

## **Evolución de la salinidad de los suelos regadíos del río Tunuyán Inferior (Mendoza - Argentina)**

### **Salinity evolution in irrigated soils in the Lower Tunuyán River basin (Mendoza - Argentina)**

Fabián Tozzi <sup>1</sup>, Adriana Mariani <sup>2</sup>, Rosana Vallone <sup>1,3</sup>, José Morábito <sup>2,3</sup>

Originales: *Recepción*: 31/05/2016 - *Aceptación*: 07/12/2016

#### **RESUMEN**

La salinidad del suelo y del agua de riego afecta la producción de los cultivos impactando en la economía de los oasis regadíos. Se realizó este estudio sobre los suelos cultivados en el área de influencia del río Tunuyán Inferior, con el objeto de determinar la evolución de la salinidad edáfica, a partir de mediciones de conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CEes). El estudio abarcó los períodos 2001-2002 y 2007-2009 con determinaciones a dos profundidades (0 - 0,5 m y 0,5 - 1 m). Se trazaron curvas de isosalinidad de suelo y se analizaron los factores que inciden en la CEes: niveles freáticos, obras de impermeabilización de canales, lluvia, evapotranspiración y volúmenes derivados para riego. Los resultados muestran que existe diferencia significativa de la variación temporal de la CEes, para ambas profundidades analizadas, reflejando una disminución de la variable en el tiempo. A partir de curvas de isosalinidad se determinó para el estrato superficial que el 49% del área (2002) presentaba suelos moderadamente salinos, mientras que en el año 2009, el 60% de la superficie presentó una reducción de la salinidad. Ello se atribuye a la disminución de los niveles freáticos, producto de las obras de impermeabilización.

#### **Palabras clave**

mapas de isosalinidad de suelos • dinámica salina edáfica

- 
- 1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA Junín)
  - 2 Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino (INA-CRA). Belgrano Oeste 210, CP: 5500, Mendoza - Argentina. jamorabito53@yahoo.com.ar
  - 3 Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias. Alte. Brown 500. Chacras de Coria. Mendoza. Argentina. M5528AHB.

## ABSTRACT

Soil salinity and irrigation water affect crop production and the economy of irrigated oases. This study was carried out on cultivated soils in the command area of the Lower Tunuyán River in order to determine the evolution of soil salinity by measuring the electrical conductivity of the soil saturation extract (CEEs for its acronym in Spanish). The study comprised periods 2001-2002 and 2007-2009 and determinations were made at two different depths (0-0.5 m and 0.5-1 m). Iso-salinity curves were plotted and the factors affecting CEEs were analyzed: water table levels, irrigation canal lining, rainfall, evapotranspiration and volumes derived for irrigation. Results showed that there is a significant difference in the temporal variation of the CEEs at both depths, with a decreasing trend through time. Iso-salinity curves made it possible to determine that in 49% of the superficial strata (2002) soils were moderately saline, while in 2009, 60% of the area showed that canal lining led to a reduction in salinity levels due to decreasing water tables.

### Keywords

soil iso-salinity maps • soil-salinity dynamics

## INTRODUCCIÓN

Los problemas de salinidad o de acumulación de sodio en exceso ocasionan un deterioro acelerado en la calidad de los suelos y una disminución del potencial productivo provocando pérdidas importantes en la producción agrícola de la zona (1).

En general, la presencia de sales solubles pueden afectar de tres formas el crecimiento de las plantas: i) efectos de toxicidad por iones específicos (por ejemplo, cloruros, sodio, boratos); ii) desbalances iónicos e interacciones en la absorción de nutrientes y iii) disminución del potencial hídrico del suelo, restringiendo la absorción de agua por las raíces de las plantas (22).

Las distintas especies vegetales difieren grandemente en su respuesta al crecimiento en ambientes salinos y a los mecanismos fisiológicos involucrados, esto ha sido ampliamente revisado y compendiado en la literatura mundial (13, 14, 15, 20, 28).

Otros autores han dado pautas sobre elección y manejo de los cultivos bajo condiciones salinas Loomis (1983), Abrol *et al.* (1977); Maas (1993), como también estrategias de utilización de plantas resistentes a la salinidad y producción de nuevos genotipos tolerantes (2, 36, 38).

En el suelo, el exceso de sodio en el complejo de intercambio conduce a su dispersión, lo que conlleva a problemas de infiltración del agua, aireación y penetración de raíces (4, 15) lo cual implica labores de recuperación y manejos especiales (1, 7, 17, 36).

FAO and ITPS (11) expresa que en Argentina más de 70 millones de hectáreas se encuentran afectadas por suelos salinos, y al menos 600.000 hectáreas de suelos irrigados bajo climas áridos y semiáridos se ven afectados por salinización antropogénica, a menudo relacionada con la gestión de drenaje inadecuado y/o mala calidad del agua.

Según FAO (2015), en Argentina existen dos procesos mayoritarios de afectación por sales y/o sodio, resultantes de la aplicación de agua de riego: 1) el que se verifica en las regiones áridas y semiáridas del país, estrechamente vinculado con láminas importantes de riego, elevación del plano freático, traslado de sales disueltas hacia el perfil del suelo y depósito de las mismas en superficie y 2) el relacionado con el riego complementario presurizado con agua bicarbonatada sódica que ocurre en la región pampeana, cuyo efecto inmediato es el deterioro de la matriz del suelo por dispersión, disminución de la infiltración, intercambio gaseoso en el perfil y generación de toxicidad en los cultivos.

El estudio menciona que Argentina cuenta con 412.338 ha afectadas con problemas de salinidad, el 41,3% de la superficie, está vinculada con procesos de sodificación y el 58,7% restante a procesos exclusivos de salinización o sinérgicos de salinización y sodificación. Menciona además que el drenaje -en sus versiones a cielo abierto y entubado- la adecuación del tiempo de avance del riego gravitacional, las enmiendas y el ajuste de láminas en riego presurizado, aparecen como herramientas para recuperar el 20% de la superficie comprometida. Recomienda, por último, promover la recuperación de las tierras afectadas por problemas de salinidad e incentivar el mejoramiento de los indicadores de desempeño en el uso del riego, tanto para fuentes superficiales como subterráneas, particularmente en aquellos sistemas afectados por la salinidad.

