
Arsénico en agua subterránea de Uruguay y riesgo a la salud asociado (Proyecto AsURU): resultados preliminares

P. Collazo
K. Pamoukaghlián
V. Bühl

P. Pizzorno
N. Mañay


Resumen: Con el objetivo de dar una solución al problema de los elevados valores de arsénico (As) en agua subterránea de Uruguay, se está desarrollando la fase inicial del proyecto multidisciplinario e interinstitucional “Arsénico en agua subterránea de Uruguay y riesgo a la salud asociado” (AsURU), coordinado por la Facultad de Ciencias y Facultad de Química, con la participación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UDELAR) y de varios organismos gubernamentales¹. El Acuífero Raigón y los Acuíferos Cretácicos en el litoral del Río Uruguay son los más afectados, pero también existen anomalías en otros

acuíferos porosos e incluso en acuíferos fisurados. En la fase inicial de este proyecto y de acuerdo con una revisión histórica de los valores de arsénico elevado (principalmente basada en datos proporcionados por Administración estatal de obras hidráulicas (OSE), y considerando el consumo de agua subterránea por parte de la población, se han seleccionado las siguientes áreas piloto: (a) Conchillas, presentando concentraciones de $As > 30 \mu\text{g L}^{-1}$; (b) Young, de acuerdo con el registro histórico de valores de As elevados ($As > 10 \mu\text{g L}^{-1}$) y al consumo prolongado de 100% de la población; (c) San Javier, con valores de $As > 10 \mu\text{g L}^{-1}$; y (d) Libertad, donde se registran valores de As entre 10 y $30 \mu\text{g L}^{-1}$. El tema debe ser abordado desde el punto de vista geológico e hidrogeológico, ya que para poder dar una solución se debe identificar el origen del contaminante y tratar de prevenir la extracción de agua en condiciones de calidad insuficientes, teniendo en cuenta la incidencia en la salud humana. La remediación debería ser una herramienta para utilizar mientras no se encuentran las soluciones más adecuadas, las cuales se obtienen al realizar perforaciones libres de arsénico con base en un estudio de los niveles permeables afectados. En tal contexto, se debería, asimismo, recurrir a remediar aquellas perforaciones para las cuales no es posible eliminar el As mediante el sellado de niveles permeables.

Palabras clave: arsénico (As), calidad del agua subterránea, áreas piloto, contaminación natural.

¹ Para mayor información consultar <http://icgeologicas.fcien.edu.uy/2018/10/10/proyecto-asuru-arsenico-uruguay/>

Recibido: Marzo 24, 2020 /Aceptado: Agosto 15, 2020
Publicado en línea: Octubre, 2020
© 2020

P. Collazo • K. Pamoukaghlián 
Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias,
Universidad de la República de Uruguay (UDELAR),
Iguá # 4265, 11.400, Montevideo, Uruguay.
E-mail de correspondencia: mpaula@fcien.edu.uy

V. Bühl • P. Pizzorno • N. Mañay
Departamento Estrella Campos, Facultad de Química,
UDELAR, General Flores # 2124, Montevideo,
Uruguay.

Abstract: The multidisciplinary and inter-institutional project “Arsenic in groundwater of Uruguay and associated health risk” (AsURU) is taking place in the initial phase, with the aim to solve the problem of high values in groundwater in Uruguay, coordinated by Science and Chemistry Faculties and counting with the participation of the Ingeniery Faculty of the Uruguayan Republic University (UDELAR) and several government agencies. The main affected aquifers are the Raigón Aquifer on the southern coast and the Cretaceous Aquifers on the western coast of Uruguay. However, there are anomalies in other sedimentary aquifers and even in fractured aquifers. In the initial phase of this project and after an historical review (mainly based on data provided by State Waterwork Administration (OSE) of high arsenic values and quantitative factors regarding groundwater consumption, the following pilot areas have been selected: (a) Conchillas, presenting concentrations of $\text{As} > 30 \mu\text{g L}^{-1}$; (b) Young, according to the historical record of high As values ($\text{As} > 10 \mu\text{g L}^{-1}$) and the prolonged consumption of 100% of the population; (c) San Javier with As values $> 10 \mu\text{g L}^{-1}$; and (d) Libertad, with As recorded values between 10 and $30 \mu\text{g L}^{-1}$. The problem must be approached from the geological and hydrogeological point of view because the origin of the contaminant must be identified and try to prevent water extraction of low quality, regarding human health implications. Remediation should be used in the meantime while most suitable solutions cannot be founded, which would be obtained by designing free-arsenic wells, based on the identification of affected permeable levels. However, remediation should be applied in places for which it is not possible to eliminate arsenic just sealing permeable levels.

Keywords: arsenic (As), groundwater quality, pilot area, natural contamination.

INTRODUCCIÓN

La presencia de anomalías de arsénico (As) en el agua subterránea es un tema de salud ambiental muy importante para el país, ya que gran parte de la población rural se abastece de agua subterránea. El valor máximo permitido, según las normativas de potabilidad vigentes en Uruguay es de $20 \mu\text{g L}^{-1}$ (0.02 mg/L) (UNIT, 2010); se tiene previsto en un futuro próximo bajar este a $10 \mu\text{g L}^{-1}$ (0.01 mg/L), valor establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el agua potable, por motivos de salud (WHO; 2010). Si bien se cuenta con las referidas normas de potabilidad de agua, no existen estudios sistemáticos de calidad de agua subterránea sobre la incidencia en la salud humana. Sin embargo, recientemente se hizo una primera aproximación para intentar correlacionar el riesgo de cáncer de tipo melanoma en hombres y mujeres con valores elevados de As, con resultados interesantes (Mañay et al., 2019).

