

Aptitud para riego del agua subterránea basada en la salinidad y sodicidad en las perforaciones realizadas entre 2004 y 2010 en los Oasis Norte y Centro de Mendoza

Aptitud for underground irrigation based on salinity and sodicity in drillings made between 2004 and 2010 in the North and Central Oasis, Mendoza

Adriana Bermejillo ¹

Luis Martí ¹

Daniela Cónsoli ¹

Carlos Salcedo ²

Joaquín Llera ³

Analía Valdés ¹

Matías Venier ¹

Silvia Troilo ¹

Originales: Recepción: 14/09/2011 - Aceptación: 24/10/2012

RESUMEN

En Mendoza la actividad agrícola se concentra en oasis productivos que dependen exclusivamente del riego, donde aproximadamente un 70% de las propiedades utilizan agua subterránea. El objetivo fue analizar la calidad del agua que extraen las perforaciones realizadas durante el periodo 2004/2010, en los oasis Norte y Centro de Mendoza. De los aproximadamente 1000 registros de nuevos pozos se han tomado muestras de 409 perforaciones, en las que se realizaron análisis físico-químicos: conductividad eléctrica actual (CEA) y efectiva (CEE), residuo salino, sales totales, pH, cationes y aniones, se obtuvo el coeficiente de álcali, relación de absorción de sodio y las durezas. Se clasificó según Riverside modificación Thorne-Peterson y siguiendo la clasificación regional de Wainstein. Las perforaciones del Oasis Centro son en general de menor profundidad, extrayendo agua de menor CEA y mayor calidad. En el Oasis Norte las mejores

ABSTRACT

Mendoza's agricultural activity is concentrated in productive areas which depend almost exclusively on irrigation. Around 70 percent of these estates rely on underground water basins. The goal of this project has been to analyze the water quality of wells drilled within the 2004-2010 period in the North and Central Oasis of Mendoza. Of the nearly 1000 new wells on record, 409 were sampled. Physical-chemical analyses were carried out to determine current and effective electrical conductivity, salt residue, total salts, pH, cations and anions. Coefficient of alkali, sodium absorption relation and hardness were also calculated. Wells in the Central Oasis are less deep, producing water of lower current electrical conductivity and of higher quality. In the North Oasis the best quality water is found in the area irrigated by the Mendoza river. In the east (Tunuyán river basin) waters are of inferior quality, despite greater depths of exploration. The greatest differences between current electrical conductivity and effective electrical conductivity occur in the lower Tunuyán river basin, where water contains larger amounts of medium soluble salts.

1 Dpto. Ingeniería Agrícola. abermejillo@fca.uncu.edu.ar

2 Dpto. de Producción Agropecuaria.

3 Dpto. de Biomatemática y Físicoquímica.

Facultad de Ciencias Agrarias. UNCUYO. Alte. Brown 500. Chacras de Coria. Mendoza. Argentina.

aguas están en la zona irrigada por el Río Mendoza, encontrando hacia el este (Río Tunuyán) aguas de peores características, a pesar de que en dicha zona es donde se ubican las más importantes profundidades de exploración. Las mayores diferencias entre CEA y CEE están en la cuenca del Tunuyán inferior, donde las aguas poseen más cantidad de sales de mediana solubilidad.

Palabras clave

aptitud agronómica • aguas subterráneas • oasis irrigados • perforaciones

Keywords

aptitude for irrigation • underground water basins • irrigated oases • wells

INTRODUCCIÓN

La calidad y la disponibilidad del agua es un tema importante desde el punto de vista económico, político y ecológico, lo que demanda hacer eficiente el uso conjunto de los recursos superficiales y subterráneos, teniendo en cuenta la conservación y preservación de las fuentes de agua dulce. Esto implica contar con indicadores que permitan advertir cuáles son y, sobre todo, cuáles serán las ofertas y las demandas de agua en las distintas regiones (4, 18). El recurso agua está sometido a la presión de una demanda cada vez más exigente en cantidad y calidad, condicionada por aspectos sociales, políticos y ambientales (15). Para lograr una gestión integrada del recurso hídrico, se debe disponer de fuentes de información oportunas en cuanto a la calidad del agua.

Dentro de Argentina, Mendoza es la provincia con mayor superficie irrigada del país: 360.000 ha, lo que representa el 25% del total nacional (4). Esto es representativo de la situación que acontece en las zonas áridas y semiáridas que muestran un marcado déficit natural de agua (12).

En Mendoza, la actividad agrícola se concentra en cuatro oasis bajo riego que ocupa sólo el 3,4% de la superficie y en ellos se desarrolla la mayor parte de la actividad económica y humana (8). En la zona Norte de la provincia se ubican dos oasis que abarcan las cuencas irrigadas por los Ríos Mendoza y Tunuyán Inferior. El Oasis Centro de la provincia se ubica en las zonas productivas irrigadas por el Río Tunuyán Superior. En el Sur de Mendoza se ubica el Oasis Sur (Ríos Diamante y Atuel). Todas las explotaciones dependen exclusivamente del riego, aproximadamente un 70 % de las propiedades utilizan agua subterránea, 50% conjuntamente con el agua superficial y el resto únicamente subterránea (6).

La participación tan importante del agua subterránea induce a poner especial atención en su aptitud agronómica y en la evolución de sus características a través de importantes períodos. La reserva más importante de agua dulce es el agua subterránea, por lo que su no preservación puede traer serios problemas económicos y sociales (1). Si bien se destinan esfuerzos e inversiones tendientes a asegurar la disponibilidad de agua, no pasa lo mismo en relación con la preservación de su calidad, y la agricultura mendocina resulta víctima de la contaminación producida por la urbanización y la industria (10).

En Mendoza existe un gran desarrollo agrícola, principalmente del sector vitícola, que se ubica en zonas que carecen de derecho de riego superficial, dependiendo exclusivamente del uso de aguas subterráneas de acuíferos confinados o semiconfinados, que requieren a tal fin de importantes inversiones en el sistema de riego.

Por tanto, es indispensable conocer si se dispondrá de un recurso hídrico de aceptable calidad que justifique la inversión, asegurando así una producción competitiva y sustentable.

Este trabajo pretende evaluar, basada en la salinidad y sodicidad, la calidad y aptitud de las aguas subterráneas en los distintos oasis de Mendoza, para que se disponga de una información confiable que asegure el éxito de nuevos emprendimientos. En el mismo se evalúan los datos correspondientes a más de 400 nuevas perforaciones realizadas en el período 2004-2010.

Objetivo

- Evaluar, basada en la salinidad y sodicidad, la calidad y aptitud agronómica de las aguas subterráneas correspondientes a perforaciones realizadas en Mendoza durante la serie temporal 2004-2010.

MATERIALES Y MÉTODOS

Mendoza es una de las provincias de la República Argentina, localizada en el centro oeste del país. Sus coordenadas son: 32°52'57" Sur y 68°49'19" Oeste. La provincia está dividida administrativamente en dieciocho departamentos (incluyendo la capital), los cuales se agrupan por zonas.

Como se observa en la figura 1 (pág. 224), en esta provincia el agua subterránea se encuentra casi totalmente en depósitos cuaternarios de los valles intermontanos y de la llanura oriental. En el primer caso se forman cuencas de agua subterránea delimitadas en la mayor parte de su perímetro por afloramientos de terrenos del basamento resistivo y, donde este no asoma, por altos estructurales del basamento aflorantes, generalmente ubicados a poca profundidad.

