

Minería y Vulnerabilidad de la Calidad del Agua para Riego y Consumo en la Localidad de Tinogasta

Martin Graziano^{1,2}, Paula Rosin¹, Carolina S. Ramos¹, Ignacio Borón¹, M. Sol Ruiz¹, Fernando Garelli¹, M. Paula Montañez², Florencia Barbarich¹, Matias Blaustein¹, Francisco Cianfagna¹ y María Comelli¹

¹ Investigadores Populares sobre la Problemática Minera, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Universitaria, Pabellón 2, CABA, Argentina

² Laboratorio de Química del Agua, INQUIMAE-CONICET, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Universitaria, Pabellón 2, CABA, Argentina.

Mail de contacto: graziano@qi.fcen.uba.ar

RESUMEN

En la localidad de Tinogasta se encuentra ubicado un proyecto minero en etapa de exploración para la extracción de uranio, cobre y plata. El objetivo fue analizar el impacto que tendría esta explotación sobre la calidad del agua para riego y consumo en la localidad a partir de las características del yacimiento y la caracterización de las aguas subterráneas y superficiales. Se encontraron niveles elevados de B en todas las aguas analizadas, y elevados niveles de U y V en las aguas subterráneas. La existencia de anomalías radiométricas, posiblemente asociadas a depósitos de tipo *roll-front*, y la correlación encontrada entre los niveles de U, V y sulfatos en las aguas sugieren que la explotación de carnotita favorecería la movilización de estos elementos a las aguas subterráneas. A su vez, la baja capacidad buffer que presentan las aguas superficiales de la zona de recarga y las aguas subterráneas agravan esta situación.

Palabras clave: Minería de Uranio, Impacto Ambiental, Capacidad Buffer, Boro.

ABSTRACT

In the town of Tinogasta is located a mining project at the exploration phase for the extraction of uranium, copper and silver. The aim of this work was to assess the impact of the project on water quality for drinking and irrigation, analyzing variables such as the reservoir characteristics, the operating methodology and the characterization of groundwater and surface water. We found elevated levels of B in all water sources, and high levels of U and V in groundwater. The existence of radiometric anomalies possibly associated to roll front uranium deposits and the correlation found between U, V and sulfates for groundwater suggest that mining of carnotite could favor the mobilization of this elements to the groundwater. In turn, we have found a low buffering capacity for the surface water of the recharge area and for the groundwater, aggravating this situation.

Key words: Uranium mining, Environmental Impact, Buffer Capacity, Boron.

Introducción

La protección del medio ambiente debería ser una de las principales preocupaciones de los Estados-Nación. La minería es una actividad de alto impacto en el ambiente y por ello los estudios de evaluación de impacto ambiental deberían ser rigurosos e independientes de los beneficiarios. Además, deberían considerar el impacto sobre el modo de vida local (IPPM, 2012). En Latinoamérica han aumentado los emprendimientos mineros en respuesta, en parte, a normas ambientales y legales menos estrictas que en sus países de origen (Müezzinoğlu 2003, Secretaría de Minería de la Nación). Numerosos estudios han demostrado graves efectos sobre el ambiente por parte de la minería a cielo abierto, incluyendo la

degradación del suelo (Navarro et al., 2004), efectos sobre la vegetación (Ramos et al., 2012), contaminación atmosférica y de las aguas tanto superficiales como subterráneas (Luís et al., 2009; Mudd, 2008; Bidhendi et al., 2007; Dudka y Adriano 1997). La contaminación del agua por drenaje ácido durante y después del funcionamiento de la mina es una de las principales causas del impacto ambiental (Monjezi et al., 2009). En particular, se ha encontrado contaminación del agua superficial y subterránea con uranio en zonas de extracción del mismo (Lottermoser, 2010; Abdelouas, 2006; Mudd, 2001). Además, los diques de cola suelen contener grandes concentraciones de metales que son una fuente de contaminación adicional (Lottermoser 2010, Abdelouas

2006). Existen principalmente tres tipos de depósitos de Uranio, IOCG (del inglés: Iron Oxide-Copper-Gold), yacimientos en relación a discordancias, y de tipo roll-front (Lehmann, 2008), en particular este último en estrecha relación con acuíferos (Lottemoser, 2010; Lehmann, 2008). Las técnicas de explotación incluyen la minería subterránea, a cielo abierto o, más actualmente, la lixiviación *in situ* (Seidel, 1981). Ésta última se realiza inyectando en diferentes pozos soluciones ácidas o alcalinas para lixiviar el mineral presente en el acuífero (Lehmann, 2008).

En el año 2007 comenzó a trabajar en la localidad de Tinogasta (Catamarca, Argentina) la empresa australiana Cauldron Energy a través de Jackson Global Ltd. con el proyecto Río Colorado, que abarca una superficie de 762 km². Este se ubica a 7 km del centro de la ciudad para la extracción de uranio, cobre y plata. Su área de influencia abarca arroyos, nacientes y ríos de la cuenca del Río Abaucán. Tanto el agua superficial como la subterránea son utilizadas para riego y consumo en la ciudad de Tinogasta y localidades aledañas. La producción agrícola del departamento depende exclusivamente del riego, siendo éste su principal limitante.