El Proyecto AsURU, coordinado por la Facultad de Ciencias (Paula Collazo y Karina Pamoukaghlián) y por la Facultad de Química (Nelly Mañay), tiene como objetivo principal dar una solución a esta problemática, haciendo un enfoque no solamente desde el punto de vista de la hidrogeología y la caracterización de acuíferos, sino también desde el riesgo a la salud, además de buscar soluciones por medio de métodos de remediación de acuíferos, mitigación del As en perforaciones ya existentes y la posible prevención en la construcción de nuevas perforaciones.

El presente reporte pretende mostrar los avances y dificultades encontrados durante este proceso. Desde el punto de vista de la hidrogeología, se ha avanzado en la recopilación de datos acerca de las bases teóricas de la hidrodinámica del As en el agua subterránea y las posibles causas naturales de su origen. Los resultados de la investigación de Machado y colaboradores (2019a; 2019b) avalan un origen natural del As debido a la disolución de vidrio volcánico, lo cual se explicará más adelante.

Desde el punto de vista de riesgo a la salud, se han publicado resultados de las investigaciones que se están desarrollando por el grupo de la Facultad de Química. Con el objetivo de correlacionar las anomalías de As con un tipo de cáncer, Mañay y compañeros (2019) relevaron una región que cubre aproximadamente un tercio de todo el país e incluye dos acuíferos principales: el acuífero Mercedes y el Raigón. Los acuíferos investigados en el estudio corresponden a 61.5% del agua subterránea total extraída en el país para consumo humano (DINAMIGE, 2009), de acuerdo con datos provistos por la Administración de Obras Sanitarias del Estado (OSE) y por el Movimiento Pro-Eradicación de la Vivienda Rural Insalubre (MEVIR). Por una parte, dentro del área de estudio, aproximadamente 113,500 personas reciben agua subterránea en localidades en las que se reportaron niveles de As por encima de los recomendados por la OMS (OSE, 2016). Por otra parte, se contó con los datos de incidencia y mortalidad por cáncer registrados en la última publicación del Atlas de Cáncer de Uruguay (Comisión Honoraria de Lucha contra el Cáncer, CHLCC, 2014), en el cual aparecen reportada la incidencia de diferentes tipos de cáncer en hombres y mujeres de acuerdo con la división territorial del Uruguay.

Asimismo, y dada la preocupación de la incidencia de este problema en niños, se han realizado estudios epidemiológicos acerca de la exposición a bajos niveles de As en el agua de consumo en relación con la alimentación (considerando p.ej. el consumo de arroz), en niños de edad escolar para Uruguay (Kordas et al., 2016), así como la incidencia que esto tiene en el aprendizaje (Desai et al., 2020).

Por su parte, Falchi y colaboradores (2018) estudiaron la concentración de As en agua proveniente de zonas arroceras de la Laguna Merín. Se tomaron muestras de la laguna y principales canales que abastecen la producción de arroz, y muestras de agua subterránea de los pozos que abastecen a los habitantes del pueblo de la empresa

arroceras, se observaron concentraciones de tAs (arsénico total) sensiblemente más elevadas en las aguas subterráneas que en el agua superficial, pero no se encontraron valores de tAs mayores a $20 \mu\text{g L}^{-1}$ (valor admitido según la normativa vigente en Uruguay), salvo muy pocas excepciones (valores máximos referidos en la tabla 1: $22 \mu\text{g L}^{-1}$) y mayoritariamente entre 5 y $10 \mu\text{g L}^{-1}$ (valores admitidos según la normativa de la OMS).

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio del Proyecto AsURU abarca, en principio todo el país, aunque se tiene previsto comenzar por los acuíferos principales que se ven afectados por el problema de As, por ende, se reduce el área de estudio a la región litoral oeste y suroeste del país, que abarca los acuíferos Mercedes y Raigón. Para cada uno de estos acuíferos se han seleccionado las áreas piloto, señaladas sobre la carta geológica de Uruguay (Bossi et al., 2012), en la figura 1.

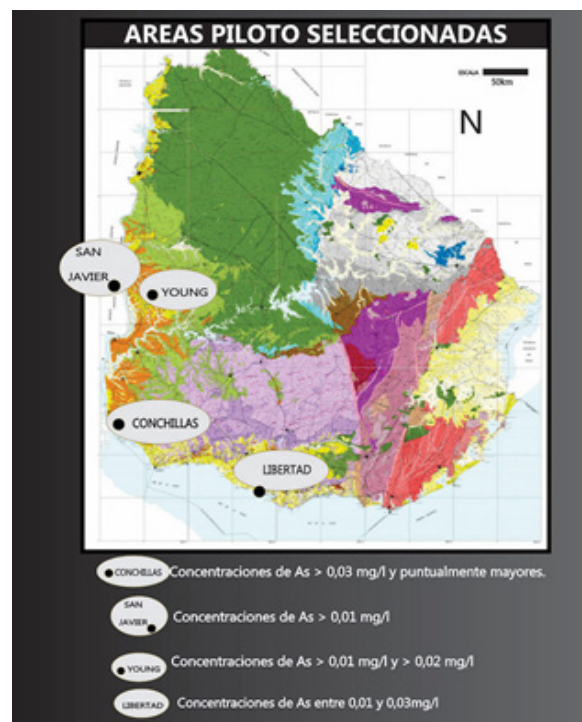


Figura 1. Mapa geológico de Uruguay (fuente: carta geológica 1:500.000 de Bossi et al. (2012); ver referencias geológicas en la figura 2), señalando las áreas piloto seleccionadas.