FAO -en el documento arriba citado- menciona que Mendoza posee un 26,4% de suelos efectivamente regados con algún grado de afectación, particularmente en el Oasis Norte, superficie que se

intensifica en ciertos lugares como la zona central, centro norte y norte de la cuenca del río Mendoza y con valores inferiores en el río Tunuyán. También existe afectación en los suelos del área central, en el límite este de la superficie regada, lo que es coincidente con el uso de agua subsuperficial. El proceso ha mantenido cierta estabilidad en las cuencas de los ríos Tunuyán y Mendoza durante los recientes ciclos hidrológicos, con una profundidad del plano freático entre 1 y 2 m, una CE del agua de riego de 0,9 a 1,35 dS.m<sup>-1</sup> y del agua de drenaje de 3 a 3,5 dS.m<sup>-1</sup>, con un RAS de 2,45.

Vallone *et al.* (2007), relevaron la salinidad de los suelos a escala 1:200.000 en todos los oasis regadíos de la provincia de Mendoza y determinaron que en la cuenca del (RTI) el 25% de la superficie presentaría valores de conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEes) mayores a 4 dS m<sup>-1</sup>.

Importantes estudios realizados en relación con la estimación de impacto del cambio climático sobre los Andes centrales sudamericanos -donde se encuentra la provincia de Mendoza- predicen escenarios de escasez del recurso hídrico: reducción promedio del 10% (con valores extremos del 7 al 13%) en los caudales de los ríos provinciales para los años 2021 al 2030 (35). Esa reducción de los caudales afectaría la salinidad del agua superficial incrementándola (27).

Deis *et al.* (2015) realizaron un análisis de los índices climáticos que contempla la precipitación anual en la estación San Martín en los últimos 50 años, detectando una disminución de los días de lluvia pero con aumento de la precipitación anual, es decir, menor cantidad de eventos pero de mayor magnitud cada uno.

La cuenca del río Tunuyán -provincia de Mendoza- abarca una superficie de

18.954 km<sup>2</sup>, situada en las zonas centro-norte y centro de la provincia, dando origen a las subcuencas superior e inferior. El dique embalse El Carrizal, de 360 hm<sup>3</sup> de capacidad, almacena los caudales no utilizados en la subcuenca alta, delimitando el extremo superior de la subcuenca del RTI (21).

La subcuenca del RTI se desarrolla en una llanura que disminuye en altura de 800 a 500 metros en sentido oeste-este. Tanto el clima como los suelos son favorables para la producción de viñedos de alta calidad y adecuada productividad, aprovechándose además para el cultivo de durazneros, ciruelos y olivos entre otros. En esta subcuenca, con aproximadamente 100.000 ha habilitadas para riego superficial y alrededor de 7.800 establecimientos agrícolas se destaca la vitivinicultura sobre todas las otras actividades (64% de la superficie regada), seguida en orden de importancia por la producción de frutales entre los que se encuentra el olivo, las hortalizas y las pasturas y actividades forestales. En suma, la superficie cultivada con vid, con derecho a riego que utiliza agua subterránea sobrepasan las 50.000 ha (21).

Chambouleyron *et al.* (2002) estiman un aumento de la salinización del agua (hasta 1,4 dS.m<sup>-1</sup>) y de los suelos de la subcuenca inferior como consecuencia de la disminución de caudales aguas abajo de la cuenca superior. La misma estaría afectada por un fuerte crecimiento de la superficie cultivada con viticultura de calidad (más de 15.000 ha del cultivar Malbec), regada casi exclusivamente con riego presurizado localizado, a expensas del bombeo intensivo. Este escenario estaría alertando sobre posibles aumentos de salinidad del agua y lógicas disminuciones de producción de los cultivos que con ella se riegan y su impacto en la economía regional y nacional.

Morábito *et al.* (2004) muestran mapas con altos niveles salinos vinculados con problemas de drenaje subsuperficial en las zonas centro y norte del área regadía del río Mendoza. Igualmente se observan problemas similares en el área comprendida entre el río Mendoza y el río Tunuyán donde estos presentan su mayor cercanía. Los autores afirman también que considerando el factor estado del suelo (cultivado e inculco), y para un ( $\alpha \leq 0,05$ ) en todos los casos analizados, la CEes del suelo inculco es significativamente superior a la del suelo cultivado. Cuando se analiza la totalidad del área sujeta a estudio (372.610 ha), se observa que el 63% de la cuenca tiene niveles de salinidad edáfica en el primer medio metro de suelo, inferiores a 8 dS.m<sup>-1</sup>.

Con respecto al uso del suelo y su correspondencia con los distintos niveles de salinidad, el trabajo permite visualizar con claridad cómo la superficie cultivada (51% del total) disminuye a medida que aumenta la salinidad del suelo y prácticamente se hace nula cuando esta supera los 8 dS m<sup>-1</sup>.

Morábito *et al.* (2010) en un trabajo sobre la evolución de la salinidad de suelos regadíos realizado dentro del área cultivada en la cuenca del río Mendoza, colindante con la cuenca del RTI, concluye que no existen diferencias significativas de CEes entre las lecturas obtenidas en los años 1973 y 2002.

En estudios realizados sobre la problemática de la salinidad de los suelos (Mirábile *et al.*, 2010) se observó que en el área de regadío del RTI los agricultores tienden a aplicar láminas de riego que superan con creces los requerimientos de lixiviación y que los problemas de salinidad de suelo se debían a la existencia de sectores con niveles freáticos elevados.