El presente trabajo analizó el impacto que tendría la explotación del Proyecto Río Colorado sobre la calidad del agua para riego y consumo en la localidad de Tinogasta a partir de las características del yacimiento, la metodología de explotación, y la caracterización de las aguas subterráneas y superficiales de la cuenca del Río Abaucán.

Materiales y métodos

Descripción del Área de estudio

La zona de estudio se encuentra delimitada, hacia el sur, por el límite de la provincia de Catamarca; hacia el este, se encuentra limitada por las Sierras de Zapata y de Copacabana, y hacia el oeste, por el Cerro Negro de Rodríguez (Fig. 1). El clima es de tipo árido puneño. Las precipitaciones son escasas, (200 mm anuales) con máximos entre los meses de diciembre y marzo. La temperatura media anual es de 18° C. En verano se registran máximas de 33° C y mínimas de 19° C, mientras que en invierno varía entre los 21°C y 2° C.

Muestreo

La caracterización hidroquímica se realizó a partir de 15 puntos de muestreo representativos de las diferentes fuentes de agua de la zona: agua superficial de la zona de recarga de los

acuíferos (AZR, 3), Río Abaucán (RA, 3), agua subterránea (ASub, 5), y agua de red (Red, 4) (ver Fig. 1). Los muestreos se realizaron en Febrero y Agosto de 2012.

Las muestras para analizar parámetros físico-químicos fueron recolectadas en botellas de PVC y conservadas a 0°C. Para la medición de alcalinidad, nitratos, nitritos y amonio se filtró con un filtro Whatman® GF/F de 0,75 µm y 47 mm diámetro membrana. Las muestras de metales se acidificaron con HNO₃ Suprapur y se conservaron a 0°C. Para la determinación de los restantes parámetros se conservaron a 4-8°C.

Análisis físico-químicos (FQ)

Se midieron *in situ* las siguientes variables físicoquímicas: Temperatura, pH, conductividad, turbidez y alcalinidad por titulación ácido/base (titulador digital marca Hach®). En laboratorio y antes de las 48hs se midió: dureza, sulfatos, fosfatos, nitratos, cloruros, empleando un espectrofotómetro marca Hach® DR2800. Los métodos aplicados siguen normativa estandarizada (APHA-AWWA-WPCF, 1992). Se determinó la concentración de los cationes mayoritarios Na, K, Mg, Ca, mediante cromatografía iónica con equipamiento Dionex, columna IonPac CS10. Se analizó por espectrometría de emisión atómica ICP-MS la concentración de: As, U, Zn, Se, B, Cu, V y Fe.

Análisis estadístico

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) para distinguir las principales variables que caracterizan a los tipos de agua. Se realizó un ANOVA en bloque de 1 factor para analizar las variaciones de alcalinidad entre los tipos de agua, y un Test de Bonferroni para realizar comparaciones *post-hoc*. Por último, se realizaron correlaciones parciales (Pearson) para analizar la correlación entre diferentes parámetros, controlando por la variable Temperatura. Para los análisis se utilizó el programa InfoStat (Di Rienzo et al., 2008).

Resultados y discusión

Análisis del contexto

Geología y Geomorfología

El área exhibe un paisaje típico de un sistema de montañas separados por amplios valles intermontanos (Niz, 2003). Una de las principales formaciones presente en la ladera oriental del Cerro Negro de Rodríguez es la Formación Río Colorado (estratos Famatinense de Bodenbender), constituida por sedimentos conglomerádicos, areniscosos y piroclásticos,

