L
C. San Juan	ET T2	2.023	1.51	1.44	4.63	0.07
	ET T3	3.93	2.66	2.82	6.01	-0.16
	ChC T2	2.01	2.07	2.09	0.97	-0.02
	ChC T3	3.90	4.11	4.18	1.7	-0.07
Desionizada	ET T1	0.96	0.64	0.52	18.75	0.12
	ChC T1	0.12	0.94	1.21	28.72	-0.27

- 1 Calculado teóricamente de acuerdo con las concentraciones de B -inicial en el extracto de saturación del suelo y la propia del agua- y el agregado por unidad de peso de suelo con el volumen de riego empleado para reponer el evapotranspirado.
- 2 El determinado en el extracto de saturación luego de terminado el período de cultivo: medias de 8 repeticiones en T2 y T3, y de 3 repeticiones en T1.
- 3 El resultado pronosticado por aplicación del método empírico de *Requerimiento de Lixiviación Funcional* de Nijensohn y Maffei ($RLF_{N\&M}$)
- 4 $[(B2-B3)/B2]100$

Tabla 7. Correspondencia de valores de conductividad eléctrica en extractos de saturación encontrados en los ensayos en maceta y los pronosticados de acuerdo al método empírico de Nijensohn y Maffei ($RLF_{N\&M}$)

Aguas	Suelo y tratamiento	C.E. teórico ¹ dS/m	C.E. encontrada ² dS/m	C.E. esperada ³ dS/m	Error ⁴ %	Diferencia 2-3 dS/m
C. San Juan	ET T2	2.54	2.25	2.10	6.66	0.15
	ET T3	4.11	3.00	2.97	1.01	0.03
	ChC T2	5.52	4.50	4.01	10.88	0.49
	ChC T3	8.31	6.10	6.06	0.66	0.04
Desionizada	ET T1	0.96	1.13	1.21	7.07	-0.08
	ChC T1	2.73	2.77	2.73	1.44	0.04

2. Con respecto a la CEs:

a) Interacción del suelo-cultivo-riego con agua desmineralizada (T1): en ambos suelos, el riego con agua desmineralizada aumentó, aunque muy levemente la conductividad eléctrica inicial de la solución del suelo, lo que era de esperar por la acción de la respiración radical sobre el calcáreo de la fase sólida.

b) Relaciones entre las CE finales teóricas, las encontradas y las pronosticadas por el $RLF_{N\&M}$ después del cultivo con agua CSJ (T2 y T3): en todos los casos los valores encontrados fueron menores que los teóricos resultantes de la simple sumatoria de las sales aportadas con el riego. Esto se debe, evidentemente, a la precipitación de las sales de solubilidad limitada (carbonatos alcalinotérreos y yeso). El ajuste entre los valores pronosticados y los encontrados fue satisfactorio siendo el error máximo del 11 %, el que correspondió a una diferencia absoluta de sólo 0.5 dS/m.

• **En las hojas**

Las regresiones calculadas considerando los índices finales en los extractos de saturación y los contenidos foliares mostraron en ambos suelos valores de R altamente significativos entre B_s y B_f y entre CEs y Cl_f . En las correlaciones de índices foliares entre ellos resultaron significativas las de B_f vs. Cl_f en ambos suelos, mientras que únicamente en el de ChC la de B_f vs. Na_f y la de Cl_f vs. Na_f (tabla 8). Este comportamiento de la vid en ChC podría ser debido al mayor contenido de Na en este suelo (tabla 2, pág. 4).

Tabla 8. Regresiones entre índices edáficos y foliares en ensayo de validación biológica del $RLF_{N\&M}$ n = 19

Suelos	x	y (mg/kg)	b	C	R	Rango de x	Rango de y (mg/kg)
ET	B_s mg/L	B_f	30.05	23.03	0.6779	1.08-2.85	40-123
ChC	B_s mg/L	B_f	38.45	29.15	0.8338	0.38-4.76	28-229
ET	CEs dS/m	Cl_f	1860	-1648	0.6522	1.07-3.18	1562-4722
ChC	CEs dS/m	Cl_f	1667	-2640	0.7576	2.65-6.4	1314-9692
ET	B_f mg/kg	Cl_f	35.30	198.3	0.5269	40-123	1562-4722
ChC	B_f mg/kg	Cl_f	35.60	813.2	0.7941	28-229	1314-9692
ET	B_f mg/kg	Na_f	2.302	200.5	0.1842	40-123	175-656
ChC	B_f mg/kg	Na_f	2.497	166.0	0.472	28-229	211-922
ET	Cl_f mg/kg	Na_f	51.71	860.4	0.397	1562-4722	175-656
ChC	Cl_f mg/kg	Na_f	8.13	1483.8	0.579	1314-9692	211-922

Al final del ensayo se observaron leves síntomas de bordes necrosados, característicos de cloruros, que fueron más notables en el tratamiento 3 de ambos suelos y, especialmente, en las hojas nuevas de este tratamiento en el suelo de ChC. Simultáneamente, también se notaron pequeñas ampolladuras que indicarían una incipiente intoxicación bórica. Estas observaciones conciden con los contenidos máximos de Cl y B alcanzados en este ensayo y la bibliografía (7).

CONCLUSIÓN

El método propuesto: $RLF_{N\&M}$ pronosticó dentro de un margen de error aceptable los valores edáficos determinados después del ciclo del ensayo. Las pequeñas diferencias encontradas podrían explicarse, además del inevitable error experimental, por los efectos de la respiración radical sobre la solubilidad del calcáreo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ayers, R. S. and Wescott, D. W. 1976. Calidad del agua para agricultura. Roma : FAO. p. 29-85. Estudio FAO Riego y Drenaje.
2. Keren, R. 1984. Potassium, magnesium and boron in soils under saline and sodic conditions. In : Soil salinity under irrigation, edited by I. Shainberg and J. Schalhever. Berlin : Springer Verlag, p. 77-99.
3. Keren, R. y Talpaz, H. 1984. Boron adsorption by montmorillonite as affected by particle size. Soil Sci. Soc. Am. J., 48 : 555-559.
4. Maas, E. V. 1990. Crop salt tolerance. In : Agricultural salinity assessment and management manual, edited by K. K. Tanji . New York : ASCE, p. 262-304.
5. Mezuman, U. and Keren. 1981. Boron adsorption by soils using a phenomenological adsorption equation. Soil Sci. Soc. Am.J., 45 : 722-726.
6. Nijensohn, L. 1955. Conductividad eléctrica potencial : un nuevo procedimiento para la determinación salina de aguas de riego y extractos de suelos. Boletín Técnico Instituto de Investigaciones de la Vid y del Vino Mendoza, 1(4) : 183-200.
7. _____. 1960. Intoxicación de vid por cloruros. Boletín Técnico Instituto Provincial Agropecuario Mendoza, 2 : 3-26.
8. _____. 1972. Influencia de la calidad del agua en el manejo del riego a nivel de predio. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo, 18 : 95-118.
9. Rhoades J. D.; Kandiah, A. and Mashall, A. M. 1992. The use of saline waters for crop production. Rome : FAO. FAO Irrigation and drainage. Paper 48 : 133 pp.
10. Richards, L. A. (ed.). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington : USDA. Handbook 60.
11. Suarez, D. L. 1982. Graphical calculation of ion concentration in calcium carbonate and/or gypsum soil solutions. J. Environmental Quality, 11: 302-308
12. Westerman, R. L. 1990. Soil testing and plant analysis. 3rd. ed. Berlin : Springer Verlag. SSSA Book Series, Number 1.