El Acuífero Raigón está conformado por la Formación Raigón, definida por Goso y Bossi (1966). Dicha unidad aflora en el litoral de los departamentos de Colonia, San José y Canelones; está compuesta por areniscas de granulometría variable, blancuzcas, con lentes y niveles de arcillas verdes y conglomerados y contiene concreciones calcáreas. Presenta estratificación rítmica, niveles lentiformes, estratificación paralela y cruzada y corresponde a un ambiente transicional continental fluvial, de acuerdo con Preciozzi y colaboradores (1985), así como con Spoturno y compañeros (1993). Su edad es Plioceno tardío-Pleistoceno medio, de acuerdo con Perea y Martínez (2004). Su límite infrayacente es la Formación Camacho y su límite suprayacente es la Formación Libertad.

El Acuífero Raigón se comporta como un acuífero confinado cuando es sobreyacido por la Formación Libertad y, en ocasiones, como un acuífero libre o aflorante. Los parámetros hidrodinámicos determinados por medio de pruebas de bombeo son transmisibilidad promedio de $264\text{m}^2/\text{d}$ y coeficiente de almacenamiento promedio de 6.5×10^{-3} , en tanto, los caudales específicos medios se estiman en $6\text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (Heinzen et al., 2003) y los caudales medios en los pozos explotados son de $10\text{-}20\text{m}^3/\text{h}$ (Montaño et al., 2005). Desde el punto de vista hidrogeoquímico, se clasifican como aguas bicarbonatadas sódicas, sin presentar anomalías respecto a sus propiedades fisicoquímicas ni a los elementos mayoritarios y minoritarios. Sin embargo, se han constatado varios casos de valores de As por encima de la normativa vigente (hasta $40\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$).

Para el estudio de esta problemática en el Acuífero Raigón se seleccionan como áreas piloto las localidades Conchillas y Libertad (figura 1). Cabe destacar que en la localidad de Conchillas se extrae agua del acuífero poroso Raigón y del acuífero fisurado subyacente.

El basamento cristalino subyacente que conforma el acuífero fisurado en la zona de Conchillas corresponde a la faja granto-

gneíssica Florida, la cual se desarrolla entre los cinturones Arroyo Grande y San José (Bossi, 2012). Dicha faja es instruida por granitos post-tectónicos como la granodiorita Piedra Alta y el mismo granito-gneiss de Conchillas. Son comunes, además, los xenolitos de micaesquistos decamétricos dentro de los granitos y gneiss (Oyhantçabal et al., 2011).

Los Acuíferos Cretácicos sedimentarios del litoral del río Uruguay que nos abocan, son los correspondientes al Grupo Paysandú, en particular la Formación Mercedes, cuyo estudio debe ser enfocado dentro del sistema acuífero conformado por el Grupo Paysandú. Éste se extiende principalmente sobre los departamentos de Salto, Paysandú, Río Negro, Colonia, Flores y Durazno y ocupa aproximadamente $25,000\text{ km}^2$ (Goso, & Perea, 2004). Se apoya en discordancia sobre el basamento cristalino de edad Paleoproterozoica y sobre la Formación Arapey de edad Cretácico inferior.

La Formación Mercedes fue definida por Lambert (1989) y su edad fue asignada como Cretácico superior por Serra (1945). Goso y colaboradores (1999) describen litologías clásticas (conglomerados y areniscas) predominantes, frecuencia de litofacies calcáreas ferrificadas y silicificadas y subordinadamente litologías pelíticas. Este mismo autor divide la Formación Mercedes en dos miembros: (1) Miembro Yapeyú compuesto por: (a) areniscas finas de color blancuzco, bien seleccionadas, cuarzosas y feldespáticas, con cemento calcáreo, las cuales presentan laminación plano-paralela, laminación cruzada planar, gradación normal en los planos de foresets de estratificación cruzada planar y (b) pelitas con laminación plano-paralela y frecuentemente con estructuras de carga y con interlaminaciones de carbonatos; (2) el Miembro del Chileno compuesto principalmente por areniscas y conglomerados, de colores blanco grisáceo y amarillento. Los conglomerados son polimícticos y presentan megaclastos de cuarzo, basalto, granito, gneiss, cuarcitas y esquistos. Subordinadamente, aparecen

areniscas medias a gruesas, de color gris claro, con cemento calcáreo o silíceo. Es interpretado por Goso y colaboradores (1999) y por Goso y Perea (2004) como paleoambiente fluvial de canales estrechos con variaciones en las condiciones del flujo.

La Formación Mercedes conforma el Acuífero Mercedes, el cual es un acuífero continuo de extensión local a regional, libre o confinado, constituido por arenisca de selección variable de finas a conglomeráticas y de consolidación variable. La permeabilidad es media a alta y la profundidad de las perforaciones varía según este acuífero esté libre o confinado desde 20 a 120 metros respectivamente (Heinzen et al., 2003). El caudal específico obtenido en el caso del acuífero Mercedes en el área sur del Río Negro está en torno a 0.6 m/h/m, siendo el máximo relevado 3.8 m/h/m y el mínimo 0.05 m/h/m. Por su parte, en el norte del Río Negro se observa un aumento en el caudal específico del acuífero Mercedes, con un promedio de 1.03 m/h/m, con un valor máximo de 6.5 m/h/m y mínimo de 0.05 m/h/m, de acuerdo con valores medios estimados por

Bonjour (2013), a partir de datos de Proyecto PRENADER y perforaciones de MEVIR. La transmisividad tiene un promedio de 36 m/día con extremos de 0.667 a 189 m/día y los coeficientes de almacenamientos son indicativos del confinamiento del acuífero (Bonjour, 2013). Hidroquímicamente se clasifica como de aguas bicarbonatadas cálcica, de calidad química generalmente buena, sin anomalías importantes respecto a los elementos mayoritarios y minoritarios (Heinzen et al., 2003). Sin embargo, se han constatado varios casos de valores de As por encima de la normativa vigente.