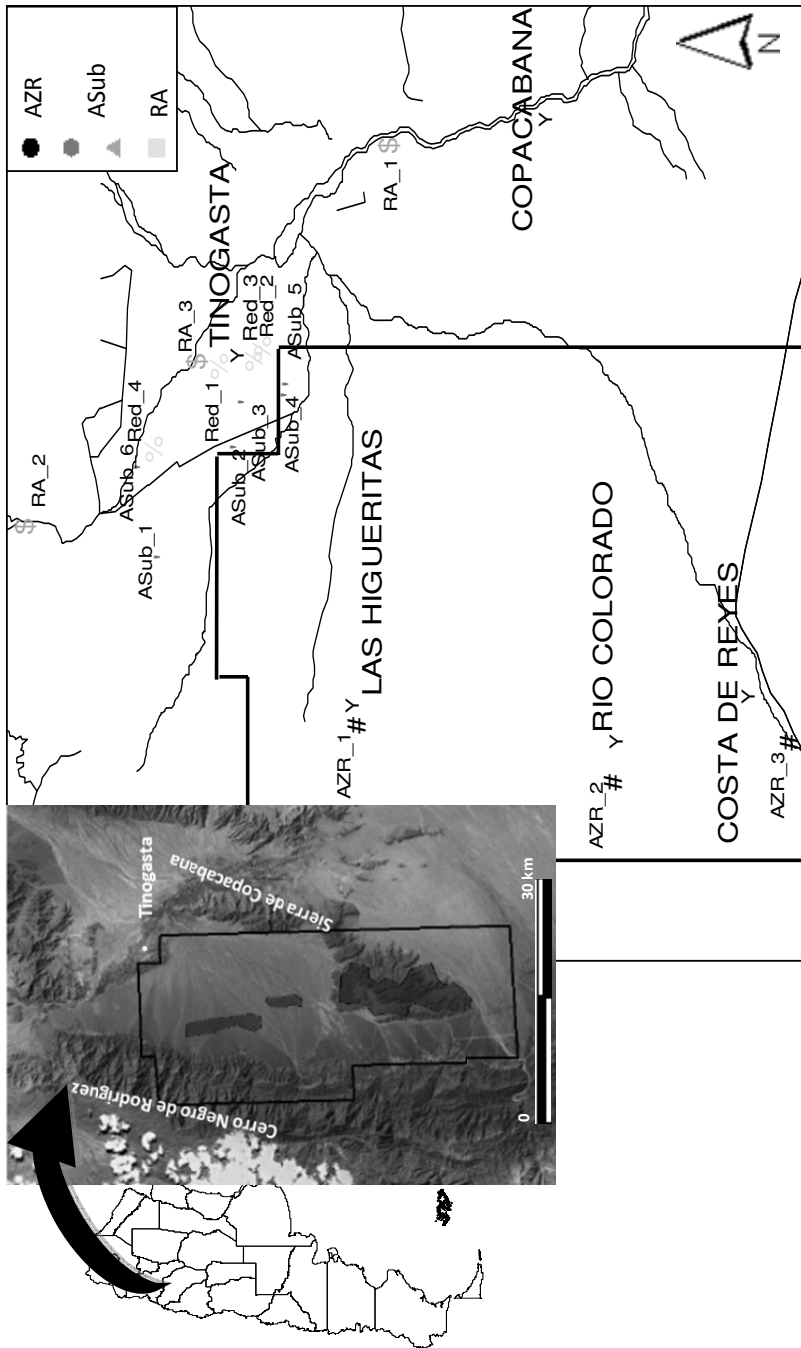


Figura 1. Ubicación del área de estudio y localización de los sitios de muestreo. AZR: Agua sup. de la zona de recarga, ASub: Agua subterránea, RA: Río Abaucán y Red: Agua de red de Tinogasta. Se muestra además el área del proyecto y las zonas con anomalías radiométricas.

de edad no determinada. Hacia el S se sobreimpone a la Formación Potrerillo, de edad miocena-pliocena, que se dispone en forma discontinua en la fractura La Aguadita–Santa Cruz. El Piedemonte del Cerro Negro De Rodríguez es el más extenso y amplio de la región, y se trata de una sucesión de abanicos aluviales y paleoconos coalescentes que forman una cuenca sedimentaria con superposición de abanicos aluviales.

Hidrología e Hidrogeología

El sistema hidrográfico más importante de la región es el Río Abaucán. Se origina por la confluencia de los ríos Chaschuil y Fiambalá (Subsecretaría de Recursos Hídricos -SsRH-). Su cuenca equivale al 21% de la superficie catamarqueña y se alimenta fundamentalmente con agua de deshielo. Su caudal promedio es de 2,54 m³/s (SsRH). La zona del valle Abaucán presenta una cubeta subterránea intermontana. Las rocas permeables del cono de deyección sirven de zona de recarga de los acuíferos, distalmente confinados por sedimentos impermeables más finos (limo arcillosos). A su vez, existe un endicamiento subterráneo de las aguas entre el valle Abaucán y el de Copacabana, abierto hacia este último donde se encuentra una cubeta subsidiaria (Sosic, 1972). Estudios previos de geoléctrica en el sector norte-noreste de la ciudad de Tinogasta (Dirección Provincial de Colonización, Ministerio de Producción y Desarrollo, Provincia de Catamarca), entre los valles del Abaucán y de Copacabana, evidenciaron una unidad hidrogeológica de interés a partir de los 87m. Esta unidad se extendería hasta más allá de los 125-145m de profundidad en dirección Oeste-Este y alojarían al acuífero libre o formaciones de baja saturación del sistema hidrogeológico. La siguiente capa, caracterizada por una formación clástica más fina y menos resistiva alojaría los acuíferos semiconfinados y confinados del sistema, que debido a su baja resistividad representan el sistema de mayor interés hidrogeológico. Si bien no existe un relevamiento detallado de la hidrogeología de la zona oeste de Tinogasta, a partir de datos de perforaciones cercanas a la ciudad en dirección suroeste, se han detectado dos capas acuíferas, entre aprox. 30-47 m, y 90-96 m (Sosic, 1972). A su vez las perforaciones relevadas abarcan profundidades de 66-77mbbp y 86-90mbbp en el sitio ASub_4 (NE 28mbbp), y de 120mbbp en ASub_3, de 60-105mbbp en ASub_2, y de 205mbbp para ASub_1 (NE 82-84mbbp). Esto indicaría la presencia en la zona oeste de

