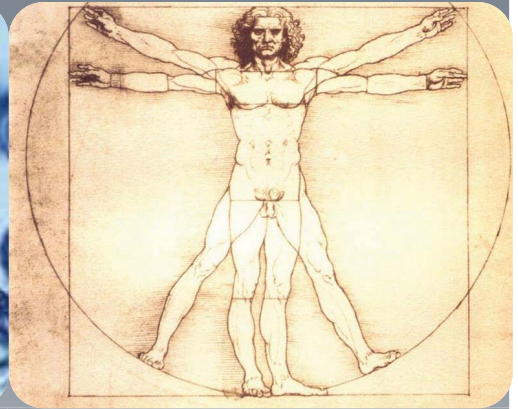
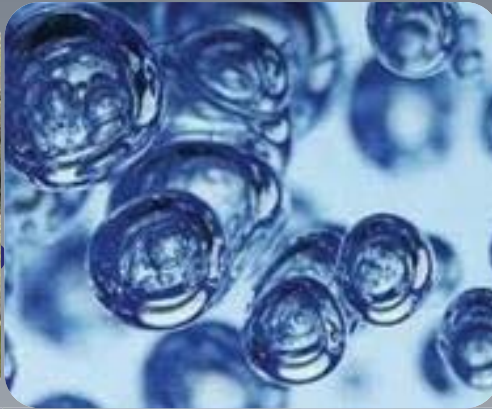


I JORNADA DE GEOLOGÍA MÉDICA EN ESPAÑA



La Geología Médica: una disciplina emergente



Elena Giménez-Forcada
Editora
2017



UNIVERSIDAD
DE SALAMANCA
Facultad de Ciencias



I Jornada de Geología Médica en España (1. 2016. Salamanca)

La geología médica : una disciplina emergente / I Jornada de Geología Médica en España ; Elena Giménez-Forcada, editora. – [Madrid] : Instituto Geológico y Minero de España, 2017
106 p. : fig., tb. ; formato electrónico

978-84-9138-035-1

1. medicina 2. congreso 3. toxicidad 4. agua mineral 5. España I. Instituto Geológico y Minero de España, ed.
II. Giménez Forcada, Elena, ed...

551(460)

Se recomienda que este libro se cite de las siguientes formas:

Libro completo:

Giménez-Forcada, E. (ed.) (2017). *I Jornada de Geología Médica en España. La Geología Médica: una disciplina emergente*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 107 p.

Capítulo de libro:

Börgel, L. y Schulthess, M. (2017). Importancia de la evaluación de riesgo toxicológico de metales pesados para la toma de decisiones en salud ambiental. En *I Jornada de Geología Médica en España. La Geología Médica: una disciplina emergente* (E. Giménez-Forcada, ed.). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 11-26.

I JORNADA DE GEOLOGÍA MÉDICA EN ESPAÑA. La Geología Médica: una disciplina emergente.
Elena Giménez

ISBN: 978-84-9138-035-1

NIPO: 064-17-013-2

Depósito legal: M-19863-2017

Catálogo y venta de publicaciones de la Administración General del Estado en:

<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

I JORNADA DE GEOLOGÍA MÉDICA EN ESPAÑA

La Geología Médica: una disciplina emergente

	<i>página</i>
PRÓLOGO	5
Nelly Mañay. Presidente de la Asociación Internacional de Geología Médica, IMGA	
PRESENTACIÓN	7
Juan José Durán Valsero. Director del Departamento de Investigación en Recursos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, IGME	
CONFERENCIA INAUGURAL	
Importancia de la evaluación de riesgo toxicológico de metales pesados para la toma de decisiones en salud ambiental	11
<i>Laura Börgel, Universidad de Chile, UChile</i>	
<i>Melissa Schulthess, Universidad de Chile, UChile</i>	
CONFERENCIA INVITADA	
El uso médico de las aguas minerales y productos termales	29
<i>Rosa Meijide Faílde, Universidade da Coruña, UDC</i>	
GEOLOGÍA MÉDICA EN IBERIA	
Geología Médica: Um tópico multidisciplinar em crescente desenvolvimento	49
<i>Carla Patinha. Secretaria de IMGA. Universidade de Aveiro, UA.</i>	
Presentación del Capítulo Español de Geología Médica	57
<i>Elena Giménez-Forcada, Presidente del Capítulo Español IMGA, IMGA-España. Instituto Geológico y Minero de España, IGME.</i>	
PRESENTACIÓN DE ACTIVIDADES DEL GRUPO ESPAÑOL DE GEOLOGÍA MÉDICA	
Evaluación de la exposición a elementos traza de la población infantil en ambientes urbanos: el caso de la ciudad de Madrid	63
<i>Miguel Izquierdo, Universidad Politécnica de Madrid, UPM</i>	
<i>Fernando Barrio-Parra, Universidad Politécnica de Madrid, UPM</i>	
<i>Eduardo De Miguel, Universidad Politécnica de Madrid, UPM</i>	
Aplicaciones de la geoestadística a estudios geoambientales	69
<i>Juan Antonio Luque, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
<i>Eulogio Pardo, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
<i>Mario Chica, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>Víctor Rodríguez, Universidad de Sevilla, US</i>	
<i>Juan Grima, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
Proyecto HidroGeoTox HGT	
Presentación del proyecto HidroGeoTox: Factores que controlan la distribución de arsénico y otros elementos traza asociados en el sur de la Cuenca del Duero	77
<i>Elena Giménez-Forcada, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
<i>Investigadora principal del proyecto HidroGeoTox</i>	

Control morfoestructural de la distribución de arsénico en el sur de la Cuenca del Duero	83
<i>María del Carmen Rey-Moral, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
<i>David Gómez Ortiz, Universidad Rey Juan Carlos, URJC</i>	
<i>Elena Giménez-Forcada, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
<i>María Teresa López Bahut, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
Las fuentes primarias de As y otros elementos traza en las aguas subterráneas del sur de la Cuenca del Duero	89
<i>Susana M^a Timón-Sánchez, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
<i>Elena Giménez-Forcada, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
El flujo de las aguas subterráneas como regulador de las anomalías hidrogeotóxicas en el sur de la Cuenca del Duero	95
<i>Manuel García Rodríguez, Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED</i>	
<i>Elena Giménez-Forcada, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
Enriquecimiento de arsénico en niveles limosos de la Cuenca del Duero	101
<i>Agustina Fernández Fernández, Universidad de Salamanca, USAL</i>	
<i>Susana M^a Timón-Sánchez, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
<i>Elena Giménez-Forcada, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	

PRÓLOGO

En mi carácter de Presidente de la Asociación Internacional de Geología Médica (IMGA por sus siglas en inglés), tengo el agrado de presentar este documento que refleja la excelente repercusión que ha tenido la “I Jornada de Geología Médica en España: Una disciplina emergente”, llevada a cabo en Salamanca, para promover y difundir esta disciplina en vuestro país.

La Geología Médica es una disciplina emergente a nivel internacional, con un enfoque interdisciplinario, que quiere entender y aportar los conocimientos integrados de las ciencias de la tierra y las ciencias de la vida para conseguir prevenir o proteger los efectos a la salud ocasionados por factores de riesgo naturales y antropogénicos del ambiente.

El desarrollo de la Geología Médica a nivel internacional, regional o nacional permite que la comunidad integrada por actores sociales y políticos acceda a más elementos técnico-científicos para entender las interacciones, efectos beneficiosos, adversos o toxicológicos de origen ambiental sobre la salud, debidos a deficiencias o excesos naturales en el aire, agua y suelo, o como consecuencia de la contaminación, para tomar las acciones correctivas más adecuadas.

La Asociación Internacional de Geología Médica cuenta con 10 años de trayectoria desde su inauguración, durante los cuales ha establecido vínculos entre los investigadores y profesionales de las ciencias de la tierra y las ciencias de la salud para lograr una conjunción de conocimientos necesarios para abordar problemas de salud pública originados por factores naturales o antropogénicos.

Queremos extender nuestras felicitaciones por la iniciativa al capítulo de la IMGA en España, liderado por la Dra. Elena Giménez, a los organizadores y conferencistas de la Jornada, por haber logrado difundir un programa con temas destacados y representativos del ambiente geomédico, presentando diversos estudios de casos y otros ejemplos que dieron como resultado una exitosa actividad.

Este entusiasmo manifestado por el público participante y los medios de comunicación, nos impulsan a seguir adelante con nuevos emprendimientos de cursos, proyectos y trabajos científico-técnicos interdisciplinarios que permitan avanzar en el conocimiento de múltiples temas que requieren de la Geología Médica para poder ser abordados y lograr soluciones viables a problemas de salud pública y ambiental.

Quedo a vuestras gratas órdenes para apoyar nuevas iniciativas.

Prof. Dra. Nelly Mañay
Presidente de la Asociación Internacional de Geología Médica
International Medical Geology Association (IMGA)
<http://www.medicalgeology.org>

PRESENTACIÓN

Los sistemas biológicos naturales se desarrollan en el seno de una matriz geológica; dependen de los minerales y nutrientes que esta proporciona tanto para la creación de las estructuras orgánicas, como para abastecer a los sistemas metabólicos de los elementos necesarios para su funcionamiento, conformando de esta manera lo que entendemos como vida. Estos sistemas dependen de un frágil equilibrio entre lo que es necesario, lo que siendo necesario puede convertirse en perjudicial cuando está en exceso, y aquello cuya presencia resulta tóxica. La Geología Médica trata precisamente de la relación entre el soporte geológico, la salud y la enfermedad.

Aunque puede considerarse que la Geología Médica nace como ciencia en 1990 cuando la Unión Internacional de Ciencias Geológicas propuso su definición formal, esta relación entre el medio geológico y la salud se conoce desde muy antiguo, en especial desde la perspectiva de la terapéutica basada en las aguas minerales y termales y en los remedios minerales. Sin embargo, mucho más reciente es el reconocimiento del factor geológico como fuente de enfermedad pues hubo que esperar al desarrollo de la química y al conocimiento de fenómenos como la radioactividad natural.

El volumen que tiene el lector en sus manos, presenta el resultado de la I Jornada de Geología Médica en España, que ha sido organizada por el Capítulo Español de la Asociación Internacional de Geología Médica, el cual, aunque de reciente creación (vio la luz en 2015), muestra una incesante actividad de promoción y difusión de la Geología Médica.

A lo largo de la jornada se han tratado temas de gran actualidad, centrándose específicamente en la toxicología de metales pesados, la exposición a elementos traza por la población infantil y el creciente problema del arsénico en las aguas subterráneas en extensas zonas de la Península Ibérica. También se ha prestado atención a la salud ambiental, al riesgo toxicológico y la toma de decisiones. En el aspecto relacionado con la visión terapéutica las presentaciones se han centrado en la visión de las aguas minerales y termales como elementos de salud; por último se ha analizado la aplicación de herramientas geoestadísticas a la interpretación de datos geoquímicos desde la perspectiva médica y epidemiológica.

Sin duda es éste un excelente comienzo en el desarrollo en nuestro país de la Geología Médica como disciplina científica netamente integradora, en la que la sinergia entre campos tan aparentemente distantes como la geología, la medicina, la geoestadística o la epidemiología se dan la mano con el fin de comprender la interacción entre el mundo mineral y el orgánico, entre la matriz geológica que nos rodea, la salud y la enfermedad.