El mismo autor indica además que durante el año 2002 se había producido una desalinización significativa ( $\alpha \leq 0,05$ ) de los suelos en aproximadamente el 60% de la subcuenca, no encontrando diferencias significativas en la salinidad de los suelos cultivados cuando se comparaban las dos profundidades para un mismo año de estudio. Por el contrario, se encontró diferencias significativas ( $\alpha \leq 0,05$ ) cuando la comparación se efectuaba entre los años 1985 y 2002.

No obstante, debido al crecimiento del área cultivada en la cuenca del río Tunuyán Superior, es que resulta necesario monitorear la salinidad en los suelos de la cuenca baja, para asegurar la sustentabilidad del sistema.

### Objetivos

Determinar la evolución espacial-temporal de la salinidad edáfica, a partir de mediciones de conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CEes) en la zona cultivada de la subcuenca del RTI.

Disponer de información básica para elaborar estrategias de recuperación de los suelos.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Geográficamente la zona de estudio comprende los departamentos de Junín, San Martín y Rivadavia y geomorfológicamente se encuentra en zonas de mesetas y llanuras, donde la presencia de salinas determina la aridez de la región. La temperatura media anual de 14°C y la precipitación media anual de 200 mm, caracterizan a un clima seco y fresco que es el que predomina en este sector. Las lluvias se dan en verano y primavera, siendo la evapotranspiración media anual de 1525 mm (24). El agua de riego utilizada en la zona, presenta valores de salinidad del orden de 1,4 dS.m<sup>-1</sup> con una desviación estándar de 0,18, siendo el RAS

de 1,5 con una desviación estándar de 0,42 (30), correspondiéndole la categoría C3-S1 según Riverside modificada por Thorne y Petersen (3).

En la zona predominan los suelos de texturas franco arenosa a francas (5). La clasificación utilitaria de suelos con fines de riego más reciente en la subcuenca del RTI, resulta en 16,9% Clase I, 67,8% Clase II, 11,8% Clase III, 3,2% Clase IV y 0,2% Clase VI (34).

En cuanto a los cultivos predominantes, la vid, olivo, frutales de carozo (duraznero, ciruelo y damasco), hortalizas (tomate y ajo) y forrajeras. Es importante destacar que la zona se riega con recurso superficial, subterráneo o una combinación de ambos (21).

Para el diseño estadístico del muestreo se tomó como unidad de análisis la propiedad o finca. El tamaño de muestra fue diseñado en el año 2002 para un error de muestreo del 10% con respecto a la media de la CEes para ambas profundidades. Se utilizaron datos (desviación típica y media) obtenidos de trabajos previos (Mirábile *et al.*, 2010) y un valor de  $z = 1,96$  que es el valor relacionado con el 0,95 de probabilidad (95% de confiabilidad). Este diseño llevó a una muestra de  $n_1 = 142$  unidades. En el año 2007 por motivos económicos se tomó una muestra menor de  $n_2 = 88$ , lo que llevó a un error de estimación del 14% válido a los fines del presente estudio. Posteriormente se verificaron los errores de estimación en función de los estadígrafos obtenidos.

La selección de las fincas fue realizada teniendo en cuenta principalmente dos criterios: primero, que las mismas se distribuyeran aproximadamente en igual cantidad en las diferentes zonas de riego y sobre los canales más representativos de cada una de ellas y segundo, tomadas sobre propiedades con derecho de riego superficial. Dentro de estas zonas las propiedades se seleccionaron en forma aleatoria.

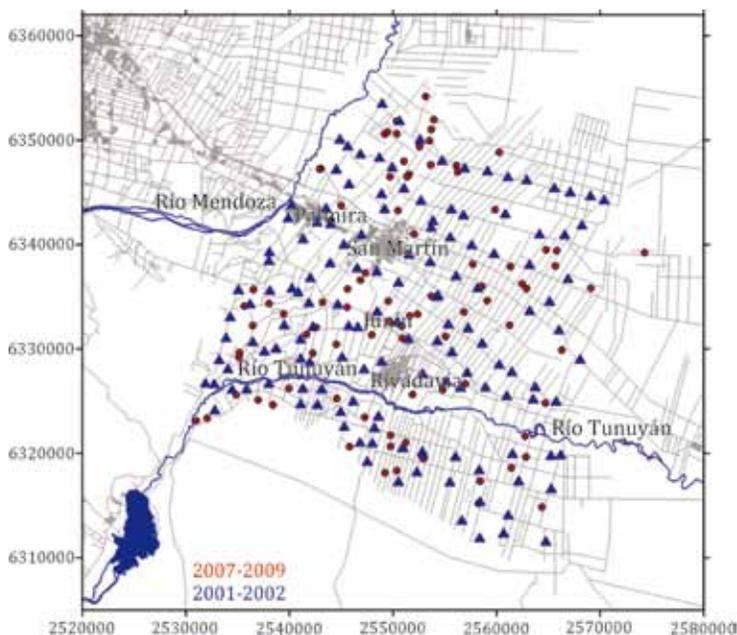
Se realizaron dos campañas de muestreo en la zona cultivada, la 1<sup>o</sup> durante el período agosto 2001-octubre 2002 en la que se relevaron 142 sitios y la 2<sup>o</sup> durante el período otoño 2007-otoño 2009, con 88 sitios de muestreo. En cada uno de los sitios se extrajeron muestras de suelo a dos profundidades: 0-0,50 m y 0,50 - 1 m, en las cuales se determinó la CE<sub>s</sub>, por el método del extracto de saturación (USDA) (33), corregida a temperatura de 25°C. La figura 1 muestra la ubicación de los sitios de muestreo: 142 (campaña 2001-2002) y 88 (campaña 2007-2009).

A fin de identificar áreas y evolución de la salinidad del suelo en la zona de estudio, se trazaron curvas de isosalinidad para las dos profundidades mencionadas en ambas campañas de muestreo utilizando el programa SURFER (32), con equidistancia de 2 dS.m<sup>-1</sup>.