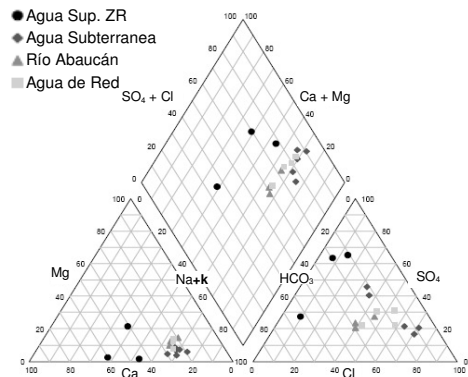


Figura 2. Diagrama de Piper de iones mayoritarios para los diferentes tipos de agua.

Tinogasta de acuíferos libres y semiconfinados-confinados en los 100m de profundidad.

El yacimiento y los depósitos minerales

Según Sosic (1972) y datos de la empresa, se han observado afloramientos mineralizados de uranio, cobre y plata en sedimentos del tipo *Red-Bed* de la Formación Río Colorado. Los muestreos de *due diligence* realizados por la empresa arrojan resultados de hasta 2.451 ppm U₃O₈, con profundidades de hasta 200m. El mineral encontrado es carnotita, de color pardo-amarillento, y se corresponde a un vanadato de potasio y uranio con fórmula química K₂(UO₂)₂(VO₄)₂·3H₂O. En dicha Formación se presentan de color pardo-amarillento claro y rellenando los planos de fisibilidad, grietas y diaclasas de las lutitas.

Se han encontrado además grandes zonas de anomalías radiométricas de uranio en los sedimentos fluviales no consolidados del valle del Abaucán (Fig. 1), derivados en parte del entorno mineralizado de la Formación Río Colorado. Estas indicarían la presencia de depósitos de tipo *roll-front* por debajo de los sedimentos en contacto con el agua subterránea.

Caracterización general de las aguas

En la Tabla 1 pueden observarse los resultados obtenidos. Las aguas son en su mayoría de tipo sulfatadas/cloruradas sódicas (Fig. 2), con excepción de algunas aguas de la zona de recarga que se hallan enriquecidas en Ca²⁺. Esto es consistente con un modelo de evolución hidroquímica correspondiente a una fase intermedia del proceso de recarga y descarga de acuíferos, en donde las aguas subterráneas se han enriquecido en SO₄²⁻ y Na⁺

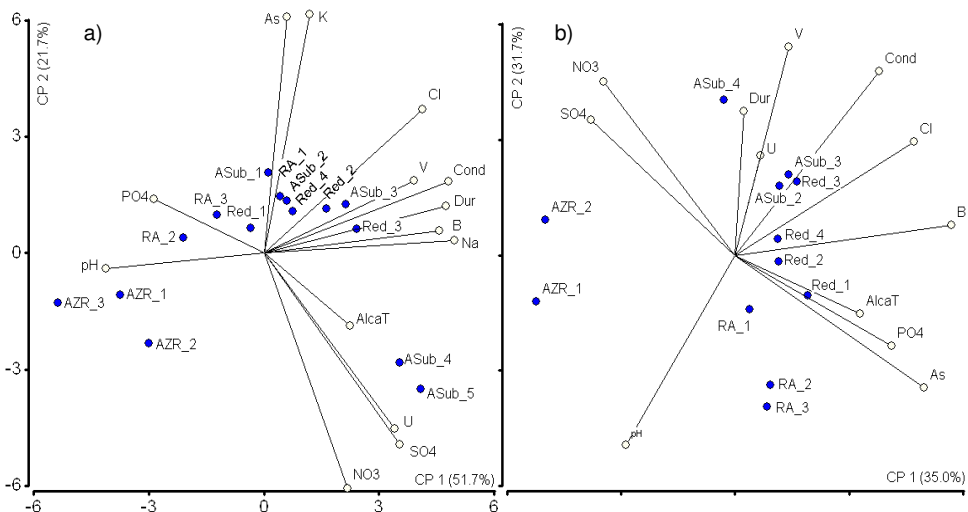


Figura 3. Diagrama de ordenamiento de los ejes 1 y 2 del PCA a) Verano y b) Invierno. Las líneas representan las variables y los puntos a los sitios de muestreo. Cond: Conductividad, Dur: Dureza, AlcaT: Alcalinidad Total, SO4: Sulfatos, NO3: Nitratos, PO4: Fosfatos.

en detrimento de HCO_3^- y Ca^{2+} (Custodio y Llamas, 1983). El PCA mostró en verano un agrupamiento de las aguas de la zona de recarga y las correspondientes al Río Abaucán en relación al incremento de Na^+ , pH y fosfatos (Fig. 3a). Las muestras de agua subterránea y de red conformaron otro grupo, con excepción de dos muestras de agua subterránea que se diferenciaron en el contenido de sulfatos y uranio. Por el contrario, en invierno las aguas del Río Abaucán se diferencian más de las aguas superficiales de la zona de recarga acercándose a la composición de las aguas subterráneas (Fig. 3b), evidenciando el comportamiento de río ganador/efluente que posee el Río Abaucán en esta zona.