En el caso de la llanura oriental, las características hidrogeológicas se asemejan a las de las grandes llanuras. Es así que en esta extensa zona varían las características sedimentológicas de los acuíferos y estos se recargan por ríos que drenan diferentes áreas, cada una con distinta constitución geológica. Por ende, las características químicas del agua varían dentro de la gran llanura.

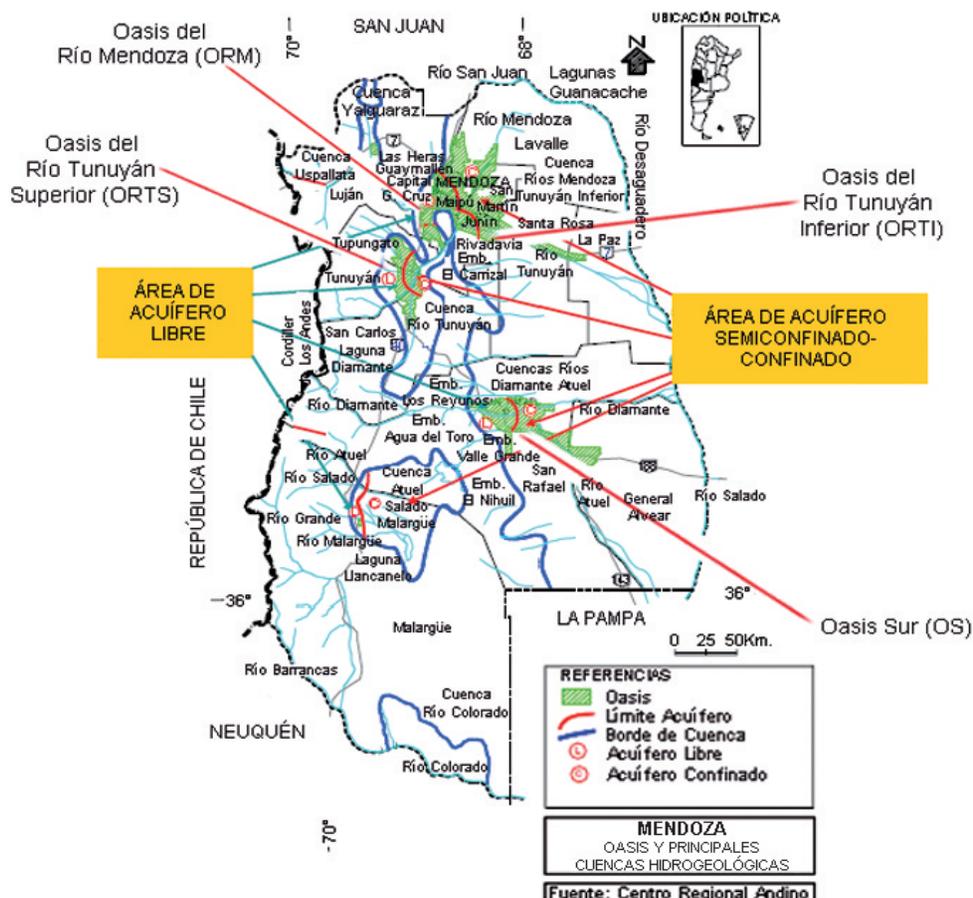


Figura 1. Oasis y principales cuencas hidrogeológicas de Mendoza (7).
Figure 1. Oasis and main hydrogeological basins of Mendoza (7).

Las muestras se agruparon por oasis ya que las aguas de cada cuenca tienen similares características. En la figura 1 se muestra la zona de estudio, en la cual se observan los oasis más importantes: el irrigado por el Río Tunuyán Superior se denomina Oasis Centro (ORTS) y el Oasis Norte de Mendoza que se divide en las cuencas irrigadas por los Ríos Mendoza (ORM) y Tunuyán Inferior (ORTI). El ORM incluye los departamentos de Godoy Cruz, Guaymallén, Las Heras, Luján de Cuyo, Maipú, Lavalle y Capital. El ORTI (hacia el Este de la provincia) comprende los departamentos de Junín, La Paz, Rivadavia, San Martín y Santa Rosa. El ORTS de la provincia se ubica en las zonas productivas de los departamentos de San Carlos, Tunuyán y Tupungato que son irrigados por el Río Tunuyán Superior. El Oasis Sur (OS) comprende los departamentos de San Rafael, General Alvear y Malargüe (este último también se considera parte del OS, a pesar de que su fuente de agua es independiente y está más separado del resto).

La cuenca de agua subterránea Norte se ubica, como su nombre lo indica, al Norte de la provincia de Mendoza y recostada sobre la ladera Este de la Cordillera de los Andes. Tiene 22.800 km² de superficie (9).

Los sedimentos que conforman la cuenca subterránea del Oasis Norte se caracterizan por ser sedimentos de edad cuartaria, que se han depositado en su mayoría sobre una base hidrogeológica compuesta por sedimentos de edad terciaria. Los sedimentos cuaternarios que rellenaron esta cuenca son los arrastrados por la dinámica del Río Mendoza.

Se puede determinar dentro de esta cuenca hidrogeológica una zona de acuíferos libres que se sitúan en la cabecera de la cuenca, conformada por sedimentos conglomerádicos gruesos, polimícticos, con granulometría que va desde bloques de 1 m de diámetro, generalmente con matriz constituida por gravas gruesas y arenas gruesas.

La disposición de estos sedimentos ha sido marcada por la variación del cauce principal del Río Mendoza en los distintos pulsos de aporte; se encuentran sedimentos muy gruesos, depositados por el cauce principal, que varían lateralmente en forma lenticular a sedimentos medios como son las gravas y las arenas.

Dentro de esta zona no existe en profundidad ningún vestigio de sedimentos finos. Hay una zona media dentro de la cuenca del Oasis Norte, donde los sedimentos gruesos existentes en la cabecera se comienzan a intercalar con sedimentos más finos a medida que se distancian de la salida del Río Mendoza al valle; en esta parte de la cuenca de depositación se pueden ver sedimentos de tamaño grava gruesa conglomerádica, cantos rodados y arenas gruesas a medias, incluyendo lentes con matriz de arena media y en casos fina, y se pueden determinar algunos lentes de material limo arcilloso, que pasan a constituir por debajo de ellos acuífero semi-confinados. Siempre en la parte superior de la zona de saturación sigue existiendo un acuífero libre.

Cuando el Río Mendoza pierde su mayor dinámica de arrastre, en la zona distal de los conos de depositación que rellenaron la cuenca en estudio, deposita sedimentos finos a muy finos, y si bien se mantiene un acuífero freático, libre, los acuíferos que hoy se explotan en esta zona son acuíferos semi-confinados a confinados. La columna sedimentaria medida en la zona del departamento de Lavalle supera los 700 m de espesor.

Los sedimentos que conforman estos acuíferos son sucesiones de arenas finas a medias, intercaladas con limos y limos arcilla, y en algunos casos grandes paquetes arcillosos. Por esta razón es que la mayoría de las perforaciones construidas en estas zonas tienen filtros intercalados.