A partir de la superposición de las curvas de isosalinidad se determinó la superficie porcentual que presentaba incremento o disminución de las CE<sub>s</sub>, con el objeto de determinar la evolución a fin de visualizar fácilmente la tendencia de la salinidad en la zona de estudio.

Se analizó la normalidad (test de Shapiro-Wilk) de la variable CE<sub>s</sub>, se determinaron las medidas de posición y dispersión de las muestras analizadas, y -a partir del test de Wilcoxon- se compararon las medianas a fin de identificar diferencias significativas ( $\alpha \leq 0,05$ ) entre ellas.

Se realizaron las siguientes comparaciones: (1) dentro de cada época de muestreo (2002 y 2009) y para cada profundidad de suelo (0 a 0,50 y 0,50 a 1 m) y (2) el ciclo 2002 *versus* el 2009, para cada profundidad de suelo (0 a 0,50 y 0,50 a 1 m).



**Figura 1.** Puntos de muestreo campañas 1 (2001-2002) y 2 (2007-2009).

**Figure 1.** Sampling points - periods 1 (2001-2002) and 2 (2007-2009).

La clasificación de los suelos se realizó siguiendo la "Guía para la descripción de suelos" (9), que considera suelos no salino a aquellos que tienen la CEes menor a  $0,75 \text{ dS.m}^{-1}$ , ligeramente salino ( $0,75$  a  $2 \text{ dS.m}^{-1}$ ), moderadamente salino ( $2$  a  $4 \text{ dS.m}^{-1}$ ), fuertemente salino ( $4$  a  $8 \text{ dS.m}^{-1}$ ), muy fuertemente salino ( $8$  a  $15 \text{ dS.m}^{-1}$ ) y extremadamente salino (mayor a  $15 \text{ dS.m}^{-1}$ ).

Se analizaron distintos factores que podrían justificar la tendencia a la disminución de la salinidad, entre los cuales se destacan la disminución de niveles freáticos, las nuevas obras de impermeabilización de canales, la precipitación y las láminas de riego aplicadas.

A los últimos dos factores se les aplicó el test de Mann-Kendall, a fin de detectar la existencia de tendencia monótona o cambio (gradual o súbito), durante los ciclos analizados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación del Test de Shapiro-Wilk, para analizar estadísticamente la variable CEes, permitió rechazar la hipótesis de

normalidad de las muestras a distinta profundidad en ambas campañas. Se calcularon además las medidas de posición y dispersión (tabla 1) y se graficaron los diagramas de cajas (figura 2, pág. 86).

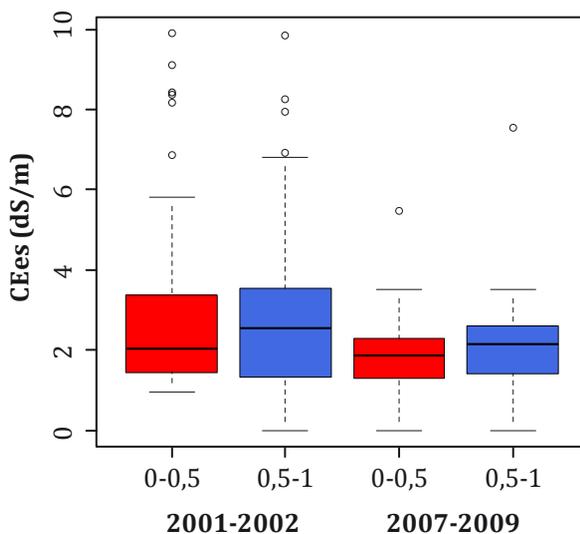
A partir de los diagramas de cajas y bigotes, se observa en todos los casos una asimetría con un incremento de la variable CEes en profundidad y una disminución en el tiempo. En la campaña 1 el 25% de los valores supera los  $3,23 \text{ dS.m}^{-1}$  y  $3,50 \text{ dS.m}^{-1}$  en superficie y profundidad respectivamente, mientras que en la campaña 2 fueron de  $2,30 \text{ dS.m}^{-1}$  y  $2,5 \text{ dS.m}^{-1}$  mostrando claramente la tendencia decreciente de la CEes en el tiempo. Por otro lado, los valores atípicos o extremos observados durante la campaña 1, presentes en las dos profundidades muestreadas, se redujeron notoriamente en la campaña 2, mostrando una menor dispersión de los datos.

Luego se aplicó el test de Wilcoxon, a fin de comparar las medianas de las muestras relacionadas y determinar si existieron o no diferencias significativas entre ellas, partiendo de la premisa que las muestras no presentan normalidad.

**Tabla 1.** Salinidad del extracto de saturación del suelo. Medidas de posición y dispersión, según profundidad (campañas 1 y 2).

**Table 1.** Salinity of the soil saturation extract. Measures of position and dispersion according to soil depth (periods 1 and 2).

Estimadores	CEes: campaña 1		CEes : campaña 2	
	0-0,5 m	0,5-1,0m	0-0,5 m	0,5-1,0m
Mínimo ( $\text{dS.m}^{-1}$ )	0,958	0,823	0,562	0,544
Máximo ( $\text{dS.m}^{-1}$ )	9,900	9,860	5,470	7,540
Promedio ( $\text{dS.m}^{-1}$ )	2,563	2,653	1,905	2,080
Mediana ( $\text{dS.m}^{-1}$ )	2,025	2,580	1,875	2,152
Desvío estándar	1,669	1,617	0,796	0,988
Coefficiente de variación	0,64	0,61	0,41	0,47
Número de observaciones	142	141	88	88
Error de estimación (%)	10,7	10,1	8,7	9,9



**Figura 2.** Diagrama de caja y bigotes para la campaña 1 y 2, a profundidades de 0-0,5 m; y 0,5-1 m.

**Figure 2.** Box-and-whisker plot for period 1. V1: 0-0.5 m soil depth; V2: 0.5-1 m soil depth.

Primeramente se contrastaron para cada campaña las muestras obtenidas a ambas profundidades: en la campaña 1 no se encontraron diferencias significativas ( $\alpha \leq 0,05$ ) al contrario que en la campaña 2, ratificando lo observado en la figura 2.