Alcalinidad y capacidad buffer de las aguas

La alcalinidad del agua permite tener una idea de su capacidad buffer, lo cual es de gran relevancia al evaluar el efecto sobre las aguas de proyectos mineros metalíferos (Garbagnati et al., 2005). Los valores de alcalinidad observados fueron moderados para el Río Abaucán (RA, media \pm ES: 233 ± 23 mg/L CaCO_3) y el agua de Red (Red, 193 ± 20 mg/L), y bajos para el agua subterránea (ASub, 155 ± 18 mg/L) y las aguas superficiales de la zona de recarga (AZR, 101 ± 23 mg/L). El ANOVA mostró un efecto principal significativo del tipo de agua (ANOVA, $F_{4,25}$, $p = 0,0047$) pero no de la época ($F_{1,25}$, $p = 0,53$). Los contrastes realizados evidenciaron una diferencia

significativa de la media de las aguas AZR con respecto a las RA y Red ($p < 0,05$).

En resumen, las aguas superficiales de la zona de recarga presentaron un nivel bajo de alcalinidad. Esto es de especial relevancia ya que se ubican cerca (o dentro) de la zona del proyecto e infiltran en el terreno del valle.

Uranio, vanadio, sulfatos y otros metales (metaloides)

Se encontraron niveles elevados de Boro para todos los tipos de agua con excepción de las aguas superficiales de la zona de recarga (Fig. 4a). Los valores medios fueron: AZR 200 ± 20 $\mu\text{g/L}$, ASub 1610 ± 150 $\mu\text{g/L}$, RA 1500 ± 100 $\mu\text{g/L}$, Red 1600 ± 40 $\mu\text{g/L}$. Sin diferencias entre los valores obtenidos en verano e invierno. Tanto la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Código Alimentario Argentino (CAA) y la legislación provincial de Catamarca establecen como nivel límite 500 $\mu\text{g/L}$ en agua de consumo. Las afecciones asociadas más destacadas son malformaciones en fetos, alteraciones en el sistema reproductivo masculino y enfermedades crónicas renales (Pahl et al., 2005).

Los niveles de As fueron elevados respecto a lo sugerido por la OMS y el CAA (10 $\mu\text{g/L}$) en muestras de aguas subterráneas (rango, 3-14 $\mu\text{g/L}$), Red y RA (11-26 $\mu\text{g/L}$; Fig. 4b).

El Uranio mostró valores por debajo del límite sugerido por la OMS (30 $\mu\text{g/L}$; WHO, 2012) en el agua de red (Fig. 4c). Sin embargo,