La cuenca de agua subterránea Centro se ubica al Centro-Oeste de la Provincia de Mendoza. Superficialmente abarca unos 3.180 km², tiene una forma alargada de Norte a Sur y se extiende adosada al Este de la Cordillera de los Andes por unos 140 km (9).

La cuenca del oasis Centro tiene como río principal el Río Tunuyán, pero existen arroyos importantes que también aportan a la cuenca, como son los arroyos Yaucha, San Carlos, Grande, Blanco, Las Tunas, La Estacada, etc. Esta es una cuenca cerrada con varios ingresos de cauces y una sola salida del colector principal que es el Río Tunuyán, que sale de la cuenca en la zona de Zapata.

Los sedimentos que conforman los acuíferos que se explotan en esta zona son de edad cuaternaria, con una base hidrogeológica constituida por sedimentos de edad terciaria.

Por ser una cuenca de recorrido corto en el sentido Este-Oeste, promedio 40 km, que es el sentido de la pendiente regional, la depositación de sedimentos es menos seleccionada que en la cuenca del Río Mendoza.

De todas maneras existe una zona de recarga y cercana a esta, en el Río Tunuyán como en los arroyos que aportan a la cuenca, desarrollan una zona de acuífero libre constituida por sedimentos gruesos a muy gruesos tamaño bloque con diámetros muy importantes como los existentes en la zona de Altamira, departamento de San Carlos donde se han medido bloques de 3,5 m de diámetro.

Estos sedimentos se disponen en superficie y se estima que en profundidad ocurre lo mismo, en franjas por donde el río que los transportó de las estribaciones de la Cordillera Frontal los fue depositando.

Esto fue definido por J. Polanski como pavimentos de piedra: lateralmente se advierte que estos sedimentos pasan a sedimentos de granulometría mucho más finas tipo loessicos.

En las columnas sedimentarias analizadas en las distintas perforaciones construidas en esta cuenca se puede observar que la zona de acuífero libre antes de los 5 km de recorrido en sentido de la pendiente regional (Oeste-Este), ha pasado a una zona de acuíferos semi-confinados, que hacia el centro de la cuenca se transforman en acuíferos totalmente confinados con presiones de surgencia muy importantes.

La sucesión de sedimentos cuaternarios que conforman el acuífero principal de esta parte de la cuenca del Valle de Uco lo conforman sucesiones de secuencias granocrecientes y granodecrescientes con sedimentos de tamaño grava gruesa conglomerádica en la cuenca media alta intercaladas con areniscas finas a medias y con lentes de arcillas y limoarcillas.

En la parte baja de la cuenca la sucesión de gravas finas a medias intercalan con paquetes de areniscas finas a medias y con paquetes importantes de arcillas plásticas y limo arcillas.

Sobre un total de 409 muestras de agua provenientes de perforaciones realizadas por empresas locales y profesionales independientes entre enero 2004 y diciembre 2010, se efectuaron las siguientes determinaciones:

- Conductividad eléctrica: actual (CEA) y efectiva (CEE)
- Residuo salino y sales totales
- pH
- Cationes: calcio y magnesio por complexometría; sodio y potasio por fotometría de llama (14).
- Aniones: carbonato y bicarbonato por volumetría ácido base, método Warder; cloruro por volumetría, método Mohr y sulfato por método volumétrico con clorhidrato de bencidina (14).
- Durezas: total, temporaria y permanente

Posteriormente se clasificó por su aptitud:

- según escala Riverside con modificación de Thorne-Peterson (16, 17).
- según escala Wainstein de clasificación de aguas de riego de Mendoza (19). Esta calificación de aptitud regional tiene en cuenta el contenido de sales de mediana solubilidad relacionados con el factor interpretativo de concentración (FIC) de Nijensohn (13). La calificación de Wainstein se adapta a las aguas de Mendoza, ya que se basa en el esquema de Riverside (modificada por Thorne-Peterson), en el criterio de CEE relativo a aguas yesosas propuesto por Nijensohn, en las características de las aguas cuyanas, en el contenido de yeso de la región y en la eliminación del exceso de sodio por drenaje (3).
- Clasificación por K (coeficiente de álcali, Hardman-Miller). Este coeficiente es conocido incorrectamente como "índice de SCOTT" por ser quien lo difundió; en Argentina lo preconizó MAZZA. Las fórmulas utilizadas se emplearon según el ión dominante para cada muestra, según lo estableció originalmente el autor (3).
- Relación de Absorción de Sodio (RAS)

Se llevó a cabo el procesamiento de los datos, y previo a su análisis se trabajó en la búsqueda de profundidades totales de cada perforación analizada; no se logró dicho dato sólo en veinte perforaciones. A pesar de ello, no se descartaron dichas muestras por el importante valor que tiene el resto de los resultados, sirviendo para la caracterización del agua.

La totalidad de los datos se analizó a través de estadística descriptiva, mediante planilla de cálculo, estimando los parámetros: media, desviación estándar y diferencia mínima significativa. Con los datos obtenidos de las frecuencias absolutas se calcularon las frecuencias relativas en porcentajes para interpretar la variabilidad de los datos, permitiendo la caracterización del agua extraída en las distintas zonas dentro la provincia de Mendoza.

RESULTADOS

La figura 2 presenta las muestras analizadas según el departamento en el cual se realizó la perforación.

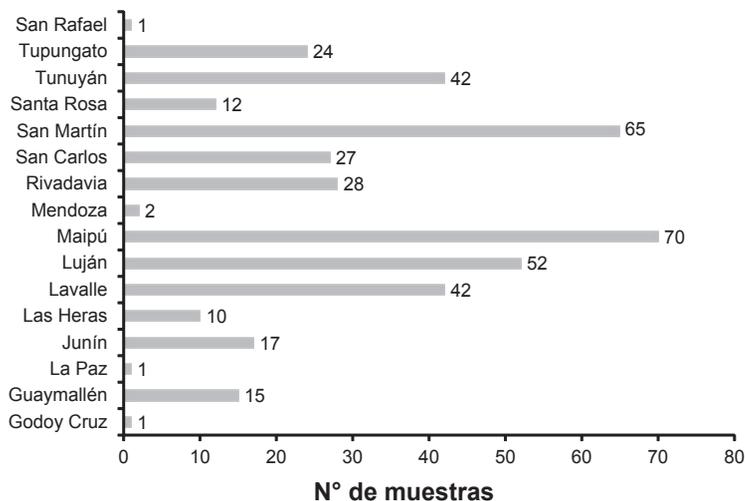


Figura 2. Distribución de las 409 muestras de agua tomadas por departamento.
Figure 2. Distribution of the 409 samples by department.

Se ponen de manifiesto los departamentos en los que se ha realizado el mayor número de perforaciones. Se observa que un 17,1% pertenece al departamento de Maipú. Le siguen en orden decreciente los departamentos de San Martín (15,9% de las muestras), Luján (12,7%), Lavalle y Tunuyán (10,3%). Por el contrario, Godoy Cruz, La Paz y San Rafael son los departamentos en los cuales se analizó el menor número de perforaciones (0,2% en cada caso), concordando con un menor número de pozos perforados en el período analizado.

En la tabla (pág. 229) se presentan los resultados (media, desviación estándar e intervalo de confianza) de las variables profundidad total de la perforación, CEA, CEE, pH, sales totales y residuo salino, calculados a partir de los datos correspondientes a las perforaciones analizadas agrupadas por departamento.