En referencia a la variación de la CEs en el tiempo, más precisamente, en los ciclos 2001-2002 y 2007-2009, los resultados muestran para ambas profundidades diferencias significativa ( $\alpha \leq 0,05$ ), evidenciando una tendencia a la disminución de la salinidad.

Esta tendencia a la disminución de la salinidad puede deberse a varios factores, entre los cuales se destacan: a) una reducción de las áreas afectadas con problemas de niveles freáticos cercanos a la superficie del suelo, como consecuencia de la impermeabilización de los canales de riego (esencialmente primarios

y secundarios) y b) un incremento de las precipitaciones o de los volúmenes derivados para riego en los años previos al muestreo del ciclo 2007-2009 respecto de los años anteriores al ciclo 2001-2002.

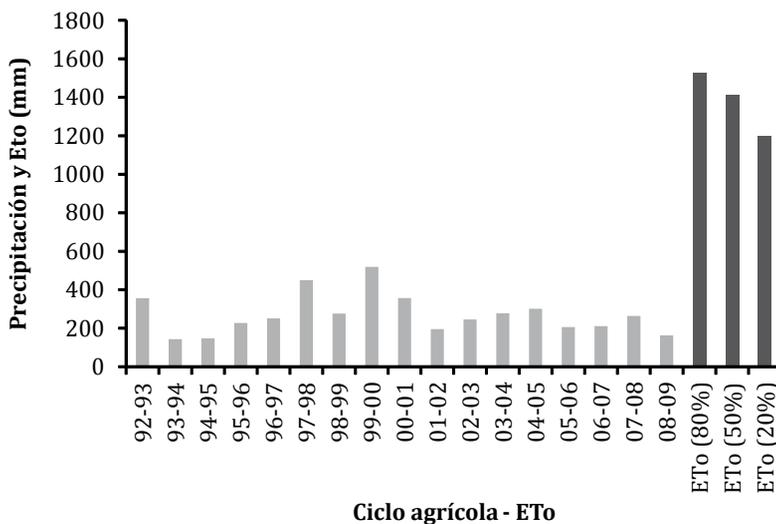
Respecto del factor a) se analizaron estudios realizados por Ortiz Maldonado (2015, 2016) en la zona de la cuenca del RTI, encontrando valores medios anuales de la profundidad freática de 2,59 m para el año 2002 y de 3,93 m para el año 2008, lo cual evidencia un importante descenso de las napas freáticas de 1,34 m en el período 2002-2009.

Se realizó además un análisis del estado de la red de riego del área regadío del RTI (8). El área posee una red de 2588 km de canales, de este total 383 km son primarios, 426 km son secundarios y 1779 km son terciarios; solo el 7,3% estaba revestido al año 2000. Debido a que una alta proporción de los suelos poseen

texturas franco arenosa a francas (5, 33), las pérdidas de agua en la red de canales es alta, lo cual contribuye con la elevación de los niveles freáticos. Es necesario recordar que los canales primarios están dotados con agua la mayor parte del tiempo, mientras que los terciarios distribuyen agua por turnado, uno de cada ocho a doce días. Durante el período 2001-2009, se revistieron un 4,7% de la red, alcanzando un total de 12%. Si bien el porcentaje de canales revestidos respecto del total es aún bajo, los canales primarios impermeabilizados entre el año 2001-2009 tuvieron un incremento del 43% (se revistieron 63 km sobre 150 km que existían al año 2000). Un análisis similar puede ser realizado en los canales secundarios, que pasaron de 31 km en el año 2000 a 86 km en el año 2009 (55 km nuevos) generando un

aumento del 177%. Estos importantes incrementos en la proporción de canales primarios y secundarios impermeabilizados han reducido fuertemente las pérdidas por infiltración contribuyendo al marcado descenso de las napas freáticas en la zona.

Con respecto al factor b) se analizaron las precipitaciones diarias registradas en la estación San Martín perteneciente al SMN, en el período 1992-2009. La figura 3 muestra los valores de precipitación total por ciclo agrícola (julio-junio) desde el año 1992 al 2009. Se observa que los valores promedios de los ciclos 1992-2001 y 2001-2009 son de 302,8 mm y 232,8 mm respectivamente, con valores máximos superiores a los 400 mm en los ciclos 99-00 y 97-98.



**Figura 3.** Precipitación por ciclo agrícola y evapotranspiración del cultivo de referencia para distintas probabilidades de ocurrencia.

**Figure 3.** Precipitation per agricultural cycle and crop evapotranspiration for different probabilities of occurrence.

La prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall, de análisis de tendencia de la precipitación acumulada por ciclo agrícola desde 1992-2009 arrojó un valor de  $Z = -0,12$ , lo cual indica que no existe tendencia estadísticamente significativa (tabla 2). Así, se puede asociar el valor del estadístico  $S$  estandarizado al de la variable  $Z$  -normal estandarizada- y calcular el nivel de significación de la prueba (valor-p).

Por otro lado, se compararon los valores de precipitación por ciclo para la estación San Martín, con los valores de evapotranspiración de referencia  $ETo$ , según probabilidad de ocurrencia, y se observa que la

$ETo$  es 4,4 a 5,6 veces mayor que la precipitación (figura 3, pág. 87) (23).