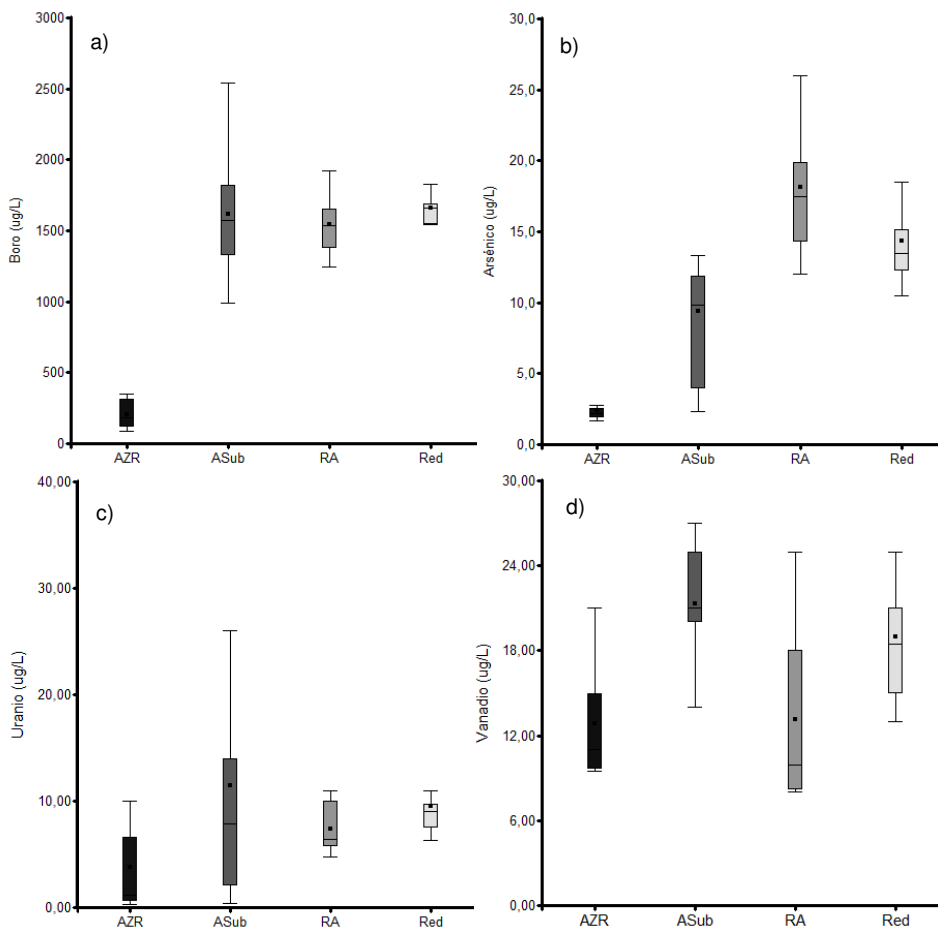


Figura 4. Diagrama *box-plot* a partir de los Niveles de a) Boro, b) Arsénico, c) Uranio, d) Vanadio para los diferentes tipos de agua analizados. Cajas sólidas representan rango percentil 25-75%, el cuadrado interno la media, y las barras los valores máximos y mínimos.

en dos de las muestras de agua subterránea se detectaron valores (26 y 38 µg/L; Fig. 5c) por encima del límite nacional establecido para agua de riego (10µg/L, Ley 24051 de residuos peligrosos). Existen trabajos sobre toxicidad a nivel renal del uranio en agua de consumo (World Health Organization, 2012). La toxicidad del Boro y el Uranio a nivel renal es de destacar ya que en Tinogasta, según una comunicación de médicos locales, existiría una alta incidencia de problemas renales (com. personal).

El Vanadio también presentó valores elevados en Red, RA y ASub (media: $18,5 \pm 0,2$ µg/L; Fig. 4d). Los demás parámetros se encontraron dentro de los valores legislados.

Vulnerabilidad de las aguas

Los yacimientos de tipo roll-front están asociados a la movilización de uranio por infiltración de las aguas y su posterior encuentro con un ambiente reductor, el cual, en el caso de Tinogasta, podría deberse a la materia orgánica presente en los sedimentos (Spirakis, 1996). El ambiente reductor rico en pirita, al entrar en contacto con las aguas subterráneas provoca la oxidación de los sulfuros a sulfatos y del UIV a UVI (Lottermoser, 2010; Rackley, 1972), provocando la liberación y el enriquecimiento de las aguas en uranio y sulfatos (Langmuir y Chatham, 1980). Las correlaciones parciales (controlando por la temperatura del agua) de las

concentraciones de uranio, vanadio y sulfatos en las aguas subterráneas mostraron una

Conclusiones

Tabla 1. Resultados de los parámetros FQ y metales medidos para cada sitio de muestreo