Juan José Durán Valsero
Director del Departamento de Investigación en Recursos Geológicos
Instituto Geológico y Minero de España, IGME
<http://www.igme.es>

CONFERENCIA INAUGURAL

Herramientas para la evaluación en la investigación de efectos agudos y crónicos por metales y posibles intervenciones

L. Börgel¹ y M. Schulthess¹

1 Unidad de Toxicología Ambiental, Departamento de Medicina Legal, Facultad de Medicina, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Resumen: La situación mundial respecto a la exposición ambiental a sustancias químicas, especialmente metales, se mantiene latente, pero puede verse incrementada cuando se asocia a desastres naturales, así como a un mayor uso y dificultades en la gestión de residuos. Se presentan las herramientas para establecer el riesgo por exposición a sustancias químicas, específicamente metales, como elemento clave para la toma de decisiones e intervenciones en diversas situaciones, como sitios contaminados en los que se sospecha que pueda haber daño a la salud o al medio ambiente, para establecer el destino final más adecuado de un residuo, garantizar un química sustentable o para resolver un conflicto de tipo legal, como casos más frecuentes. Las herramientas planteadas permiten establecer el riesgo o margen de seguridad de forma objetiva para las exposiciones agudas y crónicas, lo que facilita la toma de decisiones, tales como acciones correctivas o de mitigación, que pretenden disminuir el impacto en la salud y el medio ambiente.

Palabras clave: evaluación de riesgo, toxicología, herramientas, metales pesados, sustancias químicas.

Abstract: *The worldwide situation of environmental exposition to chemical substances, specially metals, is latent nowadays and increases its role when there are natural disasters, more use and difficult handling of residues, therefore, by this we present some tools for risk assessment of the exposition to chemical substances, specifically metals, as a key element in the decision making process and the intervention in different situations as contaminated areas where there is suspicion on damage in health or environment, in order to establish the final destination of a residue, when there is a natural disaster, with scientific purpose associated to sustainable chemistry, or in order to give an answer to a legal conflict, among the most frequent events. The tools presented allow to establish the risk or safety margin in an objective way for acute and chronic expositions, which eases the decision making process as for corrective means or mitigation actions, in order to diminish the impact in health and environment.*

Key words: *risk assessment, Toxicology, tools, metals, Chemical substances*

Key words: *Risk assessment, toxicology, tools, heavy metals, chemicals.*

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la salud, la tendencia actual a nivel mundial es constatar que la población se enfrenta a nuevos desafíos como son las enfermedades emergentes, principalmente no trasmisibles, asociadas con exposiciones ambientales a sustancias químicas, o la búsqueda de instrumentos que permitan alcanzar las metas para el 2030 establecidas por las Naciones Unidas. Dentro de este contexto juega un papel importante la exposición de los individuos a determinados agentes químicos, específicamente metales en situaciones complejas como las que hay que afrontar en ciudades contaminadas, o la contaminación de agua, suelo y aire, en general. Todos ellos son temas de repercusión mundial, como también lo son el calentamiento global y las

enfermedades asociadas a exposiciones a elementos tóxicos en bajas dosis pero por periodos prolongados. Estos desafíos futuros plantean una inquietud respecto a las herramientas a considerar en la evaluación del riesgo asociado específicamente a la exposición a metales, si tenemos en cuenta que nuestro planeta está permanentemente en proceso de cambio y que hoy nos enfrentamos a la movilización de los contaminantes naturales, no sólo por la acción antrópica sino también por fenómenos naturales como inundaciones, aluviones o sequías en lugares geográficos donde históricamente no se observaban o eran infrecuentes.

Se presenta, por tanto, una actualización de la metodología y una revisión de las herramientas a considerar para distintos escenarios, en la evaluación de riesgos por exposición a sustancias químicas.

Son diversas las situaciones por las cuales se debe evaluar la exposición potencial de las poblaciones a agentes químicos, siendo las de mayor complejidad aquellas que nos obligan a enfrentarnos a determinados contaminantes, como los metales y metaloides, algunos de los cuales presentan características de oligoelementos y otros de toxicidad, pero que tienen un origen natural y a veces antrópico.

Dentro de estos contaminantes son relevantes los metales y metaloides (i.e. arsénico, plomo, mercurio, cadmio) y otros elementos como el flúor, por estar presentes en la corteza terrestre y por ser parte de los contaminantes naturales que podemos encontrar a diario en suelos, aire y agua, medios por los cuales son capaces de mobilizarse al ser humano e ingresar en el organismo por vía respiratoria, digestiva o dermal. Pero lo importante es preguntarse si este agente estará o no biodisponible para esa población, a qué dosis podrá suponer un riesgo y de qué modo tendrá un impacto en salud. Estos interrogantes y otros son los que a diario deben resolverse en salud y medio ambiente para garantizar la inocuidad o establecer el riesgo de una determinada situación.

Por otra parte debe señalarse que los puntos de emisión son diversos, al igual que los mecanismos involucrados en la movilización de estos elementos en el medio ambiente. Todo ello está directamente relacionado con las características del sitio, o el uso y los componentes geoquímicos locales. De este modo podemos afrontar diferentes situaciones como la de una explotación minera regularizada y sistematizada, a la cual se podrán sumar emisiones procedentes de fenómenos naturales como aluviones, volcanismo, etc., o bien situaciones irregulares donde se desconoce el real impacto de la contaminación. En ambos casos deben tomarse decisiones para proteger a las poblaciones.

La Organización Panamericana de la Salud (OPS), en su publicación *Salud en las Américas* (OPS, 2012) advierte de la contaminación ambiental y del riesgo por exposición directa a elementos tóxicos. Por ejemplo, estima que cada año se descargan al aire, suelo y aguas superficiales de la Amazonia unos cinco millones de galones de desechos tóxicos sin tratar, como benceno, hidrocarburos aromáticos policíclicos, compuestos orgánicos volátiles y metales pesados tóxicos, provenientes de las actividades ordinarias de la explotación petrolera en la zona. A su vez el saneamiento ambiental en algunos casos favorece que poblaciones situadas a orillas de los ríos diariamente recojan agua de las corrientes contaminadas para beber, bañarse y pescar, por lo que están continuamente en riesgo (OPS, 2012). Se suman las pruebas científicas y el consenso de la comunidad científica con respecto al cambio climático y sus consecuencias, que suponen una sobreexposición de las poblaciones a situaciones de riesgo de origen natural, como aluviones, inundaciones, sequías, o huracanes. Además, sobre la base de los aumentos de temperaturas medias mundiales del aire y el mar observados, así como el deshielo generalizado de nieves y glaciares, se evidencian consecuencias como la consiguiente elevación del nivel medio del mar en el plano mundial y las variaciones locales, que favorecen el desarrollo de algas y dinoflagelados (OPS, 2012)

En la Figura 1 se muestra la tendencia de los fenómenos naturales asociados a desastres ocurridos entre 1970 y 2016.

Por otra parte, este documento quiere referirse a la prevención y atención a situaciones de desastre y hacer referencia a que menos del 10% de los países del continente americano, con una población inferior a los 500.000 habitantes, cuenta con un programa para gestión de desastres, con personal a tiempo completo y una partida presupuestaria propia dentro del Ministerio de Salud, mientras que todos los países con una población mayor de 20 millones de habitantes tienen un programa completo y de alto nivel. La mitad de los programas de desastres del sector salud existentes informan que nunca han tenido financiación permanente específica, en tanto que, de los que lo tienen, a un tercio se le asignan menos de US\$ 10.000 por año y sólo a un tercio más de US\$ 100.000. Más aún, si bien el 66% de los países miembros de la OPS informan que poseen planes para hacer frente a situaciones de desastre, el 88% de estos planes corresponden a contingencias para riesgos concretos. Un gran número de países carece de planes nacionales para las situaciones de desastre y mucho menos planes para hacer frente a múltiples amenazas (OPS, 2012)

Tanto los fenómenos naturales como antrópicos movilizan el material de la corteza terrestre. Por ejemplo, la cantidad de este material que la minería mundial remueve en un año equivale al doble de los sedimentos que arrastran los ríos. A los trabajos de extracción de los minerales metálicos y su posterior fundición y purificación, hay que añadir los diversos procesos de fabricación en sus múltiples aplicaciones. De esta manera cada año el hombre vierte en el medio ambiente significativas cantidades de elementos potencialmente tóxicos. Esto requiere contar con herramientas precisas para establecer el riesgo y/o generar acciones de mitigación.

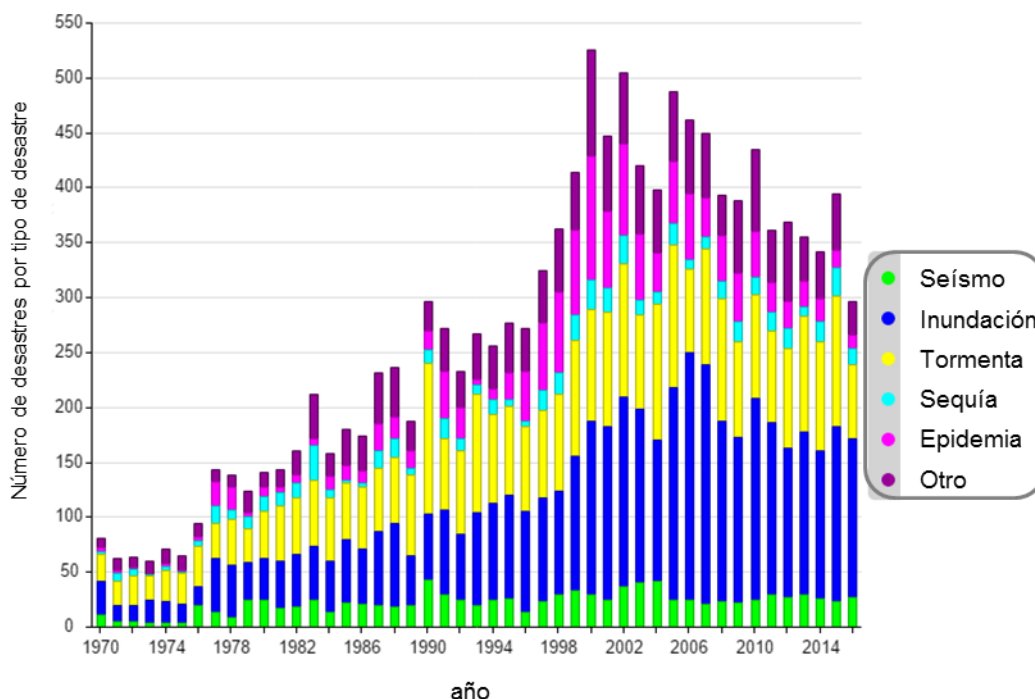


FIGURA 1. Número total de desastres naturales en América Latina y El Caribe, entre 1970 y 2016 (Guha-Sapir, 2016)

Los metales, puros o combinados, pueden determinar efectos en el medio ambiente, tanto en vegetales como en animales. El ser humano no está ajeno a esta exposición al ingerir alimentos o respirar aire contaminado. Estas sustancias pueden alcanzar concentraciones con efectos dañinos sobre la población y en ese caso ser consideradas como responsables de una exposición aguda o crónica, dependiendo de las concentraciones en el medio y del factor tiempo.

Esta es la realidad más frecuente en países en los que existe un desarrollo de actividades mineras, donde conviven explotaciones sostenibles y responsables, con etapas de control desde el inicio del proyecto hasta su cierre (incluyendo el manejo de residuos), con explotaciones mineras pequeñas o locales, artesanales, que con mayor frecuencia ocasionan contaminación de ecosistemas y generan sitios contaminados, con riesgo para las poblaciones vecinas.

Por tanto, una gestión de sustancias químicas deficiente determinará en mayor o menor grado una contaminación, lo que hace necesario contar con estrategias para investigar los efectos agudos y crónicos de la exposición a metales pesados e identificar las posibles intervenciones.