Con el fin de abordar el tema en los Acuíferos Cretácicos del litoral del Río Uruguay se seleccionaron como áreas piloto las localidades de Young y San Javier (figura 1).

Sin embargo, la investigación se encuentra en fase inicial, por lo que se presenta aquí una revisión general de los acuíferos a estudiar, sin entrar en detalles acerca de las áreas piloto, las cuales serán objetivo de estudio en fases posteriores.

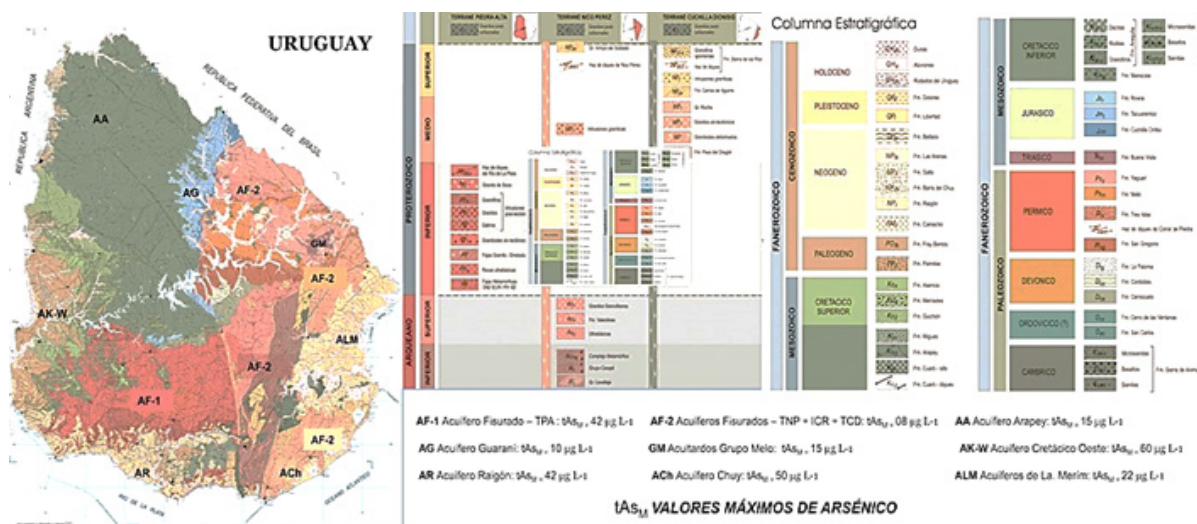


Figura 2. Mapa geológico de Uruguay, muestra valores máximos de los principales acuíferos, en relación con la geología. Nótese los valores elevados de concentración de As en agua subterránea (valores máximos de As total) para los Acuíferos Raigón (AR); Chuy (ACh), Cretácicos del litoral oeste y para el basamento cristalino en el Terreno Piedra Alta (TPA) que conforma acuíferos fisurados (AF-1).

METODOLOGÍA

El plan de trabajo que se lleva a cabo en el marco del Proyecto AsURU consiste en: (a) identificación de los acuíferos de Uruguay con presencia de As; (b) división en zonas de estudio; (c) selección de un área piloto de extensión local en cada zona, para su estudio, las cuales deben cumplir con criterios de selección establecidos: i) ser abastecidas por acuíferos de agua subterránea con valores de As superiores a la norma, ii) representar una extensión superficial significativa del acuífero contaminado, iii) tener conocimiento del acuífero (libre, semiconfinado o confinado),

potencia, productividad, etc., iv) conocer datos generales sobre el número de personas afectadas y tiempo de exposición, y v) tener evidencias de afectaciones a la salud en poblaciones con consumo de agua subterránea contaminada con As, según un registro histórico; (d) estudio hidrogeológico, hidrodinámico e hidrogeoquímico, con la finalidad de identificar el origen del As y su movilidad espacio-temporal; (e) identificación y selección de la población presuntamente afectada en el área piloto y evaluación de su exposición al As a través del agua; y (f) proponer soluciones a nivel de construcción de perforaciones y a nivel de remediación.

Tabla 1. Datos preliminares de tAs de las perforaciones de los diferentes acuíferos de Uruguay, interpretados de datos brindados por la OSE, expuestos en el I Simposio de Arsénico en agua subterránea (2018). Se señalan en **negrita** los valores que exceden la normativa vigente