Cabe recalcar que se trata de las perforaciones realizadas en los últimos años y sus profundidades varían entre departamentos, indicando la profundidad promedio a la cual se está perforando actualmente para lograr diferentes calidades de agua propias de cada departamento. En los departamentos de La Paz, San Rafael y Godoy Cruz no se han calculado estos resultados porque en cada uno de ellos sólo se ha analizado una perforación.

Como se puso de manifiesto en la figura 2, las muestras de Mendoza Capital fueron 2 ya que en dicho departamento no se han realizado más perforaciones por ser una zona principalmente urbana.

Tabla. Caracterización de las perforaciones analizadas por departamento.
Table. Characterization of sampled wells by department.

Oasis	Dpto	Distrito	Prof. m	CEA $\mu\text{S/cm}$	CEE $\mu\text{S/cm}$	pH	Sales tot. mg/L	Res. Sal mg/L
ORM	Guaymallén	Media	162,20	1104,00	1085,68	6,93	777,74	735,22
	Guaymallén	SD	73,15	300,15	278,93	0,48	230,25	230,36
	Guaymallén	Dif.mín.sign.	43,23	177,38	164,83	0,29	136,07	136,13
ORTI	Junín	Media	234,35	1504,00	1418,70	6,89	1081,09	1050,44
	Junín	SD	80,88	457,97	331,34	0,40	333,11	376,49
	Junín	Dif.mín.sign.	47,80	270,64	195,80	0,24	196,85	222,49
ORM	Las Heras	Media	106,90	1504,60	1430,60	6,94	1106,00	1117,94
	Las Heras	SD	75,28	1223,83	1046,98	0,59	911,17	1069,96
	Las Heras	Dif.mín.sign.	44,49	723,22	618,71	0,35	538,46	632,30
ORM	Lavalle	Media	171,71	1047,40	1047,40	6,86	731,44	685,89
	Lavalle	SD	60,85	210,77	210,77	0,48	156,18	153,92
	Lavalle	Dif.mín.sign.	35,96	124,55	124,55	0,28	92,29	90,96
ORM	Luján	Media	176,99	1431,87	1373,44	6,98	1044,88	1043,88
	Luján	SD	56,86	1529,46	1389,25	0,53	1219,78	1391,43
	Luján	Dif.mín.sign.	33,60	903,83	820,98	0,31	720,83	822,27
ORM	Maipú	Media	153,88	935,17	929,64	6,85	650,35	607,87
	Maipú	SD	58,55	203,06	187,58	0,51	153,29	150,48
	Maipú	Dif.mín.sign.	34,60	120,00	110,85	0,30	90,59	88,93
ORM	Mendoza	Media	175,00	1758,50	1758,50	7,16	1296,50	1284,50
	Mendoza	SD	35,36	596,09	596,09	0,44	471,64	495,68
	Mendoza	Dif.mín.sign.	20,89	352,26	352,26	0,26	278,72	292,92
ORTI	Rivadavia	Media	198,84	1661,04	1518,38	7,09	1219,97	1187,59
	Rivadavia	SD	105,74	804,49	592,86	0,48	648,36	707,55
	Rivadavia	Dif.mín.sign.	62,49	475,41	350,35	0,28	383,15	418,13
ORTS	San Carlos	Media	151,37	497,19	497,19	6,87	349,35	320,13
	San Carlos	SD	48,70	102,77	102,77	0,51	76,35	67,52
	San Carlos	Dif.mín.sign.	28,78	60,73	60,73	0,30	45,12	39,90
ORTI	San Martín	Media	231,99	1121,92	1096,21	6,82	791,28	757,02
	San Martín	SD	57,22	526,68	426,26	0,51	412,51	437,48
	San Martín	Dif.mín.sign.	33,81	311,24	251,90	0,30	243,77	258,53
ORTI	Santa Rosa	Media	257,00	1895,00	1703,51	6,79	1356,31	1366,20
	Santa Rosa	SD	31,49	581,67	548,16	0,73	438,56	504,62
	Santa Rosa	Dif.mín.sign.	18,61	343,74	323,94	0,43	259,17	298,20
ORTS	Tunuyán	Media	186,41	348,76	346,40	7,10	243,50	224,91
	Tunuyán	SD	61,69	168,76	155,89	0,60	111,05	117,74
	Tunuyán	Dif.mín.sign.	36,46	99,73	92,12	0,36	65,63	69,58
ORTS	Tupungato	Media	163,61	722,42	712,88	6,90	509,19	480,85
	Tupungato	SD	40,15	562,19	528,44	0,54	415,81	423,58
	Tupungato	Dif.mín.sign.	23,73	332,22	312,28	0,32	245,73	250,32
OS	San Rafael		70,00	1143,00	1143,00	7,46	820,62	731,52
ORM	Godoy Cruz		144,40	1257,00	1257,00	6,87	940,63	879,90
ORTI	La Paz		-	3020,00	1846,73	7,72	2403,02	2416,00
	COMPLETO	Media	183,13	1072,77	1034,58	6,92	765,47	737,85
		SD	71,27	787,90	695,29	0,53	611,02	669,46
		Dif.mín.sign.	42,12	465,61	410,88	0,31	361,09	395,62

Se sabe que los tres niveles de acuíferos existentes se ubican a diferentes profundidades: aproximadamente hasta los 90 m se ubica el primer nivel, de 100-180 m el segundo nivel y a más de 200 m aparece el tercer nivel de explotación (2, 18).

En virtud de ello y como se cita en numerosas bibliografías:

- La salinización del primer nivel es difícil de evitar ya que el lixiviado de las sales del suelo irrigado que percola con los excedentes del riego lo deterioran progresivamente. Dicho proceso depende de la eficiencia de riego y de la necesidad de lavar los suelos para mantener bajos los niveles de salinidad en el área de exploración de raíces de los cultivos.
- En el segundo nivel, los valores de CE aumentan gradualmente hacia el Este de la provincia, lo cual podría deberse a causas tales como sobre explotación de acuíferos, mala construcción de perforaciones, roturas por procesos de corrosión y en algunos casos los provocados por movimientos sísmicos.
- El tercer nivel es el menos expuesto a los procesos de contaminación de origen exógeno; los valores más altos corresponden a la zona este de San Martín y Santa Rosa.

En la figura 3 (pág. 231) se representa la variable profundidad; se observa que las mayores profundidades alcanzadas en las perforaciones realizadas corresponden a los departamentos de Santa Rosa, San Martín, Junín y Rivadavia -todos integrantes del ORTI- que es donde hay mayor proporción de perforaciones más profundas.

Un buen análisis de la situación se puede hacer al agrupar las perforaciones por oasis. Se han analizado 93 muestras de agua correspondientes al ORTS, 192 muestras del ORM, 123 muestras del ORTI y solo 1 muestra del OS. En este último caso no se pueden sacar conclusiones, por no disponer de un número representativo de muestras, por lo cual no se ha podido analizar la problemática de dicho oasis. Cabe aclarar que en el período analizado no se han realizado perforaciones para uso agrícola en el OS, debido a que la disponibilidad de agua superficial es suficiente, siendo las perforaciones realizadas para uso doméstico o industrial.