REVISIÓN DEL ESTADO, CRITERIOS Y FACTORES A CONSIDERAR

Son diversas las causas que pueden determinar la necesidad de una intervención, tal como recoge la Figura 2. Puede tratarse de situaciones relacionadas con la correcta disposición de residuos de metales asociados a un plan de gestión y de responsabilidad social, puede ser porque se sospecha de riesgos para salud o el medio ambiente o bien porque se han detectado impactos en la salud, o porque existen acciones legales. Aunque poco frecuente también pueden darse situaciones de investigación en química sostenible sobre determinadas sustancias de las que existen escasas alternativas, sobre la gestión de residuos o el control de emisiones.

Por tanto, los objetivos de una posible intervención en casos de contaminación por metales se concretan al responder a la necesidad de:

- Establecer la existencia de un contaminante ambiental (metal(s)), que podría generar un efecto perjudicial en la salud o en el medio ambiente (percepción).
- Responder a interrogantes que permitan establecer la existencia de riesgo o que por el contrario que exista un margen de seguridad.
- Conocer las concentraciones ambientales de un metal(s) en agua, aire, suelo para establecer acciones de mitigación /remediación en base a valores de referencia.
- Cuantificar las concentraciones en poblaciones susceptibles y evaluar sus efectos, cuando los valores de exposición excedan los valores de referencia para efectos agudos o crónicos.
- Establecer pronósticos en el ámbito laboral, generando medidas de control ocupacional y tratamientos específicos.
- Evaluar las medidas correctivas en el tiempo o post desastres.
- Evaluar lesiones corporales y/o impactos medioambientales con fines jurídicos.

Dado lo anterior, las tres áreas donde se deberá centrar esta investigación serán:

Evaluación medioambiental. Donde se considerará la característica del medio ambiente, tanto del emisor como del receptor del contaminante (Figura 3), siendo de importancia las variables geoquímicas y las características del sitio asociadas a un determinado metal, lo cual se relaciona con la biodisponibilidad de éste, así como con varios parámetros como pH, salinidad, temperatura, radiación solar, organismos o bacterias presentes, tipo de suelo, tamaño de partículas, relieve, clima y vientos. También la presencia de otros contaminantes, estableciendo si

son de origen natural o antrópico, y a qué fuentes emisoras están asociados. Además se deben establecer las rutas ambientales, es decir cómo se moviliza en las distintas matrices ambientales y en qué concentraciones se encuentran (aire, agua, suelo).

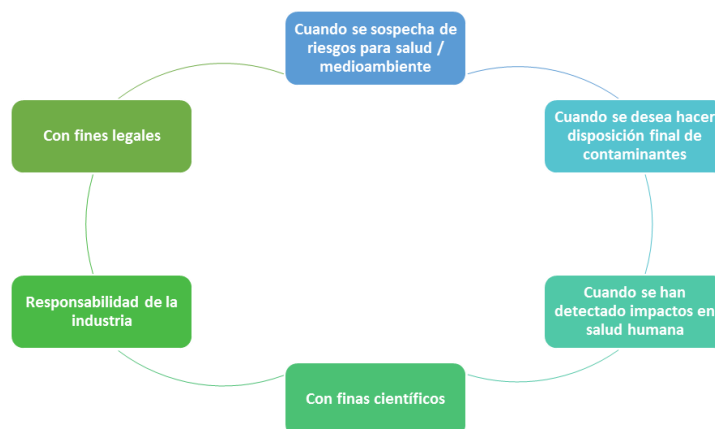


FIGURA 2. Alternativas e interrelaciones frente a las cuales es necesario intervenir

Llegados a este punto es importante señalar que no es suficiente que exista un contaminante en el medio ambiente, además debe contarse con una ruta ambiental y unas condiciones físico químicas del agente que le permita ingresar en el ser humano por las distintas vías, es decir si se trata de un metal como por ejemplo plomo, éste podrá estar en altas concentraciones en el medio suelo, pero deberá haber una ruta como el aire a través de la cual se movilice a las poblaciones y, a su vez, el contaminante deberá tener un tamaño de partícula que permita su dispersión en este medio y su ingreso a la vía respiratoria. Aquí es también de relevancia recordar que los contaminantes metálicos se movilizan en las fracciones más pequeñas del microparticulado ($PM_{2.5}$), lo que se asocia a calidad de aire (Elder *et al.*, 2015).

Evaluación de expuestos. Cuando hablamos de individuos expuestos puede tratarse de poblaciones humanas, pero también de la población animal. Debemos resaltar que los *animales centinelas* son buenos indicadores, de ahí la importancia de considerar grupos multidisciplinarios en la evaluación de riesgos. Además, tendrá relevancia la información epidemiológica y la distribución de enfermedades en estas poblaciones, pero también podrán ser de mamíferos que conviven con el ser humano, como animales domésticos, los cuales son más sensibles que el mismo hombre y por tanto podrán presentar efectos de neurotoxicidad a concentraciones menores de exposición y resultar ser indicadores de riesgo.

Dentro del ser humano, las poblaciones más susceptibles y de relevancia son los niños, embarazadas y poblaciones de ancianos, por tanto, cada vez que se investiga un metal deberá especificarse si los valores de referencia para exposición o las dosis internas son aplicables a población general o a población laboral.

Uno de los factores que determina si una población es más susceptible que otra ante un agente tóxico es la edad del individuo. Se ha comprobado que algunos tóxicos se absorben con mayor velocidad en individuos jóvenes.

El sub desarrollo de los mecanismo de excreción lleva a la acumulación de estas toxas y drogas en neonatos. Los niños pueden absorber plomo en cantidades 4 a 5 veces superiores que individuos adultos, mientras que para el cadmio su tasa de absorción es 20 veces superior. Bajo condiciones fisiológicas normales, los poros de la barrera hematoencefalica de los niños poseen una mayor permeabilidad a algunos metales. Además, sus órganos en esta etapa de crecimiento

se encuentran en desarrollo, el pH gastrointestinal tiende a ser neutro, el tiempo de vaciamiento gástrico es mayor, la capacidad renal es inferior, y la absorción percutánea es mayor. Por otra parte, el contenido de agua corporal es superior, la capacidad de formar ligandos con proteínas es menor, y la actividad microsomal hepática y de glucoronidación es baja, por tanto, la exposición a metales en un niño puede llevar a un futuro daño en el organismo.

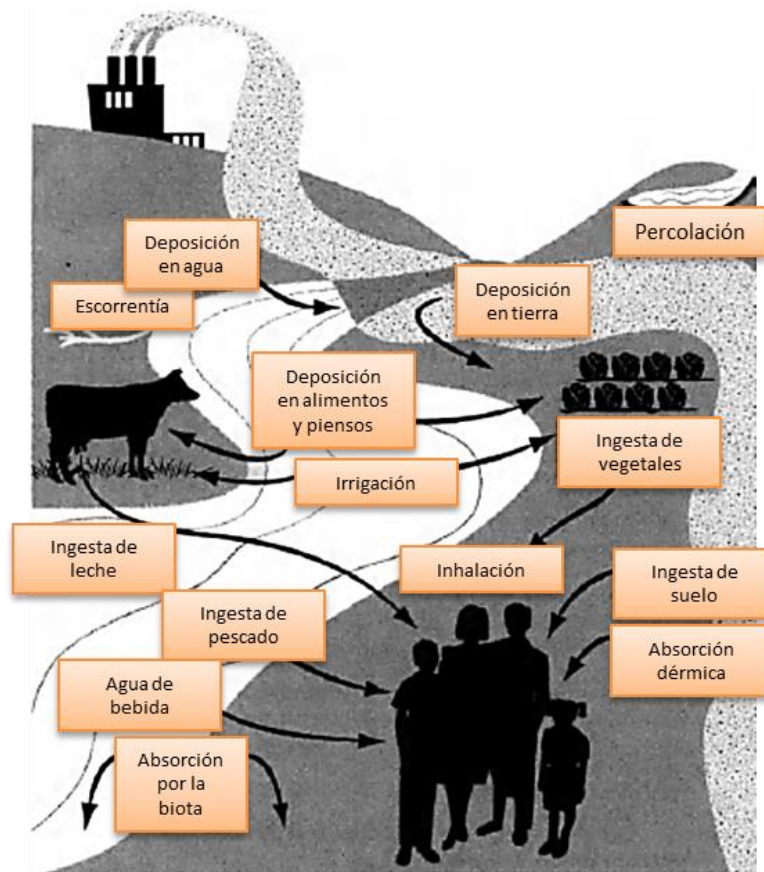


FIGURA 3. Representación esquemática que ilustra las vías de exposición que se extienden desde una fuente de tóxicos a la exposición de ganado y seres humanos (McClellan, 2012. Figure 2.4. Schematic rendering illustrating exposure pathways extending from a source of toxicants to exposure of livestock and people)

Otro ejemplo es el estado de gestación, donde se observa la coexistencia de factores asociados a la capacidad protectora de la placenta y el desarrollo fetal, siendo esta protección dependiente del estado del desarrollo fetal.

Los animales o humanos gerontes son más susceptibles a algunas sustancias. El efecto de senectud en la toxicidad ha sido poco evaluado, pero se considera que se relaciona con una menor capacidad de detoxificación y disminución en la excreción renal. La distribución de los tóxicos puede también alterarse debido al incremento en el tejido adiposo y la pérdida de agua corporal. Su mecanismo de detoxificación está alterado, se dan condiciones de deficiencias nutricionales, una alta proporción de tejido adiposo, un incremento en la vida media de los fármacos, una disminución en la excreción renal, una reducción en la capacidad de formar enlaces con proteínas plasmáticas, y menor absorción intestinal. Esta población presenta una alteración en la toxicocinética de las sustancias, lo que favorece la aparición de daños en dosis inferiores.

La edad es, por tanto, uno de los factores de riesgo más importante. Las neoplasias son responsables de menos del 10% de las muertes en niños menores a 15 años, mientras que la

incidencia de cáncer aumenta en hasta un 50% en individuos de más de 75 años. Se cree que el incremento en la edad es la causa de este fenómeno.

En la evaluación de los expuestos, es importante considerar las concentraciones en el medioambiente, la ruta de ingreso al organismo, la biodisponibilidad del contaminante por la ruta de ingreso y el tiempo de exposición (duración y frecuencia) (Figura 4).

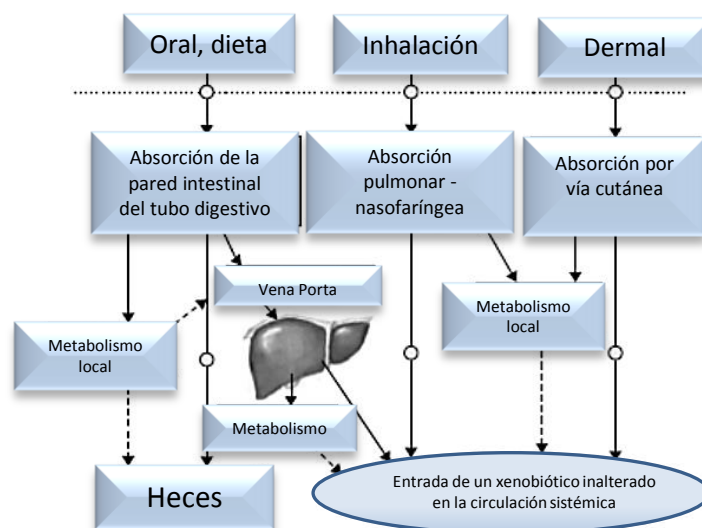


FIGURA 4. Conceptos en absorción extravascular. Cuando un xenobiótico, como una droga, es administrado por vía no endovenosa, la absorción en el sitio local es el proceso clave en el sistema de transporte de la sustancia activa. Algunas de las rutas extravasculares más importantes incluyen oral/dietética, inhalación (nasofaríngea – pulmonar), y dermal. Mediante estas rutas extravasculares de administración, una porción significativa del xenobiótico se pierde debido al metabolismo local. Sumado a lo anterior, si se administra por vía oral, el metabolismo hepático de primer paso posee un rol esencial en el control de la disponibilidad sistémica de las sustancias (Dixit, 2007).