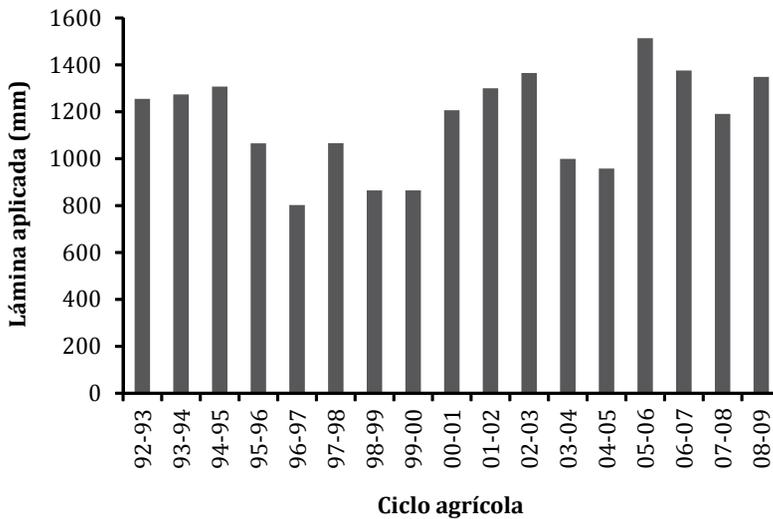
La figura 4 presenta las "láminas de riego aplicadas" durante los diferentes ciclos agrícolas (julio 1979-junio 2009) obtenidas a partir de la transformación de los volúmenes (8) derivados para riego desde el dique Tiburcio Benegas (cabecera del área regada) y la superficie efectivamente regada de 86.454 ha.

Los resultados del estudio de análisis de tendencia (Mann-Kendall) a dichas láminas (alturas de agua) muestran un valor de  $Z = -0,68$ , lo que indica que no existe tendencia estadísticamente significativa de la variable analizada (tabla 3).

**Tabla 2.** Resultados del análisis estadístico de tendencias de precipitaciones según Mann-Kendall.

**Table 2.** Results of the statistical analysis of precipitation trends according to the Mann-Kendall test.

S	VARs	Z	B (estimador de la pendiente)
-4,0	589,3	-0,12	-0,005



**Figura 4.** Lámina de agua aplicada en el área de estudio por ciclo agrícola.

**Figure 4.** Water depth applied to the area per agricultural cycle.

**Tabla 3.** Resultados del análisis estadístico de tendencias de láminas aplicadas.

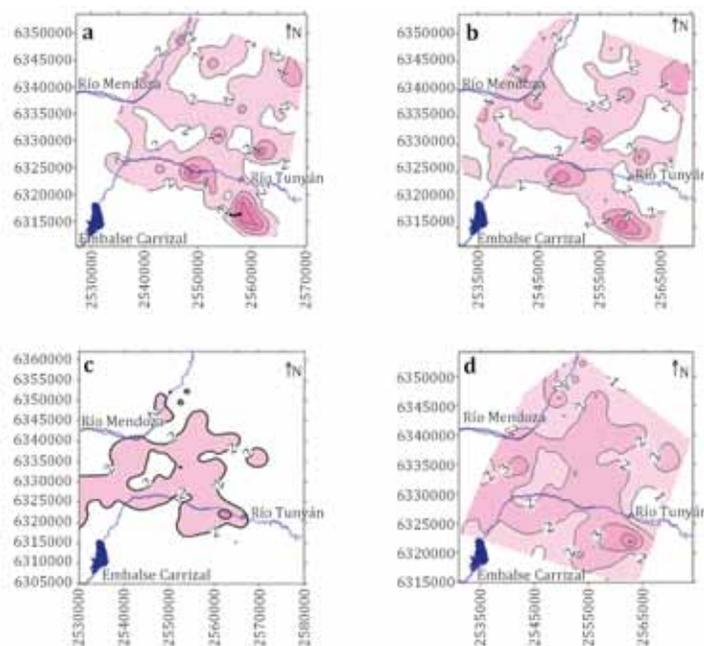
**Table 3.** Results of the statistical analysis of water depth trends.

S	VARS	Z	B (estimador de la pendiente)
-39,0	3141,7	-0,68	-0,002

Del análisis de los factores que podrían explicar la disminución de la CEs, se observa que dicha disminución se debería a la profundización de los niveles freáticos causado por la reducción de las pérdidas por infiltración debidas a la impermeabilización de los canales de riego.

En lo que respecta al análisis espacial de la CEs, la figura 5, presenta los mapas de isosalinidad en coordenadas geográficas

Gauss-Kruger. Se determinó que en la campaña 1 -y según la clasificación de FAO (2009)- el 49 % de la superficie a nivel de estrato superficial y el 55 % del estrato más profundo corresponden a suelos moderadamente salinos ( $2$  a  $4$  dS.m<sup>-1</sup>), mientras que 45 % y 38% de los estratos superficiales y profundos respectivamente, son ligeramente salinos ( $0$ - $2$  dS.m<sup>-1</sup>) (figura 5 a y b, tabla 4, pág. 90).



Ref.: a) Campaña 1: estrato 0 - 0,5 m; b) Campaña 1: estrato 0,50 - 1 m; c) Campaña 2: estrato 0 - 0,5 m; d) Campaña 2: estrato 0,50 - 1 m.

Ref: a) Period 1: 0-0.5 m soil depth; b) Period 1: 0.50-1 m soil depth; c) Period 2: 0-0.5 m soil depth; d) Period 2: 0.50-1 m soil depth.

**Figura 5.** Mapas de isosalinidad de suelo en la cuenca del RTI, para los estratos superficial y profundo, correspondientes a las campañas 1 y 2.

**Figure 5.** Soil iso-salinity maps of the superficial and deep strata of the Lower Tunuyán River Basin for periods 1 and 2.

Un análisis similar para la campaña 2, muestra que a nivel superficial el 60% del área posee suelos ligeramente salinos y el 39% moderadamente salinos, mientras que a mayor profundidad los porcentajes son 42 y 56%, respectivamente (figura 5 c y d, pág. 89; tabla 4).

En la campaña 1 se obtuvieron valores puntuales mayores a  $8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , los cuales no superaban el 1% de la superficie tanto en los estratos superficiales como en los profundos; en la campaña 2, por el contrario, no se encontraron valores en dicho rango, sin embargo los mayores valores del orden de los  $7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , se registraron en la misma zona que en la campaña 1.