En la figura 4 (págs. 231-232) se representan los datos de profundidad, agrupándolos por oasis y año de ejecución, de manera de destacar las profundidades en las que se están realizando mayoritariamente las perforaciones en cada oasis. Se pone de manifiesto una mayor cantidad de pozos cercanos a los 300 m, especialmente en la cuenca del ORTI.

Las perforaciones del ORTS son, en general, de menor profundidad (sólo 5 presentan profundidades mayores a los 250 m) y como se verá más adelante extraen agua de menor CEA. Dentro del Oasis Norte las mejores aguas están en el ORM, encontrando hacia el Este aguas de peores características, con mayor CEA, a pesar de que en dicha zona es donde se ubican las mayores profundidades de exploración.

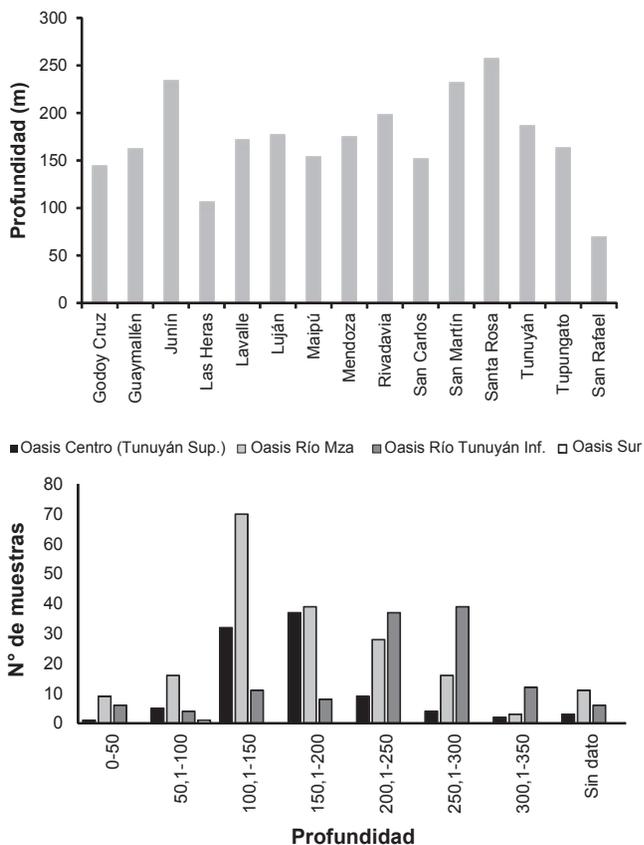


Figura 3. Profundidades media de todas las perforaciones analizadas por departamento y por oasis.

Figure 3. Depth of all sampled wells by department and oases.

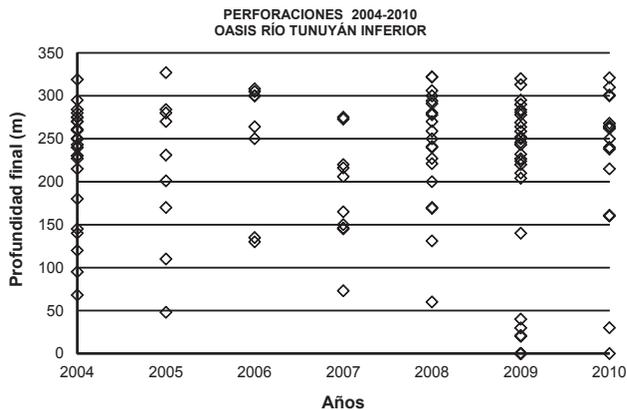


Figura 4. Profundidad de las perforaciones realizadas en los distintos oasis.

Figure 4. Well depth in the different oases.

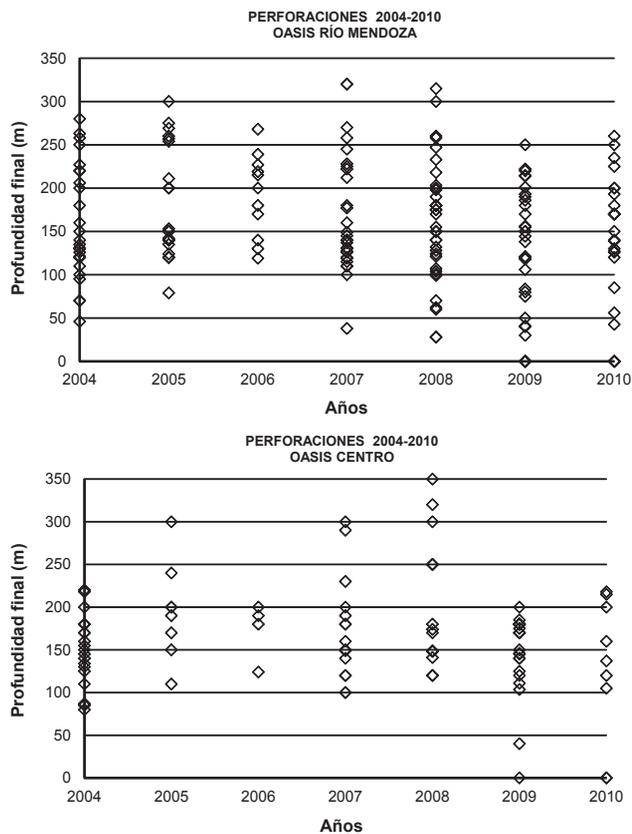


Figura 4 (cont.). Profundidad de las perforaciones realizadas en los distintos oasis.
Figure 4 (cont.). Well depth in the different oases.

Del análisis de la figura 5 (pág. 233), correspondiente al contenido de sales, se desprende que la menor concentración de sales corresponde a las aguas del Oasis Centro, el 54% posee menos de 300 mg/L y el 41% entre 301 a 600 mg/L. Le siguen en orden decreciente las aguas del ORM en las que la mayoría de las muestras se incluyen en los siguientes intervalos: el 41% entre 601 a 900 mg/L, el 36% entre 301 a 600 mg/L y el 14% entre 901 a 1200 mg/L. La muestra del OS estuvo en el intervalo de 1501 a 1800 mg/L.

El pH es otro factor de calidad que rara vez presenta valores extremos en aguas subterráneas de la provincia de Mendoza. Como se pone de manifiesto en la figura 6 (pág. 233), el 97% de las muestras del ORTS presentan valores de pH que van de 6 a 8 y sólo un 3% tiene pH menor a 6. En la cuenca Norte, tanto para el ORM y del ORTI, las aguas presentan más del 85% de las muestras entre 6,01 a 7,5. Sólo en el ORTI se encontró un 2% con pH mayor a 8. Sin embargo, en todos los oasis, el 97% de las muestras se encuadran entre 6 a 8, lo cual indica que el mismo es adecuado.