Investigación de efectos en bioindicadores. Una de las instancias más relevantes es la evaluación dosis- efecto en la que, en base a la cuantificación en fluidos biológicos como sangre y orina (principalmente para exposiciones agudas), sumadas a la de cabellos, se puede establecer si estos niveles se encuentran en rangos de exposición normal para individuos sanos o para poblaciones de trabajadores o bien exceden estos valores de referencia. También resulta ser de importancia establecer los tiempos de exposición y cuál es la vía de ingreso de ese determinado metal al organismo (oral, inhalatoria o dermal), sin antes no haber analizado otras fuentes no convencionales de metales, como las asociadas a hábitos, consumo de drogas ilícitas y de tabaco.

Es importante considerar actualmente las recomendaciones de la OMS del año 1993, respecto del uso de biomarcadores para evaluar la exposición a xenobióticos (World Health Organization (WHO) & International Programme on Chemical Safety (IPCS), 1993). Los biomarcadores pueden definirse como indicadores o eventos de señalización en sistemas biológicos o muestras de cambios medibles a nivel molecular, bioquímico, celular, fisiológico, patológico o etológico (Gupta, 2014). Un ejemplo de biomarcador es la medición de L-Glutatión, que permite identificar el comportamiento específico de algunas poblaciones contra metales pesados y otros contaminantes en concentraciones de exposición bajas y en dosis internas inferiores, pero con efectos bioquímicos que deben evaluarse en el tiempo como indicadores de riesgo (Davidson, Ke, & Costa, 2015; Santonen, Aitio, Fowler, & Nordberg, 2015) (Figura 5).

A su vez, cuando se investiga un determinado agente(s) como posible responsable de una situación de riesgo en un sitio contaminado es requisito contar con los siguientes datos:

- *Información de la situación local*, sin olvidar efectuar una visita al terreno de manera que se puedan considerar todas las variables ambientales a tener en cuenta en la investigación.
- *Revisión de información existente* en bases de datos como ATSDR, EPA, IRIS, OMS, INCHEM, IPCS, u otras, incluyendo métodos analíticos y valores de referencia.
- *Consolidación de la información global* de relevancia para la estimación del riesgo, es decir si lo que se está evaluando son efectos agudos, en cuyo caso los datos relevantes y de referencia serán para estudios en animales en un tiempo menor a 14 días, o si, por el contrario, se está investigando efectos a largo plazo y, en este caso, los datos referenciados, y que serán utilizados para las modelaciones, corresponderán a estudios experimentales de más de 1 año o 2 años (estudios crónicos).
- *Elaboración del plan de estudio e hipótesis*, basado en los datos ambientales de concentración en el medio, se calculará o estimarán las dosis de exposición para las distintas vías de ingreso del contaminante (oral, respiratoria y dermal) y los diferentes tiempos, considerando la duración y frecuencia. Con esta información será posible definir la condición de riesgo o margen de seguridad.
- *Diseño del muestreo* con la información de la estimación de riesgo, en base a lo cual se establecerán las poblaciones más susceptibles y los individuos (*n*) que son representativos tanto de la población en estudio como de la población control o blanco. También se definirá el método analítico a utilizar, los niveles de detección de éste y de cuantificación, con su validación correspondiente. Las condiciones de toma de muestras ambientales y/o de poblaciones y la cadena de custodia para garantizar la validez del muestreo.
- *Análisis de resultados* para conocer las concentraciones de exposición, en qué medio ambiental se encuentran, las dosis internas y, además del análisis de la información global del sitio en estudio, se podrá determinar la relación de causalidad.

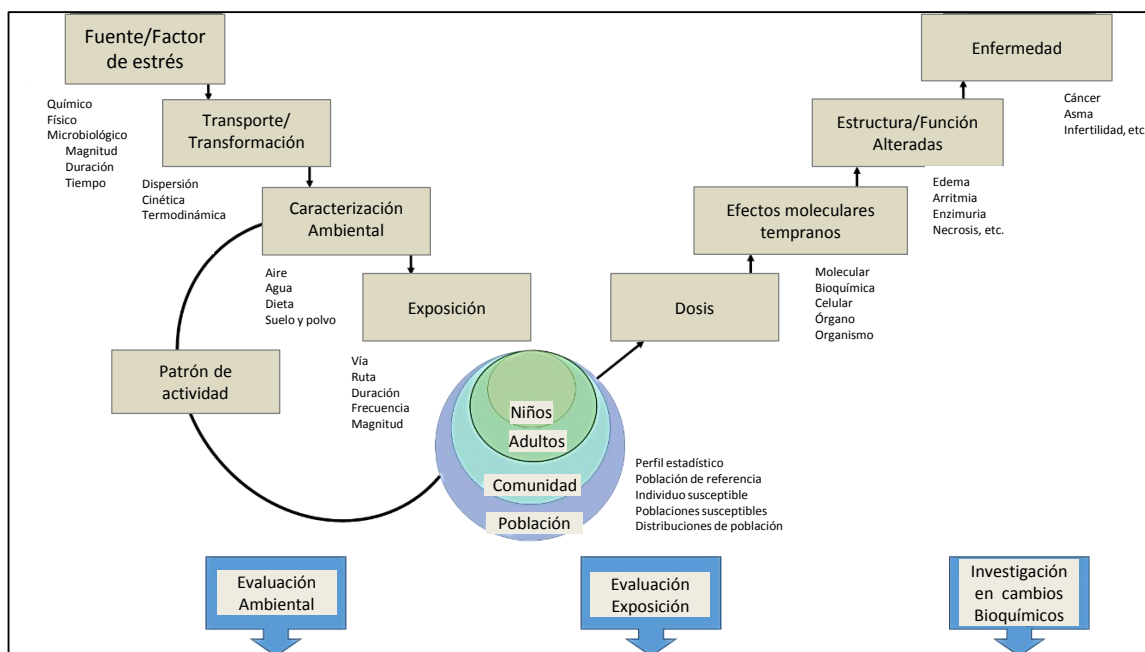


FIGURA 5. Componentes de la ciencia de la exposición: desde la caracterización de la fuente de un contaminante a su transporte, transformación y destino tras su liberación al medioambiente, a su contacto final con el ser humano y los ecosistemas (Modificado de Georgopoulos, 2008).

- *Conclusiones y recomendaciones* de acuerdo con los resultados. Se podrá establecerse la relación causa efecto para exposiciones agudas y/o crónicas y se establecerán las medidas de control y de mitigación.

Existen diversas metodologías para el estudio de un posible sitio contaminado y dentro de todas la más relevante y sistematizada es la ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2015), la cual considera los siguientes ítems:

- **Evaluación de la información sobre el lugar:** datos físicos, actividades demográficas, topografía, clima, recursos naturales, contaminación.
- **Determinación de contaminantes de interés.**
- **Identificación y evaluación de las rutas ambientales:** fuentes, medios contaminados, transporte y destino, transformación.
- **Identificación de rutas de exposición humana:** poblaciones, modalidad de exposición (duración y frecuencia), toxicocinética (absorción, distribución, biotransformación y excreción) y tóxicodinámica (órgano diana, receptor y efecto) del agente que es objeto de la investigación.
- **Determinar implicaciones para la salud pública:** estimar exposición, comparar dosis, identificar efectos y comunicación de riesgos.

Para establecer cuál es la magnitud de la exposición a un agente en estudio se deberá considerar la cantidad (concentración) del agente en la superficie de contacto y el lapso de tiempo específico de contacto. En el caso de exposiciones crónicas, este periodo de tiempo sería de entre el 10 y 100% de la esperanza de vida; en exposiciones a corto plazo, esta duración sería inferior al 10% de la expectativa de vida y para exposiciones agudas, se relacionaría con un solo evento de exposición, con una duración de un día o menos, (Duffus & Park, 1999; IPCS, 2010). También, en algunos casos, es posible observar un periodo de latencia, que corresponde al periodo entre la exposición y la aparición de los efectos en el individuo. Esto es importante en caso de exposiciones intermitentes.

Los factores principales a considerar en el momento de diseñar un muestreo son:

- **Tipo de exposición:** en el caso de exposiciones intermitentes, el tiempo entre exposiciones es muy importante, dado que la concentración del agente puede variar rápidamente en el tiempo. La concentración interna aumenta al inicio de la exposición, y tiende a disminuir a medida que el proceso de detoxificación avanza (metabolismo y excreción). El lapso de tiempo no es relevante en exposiciones continuas, dado que la concentración del agente será prácticamente constante tras el establecimiento del régimen estacionario.
- **Movilidad y metabolismo:** dependiendo de las propiedades físico-químicas del tóxico, éste es transportado a diferentes velocidades en los órganos, y se acumula y se transforma en distintas tasas en cada compartimento en el que ingrese. Si el compuesto original es de rápida biotransformación, entonces su concentración en las matrices biológicas será baja y, en este caso, es más significativo medir la concentración de sus metabolitos. El compuesto puede detectarse en sangre, acumulado en tejido adiposo, cabello, uñas, músculos o huesos, o puede estar en las secreciones (orina, heces, leche, sudor, etc.).

- **Facilidad de muestreo:** se prefiere analizar matrices de las cuales sea posible obtener muestras con facilidad y con la menor invasión posible al cuerpo. También es mejor seleccionar la matriz donde la especie química relevante se encuentre con mayor facilidad.

El muestreo de cada matriz posee sus ventajas y desventajas, y la selección de la más apropiada en cada caso dependerá en el balance de esas características. Las matrices más frecuentes son orina, sangre y cabello.

Con respecto a los métodos analíticos para cuantificar metales en distintas matrices, se consideran para distintos casos.

- **Medio ambiente.** Se aplica a matriz agua, aire, suelo, especies vegetales, sedimentos, alimentos.

- *Difracción de Rx.* Sólo para muestras secas o liofilizadas. Se expresa en % por barrido, técnica de terreno con lectura inmediata.
- *Espectroscopia IR.* Permite identificar diversos metales y además tipos de suelos, se aplica a muestras de agua, microparticulado y otras matrices ambientales. Se expresa en % de identidad a nivel de residuos (ppb) e identifica los grupos funcionales y uniones de metales con sulfatos u otros.
- *Absorción atómica /Inducción de plasma (ICP).*
- *Voltagometría o potenciometría.*

- **Biológicas.** ICP y absorción atómica tanto para metales como especiación

- Se aplica a matrices biológicas como sangre, orina, cabellos, uñas y leche materna.
- En matrices de la unidad materno-fetal se hará sobre placenta y sangre de cordón. En el caso de fallecidos se realizará en encéfalo, hígado, riñón, etc.
- Se tendrán en cuenta indicadores de exposición específicos para medir efectos, como vitamina D, hemograma, Delta ALA, EEG, EMG, RNM cerebro, Spect Cerebral.
- Se analizarán los indicadores biológicos (OMS) para conocer los efectos bioquímicos como niveles de L-Glutatión.