Cód.	Temp. (°C)		pH		Conductividad (µS)		Alcalinidad T. (mg/L CaCO ₃)		Bicarbonatos (mg/L)		Cloruros (mg/L)		Sulfatos (mg/L)		Dureza (mg/L CaCO ₃)		Nitratos (mg/L)		Fosfatos (mg/L)					
	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I				
AZR_1	31	14	8.2	7.9	680	610	66	54	66	54	24.5	29.3	170	170	133	130	1.4	1.7	0.58	0.11				
AZR_2	22	8	8.4	8.2	770	1190	146	130	146	130	18.7	37.5	260	310	195	400	2.1	1.5	0.19	0.11				
AZR_3	17	10	8.3	8	390	440	110	98	110	98	8.9	11.1	40	50	95	140	1.5	1.2	0.81	0.05				
A Sub_1	32	30	7.4	7.8	1650	1920	99.2	40	99.2	40	340	496	120	70	244	291	1.3	0.7	0.19	0.17				
A Sub_2	30	29	7.4	7.2	1880	1990	61.2	82	61.2	82	327.5	485	140	100	258	278	1.8	1.2	0.5	0.28				
A Sub_3	26	25	7.1	7	2020	1970	148	151	148	151	367.5	425	180	100	314	300	1.5	0.8	0.09	0.13				
A Sub_4	24	22	7.3	7.1	1900	1920	240	240	240	240	218	253	430	320	304	301	2.6	2.1	0.09	0.28				
A Sub_5	24	ND	7.1	ND	>2000	ND	284	ND	284	ND	266	ND	420	ND	300	ND	2.5	ND	0.23	ND				
A Sub_6	ND	23	ND	7.5	ND	1420	ND	212	ND	212	ND	288	ND	110	ND	ND	ND	1	ND	0.32				
RA_1	34	8	8.3	7.9	1710	1430	228	231	228	231	228	257	200	150	218	255	1.3	0.7	0.46	0.23				
RA_2	20	8	8.3	8.1	1170	1140	246	195	246	195	145	182	110	70	217	224	1.6	0.4	0.95	0.37				
RA_3	28	8	8.6	8.4	1220	1150	244	254	244	254	144	203	130	80	216	220	1.5	0	0.6	0.34				
Red_1	25	19	7.8	7.2	1300	1330	226	226	226	226	158	230	120	110	246	251	1.8	0.8	0.4	0.47				
Red_2	26	20	7.2	7.5	1800	1490	181	180	181	180	325	267	180	130	302	274	1.5	0.8	0.3	0.34				
Red_3	28	21	7.1	7.1	2080	1930	168	158	168	158	352.5	435	290	120	312	305	1.5	0.8	0.08	0.22				
Red_4	25	22	7.4	7.6	1500	1570	198.5	203	198.5	203	217.5	270	210	150	290	272	1.8	1.2	1	0.31				
ppm																								
Cód.	Na		K		Mg		Ca		As		U		Zn		Se		B		Cu		V		Fe	
	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
AZR_1	90	0	0	0	71	2.8	2	0.6	0.3	< 0.2	0.6	4.6	5.4	351	312	1.9	1.5	21	15	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	
AZR_2	74	4	22	78	3.6	2.2	6.6	10	< 0.2	< 0.2	< 0.2	3.1	4.9	195	204	2.0	2.0	9.6	9.5	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	
AZR_3	28	0	1	42	2.1	1.7	1.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	1.5	2.1	85	119	0.8	0.9	11	11	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2		
A Sub_1	230	10	7	102	14	9.6	2.0	< 0.2	< 0.2	1.8	3.6	4	1134	993	3.7	3.7	22	18	0.8	0.5				
A Sub_2	294	7	6	103	13	10	0.4	1	< 0.2	1.1	5.1	5.1	1322	1436	4.9	4.6	25	20	< 0.2	2.3				
A Sub_3	315	7	15	110	13	11	7.9	5.8	< 0.2	0.3	4.3	3.5	1669	1546	5.8	4.6	25	20	0.9	< 0.2				
A Sub_4	354	3	17	111	4.1	3.0	26	14	< 0.2	< 0.2	7.5	5.8	2093	1822	5.6	4.6	27	20	< 0.2	1.3				
A Sub_5	400	0	14	102	3.4	ND	38	ND	< 0.2	ND	7.2	ND	2541	ND	6.2	ND	22	ND	< 0.2	ND				
A Sub_6	ND	ND	ND	ND	ND	13	ND	8.1	ND	< 0.2	ND	1.9	ND	1605	ND	3	ND	14	ND	< 0.2	< 0.2			
RA_1	261	9	20	103	21	12	10	5.7	< 0.2	< 0.2	2.2	2.2	1921	1654	6.8	4.3	25	8.8	2.4	2.2				
RA_2	154	6	18	46	18	17	6.9	5.9	< 0.2	< 0.2	1.4	1.2	1247	1530	3.9	3.2	11	8.2	9.4	21				
RA_3	186	7	19	70	26	15	11	4.8	< 0.2	< 0.2	1.8	1.2	1536	1377	4.8	2.9	18	8.0	1.3	19				
Red_1	195	10	19	68	19	14	11	7.5	< 0.2	< 0.2	2.0	1.9	1542	1689	4.3	3.1	17	13	0.2	< 0.2				
Red_2	301	7	18	106	14	13	9.0	9	< 0.2	< 0.2	3.7	2.2	1657	1629	5.7	3.5	24	15	< 0.2	0.3				
Red_3	315	5	17	114	13	11	8.5	6.3	< 0.2	0.4	4.2	3.5	1668	1546	5.8	5.1	25	20	< 0.2	0.2				
Red_4	237	13	26	80	17	14	15	9.7	< 0.2	0.2	2.9	2.4	1825	1745	4.1	3.3	21	17	< 0.2	< 0.2				

correlación positiva significativa entre los niveles de sulfatos y uranio ($r=0,88$; $p<0,01$), sulfatos y vanadio ($r=0,77$; $p<0,01$), y una tendencia positiva entre los niveles de uranio y vanadio ($r=0,49$; $p=0,18$). Se plantea a futuro realizar un análisis hidrogeoquímico más detallado para evaluar el control de la solubilidad de estos compuestos y el índice de saturación de los mismos. Estos resultados están en concordancia con la detección de anomalías radiométricas en la planicie del valle Abaucán y sugiere que la explotación de uranio de estos sedimentos podría generar liberación de vanadio y sulfatos a las aguas subterráneas, además de la movilización de uranio.

Se ha analizado la hidroquímica de diferentes tipos de aguas en la zona de Tinogasta que podrían verse alterados por la instalación de un emprendimiento de uranio, cobre y plata a 7 km del centro de la ciudad. Los resultados indican una mayor vulnerabilidad de las aguas superficiales de la zona de recarga, seguida de las aguas subterráneas, ante la posible generación de desechos ácidos en el proceso minero, con el consecuente impacto sobre su calidad para consumo y riego. En este sentido es necesario un mayor conocimiento de las capas acuíferas para evaluar la existencia de procesos *buffer* en las aguas subterráneas. Se detectaron además altas concentraciones de Boro en todos los tipos de agua analizados que

las hacen no aptas para consumo humano y riego, haciendo necesaria una urgente intervención por parte de las autoridades correspondientes. A su vez, la existencia de anomalías radiométricas, posiblemente asociadas a depósitos de tipo *roll-front*, la composición mineralógica y la correlación encontrada entre los niveles de U, V y sulfatos en las aguas analizadas, sugieren que la explotación de carnotita favorecería la movilización de estos elementos a las aguas subterráneas presentes en la zona de recarga, con la posible afectación de las mismas, y empeorando de este modo la situación actual debido a los peligros reportados de la ingesta de Uranio y Vanadio.