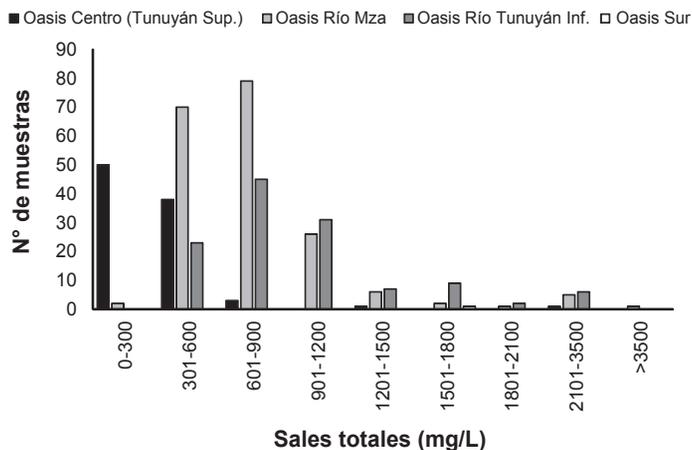


Figura 5. Muestras según contenido total de sales.

Figure 5. Sample according to total salt content.

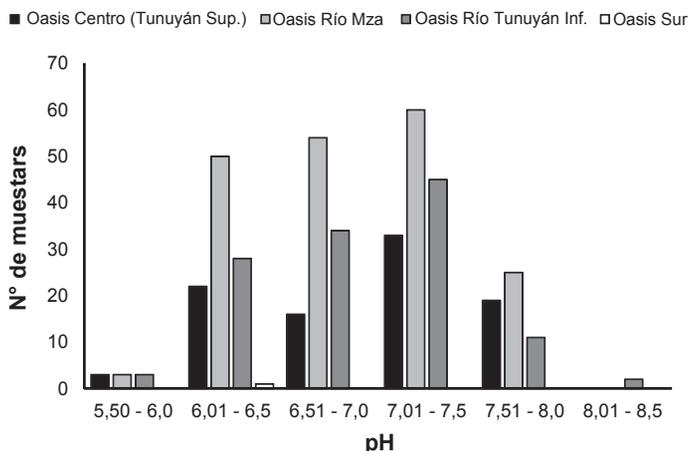


Figura 6. Distribución de las muestras por su pH.

Figure 6. Sample distribution according to pH.

Según la CEA, se han clasificado las aguas por Riverside modificación Thorne- Peterson según su salinidad y sodicidad, como se observa en la figura 7 (pág. 234). De acuerdo con esta clasificación en el ORTS el 85% de las muestras son C2 "salinidad baja: 250-750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ", no hubo muestras con salinidad muy alta C5 (4000-6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Las aguas C2 pueden usarse para riego de todos los cultivos salvo los extremadamente sensibles a la salinidad, cuando estos se hallan en suelos de alta a mediana permeabilidad. Con suelos de baja permeabilidad deberá ocasionalmente efectuarse algún lavado.

En el Oasis Norte (ORM y ORTI) se observó que las aguas generalmente son C3 "salinidad media: 750-2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ", alcanzando un 85 y 87% respectivamente. Dicha categoría establece que son únicamente utilizables en suelos de moderada a buena permeabilidad, siendo necesario aplicar regularmente riegos de lavado para prevenir peligrosas acumulaciones salinas. Los cultivos irrigados deben ser de moderada a buena tolerancia a la salinidad.

Analizando conjuntamente CEA y RAS se observa que, en general, ningún oasis presenta mayores problemas de sodicidad, ya que más del 94% son S1 "baja peligrosidad sódica" (figura 7).

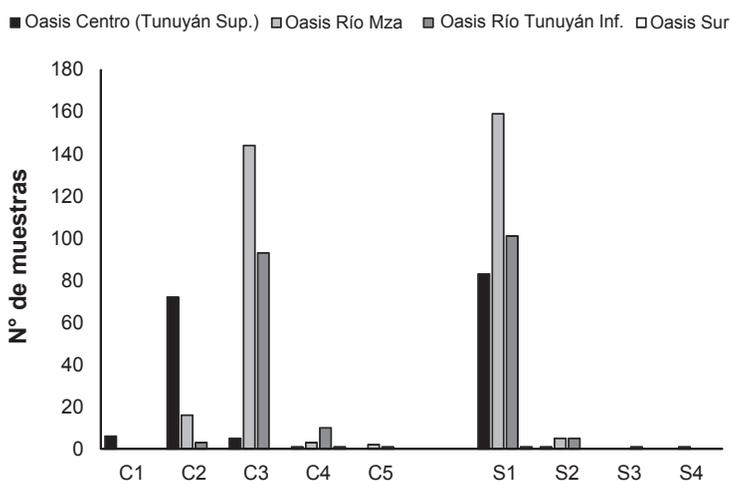


Figura 7. Muestras según clasificación de Riverside modificación Thorne-Peterson
Figure 7. Samples according to Riverside classification – Thorne-Peterson modification

La clasificación Regional de Wainstein, está adaptada a la zona de Cuyo, ya que tiene en cuenta las sales de mediana solubilidad (carbonato de calcio y/o magnesio y sulfato de calcio) las cuales se encuentran mayoritariamente en las aguas de Mendoza y además tiene la ventaja de tener subdividida las categorías C3 y C4 de Riverside en tres y dos categorías, respectivamente, dando mayor información en cuanto a calidad y manejo.

Según la CEE se clasificó por Wainstein (figura 8, pág. 235) poniendo de manifiesto que las categorías más altas de salinidad están en la cuenca del Tunuyán Inferior, Oasis Norte de Mendoza, donde un 53% se incluyeron como C3 "moderadamente salina: 750-1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ " y el 32% como C4 "medianamente salina: 1250-1750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ".

Dicho resultado concuerda con otros trabajos similares, donde ya se indicaba que en los departamentos del Este de la provincia, es donde se requiere mayor profundidad de perforación para la obtención de aguas de aceptable calidad, debido a fenómenos de contaminación progresiva de los acuíferos (5, 11).

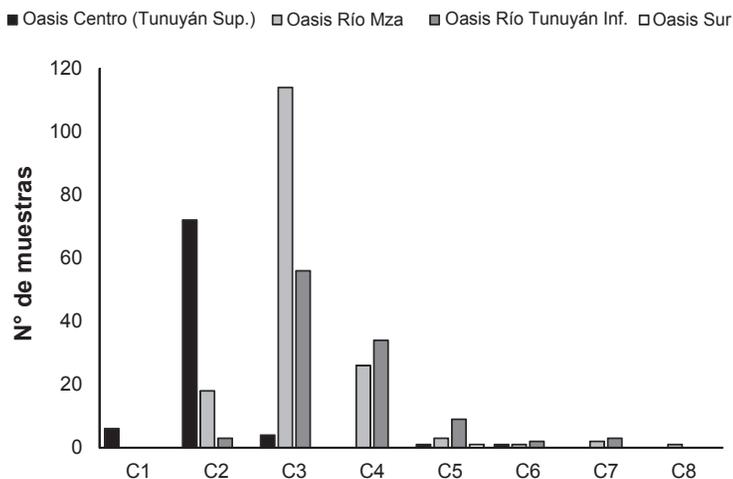


Figura 8. Muestras según clasificación regional de Wainstein.
Figure 8. Samples according to Wainstein regional classification.

En las figuras 9 y 10 (pág. 236) se han graficado los valores de CEA y CEE en relación con la profundidad de extracción del agua, para cada oasis.

En las mismas se destaca que existe una mayor densidad de puntos que indican la profundidad a la cual se está realizando la mayor cantidad de perforaciones en cada oasis, correspondiéndose a los valores de CEA o CEE que también responden a la característica de cada oasis.