Los escenarios que se podrán considerar en esta investigación están relacionados con el **agente** y con los **valores de referencia** en bases de datos reguladoras o de estudios experimentales. De tal modo que cuando se valore el agente o metal susceptible del estudio, deberá tenerse una evaluación del tipo de metal, su categorización como metal tóxico o si se trata de un oligoelemento, su concentración en el medio y el método que se utilizó en su cuantificación con su sensibilidad, la ruta ambiental y las vías de ingreso al organismo. De ahí que la visita al terreno no sea delegable y el equipo investigador deberá utilizar diversa información del sitio para establecer la existencia de rutas ambientales (ATSDR). La ausencia de la(s) ruta(s) ambiental(es) determinará la ausencia de una vía de ingreso al organismo y por ende permitirá sospechar de manera fundamentada la existencia de una escasa o nula probabilidad de riesgo.

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN

Riesgo y Peligro

El término peligro se define como la capacidad de una sustancia de producir efectos adversos en los organismos, y el término riesgo se define como la probabilidad que, bajo ciertas condiciones, una sustancia peligrosa produzca daño.

La toxicidad es una medida inherente del peligro de una sustancia, y la magnitud del riesgo es una función de la peligrosidad de la sustancia y la magnitud de la exposición. Para establecer un riesgo es necesario tener el peligro y la exposición; si uno de ellos es cero, entonces no hay riesgo.

Por tanto, si queremos valorizar el riesgo es necesario poseer información válida de los valores de referencia de los efectos toxicológicos para una dosis específica y durante un periodo de tiempo definido.

La evaluación del riesgo permite establecer si el riesgo al que una población está expuesto o los tóxicos ambientales en un área contaminada, es **tolerable**, y establecer el tiempo máximo de exposición en el que, incluso existiendo riesgo para la población, éste sigue siendo **socialmente aceptable**.

La **evaluación de la exposición** es el cálculo del número de xenobióticos recibidos por una población, y permite establecer una relación cuantitativa de dosis-respuesta. La dosis-respuesta es la relación entre la dosis, la incidencia y la severidad del efecto a diferentes niveles de exposición (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2011)

La medición de los parámetros (índice de peligrosidad) debe ser ajustada a las exposiciones ambientales bajas y estables, y son diferentes para efectos tóxicos con o sin nivel umbral. Si el agente posee **nivel umbral**, es posible establecer el valor para niveles seguros de exposición, basado en el límite de toxicidad observado en estudios toxicológicos en animales. Por el contrario, si la sustancia es carcinogénica o genotóxica, ésta **carece de nivel umbral** y es posible predecir el riesgo asociado a la exposición. Para los **efectos tóxicos sin nivel umbral** el índice de peligro es la **probabilidad** de que el efecto en la salud aparezca, a partir de la cual se puede calcular un margen de seguridad. La cuantificación de la exposición consiste en determinar la **magnitud, frecuencia y duración en el tiempo de la exposición** de los individuos de una población, **para cada una de las rutas significativas**.

Si la exposición ocurre en un periodo de tiempo específico, la exposición total debe dividirse por la duración de ésta, a modo de establecer la **tasa de exposición promedio por unidad de tiempo** y, frecuentemente, este promedio es expresado, además, por unidad de peso corporal.

La **dosis interna** o **captación** es la cantidad de contaminante con el que los receptores contactan por unidad de tiempo y masa corporal, y se expresa como mg/Kg/día (Paustenbach & Madl, 2014)

La **dosis absorbida** es parte de la dosis externa que ingresa al torrente sanguíneo y es distribuida en el organismo (Paustenbach & Madl, 2014).

De acuerdo con las concentraciones en el medio, la tasa de absorción, con la frecuencia y la duración, y la relación con la masa corporal y el tiempo de exposición, es posible calcular la dosis administrada o de exposición (IPCS, 2010). La fórmula para la dosis de exposición es [1]:

$$ER = \frac{C \times Cr \times F}{M \times d} \quad [1]$$

donde *ER* es la tasa de exposición (dosis de exposición [*ED*]); *C* la concentración; *Cr* la tasa de contacto (absorción); *F* la frecuencia; *M* el peso corporal (Kg); y *d* el tiempo promedio en el que la exposición es relevante para la caracterización del riesgo a la salud.

Para efectos de toxicidad no carcinogénicos y asociados al desarrollo, este valor de *ED* se compara con: **Dosis de Referencia (RfD) o Ingesta Diaria Admisible (ADI)**. Este es el nivel de exposición diaria para una población durante toda su esperanza de vida, en el cual no se presenta un riesgo medible de efectos adversos, incluyendo subpoblaciones sensibles (Beck *et al.*, 2014)

La *ED* se calcula para diferentes rutas de ingreso para el tóxico, periodo de exposición evaluado y tipo de efecto adverso observado. Por ejemplo, es posible obtener el valor de la dosis de referencia para exposiciones orales crónicas (**RfDoc**), la dosis de referencia para exposiciones crónicas respiratorias (**RfDic**), la dosis de referencia oral a corto plazo (**RfDos**), y para efectos del desarrollo (**RfDd**), entre otras (Duffus & Park, 1999)

Cuando se trata de agentes carcinogénicos, el riesgo se estima como el incremento en la probabilidad de que un individuo desarrolle cáncer durante su vida debido a la dosis administrada durante la exposición a un agente carcinogénico, por tanto se valora el aumento en el riesgo de desarrollar cáncer. Esta dosis de exposición se calcula de las dosis diarias promedio crónicas durante 70 años, en mg/Kg/día; y de la información de la probabilidad específica de desarrollar cáncer (**factor de pendiente**) para la sustancia de interés (Duffus & Park, 1999).

La fórmula para riesgo de cáncer [2] se expresa como:

$$\text{Riesgo de cáncer} = ED \times SF \quad [2]$$

donde *ED* es la dosis de exposición y *SF* el factor de pendiente

El valor límite tolerable en el incremento del riesgo de cáncer es de 1×10^{-6} y 1×10^{-5} (Duffus & Park, 1999).

Efectos no carcinogénicos – Margen de exposición

Es posible calcular el potencial de presentar un efecto de toxicidad no carcinogénico o efecto adverso cuando se relaciona la dosis de exposición con la dosis de referencia (estudios en mamíferos). Esta relación de exposiciones a tóxicos es llamada **Margen de exposición**, y se puede definir (Duffus & Park, 1999; Suter, 2006):

La fórmula del margen de exposición (Duffus & Park, 1999), se expresa como [3]:

$$MOE \text{ (o MOS)} = \frac{NOAEL}{E} \quad [3]$$

donde *MOE* es el margen de exposición de efectos no carcinogénicos (o *MOS*); *NOAEL* el nivel de efecto adverso no observado /mg/Kg/día; y *E* el nivel de exposición o ingesta (mg/Kg/día).

Una variación de esta fórmula para *MOS* es la fórmula del margen de exposición (Becker *et al.*, 2012) [4], donde *MOS* es el margen de seguridad para efectos no carcinogénicos; *POD* el punto de partida (mg/Kg/día) [un ejemplo de *POD* es el *NOAEL*], *AFs* es el factor de ajuste, factor de incertidumbre o seguridad, y *D* la tasa de dosis diaria (mg/Kg/día).

$$MOS = \frac{POD/AFs}{D} \quad [4]$$

Los valores cercanos o superiores a 1 se consideran como valor inaceptable de riesgo asociado a exposición (Suter, 2006)

Para los valores de referencia se debe considerar información referenciada de agencias reguladoras provenientes de estudios en mamíferos, basados en guías OECD o similares. Para efectos agudos y/o crónicos, debe tenerse en cuenta la relación entre la dosis de exposición y la dosis interna, los valores de DL₅₀ para diferentes rutas de ingreso, valores de NOAEL y LOAEL para distintos tiempos de exposición, e IDA. Esta información permitirá realizar las modelaciones para seres humanos. Los datos calculados por este medio, permiten establecer la estimación del riesgo para diferentes rutas y tiempos de exposición y, en base a esta información, es posible tomar decisiones en estudios poblacionales respecto a si se evaluarán o descartarán efectos o biomarcadores de exposición en los grupos susceptibles.

Respecto a la evaluación sobre efectos en especies acuáticas, aves u organismos del suelo, se deben considerar los valores reguladores de referencia para efectos ecotoxicológicos, basados en estudios regidos por guías OECD o similares.

BASES DE DATOS CON INFORMACIÓN SOBRE TOXICIDAD

Sistema IRIS: IRIS (Integrated Risk Information System) es una base de datos que contiene información actualizada sobre toxicidad y la normativa para el uso de numerosas sustancias. Sólo está disponible para consulta en línea y se puede acceder desde la página electrónica de la EPA (Office of Communications and Public Liaison, 2016-b)

Se tiene un archivo por cada sustancia. Se agregan nuevos archivos a medida que la información va estando disponible.

Los archivos contienen la siguiente información cuantitativa:

- DdR crónicas para vía oral e inhalada
- Factores de Pendiente y Unidades de Riesgo para exposición crónica por vía oral o por inhalación
- Resúmenes de la normatividad que aplica la EPA
- Datos suplementarios sobre peligros agudos para la salud, así como información físico-química
- Bibliografía sobre los estudios toxicológicos hechos con la sustancia

Tablas HEAST. Las tablas HEAST (Health Effects Assessment Summary Tables) contienen información sobre DdR y Factores de Pendiente interinos, así como otros datos de toxicidad de algunas sustancias. Tienen información bibliográfica sobre estudios de toxicidad. Estas tablas son de gran utilidad cuando la información que se necesita no se encuentra en IRIS. Las tablas se publican trimestralmente (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2008)

Perfiles Toxicológicos. Contienen información general sobre toxicidad y niveles de exposición asociados con letalidad, cáncer, genotoxicidad, neurotoxicidad, toxicidad para el desarrollo y la reproducción, inmunotoxicidad y toxicidad sistémica (hepática, renal, respiratoria, cardiovascular, gastrointestinal, hematológica, músculo-esquelética y dermo/ocular). Los Perfiles contienen información sobre los efectos tóxicos observados en el hombre y en los animales, por ruta de exposición y duración (aguda, intermedia, crónica). Los perfiles también incluyen capítulos sobre propiedades fisicoquímicas y métodos analíticos (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2016).

RTECS (Registry of Toxic Effects of Chemical Substances) es un compendio de datos extraídos de la literatura científica. Se organizan alfabéticamente por su nombre químico-principal. Se incluyen datos de 6 tipos de efectos tóxicos

- Irritación primaria
- Efectos mutagénicos
- Efectos sobre la reproducción
- Efectos tumorigénicos
- Toxicidad aguda
- Otros efectos dosis-dependientes

(The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2011)

HSDB. La Base de Datos de Sustancias Peligrosas (Hazardous Substances Data Bank) proporciona información sobre diversos aspectos de agentes químicos: estudios de toxicidad en animales, metabolismo/farmacocinética, salud humana, entre otros (Office of Communications and Public Liaison, 2016-a)

IARC. La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer, dependiente de la OMS, es el organismo responsable de realizar y coordinar trabajos de investigación sobre las causas y desarrollo del cáncer en seres humanos y las estrategias científicas para su control (International Agency for Research on Cancer (IARC), 2017)

Base de datos del Programa Nacional de Toxicología de EEUU. Esta base de datos publica periódicamente perfiles toxicológicos de sustancias cancerígenas y probablemente cancerígenas (National Institute of Environmental Health Sciences, 2016)

OECD. La OECD posee secciones de interés sobre evaluación de riesgo toxicológica de sustancias químicas de uso industrial y agrícola, por países (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2015)

UNEP. El Programa Medioambiental de Naciones Unidas posee información sobre productos químicos (Willis, 1999)

Base de datos ITER. La base de datos internacional de Estimaciones de Riesgo (International Estimates for Risk) es una iniciativa privada que reúne información toxicológica de los efectos en salud humana, proveniente de distintos organismos oficiales (Office of Communications and Public Liaison, 2016-c)

EIONET website: La Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) mantiene este portal (European Environment Information and Observation Network, 2016)

TOXNET. Esta web es una de las más útiles para la evaluación de riesgo. Provee información medioambiental y toxicológica. También permite enlazar con la mayoría de las fuentes mencionadas anteriormente (Office of Communications and Public Liaison, 2016-d).