Se observa así una clara tendencia a la disminución de la salinidad, alcanzando un 64% de la superficie en el estrato superficial y un 90% en los estratos más profundos (tabla 5).

Es importante mencionar que Mirábile *et al.* (2010), analizando y comparando el período 1985-2002, advierten también una tendencia a la disminución de la salinidad en el área, en aproximadamente un 60% de la superficie analizada.

## CONCLUSIÓN

El presente trabajo demuestra que la CEes en el suelo ha disminuido significativamente ( $\alpha < 0,05$ ) en el área de estudio entre las campañas 1 y 2. Esta disminución se ha evidenciado tanto en superficie como en profundidad. Además se encontraron diferencias significativas entre las dos profundidades en la campaña 2007-2009.

Espacialmente se ha observado un incremento del área correspondiente a suelos clasificados como ligera y moderadamente salino del 93% (2001-2002) al 99% (2007-2009), confirmando la disminución de los tenores salinos.

**Tabla 4:** Porcentaje de superficies afectadas por salinidad y rangos de CEes.

**Table 4:** Salinity affected areas (%) and ECe ranges.

CEes ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ )	Superficie afectada (%)			
	Campaña 1		Campaña 2	
	Profundidad		Profundidad	
Rango	0-0,50 m	0,50-1 m	0-0,50 m	0,50-1 m
0 - 2	45,03	37,87	60,46	42,57
2 - 4	48,69	54,56	39,26	56,20
4 - 8	5,96	7,51	0,28	1,23
>8	0,32	0,07	0,00	0,00

**Tabla 5.** Variación de salinidad años 2002-2009.

**Table 5.** Soil salinity variations 2002-2009.

Año 2002 - 2009	Variación superficie afectada (%)	
Profundidad	0 a 0,5 m	0,5 a 1 m
Aumento	36	10
Disminución	64	90

Además se han analizado los factores que inciden en este proceso: variación de los niveles freáticos, obras de impermeabilización de canales, precipitación, ETo y lámina de agua derivada para riego. El trabajo demuestra que no se ha observado una tendencia significativa de la precipitación y de las láminas de riego aplicadas en el área regadía que incida sobre la CEes. Se destaca que la ETo es aproximadamente 5 veces mayor que la precipitación, descartando la incidencia de esta última sobre el parámetro analizado.

Por otro lado, en el mismo período se ha observado un marcado descenso de los niveles freáticos y de las áreas afectadas, en concordancia con importantes obras de impermeabilización de canales en el área

de estudio (incrementos del 43% y 177% en los canales primarios y secundarios respectivamente).

Por lo tanto, la disminución de la CEes debería ser atribuida a la disminución de los niveles freáticos y de sus áreas afectadas, producto de adecuadas obras de infraestructura de riego.

Se destaca, que el monitoreo de la salinidad de los suelos en conjunto con la elaboración de mapas de curvas de isosalinidad conforman una importante herramienta para el análisis y evaluación de la situación del oasis. Esta información contribuye también a implementar estrategias de riego, a recuperar los suelos y a planificar la asignación del recurso hídrico disponible.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Abrol, I. P.; Yadav, J. S. P.; Massoud, F. I. 1988. Salt affected soil and their management. FAO. Soil. Bull. 39:131. Rome, Italy.
2. Agüero, C.; Dandekar, A. M.; Meredith, C. P. 2005. Transgenic grapevine plants expressing green fluorescent proteins targeted to the apoplast. *Acta horticulturae*. 689(689): 475-480.
3. Avellaneda, M.; Bermejillo, A.; Mastrantonio, L. 2004. Aguas de riego: calidad y evaluación de su factibilidad de uso. EDIUNC. Mendoza, Argentina.
4. Bresler, E.; Mc Neal, B. L.; Carter, D. L. 1982. Saline and sodic soils: principles, dynamics, modeling. Springer Verlag, New York. Gerasimov, I. P. 1960.
5. Chambouleyron, J.; Marchevsky, P.; Poletto, M.; Delgado, S. 1975. Clasificación utilitaria con fines de riego de los suelos agrícolas del área media del río Tunuyán. INCyTH-INTA-DGI-CRAS. Mendoza, Argentina.
6. Chambouleyron, J.; Salatino, S.; Drovandi, A. y otros. 2002. Conflictos Ambientales en áreas regadías. Evaluación de impactos en la cuenca del río Tunuyán, Mendoza, Argentina. UNCuyo-FONCYT-INA, Mendoza (ISBN 987-1024-17-7).
7. Dagar, J. C.; Minhas, P. S. 2016. Global perspectives on agroforestry for the management of salt-affected soils. In: *Agroforestry for the Management of Waterlogged Saline Soils and Poor-quality Waters*, Edition: 1<sup>st</sup>, Publisher: Springer, Editors: JC Dagar & PS Minhas. p. 5-32.
8. Deis, L.; de Rosas, M. I.; Malovini, E.; Cavagnaro, M.; Cavagnaro, J. B. 2015. Impacto del cambio climático en Mendoza. Variación climática en los últimos 50 años. Mirada desde la fisiología de la vid. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 47(1): 67-92.
9. DGI. 2009. Planes Directores del Departamento General de Irrigación. Mendoza, Argentina
10. FAO. 2009. Guía para la descripción de suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
11. FAO. 2015. Estudio del potencial de ampliación del riego en Argentina. UTF/ARG/017 Desarrollo Institucional para la Inversión. UCAR - PROSAP. Roma, Italia.