Del análisis de las figuras 9 y 10 se pone de manifiesto que las mayores diferencias entre CEA y CEE se observan en el ORTI, donde las aguas poseen más cantidad de sales de mediana solubilidad que en el resto de los oasis, situación que hace que la CE disminuya bajando su grado de peligrosidad.

En la zona del Río Mendoza la diferencia es menor y precedentemente a la del ORTS.

Otra forma de poner de manifiesto lo dicho precedentemente es graficando la CEA en función de la CEE y ajustando líneas de tendencia para representar la variación en cada uno de los oasis, como puede observarse en la figura 11 (pág. 236), en la cual el ORTI presenta una mayor variación entre CEA y CEE, comportándose los otros dos oasis en forma similar y con variaciones menos notables.

También se calcularon otros parámetros necesarios para caracterizar las aguas estudiadas: RAS, coeficiente K y las durezas (total, temporaria y permanente).

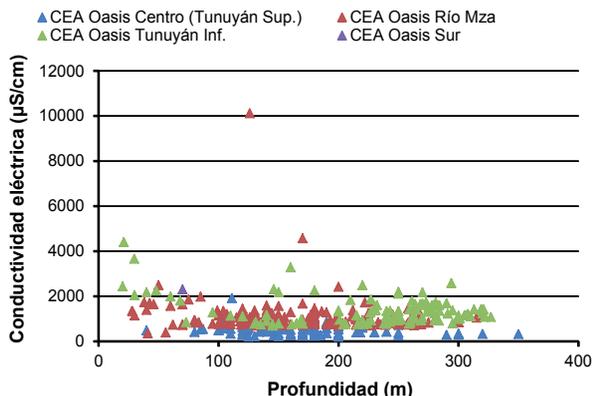


Figura 9. CEA en función de la profundidad de la perforación.

Figure 9. Current electrical conductivity according to well depth.

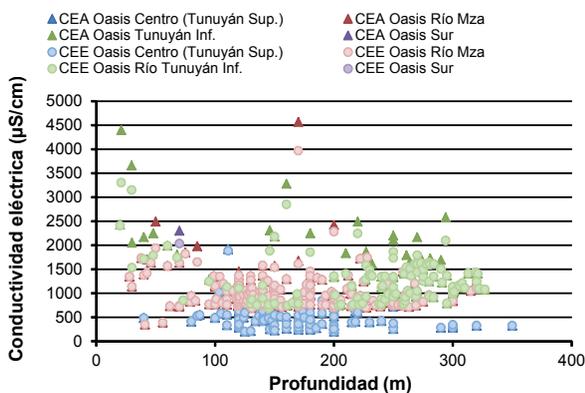


Figura 10. CEA y CEE en función de la profundidad de la perforación.

Figure 10. Current electrical conductivity and effective electrical conductivity according to well depth.

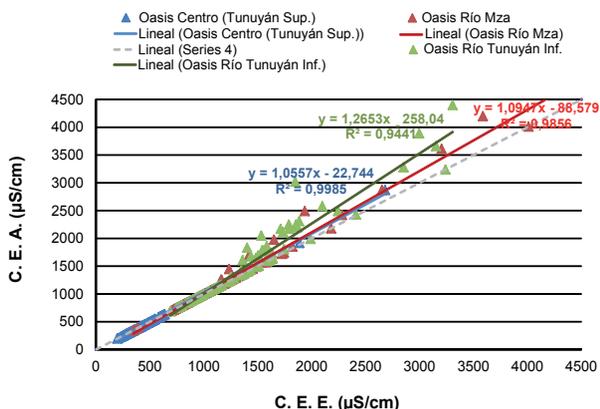


Figura 11. CEA en función de la CEE para los diferentes oasis.

Figure 11. Current electrical conductivity as opposed to effective electric conductivity in the different oases.

El coeficiente de álcali (K) tiene la ventaja de calificar las aguas simultáneamente por su peligro salino y por su peligro sódico. Para su determinación se relacionan las concentraciones de sodio con la de los aniones con que puede estar combinado, formando las respectivas sales; además se asigna una toxicidad dependiendo del anión que lo acompaña.

Como lo muestra la figura 12, el ORTS es el de mejores valores, el 97% tiene K mayor a 18,1, clasificado como Bueno, lo que indica que se la puede utilizar con éxito durante muchos años sin tener necesidad de tomar precauciones para impedir la acumulación de sales. Le sigue el ORM, en el cual el 70% tiene K Bueno y el 27% K Tolerable.

Para este último es generalmente necesario poner especial cuidado para impedir acumulación de sales, excepto en suelos con buen drenaje. En el ORTI el 53% tiene K Tolerable y el 44% K Bueno. La única muestra del OS dio un K Tolerable.

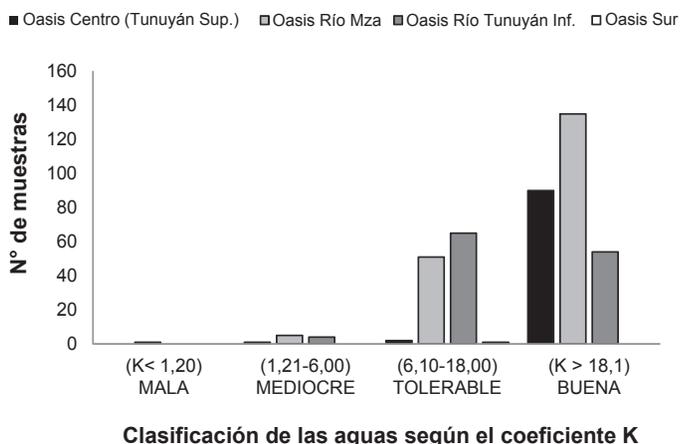


Figura 12. Distribución de las muestras por coeficiente K.
Figure 12. Sample distribution according to K coefficient.

Otra manera de evaluar la sodicidad es a través del cálculo de RAS, la cual indica la peligrosidad sódica de un agua de riego al relacionar los tenores de sodio con respecto a la cantidad de calcio más magnesio.

Como puede observarse en la figura 13 (pág. 238), no existen problemas de riesgo sódico en las aguas analizadas. Los menores valores de RAS se encontraron en el oasis centro, el 74% de las muestras presentó RAS menor a 1 y un 17% valores entre 1,01 y 2. En el ORM, el 33% de las muestras tiene valores entre 1,01 a 2, y el 28% RAS menor a 1.

En el ORTI las muestras se concentraron principalmente en dos categorías: el 41% entre 1,01 a 2 y el 39% entre 2,01 a 3. En el OS la única muestra analizada presentó RAS entre 3,01 a 4.

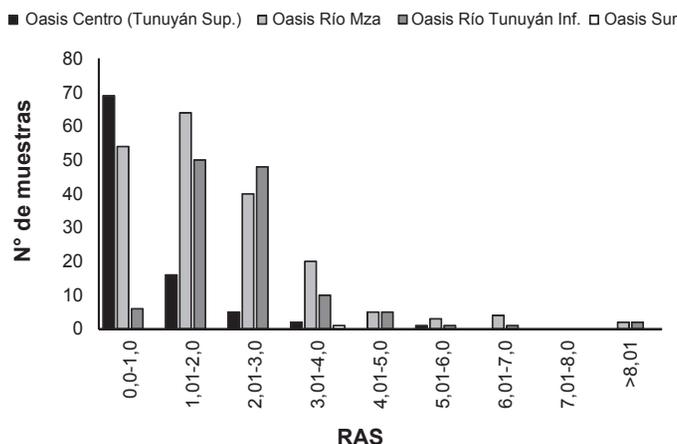


Figura 13. Distribución de las muestras según RAS.
Figure 13. Sample distribution according to RAS.