CONCLUSIONES

En resumen, estas herramientas permiten obtener datos objetivos y precisos, claves para una toma de decisiones correcta, con aplicaciones en salud ambiental, epidemiología, en el ámbito judicial, en normas reguladoras, e incluso para priorizar proyectos en el desarrollo de la química sustentable a nivel empresarial.

REFERENCIAS

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2015; September 9, 2009). Toxicology Curriculum for Communities Trainer's Manual. Retrieved from <http://www.atsdr.cdc.gov/training/toxmanual/>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2016). Toxicological Profiles. Retrieved from <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/Index.asp>
- Beck, B., Seeley, M., & Calabrese, E. (2014). Use of Toxicology in the Regulatory Process *Hayes' Principles and Methods of Toxicology, Sixth Edition* (pp. 35-88): CRC Press.
- Becker, R. A., Hays, S. M., Robison, S., & Aylward, L. L. (2012). Development of Screening Tools for the Interpretation of Chemical Biomonitoring Data. *Journal of Toxicology, 2012*. doi:10.1155/2012/941082
- Davidson, T., Ke, Q., & Costa, M. (2015). Chapter 9 - Selected Molecular Mechanisms of Metal Toxicity and Carcinogenicity A2 - Nordberg, Gunnar F. In B. A. Fowler & M. Nordberg (Eds.), *Handbook on the Toxicology of Metals (Fourth Edition)* (pp. 173-196). San Diego: Academic Press.
- Dixit, R. (2007). Figure 2.1. Concepts in extravascular absorption. Pharmacokinetics and toxicokinetics: fundamentals and applications in toxicology. In G. C. Ramesh (Ed.), *Veterinary Toxicology* (1st ed., pp. 27). Oxford: Academic Press.
- Duffus, J. H., & Park, M. V. (1999). *Chemical Risk Assessment*. UNEP/IPCS Training Module, (Training Module No. 3). UNEP, Edimburg, Switzerland.
- Elder, A., Nordberg, G. F., & Kleinman, M. (2015). Chapter 3 - Routes of Exposure, Dose, and Toxicokinetics of Metals* *Handbook on the Toxicology of Metals (Fourth Edition)* (pp. 45-74). San Diego: Academic Press.
- European Environment Information and Observation Network. (2016). About Eionet. Retrieved from <https://www.eionet.europa.eu/about>
- Georgopoulos, P. G. (2008). A Multiscale Approach for Assessing the Interactions of Environmental and Biological Systems in a Holistic Health Risk Assessment Framework. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 8*(1), 3-21. Figure 21. Schematic representation of the "environmental health sequence" from "source" to "outcome," involving a series of environmental and biological "steps". doi:10.1007/s11267-007-9137-7
- Guha-Sapir, D. (2016, 19 de diciembre de 2016). Disaster Trends: TOTAL NUMBER of reported Natural Disasters between 1970 and 2016. Retrieved from http://emdat.be/disaster_trends/index.html
- Gupta, R. C. (2014). Introduction. In R. C. Gupta (Ed.), *Biomarkers in Toxicology* (1st ed., pp. 3-5). Boston: Academic Press.
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (2017). ABOUT IARC. Retrieved from <https://www.iarc.fr/en/about/index.php>
- IPCS. (2010). WHO Human Health Risk Assessment Toolkit: chemical hazards. In IPCS (Ed.), *Harmonization project document no. 8*. Geneva: World Health Organization.
- McClellan, R. O. (2012). Figure 2.4. Schematic rendering illustrating exposure pathways extending from a source of toxicants to exposure of livestock and people). Concepts in veterinary toxicology. In G. C. Ramesh (Ed.), *Veterinary Toxicology* (2nd ed., pp. 18). Boston: Academic Press.
- National Institute of Environmental Health Sciences. (2016). National Toxicology Program (NTP). Retrieved from <https://ntp.niehs.nih.gov/about/index.html>
- Office of Communications and Public Liaison. (2016-a). Hazardous Substances Data Bank (HSDB®). *Fact Sheet*. Retrieved from <https://www.nlm.nih.gov/pubs/factsheets/hsdbfs.html>
- Office of Communications and Public Liaison. (2016-b). Integrated Risk Information System (IRIS). *Fact Sheet*. Retrieved from <https://www.nlm.nih.gov/pubs/factsheets/irisfs.html>
- Office of Communications and Public Liaison. (2016-c). International Toxicity Estimates for Risk (ITER). *Fact Sheet*. Retrieved from <https://www.nlm.nih.gov/pubs/factsheets/iterfs.html>

- Office of Communications and Public Liaison. (2016-d). TOXNET®: Toxicology Data Network. *Fact Sheet*. Retrieved from <https://www.nlm.nih.gov/pubs/factsheets/toxnetfs.html>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2015). Country Risk Classification. Retrieved from <http://www.oecd.org/tad/xcred/crc.htm>
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2012). *Salud en Las Américas: Panorama regional y perfiles de país*. Washington DC: Organización Panamericana de la Salud (OPS).
- Paustenbach, D. J., & Madl, A. K. (2014). Practice of Exposure Assessment *Hayes' Principles and Methods of Toxicology, Sixth Edition* (pp. 453-526): CRC Press.
- Santonen, T., Aitio, A., Fowler, B. A., & Nordberg, M. (2015). Chapter 8 - Biological Monitoring and Biomarkers *Handbook on the Toxicology of Metals (Fourth Edition)* (pp. 155-171). San Diego: Academic Press.
- Suter, G. W. (2006). Ecological Risk Assessment and Ecological Epidemiology for Contaminated Sites. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 12(1), 31-38. doi:10.1080/10807030500428553
- The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2011). What is RTECS? Retrieved from <https://www.cdc.gov/niosh/rtecs/>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2008). Health Effects Assessment Summary Tables (HEAST). Retrieved from <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recorddisplay.cfm?deid=2877&CFID=86107549&CFTOKEN=18714528>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2011). *Exposure Factors Handbook: 2011 Edition*. Washington: National Center for Environmental Assessment.
- Willis, J. (1999; 2017 January, 30). Chemicals (IRPTC). *United Nations Environment Programme (UNEP)* Retrieved from <http://www.un.org/earthwatch/about/docs/Pdepche.htm>
- World Health Organization (WHO), & International Programme on Chemical Safety (IPCS). (1993). *Biomarkers and Risk Assessment: Concepts and Principles* (W. H. Organization Ed.). Geneva: World Health Organization.

CONFERENCIA INVITADA

El uso médico de las aguas minerales y productos termales

R. Meijide-Faílde¹

1 Dpto. de Medicina, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad de A Coruña 15006 A Coruña.

rosa.meijide.failde@udc.es

Resumen: El uso médico de las aguas minerales y termales tiene una gran tradición en Europa y su uso está contemplado en las prestaciones sanitarias de una buena parte de los países europeos. En este texto se repasan los conceptos fundamentales de la Hidrología Médica, Cura Balnearia, Hidroterapia, Terapia Acuática, Talasoterapia, Peloterapia. Se exponen las distintas definiciones y clasificaciones de agua mineral, mineromedicinal y termal. Se hace una breve descripción de los efectos sobre el organismo de las aguas minerales así como las vías y técnicas de administración. Y finalmente, se recuerdan los centros de investigación españoles que se dedican a esta disciplina y sus más recientes aportaciones.

Palabras clave: aguas minerales, balneoterapia, hidrología médica, terapia termal, termalismo

Abstract: The medical use of the mineral and thermal waters has a great tradition in Europe and its use is incorporated in the health benefits of a good part of the European countries. The fundamental concepts of Medical Hydrology are reviewed. Spa therapy. Hydrotherapy, Aquatic Therapy. Thalassotherapy. Pelotherapy. The different definitions and classifications of mineral and mineral-medicinal water are presented. A description is given of the effects on the organism of the mineral waters as well as the techniques of administration. And finally, the Spanish research centers that are dedicated to this discipline and its most recent contributions are remembered.

Key words: mineral waters, balneotherapy, medical hydrology, spa therapy, thermalism

INTRODUCCION

Desde la antigüedad, el hombre ha sabido ir descubriendo y utilizando aquellos productos que le servían para mantener y recobrar la salud, y así ha ido acumulando experiencia sobre los beneficios y riesgos en la salud humana de las aguas minerales y productos termales. El agua, además de ser fundamental para la vida y de sus aplicaciones dietéticas, higiénicas y lúdicas, aportó, desde tiempo inmemorial, los efectos beneficiosos sobre la salud de las llamadas aguas minerales. Los inicios de la medicina griega y romana han estado vinculados al uso terapéutico de las aguas minerales y termales (González Soutelo, 2011)

La medicina balnearia, también conocida como balneología, hidrología médica o medicina termal, con una larga y dilatada historia y tradición científica, ha florecido en el continente europeo desde el siglo XVIII y ha persistido con gran vigencia, e incluso esplendor, como una tradicional modalidad terapéutica en los regímenes médicos europeos. Su tradición curativa ha llegado hasta nuestros días, sobre todo en Europa y Asia, desarrollándose una cultura del agua que promueve su uso como fuente de salud y bienestar con indicaciones médicas bien establecidas (van Tubergen and van der Linden, 2002).

El balneario es un centro terapéutico desarrollado en torno a una fuente de agua minero-medicinal natural, normalmente con tradición desde hace muchos años de tener valor terapéutico en diversas afecciones médicas. Con el núcleo del manantial natural y de las diversas técnicas de

aplicación del agua y sus derivados (barros, vapores, gases), adaptadas a las diferentes patologías, y facilitado por terapia física, ejercicio, relajación, regulación dietética, medicina preventiva y tratamiento médico, con un entorno paisajístico normalmente bien preservado, y en algunos casos, privilegiado, el balneario se concibe como un completo centro de tratamiento y promoción de la salud (Gutenbrunner *et al.*, 2011).

A pesar de que estamos en una época en la que la tecnología médica se supera constantemente y donde los medios de comunicación nos transmiten, casi a diario, espectaculares avances en genética, farmacología o cirugía, con la frecuente sensación de que el estado de la ciencia todo lo puede, podría parecer anacrónico hablar de algo tan sencillo y humilde como es el uso del agua como remedio de la enfermedad, pero la realidad es que continúa representando una terapia complementaria en el tratamiento de diversas enfermedades reumáticas, dermatológicas, respiratorias y vasculares, con la ventaja de tener una excelente tolerancia y escasos efectos adversos.

CONCEPTOS

Hidrología médica: La Hidrología Médica, según la Comisión Nacional de la Especialidad Médica en España, (Ministerio de Sanidad 1996) tiene por fin el estudio de las aguas minero-medicinales, marinas y potables ordinarias y su posible utilización en la prevención, tratamiento y reeducación de diversas afecciones médicas. Hidrología médica, Medicina Termal, Crenoterapia (Francia), Balneoterapia (países centro-europeos), Medical balneology (países anglosajones) son denominaciones que se dan en los diferentes países a la rama de la Terapéutica que estudia las aguas minero-medicinales y marinas y sus acciones sobre el organismo sano o enfermo, fijando sus formas de administración, indicaciones y contraindicaciones. Por otra parte, desde la publicación del “Real Decreto 1227/2003, por el que se establecen las bases generales sobre autorización de centros, servicios y establecimientos sanitarios” (BOE 2003), entre los Servicios o Unidades Asistenciales, encontramos la U-58 “Hidrología” que especifica: “Unidad asistencial en la que un médico especialista en Hidrología Médica es responsable de la utilización de aguas mineromedicinales y termales con fines terapéuticos y preventivos para la salud”.