UNIDAD HIDROGEOLOGICA	UNIDAD GEOLOGICA	Número de pozos	tAs Máximo (µg L-1)	tAs Mínimo (µg L-1)	tAs Promedio (µg L-1)
Acuífero Chuy	Areniscas ferrificadas de la Formación Chuy	147	50	10	11
Acuífero Raigón	Areniscas y conglomerados de la Formación Raigón, con niveles pelíticos	72	42	05	15
Acuíferos adyacentes a la Laguna Merín	Sedimentos cuaternarios	9	22	0	09
Acuíferos Cretácicos del Litoral oeste	Grupo Paysandú	65	60	0	20
Acuíferos Cretácicos del sur	Formaciones Migueles y Mercedes	46	40	20	10
Acuífero Escurado Arapey	Formación Arapey (basaltos tholeíticos)	84	14	05	8
Acuífero Guaraní	Formaciones Rivera, Tacuarembó, Cuchilla Ombú y Buena Vista	71	10	0	05
Acuíferos pobres de Formación Tres Islas	Formación Tres Islas	18	14	0	12
Acuíferos - Grupo Melo	"Peltas grises" - Grupo Melo	23	15	06	10
Acuífero Escurado - Terreno Piedra Alta	Cinturones metamórficos y Faja Granítica Florida	130	42	05	13
Acuífero Escurado - Terrenos Nico Pérez y Cuchilla Dionisio	Terrenos granito-metamórfico heterogéneos	125	08	05	07
Acuífero Escurado - Isla Cristalina Rivera	Relicto correspondiente al Terreno Nico Pérez	16	08	08	08

RESULTADOS

Se presentan los resultados de la recopilación y ordenamiento de datos acerca de los valores de As total (tAs) para los principales acuíferos de Uruguay, brindados por la OSE, en el cuadro comparativo de la tabla 1. Por una parte, se puede apreciar que afortunadamente el Acuífero Guaraní presenta concentraciones máximas que estarían por debajo del valor máximo permitido (V.M.P.) según las normas de la OMS. En el Acuífero Arapey, las concentraciones de As no exceden el V.M.P., según las normas UNIT, vigentes en Uruguay, pero sí el V.M.P según las normas de la OMS ($10 \mu\text{g L}^{-1}$). En los acuíferos de la zona de la Laguna Merín, exceden levemente el V.M.P. según la normativa UNIT. Por otra parte, en el mapa geológico de la figura 2 se representan los valores máximos de As de los principales acuíferos de Uruguay, en correlación con las unidades geológicas que los representan. Los valores más elevados corresponden a los acuíferos Cretácicos del Grupo Paysandú ($60 \mu\text{g L}^{-1}$); al Acuífero Raigón ($41 \mu\text{g L}^{-1}$); y a los acuíferos fisurados del Terreno Piedra Alta, conformado por rocas del basamento cristalino al oeste de la zona de cizalla Sarandí del Yí ($42 \mu\text{g L}^{-1}$).

En esta fase preliminar del Proyecto AsURU se ha investigado y definido teóricamente el comportamiento del As en el agua subterránea: (1) el buen drenaje favorece la disolución de ceniza volcánica y oligoelementos asociados (F, V, U, B, Sb) en las aguas subterráneas y en particular en las aguas subterráneas someras (RSA, 2018). (2) La geodisponibilidad de As es determinante (RSA, 2018). (3) El factor geológico más relevante es la litoestratigrafía y la mineralogía, por ende, deben determinarse: (a) la presencia de loess volcánico con aporte de ceniza volcánica, como ocurre en la Formación Libertad y capas interestratificadas de la Formación Raigón (aunque con escasas evidencias expuestas por Guerequiz et al.; Mañay et al., (2019); Gagliardi et al., sugieren que se registra una correlación entre la concentración de As en

los sedimentos y la del agua en los niveles permeables más cercanos. A su vez la mayor concentración de As en roca se da en la base de la Formación Fray Bentos sobreyacente y en el contacto con el nivel ferrificado de la Formación Mercedes (Asencio), lo que podría estar asociado a los óxidos de hierro en esta última y/o a la presencia de vidrio volcánico en limolitas de la Formación Fray Bentos); (b) la identificación de vidrio volcánico, teniendo en cuenta su composición (As, Se, U, Sb, Mo), aún no determinado para los acuíferos de Uruguay; y (c) una posible fuente volcánica de tipo andesítico (SiO_2 elevado), la cual se puede asociar con el vulcanismo andino para el caso de estudio de proveniencia de la ceniza volcánica en los sedimentos del litoral oeste y suroeste de Uruguay. Es de destacar que, si bien no existen estudios sobre el basamento cristalino a este respecto, la afinidad andesítica de los diques básicos del Terreno Piedra Alta [29], podría sugerir la posibilidad de una mineralogía que implique la geodisponibilidad de As en el basamento. (4) Con base en las reacciones hidrogeoquímicas generales, se puede establecer que la hidrólisis de aguas bicarbonatadas cálcicas con alto pH favorece la disolución y concentración de metales pesados, como el As. Y (5) en el agua subterránea están presentes las especies inorgánicas As (III) y As (V), de mucha mayor toxicidad que las especies orgánicas [10].

Asimismo, se han identificado las posibles causas del origen de As en el agua subterránea, debiendo comprobarse esto en las áreas piloto definidas. Esto será evaluado en el transcurso del proyecto aceptado recientemente por el Centro Tecnológico del Agua (CTAGUA). La causa más probable para el caso del Acuífero Raigón es la presencia de As en los niveles de sedimentos limosos que se interestratifican en la Formación Raigón y, a su vez, en la Formación Libertad. Éstos contienen ceniza volcánica, de acuerdo con observaciones de vidrio volcánico en estos niveles limosos (Mañay et al., 2019). Aquellos sedimentos limosos interestratificados en la Formación

Raigón, si bien conforman niveles coasi-impermeables o impermeables, podrían conferirles a los estratos de grano más grueso de esta unidad (niveles permeables) aporte de ceniza volcánica. En tanto, los sedimentos limosos de la Formación Libertad que contienen ceniza volcánica también podrían estar confiriéndole aporte de ceniza volcánica a los niveles infrayacentes de la Formación Raigón a través de la infiltración de agua por goteo, cuando la Formación Libertad se comporta como un acuitardo. Machado y colaboradores (2019b) estudiaron la incidencia del tAs e inorgánico en agua subterránea destinada al consumo humano en Uruguay, así como su correlación con el fluor, hierro, manganeso y sulfato. Estos autores identificaron correlaciones de Pearson en los pares tAs / F⁻, As (V) / F⁻ y As (V) / S O₄²⁻, de acuerdo con las características de los diferentes ambientes geológicos (pH, nivel de oxidación, etc.). La fuerte correlación de tAs con F⁻ apoya la hipótesis de una fuente de vidrio volcánico, para el oeste del país (Guerequiz et al., 2006). La correlación de los valores de pH y tAs contribuye a confirmar esta hipótesis (Machado et al., 2019).