En este trabajo no se presentan los valores de RAS⁰, debido a que este parámetro es aplicable sólo para el efecto que tiene el mismo sobre las propiedades físicas del suelo y no tiene en cuenta la consecuencia sobre los vegetales (3).

La dureza de las aguas de la región no tiene incidencia negativa en su aptitud para riego; por el contrario, se les asigna como buena característica el aporte de los macronutrientes secundarios: Ca, Mg y S.

Respecto de la dureza total, el mayor porcentaje de muestras de ORM y ORTI (66 y 53% respectivamente) se encuadran en el intervalo entre 20,1 a 40°F. Las muestras del ORTS tienen una menor dureza total, el 74% indicaron valores menores a 20°F.

En el OS, la única muestra analizada se encuentra en el intervalo entre 60,1-80°F. Considerando la dureza permanente, el ORTS presenta los valores más bajos, el 93,5% son menores a 20°F. Le sigue en orden creciente los ORM y el ORTI donde las muestras mayoritariamente se encuadran entre los intervalos de 20,1-40°F (57,3 y 43,1% respectivamente), y también hay un importante número con valores menores a 20°F (31,8 y 26,8%).

La muestra analizada en el OS se ubica entre 60,1-80°F. La dureza total está directamente relacionada con la conservación y el mantenimiento de los equipos de riego. Importantes cantidades de calcio y magnesio predisponen la obturación de todo tipo de emisores, viéndose perjudicada la eficiencia de los equipos de riego presurizado.

CONCLUSIONES

- Más del 90% de las aguas subterráneas obtenidas en los departamentos de la provincia de Mendoza mostraron ser aptas para el riego de todo tipo de cultivo, pudiendo catalogarse como de muy buena calidad según la Clasificación Regional de Wainstein (C1, C2, C3), el Coeficiente K y el RAS.
- El ORTS posee las aguas de mayor calidad considerando la totalidad de los parámetros físicoquímicos determinados. Tunuyán es el departamento que presenta los mejores valores.
- En los departamentos del Este de la provincia, principalmente la zona del ORTI, se requieren las mayores profundidades de perforación para la obtención de aguas de aceptable calidad.
- Las perforaciones del ORTS son en general de menor profundidad y extraen agua de menor CE. Dentro del Oasis Norte las mejores aguas están en la zona del ORM, encontrando hacia el Este (ORTI) aguas de peores características (mayor CEA, a pesar de ser obtenidas a mayores profundidades de exploración).
- Las mayores diferencias entre CEA y CEE se observan dentro del Oasis Norte, en el ORTI, donde las aguas poseen más cantidad de sales de mediana solubilidad que en el resto de los oasis. Situación que hace que precipiten disminuyendo notablemente la CE del agua.

BIBLIOGRAFÍA

1. Álvarez, A.; Fasciolo, G.; Barbazza, C., Lorenzo F.; Balanza E. 2008. Impactos en el agua subterránea de un sistema de efluentes para riego. El Sistema Paramillos (Lavalle, Mendoza, Argentina). Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina. 40(2): 61-81.
2. Álvarez, A.; D'Elía, M.; Paris, M.; Fasciolo, G.; Barbazza, C. 2011. Evaluación de la contaminación de acuíferos producida por actividades de saneamiento y re-uso de efluentes en el norte de la provincia de Mendoza. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina. 43(1): 19-39.
3. Avellaneda, M.; Bermejillo, A.; Mastrantonio, L. 2004. Aguas de riego: calidad y evaluación de su factibilidad de uso. Mendoza. EDIUNC. 147 p.
4. Banco Mundial: Argentina. 2000. Water Resources Management Policy Issues and Notes Thematic Annexes. Volumen III. Anexo C.
5. Barbazza, C. V. 2005. Funciones de demanda de agua subterránea para el este mendocino. INA-CELA. Mendoza.
6. Bermejillo, A.; Zuluaga, J.; Drovandi, A.; Filippini, M. F.; Martí, L. H.; Cónsoli, D.; Valdés, A.; Morsucci, A. 2009. Modificación del agua de riego y riesgo freático en el cinturón verde de Mendoza. CLICAP.
7. Centro Regional de Aguas Subterráneas (CRAS). 1996. Mapa hidrológico de la Provincia de Mendoza, escala 1: 500.000. San Juan.
8. Departamento General de Irrigación (DGI). 2006. Plan Director del Río Tunuyán. Proyecto PNUD/FAO/ARG/00/008. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación. Gobierno de Mendoza.
9. Hernández, J.; Martinis, N. 2006. Particularidades de las cuencas hidrogeológicas explotadas con fines de riego en la provincia de Mendoza. III Jornadas de Actualización en Riego y Fertilización. Mendoza, Argentina. p. 17.

10. Lavie, E.; Morábito, J. A.; Salatino, S. E.; Bermejillo, A.; Filippini, M. F. 2010. Contaminación por fosfatos en el oasis bajo riego del río Mendoza. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.* 42(1): 169-184.
11. Martí, L.; Llera, J.; Salcedo, C.; Valdés, A. 2003. Características físico-químicas y aptitud agronómica de aguas subterráneas. Período 1997- 2001 (Mendoza -Argentina). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.* 35(2): 63-70.
12. Morábito, J.; Salatino, S.; Medina R.; Zimmerman, M.; Filippini, M. F.; Bermejillo, A.; Nacif, N.; Campos, S.; Dediol, C.; Pizzuolo, P.; Genovese, D.; Mastantonio, L. 2005. Calidad del agua en el área regadía del Río Mendoza (Argentina). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.* 37(2): 1-23.
13. Nijensohn, L. 1961. *Calidad de Aguas de Riego. Primer curso Nacional de Manejo de Riego. Riego y Drenaje. Mendoza. Capítulo 14.*
14. *Official Methods of Analysis of AOAC International. 1995. 16th Edition. Volumen I.*
15. Roldán Cañas, J.; Díaz Jiménez, M.; Pérez Arellano, R.; Moreno Pérez, M. F. 2010. Mejora de la gestión del agua de riego mediante el uso de indicadores de riego. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.* 42(1): 107-124.
16. Thorne; D. W.; Peterson, H. B. 1954. *Técnica de Riego. Versión Española 1963. México.*
17. Thorne; D. W.; Peterson, H. B. 1996. *Técnica de Riego, Fertilidad y Explotación de los Suelos. Editorial Continental. México D. F. --- p.*
18. Torres, E.; Montaña, E.; Salomón, M.; Torres, L.; Urbina, S.; Fusari, M. 2003. *El agua en Iberoamérica. Aspectos de la problemática de las tierras secas. Editorial Alicia Fernández Cirelli y Elena Abraham. Publicado por CYTED. XVII (17-34).*
19. Wainstein, P. 1968. *Clasificación de las aguas de riego de Mendoza. Instituto de Suelos y Riego. Informes Científicos y Técnicos N°15.*