Hidroterapia: Concepto muy ligado a la hidrología, es el de hidroterapia que se refiere a la utilización con fines terapéuticos de las aplicaciones sobre la piel y mucosas de agua potable ordinaria, en cuanto es vehículo de acciones físicas, mecánicas o térmicas, sobre la superficie corporal sin considerar los posibles efectos derivados de su mineralización y absorción. Una modalidad de hidroterapia es **la terapia acuática o acuaterapia** que se define como la realización de ejercicios terapéuticos en el agua utilizando una variedad de posicionamientos y técnicas siendo el agua un medio idóneo para la rehabilitación debido a sus propiedades físicas: flotación, viscosidad y las presiones hidrostáticas e hidrodinámicas. En los balnearios se utilizan diferentes técnicas hidroterápicas en los que el medio empleado es el agua minero-medicinal. De esta manera, además de los efectos propios del agua mineral se aprovecharían los derivados de los principios físicos mecánicos y térmicos propios de cualquier tipo de agua (Bruce y Cole, 2011).

Talasoterapia se define como la utilización del agua de mar o lago salado con fines preventivos y terapéuticos junto con el clima marino y los diferentes elementos del medio marino: peloides marinos denominados limos, arena caliente (Psammoterapia), algas, la exposición de manera metódica y sistemática al sol (Helioterapia), requiriendo instalaciones sanitarias al borde del mar (Bobet, 1999).

Balneario: No existe una definición homogénea de balneario. De una manera genérica podemos decir que es un conjunto de instalaciones sanitarias, próximas al manantial de agua mineral o

termal, en donde se lleva a cabo la aplicación de aguas minero-medicinales. Desde el punto de vista legal, en las CCAA en donde se ha legislado al respecto, un balneario es un centro sanitario que ha de reunir tres condiciones: aguas minero-medicinales; servicio médico especializado; e instalaciones médicas adecuadas para llevar a cabo el tratamiento de aquellas enfermedades en las que está especializado. El citado anteriormente R. D. 1227/2003, por el que se establecen las bases generales sobre autorización de centros, servicios y establecimientos sanitarios define los “Establecimientos balnearios” como “Servicios sanitarios integrados en organizaciones cuya principal actividad no es sanitaria”. En Portugal, Francia e, Italia se denomina “Termas”. La palabra utilizada en inglés para nombrar los balnearios de aguas minero-medicinales o termales es “Spa”. Su concepto y definición en toda Europa quedan reflejados en la voz de la Enciclopedia Británica “Spa: Spring or resort with thermal or mineral water used for drinking and bathing, etc.”.

Terapia termal: Se define como una intervención terapéutica compleja mediante un conjunto de factores terapéuticos que incluye diversos recursos hidrominerales naturales: aguas mineromedicinales, gases (CO₂, H₂S), vapores, peloides, algas, clima, junto con Recursos complementarios de medicina física, paramédicos, educativos y factores psicosociales ligados como el reposo, cambio de clima, higiene de vida, reposo psíquico, ejercicio dirigido, medidas dietéticas y educacionales, interacción social, aspectos culturales y lúdicos, llevados a cabo bajo prescripción médica con fines preventivos, curativos y rehabilitadores. Este tipo de terapia que se lleva a cabo en los balnearios actúa sobre el individuo de forma integrada con un mecanismo de acción multifactorial y en un ambiente agradable y bien aceptado por el paciente tanto natural como culturalmente (San Martín, 2006).

Estación termal: Health resorts; Spa resorts; Thermo-mineral resorts son diferentes denominaciones de las estaciones termales que podemos encontrar en todo el mundo. Y se definen como el conjunto formado por uno o más balnearios asociado con diferentes modalidades de alojamiento y restauración para los termalistas, junto con instalaciones y espacios donde pasan su tiempo de ocio y una oferta de actividades complementarias variada dependiendo del perfil de los usuarios. Es una asociación de establecimiento/s sanitario/s y Establecimiento/s turístico-hotelero/s. En España tenemos muchos ejemplos entre los cuales están los balnearios de Alange (Badajoz), Archena (Murcia), Alhama de Aragón (Zaragoza), Cuntis o La Toja (Pontevedra). En toda Europa tenemos una gran cantidad de estaciones termales.

Villa termal: Una villa termal se puede definir como una ciudad con una actividad en torno al agua mineromedicinal, generalmente de temporada, consistente en ofrecer servicios de salud en su más amplio concepto de un entorno agradable que se presta a su vez para el descanso y las distracciones. Las villas termales deben disponer de mecanismos de planeamiento con un proyecto urbanístico integral, con protección del patrimonio, soluciones de diseño bioclimático y orientar su desarrollo a la puesta en valor del recurso termal a través de un modelo de turismo sostenible. En España se creó en 2001 dentro de la Federación de municipios y provincias. 83 villas termales en España en 2014.

Termalismo: Conjunto de medios médicos, higiénicos y de salud pública, de hidrogeología, hidroquímica, arquitectura, ingeniería, servicios hoteleros, hospitalarios, turísticos y sociales al servicio de la utilización preventiva y terapéutica de las aguas mineromedicinales o termales.

Turismo de salud: aquél referido a los viajes realizados con el fin de obtener servicios orientados al cuidado de la salud y todos los beneficios derivados de ello. La Organización Mundial de Turismo define tres tipos de turismo, hospitalario, De curación y de Bienestar. El termalismo se encuentra incluido entre los de curación y bienestar.

DEFINICIONES DE AGUAS MINERALES Y MINERO-MEDICINALES

En Hidrología Médica, de una manera general, en los países latinos y Francia, las aguas minero-medicinales son aguas que por sus especiales características, se han acreditado oficialmente como agentes terapéuticos y han sido declaradas de utilidad pública por los organismos sanitarios competentes. Se caracterizan por su contenido en minerales, oligoelementos y otros constituyentes que les confieren sus efectos terapéuticos. En los países centroeuropeos además se contempla la obligatoriedad de un contenido mínimo de minerales (Maraver, 2003).

Por otro lado no existe una denominación consensuada en Europa de las aguas minerales y minero-medicinales. La mayoría de los países europeos, desde la publicación de la Directiva 80/777/CEE del Consejo de 15 de julio de 1980 relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre explotación y comercialización de las aguas minerales naturales, han adaptado las legislaciones denominándolas “aguas minerales naturales”.

La situación en algunos de estos países es la siguiente:

España. En España la legislación específica es la Ley de Minas 22/1973 de 21 de julio, la cual regula las aguas minerales en el capítulo Primero de su Título IV y las clasifica en: Aguas minero-medicinales y Aguas minero-industriales. “Aguas Minero-medicinales” en la actualidad solamente se denominan así en España. Esto se debe a que en el momento de la redacción de esta Ley, no existía la denominación de aguas minerales naturales establecida en la Directiva comunitaria y todavía no fue actualizado este término. Además las aguas minero-medicinales han sido transferidas a las CCAA y no han legislado de manera homogénea.

En Galicia, una de las CCAA que ha legislado, clasifica y define de la siguiente manera:

Regulación de las aguas minerales, termales y establecimientos balnearios de Galicia (Ley 5/1995)

Tipo	Aguas minerales			Aguas Termales	Aguas de manantial
	Minero-medicinales	Minero-industriales	Mineral natural		

Aguas Minero-medicinales: Las alumbradas natural o artificialmente y que por sus características y cualidades sean declaradas de utilidad pública y sean aptas para tratamientos terapéuticos. Sólo podrán ser aprovechadas para usos terapéuticos en instalaciones balnearias situadas en las áreas de emergencia.

Aguas minerales naturales: Aquéllas bacteriológicamente sanas que tengan su origen en un estrato o depósito subterráneo y que broten de un manantial en uno o varios puntos de alumbramiento naturales o perforados. Pueden distinguirse claramente de las restantes aguas potables por su naturaleza y pureza original, caracterizadas por su contenido en minerales, oligoelementos y, en ocasiones, por determinados efectos favorables.

Aguas termales: Aquéllas aguas cuya temperatura de surgencia sea superior, al menos, en cuatro grados centígrados a la media anual del lugar en que alumbren, y sean declaradas de utilidad pública y aptas para usos terapéuticos en instalaciones balnearias situadas en las áreas de emergencia.

En España el R.D. 1798/2010 por el que se regula la explotación y comercialización de agua minerales naturales y aguas de manantial envasadas para consumo humano es la que regula las aguas minerales naturales envasadas y supone la transposición de la Directiva comunitaria.

Francia. No existe la denominación de agua minero-medicinal. Su definición de Agua mineral natural es la de la directiva 80/777/CEE derogada por la directiva 2009/54/CE. Define a las aguas minerales naturales como aquéllas microbiológicamente sanas que tengan su origen en un estrato o yacimiento subterráneo y que broten de un manantial o que puedan ser captadas artificialmente mediante sondeo, pozo o galería, o bien, la combinación de cualquiera de ellos. Pueden distinguirse claramente de las restantes aguas de bebida ordinarias por su naturaleza y pureza original, caracterizadas por su contenido en minerales, oligoelementos y, en ocasiones, por determinados efectos favorables para la salud o terapéuticos.

En Francia la legislación está centralizada y es única para todo el país. El reconocimiento vinculante de las propiedades terapéuticas y su condición de medicamento es realizado por la Academia Nacional de Medicina (2 ó 3 especialidades terapéuticas por balneario).

Italia. Tampoco existe la denominación de agua minero-medicinal. Después de la directiva 80/777/CEE publican la Ley 24 de octubre de 2000 nº 323 Riordino do settore termale. En ella introducen la denominación de “agua termal” (en sustitución de agua minero-medicinal): “agua mineral natural, que según el R.D. de 28 de sep de 1919, y n. 1924 y posteriores modificaciones es utilizada con fines terapéuticos”.

La legislación en Italia es estatal pero la gestión de la investigación, explotación y concesión está transferida a las Regiones. Será el Ministerio de Salud el que reconozca las indicaciones terapéuticas de las curas termales (2 ó 3 especialidades terapéuticas por balneario).

Portugal. También ha actualizado la normativa con el Decreto Lei nº 142/2004 que regula “os estabelecimentos termais”. Al igual que en el resto de los países suprime la denominación de agua minero-medicinal y la sustituye por “agua mineral natural” adoptando la definición de la directiva 80/777/CEE.

Al igual que en el resto de los países, cada balneario tiene reconocidas 2 ó 3 indicaciones terapéuticas que están reguladas y reconocidas por la dirección Xeral de Saúde. Se exige un protocolo de investigación médico que es evaluado por una Comisión de evaluación técnica que emite un informe proponiendo las indicaciones terapéuticas que eleva a la Dirección Xeral de Saúde Pública.

Alemania, Austria. En Alemania aunque han adaptado su legislación a la directiva comunitaria mantienen en su legislación el concepto de agua minero-medicinal. Y así dividen las aguas minerales en Naturliches mineralwasser (agua mineral natural), Tafelwasser (agua envasada) y Heilwasser (agua minero-medicinal, gases y lodos). Están legisladas las aguas envasadas como alimentos en 2005 y las utilizadas como recurso curativo en 1960. En Alemania el carácter de villa termal o Bad también está legislado. Y es la Deutsche Bäderverband quien define los parámetros físicos y químicos que definen las cualidades terapéuticas de las aguas minero-medicinales y sus límites. Se exigen cantidades mínimas de minerales para ser reconocidas. Y aunque la legislación es estatal, las autorizaciones y reconocimientos de cada estación termal dependen de legislaciones de cada uno de los Land.