Al mismo tiempo se ha avanzado en estudios respecto a la incidencia del As en la salud en el territorio uruguayo, como se ha explicado más arriba [Kordas et al., 2016; Mañay et al., 2019; Desai, 2020].

DISCUSIÓN

El Proyecto AsURU ha avanzado en la selección de las áreas piloto (figura 1) con elevada concentración de As en el agua subterránea, respecto a los valores máximos permitidos vigentes en el país de 20 µg L⁻¹ y con perspectivas de bajar el límite a 10 µg L⁻¹ en 2021. Se han realizado encuentros, reuniones y el “I Simposio de Arsénico en agua subterránea en Uruguay”, organizado por la Facultad de Ciencias, con la participación del Centro Regional para la Gestión de agua subterránea (CeReGas), propuesto como entidad articuladora, OSE, Movimiento pro-Eradicación de Vivienda Rural Insalubre (MEVIR), Dirección Nacional

de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (DINAMA), Dirección Nacional de Agua (DINAGUA), Ministerio de Salud y las Facultades de Química, Ingeniería y Medicina. Asimismo, se han creado grupos de trabajo, se han reportado avances en IMGA (*International Medical Geology Association*) por parte de una de las coordinadoras del proyecto: Nelly Mañay, así como se ha presentado el proyecto en oportunidades de financiación; fue aprobado recientemente un subproyecto, por el Comité Evaluador del Centro Tecnológico del agua (CTAguá). En esta primera instancia también se han suscitado dificultades en cuanto al involucramiento de los diferentes autores para llevar adelante el proyecto de forma integral, la falta de recursos y priorización del problema (Collazo et al., 2019). Actualmente se está investigando la litoestratigrafía y quimioestratigrafía de las unidades geológicas para determinar el origen del As en los acuíferos que abarcan las principales zonas identificadas y a partir de allí establecer el contexto real para comenzar a dar soluciones. Es importante destacar que el estudio litoestratigráfico y quimioestratigráfico para identificar niveles con concentraciones de As elevadas se está realizando por primera vez en el país.

Respecto al tema de riesgo de salud son importantes los resultados de Mañay y colaboradores (2019) como una aproximación para estimar el riesgo: se observa una correlación entre los casos de cáncer y zonas del país donde el agua de pozo presenta niveles elevados de As. Se desconoce el consumo de dicha agua. Además, es necesario recalcar que el cáncer es multicausal, por lo que se detectan variables de confusión para dicha asociación. La superposición de los datos del atlas uruguayo de cáncer con los niveles de As en el agua potable de los pozos puede ser una herramienta potencial para estimar la contribución de As a la incidencia de cáncer. En particular, es importante formalizar acuerdos con agencias gubernamentales, ministerios y otras organizaciones, desarrollar un marco común y compartir los datos disponibles para crear registros de alta calidad que sean útiles

para fines de investigación. Este estudio basado en un enfoque de Geología Médica podría ser un primer paso para mejorar la salud pública como prevención, aunque muchas otras causas ambientales pueden estar influyendo en la incidencia de cáncer en la misma región. Para continuar este tipo de estudios y extenderlo a otros tipos de cánceres asociados al As, sería importante contar con la caracterización geoquímica, mapeo geográfico y mapas de evaluación de riesgos.

Respecto a la caracterización hidrogeológica es menester el estudio del comportamiento hidrodinámico espaciotemporal del As en el agua subterránea. Para ello, se debe tener en cuenta que el As (V) y As (III) se encuentra con mayor frecuencia en aguas subterráneas someras, para el caso de acuíferos sedimentarios, pero difícilmente se podrá establecer una distribución espacial como modelo. En el caso de acuíferos fisurados, el comportamiento es obviamente aún más heterogéneo y no puede tomarse la profundidad como factor determinante. Sobre el origen del As, se sugiere que la causa más probable –estudiando el caso de la Formación Raigón–, es la presencia de ceniza volcánica. La comprobación de esta hipótesis se debería fundamentar con fehacientes resultados geoquímicos realizados para los diferentes niveles dentro de la Formación Raigón, complementando los resultados generales presentados por Machado y colaboradores (2019b) para el país, haciendo esto específico para la Formación Raigón. Dichos análisis están previstos a ser realizados en el marco del Proyecto AsURU (subproyecto aceptado recientemente por CTAguá, con la empresa Eface S. A.); y son esperables resultados de análisis que indiquen la presencia de anomalías de As acompañadas con anomalías de oligoelementos asociados en presencia de ceniza volcánica y de vidrio volcánico.