12. FAO and ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR)-Main Report Chapter 12: Regional Assessments of Soil Changes in Latin America and the Caribbean. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. Available in: <http://www.fao.org/3/a-bc601e.pdf>
13. Flowers, T.; Troke, P. F.; Yeo, A. R. 1977. The mechanism of salt tolerance in halophytes. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 28: 89-121.
14. Galinski, E. A. 1993. Compatible solutes of halophilic eubacteria: molecular principles, water-solute interaction, stress protection. *Experientia.* 49: 487-496.
15. Greenway, H; Munns, R. 1980. Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31: 149-190.
16. Hoffman, G. J.; Jobs, J. A. 1983. Leaching requirement for salinity control. III. Barley, cowpea, and celery. *Agric. Water Manage.* 6: 1-14.
17. Kahlow, M. A.; Tahir, M. A.; Ashraf, M. 2003. Water quality issues and status in Pakistan. Proceedings of seminar on strategies to address the present and future water quality issues. Pakistan Council of Research in Water Resources Islamabad. Publication No. 123.
18. Loomis, R. S. 1983. Crops manipulation for efficient use of water. In H.M. Taylor, W.R. Jordan and T.R. Sinclair (Editors). Limitations to efficient water use in crop production. ASA-CSSA- SSSA. Madison WI. p 345-374.
19. Maas, E. V. 1993. Testing Crops for Salinity Tolerance. Proc. Workshop on Adaptation of Plants to Soil Stresses. p. 234-247. In: J. W. Maranville, B. V. Baligar, R. R. Duncan, J. M. Yohe. (Eds.). INTSORMIL. Pub. No. 94-2, Univ. of Ne, Lincoln. U.S. Salinity Laboratory, USDA-ARS. Riverside, CA.
20. Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plant, 2nd Ed. Academic Press, San Diego, CA. 889 p.
21. Martínez, S. J. 2009. Cuenca N° 57 Cuenca del Río Tunuyán. Sitio web de la Subsecretaría de recursos hídricos: [http://www.hidricosargentina.gov.ar/documentos/referencias\\_i8/57.pdf](http://www.hidricosargentina.gov.ar/documentos/referencias_i8/57.pdf)
22. Mengel, K.; Kirkby, E. A. 2001. Principles of plant nutrition. 5th Eds. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 849 p.
23. Mirábito, C.; Morábito, J.; Manzanera, M.; Tozzi, D. 2010. Dinámica de la salinidad del suelo en el oasis del río Tunuyán Inferior comparación 1985-2002. III Jornadas de Actualización en Riego y Fertirriego. Mendoza. Disponible en <http://www.ina.gov.ar/cra/index.php?cra=39>
24. Morabito, J.; Martínez Tivoli, J.; Salatino, S.; Mirabile, C. 2002. Necesidades de riego en el área de influencia del río Mendoza. XIX Congreso Nacional del Agua. Córdoba Argentina.
25. Morábito J.; Mirábito, C.; Pizzuolo, P.; Tozzi, D.; Manzanera, M.; Mastrantonio, L. 2004. Salinidad de suelos regadíos e incultos en el oasis norte de Mendoza-Argentina. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, Entre Ríos-Argentina.
26. Morábito, J.; Mirábito, C.; Manzanera, M.; Cappé, O.; Tozzi, D.; Mastrantonio, L. 2010. Evolución de la salinidad de suelos regadíos e incultos en el área del río Mendoza. XX Congreso Nacional Del Agua - III Simposio De Recursos Hídricos Del Cono Sur. Conagua 2005. Argentina.
27. Morábito, J. A.; Salatino, S.; Campos, S.; Maffei, J.; Mastrantonio, L.; Stocco, A.; Mestre Sanchis, F.; Genovese, D. 2012. Estimación de los incrementos de la salinidad del agua superficial en la cuenca del río Tunuyán como consecuencia del impacto climático. Congreso de Riego de Albacete. AERYD-CERYD. España.
28. Munns, R.; Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology, Australia.* 59: 651-681.
29. Ortiz Maldonado, G. 2016. Base de datos de niveles freáticos del área de regadío del río Tunuyán Inferior. Departamento General de Irrigación, Mendoza.
30. Ortiz Maldonado, G.; Femenía, A.; Carmona, V.; Morales, H. 2015. Evolución de las profundidades y salinidades freáticas durante el período seco 2008-2014 en "Lavalle" y "río Tunuyán Inferior" - provincia de Mendoza. Conagua 2015. Entre Ríos.
31. Salatino, S.; Morabito, J.; Bermejillo A.; Dediol C.; Stocco A.; Tapia O.; Miralles S.; Hernández R.; Mastrantonio, L.; Genovese, D.; Ortiz, N. (2016, en prensa). Río Tunuyán Superior (Mendoza, Argentina) Ocho años de registros de calidad de agua. Análisis evolutivo de la contaminación. Revista AUGM-DOMUS. Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
32. SURFER. Surface Mapping System, version 11.6.1159. 2013. Golden software Inc. USA.

33. USDA. 1954. Manual de diagnóstico y recuperación de suelos salinos y sódicos. Manual de Agricultura N° 60. USA.
34. Vallone, R; Maffei, J. A.; Morábito, J.; Mastrantonio, L.; Lipinski, V.; Filippini, M.; Olmedo, F.; Castro, G. 2007. Mapa utilitario de suelos y riesgo de contaminación edáfica en los oasis irrigados de la provincia de Mendoza. Jornadas de Investigación en Recursos Hídricos, Espacio para la Ciencia y Tecnología, Mendoza.
35. Villalba, R. 2008. Cambio climático, oferta hídrica y agricultura en el oeste argentino. IV Jornadas de Riego y Fertirriego. Mendoza, Argentina. 106 p.
36. Xing, W.; Wenming, H.; Liu, G. 2010. Effect of excess iron and copper on physiology of aquatic plant *Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleid. *Environmental Toxicology*. 25: 103-112.
37. Yaduvanshi, N. P. S.; Swarup, A. 2005. Effect of continuous use of sodic irrigation water with and without gypsum, farmyard manure, pressmud and fertilizer on soil properties and yields of rice and wheat in a long-term experiment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 73: 111-118.
38. Zhang, H.; Blumwald, E. 2001. Transgenic salt-tolerant tomato plants accumulate salt in foliage but not in fruit. *Nature Biotechnology*. 19: 765-768.