En suma, de acuerdo a los resultados obtenidos entendemos que la localidad de Tinogasta y en particular la calidad de las aguas para consumo y riego en la localidad serán afectadas por la instalación del emprendimiento minero, y recomendamos tomar las medidas adecuadas para evitarlo.

Bibliografía

- Abdelouas, A. 2006. Uranium Mill Tailings: Geochemistry, Mineralogy, and Environmental Impact. *Elements*, 2(6):335-341.
- APHA-AWWA-WEF. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Edition.
- Bidhendi N., G. R., Karbassi, A. R., Nasrabadi, T. y Hoveidi, H. 2007. Influence of copper mine on surface water quality. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 4(1):85-91.
- Custodio, E. y Llamas M. R. 1983. Hidrología subterránea. Ed. Omega. Barcelona
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarín, M. G., González, L., Tablada, M. y Robledo C. W. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, UNC, Argentina.
- Dudka, S. y Adriano, D. C. 1997. Environmental impacts of metal ore mining and processing: a review. *J. Environ. Qual.*, 26:590-602.
- Garbagnati, M. A., González, P. S., Antón, R. I. y Mallea, M. A. 2005. Características físico-químicas, capacidad buffer y establecimiento de la línea base ambiental del Río Grande, San Luis, Argentina. *Ecol. Austral*, 15:59-71.
- Investigadores Populares sobre la Problemática Minera, IPPM. 2012. La expansión de la minería a cielo abierto en la región cordillerana de Argentina. Sus implicancias y resistencias. *Ecos FUEM Ecosocial*, 19:1-6.
- Langmuir, D. y Chatham, J. 1980. Groundwater prospecting for sandstone-type uranium deposits: A preliminary comparison of the merits of mineral-solution equilibria, and single-element tracer methods. *J. Geoch. Explor.*, 13(2-3):201-219.
- Lehmann, B. 2008. Uranium Ore Deposits. *Advanced Mining Solutions*, 2:26-26.
- Lottermoser, B. G. 2010. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts, Third Edition. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Luis, A. T., Teixeira, P., Almeida S. F. P., Ector, L., Matos J. X. y Ferreira da Silva, E. A. 2009. Impact of Acid Mine Drainage on Water Quality, Stream Sediments and Periphytic Diatom Communities in the Surrounding Streams of Aljustrel Mining Area (Portugal). *Water, Air, Soil Poll.*, 200:147-167.
- Monjezi, M., Shahriar, K. y Dehghani, H. 2009. Environmental impact assessment of open pit mining in Iran. *Environ Geol.*, 58(1):205-216.
- Mudd, G. M. 2008. Radon releases from Australian uranium mining and milling projects: assessing the UNSCEAR approach. *J. Environ. Radioactiv.*, 99:288-315.
- Mudd, G. M. 2001. Critical review of acid in situ leach uranium mining: 1. USA and Australia.
- Müezzinoğlu, A. 2003. Review of Environmental Considerations on Gold Mining and Production. *Crit Rev Env Sci Tec.*, 33(1):45-71.
- Navarro, A., Collado, D., Carbonell, M. y Sanchez, J.A. 2004. Impact of mining activities on soils in a semi-arid environment: Sierra Almagrera district, SE Spain. *Environ Geochem Health*, 26:383-393.
- Niz, A. E. 2003. Geomorfología del Sector Meridional del Dpto de Tinogasta, Prov. de Catamarca, Argentina. Tesis Doctoral. UNCa.
- Pahl, M., Culver, B., y Vaziri, N. 2005. Boron and the kidney. *J. Ren Nutr.*, 15(4):362-370.
- Rackley, R. I. 1972. Environment of Wyoming Tertiary Uranium Deposits. *Bull. Amer. Assoc. Petroleum Geologists*, 56(4):755-774.
- Ramos, C. S., Marchetti, C., Apellaniz, M. F. y Graziano, M. 2012. La Alumbra bajo teledetección: análisis temporal de la vegetación de una mina a cielo abierto en la provincia de Catamarca, Argentina. Trabajo completo del Congreso Argentino de Teledetección, Córdoba, Argentina.
- Seidel, D. C. 1981. Extracción de uranio de sus menas. *Boletín del Organismo Internacional de Energía Atómica*, 23(2):24-28.
- Sosic, M. 1972. Descripción geológica de la hoja 14d, escala 1: 200.000. Ar, Subsecretaría de Minería. Dir. Nac. de Geología y Minería.
- Spirakis, C. S. 1996. The roles of organic matter in the formation of uranium deposits in sedimentary rocks. *Ore Geol Rev.*, 11:53-69.