Para el caso de los acuíferos fisurados subyacentes en la zona de Conchillas se sugieren dos hipótesis: (1) que el As proviene de los niveles superiores (As en

ceniza volcánica en la Formación Raigón y Formación Libertad) por infiltración; (2) que el As proviene de los minerales de las rocas ígneas y metamórficas del propio basamento. Un indicio que tiende a comprobar la primera hipótesis es la concentración de As más elevada en las perforaciones más someras (que extraen agua de la Formación Raigón) que en las perforaciones de mayor profundidad (que extraen agua del acuífero fisurado), cuando esta formación sedimentaria se apoya directamente sobre el basamento cristalino, de acuerdo con datos de OSE no publicados.

Respecto al tema de remediación, existen antecedentes de investigación por la Red IBEROARSEN (Morgada et al., 2019; Litter, 2010), lo cual será tenido como referencia en el arriba referido proyecto recientemente aceptado por CTAguá a realizarse por Eface S. A./Facultad de Ciencias/Facultad de Química: “Mitigación de arsénico en agua subterránea”.

CONCLUSIONES

Se reconoce la necesidad inmediata de dar una solución al problema de las elevadas concentraciones de As en los acuíferos de Uruguay, con prioridad de comenzar con dos acuíferos de importante productividad, los cuales se ven afectados por este problema, como lo son el Acuífero Raigón y el Acuífero Mercedes.

Como conclusión respecto al tema de salud, habiendo reconocido el problema, se debe continuar avanzando y profundizando en los estudios de incidencia del As en la salud en los diferentes sectores de la población, discriminando la incidencia en la salud de la exposición al As orgánico e inorgánico y en sus diferentes estados de oxidación, y tomar en cuenta el consumo de agua subterránea, así como también de alimentos que contienen niveles bajos de As.

Hidrogeológicamente se ha avanzado en un marco teórico, tanto desde el punto de vista hidrodinámico como hidrogeoquímico, lo cual debe comprobarse en la práctica. Respecto al tema del origen del As, deben

comprobarse las hipótesis planteadas, recurriendo a análisis litológicos, mineralógicos y geoquímicos de roca de los diferentes niveles acuíferos, como está planteado a realizarse en el marco del Proyecto aceptado recientemente por CTAgua. Conocer el origen y la hidrodinámica es fundamental para estudiar las posibilidades de remediación. Si, por ejemplo, se detectaran niveles con As por disolución de ceniza volcánica, éstos podrían funcionar como “marcadores” y podrían ser tratados para remediar pozos in situ, o bien, podrían ser tenidos en cuenta a la hora de realizar nuevas perforaciones, donde estos niveles podrían ser sellados para extraer agua de los niveles libres de As. Esto requerirá, por supuesto, un estudio detallado de la hidrodinámica, el comportamiento y direcciones del flujo subterráneo, así como litoestratigráficos y quimioestratigráficos.

REFERENCIAS

- Bonjour, M. (2013). Heterogeneidades hidrogeológicas de la Cuenca del Río Uruguay (Trabajo final de grado). Montevideo: Facultad de Ciencias.
- Bossi, J., Ferrando, L., Montaña, J., Campal, N., Morales, N., Gancio, F., Schipilov, A., Piñeiro, P., & Sprechman, P. (1998). Carta geológica del Uruguay 1/500.000, Cátedra de Geología - Facultad de Agronomía. Geoeditores.
- Bossi, J., Preciozzi, F., & Campal, N. (1993). Predevoniano del Uruguay. Parte 1: Terreno Piedra Alta (pp. 1-50). Montevideo: DINAMIGE.
- Collazo, P., Mañay, N., & Pamoukaghlián, K. (2019). Proyecto AsURU: Arsénico en agua subterránea de Uruguay y riesgo a la salud asociado. Avances y dificultades en su gestión, Actas IX Congreso Uruguayo de Geología, Flores, Uruguay.
- CHLCC. (2014). Comisión Honoraria de Lucha Contra el Cáncer, IV Atlas de Incidencia del cáncer en el Uruguay. Montevideo, Uruguay. Recuperado de https://www.comisioncancer.org.uy/Ocultas/V-Atlas-de-incidencia-del-Cancer-en-Uruguay-Periodo-2012-2016-uc92_
- Desai, G., Barg, G., Vahter, M., Queirolo, E., Peregalli, F., Mañay, N., Millau, A. E., Yu, J., Browne, R. W., & Kordas, K. (2020). Low level arsenic exposure, B-vitamins, and achievement among uruguayan school children. *International Journal of Hugiene and Enviromental Health*, 223, 124-131.
- DINAMIGE. (2009). Dirección Nacional de Minería y Geología, Estimación de la extracción de agua subterránea. Principales acuíferos del Uruguay. Recuperado de http://www.miem.gub.uy/sites/default/files/estimacion_de_extracion_anual_de_aguas_subterraneas_en_los_principales_acuiferos_del_uruguay.pdf
- Falchi, L., Pizzorno, P., laquinta, F., & Cousillas, A. (2018). Relevamiento de la concentración de arsénico total en agua proveniente de varias fuentes en una zona arroceras de Uruguay. *Revista del Laboratorio Tecnológico de Uruguay, INNOTEC*, 17, 10-17.
- Gagliardi, S., Oyhantcabal, P., & Pérez, A. (2016). Variación vertical de la concentración de Arsénico y posible relación con la litología. Acuífero Mercedes, Agraciada, Soriano, Actas VIII Congreso Uruguayo de Geología, Montevideo.
- Goso, H., & Bossi, J. (1966). Cenozoico. *Geología del Uruguay* (pp. 259-305). Montevideo: Universidad de la República.
- Goso, C., & Perea, D. (2004). El Cretácico post-basáltico de la Cuenca Litoral del río Uruguay: Geología y Paleontología. En G. Veroslavsky, M. Ubilla, & S. Martínez (Eds.). *Cuencas sedimentarias de Uruguay* (pp. 143-171). Montevideo: Universidad de la República.
- Goso, H., Perea, D., Perinotto, J. A. J. (1999). Análisis de facies y paleogeografía de la Formación Guichón (Cretácico Inferior) en la cuenca del litoral, Uruguay. *Revista SUG*, 3, 6, 2-15.
- Guerequiz, A. R., Mañay, N., Goso-Aguilar, C., & Bundschuh, J. (2006). Evaluación de riesgo ambiental por presencia de arsénico en el sector oeste del acuífero Raigón, Departamento de San José, Uruguay.

- Presentación del proyecto. *Libro de actas del taller de distribución del arsénico en Iberoamérica*. Buenos Aires, Argentina: Red Temática 406RT0282 IBEROARSEN, Centro Atómico Constituyentes.
- Heinzen, W., Velozo, C., Carrión, R., Cardozo, L., Madracho, H., & Massa, E. (2003). Carta Hidrogeológica del Uruguay. Escala 1: 200.000.
- Kordas, K., Queirolo, E. I., Mañay, N., Peregalli, F., Hsiao, P. Y., Lu, Y., & Vahter, M. (2016). Low-level arsenic exposure: nutritional and dietary predictors in first-grade Uruguayan children. *Environmental research*, 147, 16-23.
- Lambert, R. (1939). Memoria explicativa de la Carta Geológica de los terrenos sedimentarios y las rocas efusivas del departamento de Durazno, Instituto Geológico del Uruguay, Montevideo. *Boletín No25*, 1-37.
- Litter, M. I., Sancha, A. M., & Ingallinella, A. M. (2010). IBEROARSEN, Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas.
- Machado, I., Bühl, V., & Mañay, N. (2019a). Total arsenic and inorganic arsenic speciation and their correlation with fluoride, iron and manganese levels in groundwater intended for human consumption in Uruguay. En *Environmental Arsenic in a Changing World: Proceedings of the 7th International Congress and Exhibition on Arsenic in the Environment (AS 2018)*, July 1-6, 2018, Beijing, PR China, p. 217, CRC Press, Agosto de 2019.
-
- (2019b). Total arsenic and inorganic arsenic speciation in groundwater intended for human consumption in Uruguay: Correlation with fluoride, iron, manganese, and sulfate. *Science of The Total Environment*, 681, 497-502. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.107
- Mañay, N., Goso, C., Pistón, M., Fernández-Turiel, J. L., García-Vallés, M., Rejas, M., & Guerequiz, R. (2013). Groundwater arsenic content in Raigón aquifer system (San José, Uruguay). *Revista SUG*, 18, 20-38.
- Mañay, N., Pistón, M., Cáceres, M., Pizzorno, P., & Bühl, V. (2019). An overview of environmental arsenic issues and exposure risks in Uruguay. *Science of the total Environment*, 686, 590-598.
- Montaño, J., Gagliardi, S., & Montaño, M. (2005). Recursos hídricos subterráneos del Uruguay. Importancia y aprovechamiento actual. *Revista SUG*, 12, 16-32.
- Morgada, M. E., Mateu, M., Bundschuh, J., & Litter, M. I. (2008). Arsenic in the Iberoamerican region. The IBEROARSEN Network and a possible economic solution for arsenic removal in isolated rural zones. *e-Terra*, 5(5), 1-11.
- OSE. (2016). Obras Sanitarias del Estado, Impacto en los sistemas de abastecimiento de agua del cambio de valor máximo permitido de 20 a 10 $\mu\text{g L}^{-1}$, 2016.
- Oyhantçabal, P., Siegesmund, S., & Wemmer, K. (2011). The Río de la Plata Craton: a review of units, boundaries, ages and isotopic signature. *International Journal of Earth Sciences*, 100, 201-220.
- Perea, D., & Martínez, S. (2004). Estratigrafía del Mioceno–Pleistoceno en el litoral suroeste de Uruguay. En G. Veroslavsky, M. Ubilla, & S. Martínez (Eds.), *Cuencas sedimentarias de Uruguay, Cenozoico* (pp. 105-124) co. Montevideo: Ediciones DIRAC, Facultad de Ciencias.
- Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W., & Rossi, P. (1985). Carta geológica del Uruguay a escala 1: 500.000. Montevideo: Dirección Nacional de Geología y Minería.
- RSA. (2018). Arsénico en agua, informe del Grupo Ad-Hoc Arsénico en agua de la Red de Seguridad Alimentaria de CONICET. Recuperado de <https://rsa.conicet.gov.ar/wp-content/uploads/2018/08/Informe-Arsenico-en-agua-RSA.pdf>
- Serra, N. (1945). Memoria explicativa del mapa geológico del departamento de Soriano, Instituto Geológico del Uruguay. *Boletín* 32, 1-42.

- Spoturno, J., Oyhantçabal, P., Goso, C., Aubet, N., Cazaux, S., Huelmo, S., & Loureiro, J. (1993). Análise faciológica e paleogeográfica da sequência mio-pliocénica do setor ocidental da bacia de Santa Lúcia (Uruguai). En Boletim Resumos V Simposio sul brasileiro de Geología, 33-34.
- UNIT. (2010). Agua Potable-Requisitos. Recuperado de <http://www.aiqu.org.uy/documentos/medioambiente/unit.pdf>
- WHO. (2010). Exposure to arsenic; a mayor public health concern. Recuperado de World Health Organization: <http://www.who.int/ipcs/features/arsenic.pdf?ua=1>