CLASIFICACIONES DE LAS AGUAS MINERO-MEDICINALES Y MINERALES NATURALES

Existen varios criterios para clasificar las aguas minero-medicinales. Las de mayor interés son las clasificaciones basadas en las propiedades físicas del agua, en especial la temperatura, y sobre todo las basadas en el residuo seco y en el contenido aniónico y catiónico predominantes. El uso médico de las aguas minerales y minero-medicinales se debe a los efectos derivados de su temperatura y de su constitución química.

Según la temperatura de surgencia del manantial se clasifican siguiendo criterios climáticos, que son los que contempla la normativa de Minas, o siguiendo criterios fisiológicos para aplicaciones hidroterápicas. Las clasificaciones de tipo climático comparan la temperatura del agua con la media anual del aire (T_{ma}) o del suelo en el punto de surgencia, y con la cota de altitud de la surgencia. Pero desde el punto de vista médico, la clasificación más útil es la que considera la temperatura del agua en relación a la indiferente del organismo, puesto que las aplicaciones externas del agua minero-medicinal se harán siempre atendiendo a la temperatura del organismo. Así se clasifican en hipotermas (menos de 34°C); mesotermas (entre 34-37 °C) e hipertermas (más de 37 °C).

Según la mineralización, las aguas minero-medicinales se clasifican atendiendo al residuo seco, a la mineralización predominante y a la presencia de elementos mineralizantes especiales. En su composición química son los minerales en forma disuelta o ionizada los constituyentes más abundantes y el predominio de uno de estos elementos va a motivar la clasificación de las aguas minero-medicinales de acuerdo a su composición química. De este modo, si tienen como anión principal a los sulfatos son aguas sulfatadas; a los cloruros, aguas cloruradas; y a los bicarbonatos, aguas bicarbonatadas. Y del mismo modo con los cationes, si predomina el sodio son sódicas; el calcio, cálcicas; el magnesio, magnésicas, etc. Además, en las aguas mineromedicinales existen muchos otros elementos, calificados como oligoelementos porque intervienen en la función celular en cantidades muy pequeñas, como son el zinc, selenio, cobre, litio... y tienen gases disueltos, como el anhídrido carbónico, hidrógeno sulfurado, radón, nitrógeno. En estos casos, su presencia en pequeñas cantidades confiere al agua unas características especiales que le otorgan una peculiar acción curativa: es el caso de las aguas sulfuradas o las de mineralización especial, como pueden ser, ferruginosas, carbogaseosas, fluoradas, litínicas o radiactivas. Existe por último un tipo de aguas mineromedicinales, denominadas oligominerales, en las que su principal característica curativa reside en la baja cantidad de sales minerales disueltas (menos de 100 mg/L de residuo seco).

En España, en hidrología médica se sigue la clasificación propuesta por Armijo y San Martín publicada por Maraver en el Vademecum de aguas mineromedicinales de España (Maraver, 2003; Maraver y Armijo, 2010). Para ello se han tenido en cuenta los distintos criterios elaborados en los distintos países europeos, de tal forma que, por un lado, existe el criterio latino, en el que un agua minero-medicinal es una agua con propiedades terapéuticas, independientemente de la cantidad de minerales, y el criterio germánico en el que es necesario tener un mínimo de residuo seco y de componentes químicos para que sea clasificada como mineromedicinal. En España se ha seguido un criterio mixto clasificándolas según se recoge en las tablas 1 y 2.

CLASIFICACION SEGÚN EL RESIDUO SECO	
Denominación	mg/L de residuo seco
Oligometálica	< 100 mg/L
De mineralización muy débil	100-250 mg/L
De mineralización débil	250 – 500 mg/L
De mineralización media	500-1.000 mg/L
De mineralización fuerte	> 1000 mg/L

TABLA 1. Clasificación de las aguas minerales según el residuo seco

CLASIFICACION DE LAS AGUAS MINEROMEDICINALES SEGÚN SU MINERALIZACION Y COMPOSICIÓN QUÍMICA (Armijo, San Martín, Maraver)	
1. Aguas mineromedicinales con más de 1 g/L de sustancias mineralizantes	
Clorurada (>20 % mEq de Cloruro)	<ul style="list-style-type: none"> • Sódicas • Cálcidas • Mixta <ul style="list-style-type: none"> ○ Sulfatada ○ Bicarbonatada
Sulfatadas (>20 % mEq de Sulfato)	<ul style="list-style-type: none"> • Sódicas • Magnésicas • Cálcidas • Mixtas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Cloruradas, Bicarbonatadas ○ Sódicas, Magnésicas...
Bicarbonatadas (>20 % mEq de Bicarbonato)	<ul style="list-style-type: none"> • Sódicas • Cálcidas • Mixtas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Cloruradas, Sulfatadas ○ Sódicas, Cálcidas...
2. Aguas minerales con elementos mineralizantes especiales	
Carbogaseosas	> 250 mg de CO ₂ /L
Sulfuradas	1 mg de S reducido/L <ul style="list-style-type: none"> • Sódicas • Cálcidas
Ferruginosas	(más de 5 mg/L de Fe bivalente)
Radiactivas	(más de 67,3 Bq/L)

TABLA 2. Clasificación de las aguas mineromedicinales según su mineralización y composición química.

Por otro lado, existe la clasificación que contempla el Real Decreto 1798/2010, de 30 de diciembre, por el que se regula la explotación y comercialización de aguas minerales naturales y aguas de manantial envasadas para consumo humano, en el que se autoriza a hacer las siguientes menciones en base a los análisis físico-químicos.

R.D. 1798/2010 Aguas minerales naturales envasadas	
Menciones	Criterios para efectuar las menciones en base a contenidos en mg/L
Bicarbonatada	> 600 mg/L de bicarbonato
Sulfatada	> 200 mg/L de sulfato
Clorurada	> 200 mg/L de cloruro
Cálcica	> 150 mg/L de calcio
Magnésica	> 50 mg/L de magnesio
Fluorada	> 1 mg/L de fluoruro
Ferruginosa	> 1 mg/L de hierro bivalente
Acidulada	> 250 mg/L de CO ₂ libre
Sódica	> 200 mg/L de sodio
<u>Indicada para dietas pobres en sodio</u>	<u>hasta 20 mg/L de sodio</u>

TABLA 3. Criterios para efectuar las menciones en base a contenidos en mg/L R.D. 1798/2010 Aguas minerales naturales envasadas.

VÍAS Y TÉCNICAS DE ADMINISTRACIÓN DE LAS AGUAS MINEROMEDICINALES Y PRODUCTOS TERMALES. TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS

Las aguas minero-medicinales y los productos termales pueden ser administradas de diversas formas. De una manera general las dividimos en 3 tipos: Ingestión oral, técnicas de aplicación externa y técnicas de aparato respiratorio (Meijide, 1998).

Ingestión por vía oral

Constituye la denominada cura hidropínica o en bebida. Éste es el método más antiguo y sencillo. Habitualmente se ingieren dos tipos de aguas, las diuréticas o las digestivas. Las primeras, son frecuentemente de escasa mineralización y su finalidad es conseguir una diuresis superior a la dosis de agua ingerida y las segundas, son las dirigidas al tracto gastro-enterohepático, entre las que sobresalen asiduamente las bicarbonatadas, carbogaseosas, cloruradas de escasa mineralización, sulfatadas o sulfuradas frías.

Técnicas de aplicación externa:

Balneación. Los Baños, es decir, la inmersión del cuerpo o parte de él en el agua minero-medicinal, pueden ser generales o parciales. Los generales, pueden a su vez, ser: colectivos en piscina orientados a la ejecución de ejercicio en el agua; individuales; en forma de aerobaños, con insuflación de aire o gas termal; con chorros subacuáticos incorporados o tipo "jacuzzi", es decir, un hidro-aero-baño a alta presión. Los locales o regionales, pueden ser: de brazos, maniluvios; de pies, pediluvios o de asiento, para la región abdominal baja o perineal (Figura 1).



FIGURA 1. Baño con chorros subacuáticos o hidromasaje

Aplicaciones con presión. Son las diferentes Duchas o Chorros, como también se les denominan, que difieren entre sí unas de otras por la forma, presión y temperatura con la que se administran las aguas. Fundamentalmente pueden ser: generales, locales o especiales. Entre las generales, distinguimos la Ducha general a presión o Chorro (Figura 2); la Ducha circular o las diferentes Duchas masajes, tipo Vichy o Aix-les-Bains. Entre las locales, se diferencian las Duchas de pies, denominadas pediluvios de serpentín; Duchas lumbares; Duchas anales y perianales o Duchas hepáticas. Entre las especiales, encontramos las Duchas babeantes, sin apenas presión, propias de técnicas tipo Kneipp o "Hidroterapia menor"; Duchas filiformes, con alta presión, utilizadas en afecciones dermatológicas y en odonto-estomatología; Irrigaciones vaginales y enteroclasis.



FIGURA 2. Ducha general a presión o chorro

Estufas. Por este procedimiento se aplican en crenoterapia los gases, el vapor del agua termal y las nebulizaciones. Estos a su vez, pueden ser colectivos o individuales. Entre los colectivos, distinguimos los Vaporarium y Salas de nebulizaciones colectivas. Entre las individuales, están la Estufa general; la Estufa local de pies y/o manos, tipo Berthollet y las Estufas dorsales o de columna.

Peloides. Se designa bajo el nombre genérico de "peloides" a los productos naturales, consistentes en una mezcla de un agua mineral (inclusive el agua de mar o lago salado), con materias orgánicas o inorgánicas resultantes de procesos geológicos, o biológicos, o a la vez geológicos y biológicos, utilizados con una finalidad terapéutica en forma de envoltura o baños" (Maraver, 2006). El concepto más reciente de peloide lo hemos encontrado en el trabajo de Gomes *et al.* (2013). "Peloide (en Griego πελοος, en Francés péloïde, en Español peloide, en Portugués peloide, en Italiano peloidi) es un barro madurado o una suspensión/dispersión turbia con propiedades curativas y/o cosméticas, compuesta de una mezcla compleja de materiales de grano fino de origen geológico y/o biológico, con agua mineral o agua marina, y compuestos orgánicos de actividad biológica metabólica".



FIGURA 3. Peloide

Cuando la maduración tiene lugar en ambiente natural es llamado barro natural y puede considerarse como un barro terapéutico. Los Barros o Peloides constituyen una de las técnicas

crenoterápicas más arraigadas. Se caracterizan por su alto poder calorífico, por tener baja conductividad térmica que permite su aplicación a elevadas temperaturas (Figura 3).

Técnicas de aparato respiratorio o técnicas atmiátricas

Ponen en contacto agua, gases o vapores con las vías respiratorias. Entre las técnicas específicas en afecciones respiratorias y otorrinolaringología destacan: los lavados e irrigaciones; las duchas y las técnicas inhalatorias. Los lavados e irrigaciones, pueden ser nasales y de senos. Las duchas faríngeas o retronasales. Entre las técnicas inhalatorias encontramos, desde los "humages" o "humectaciones", hasta el Aerosol simple; Nebulizaciones; Pulverización orofaríngea, Aerosol sónico o Electroaerosoles. Otras Técnicas, que serían: las insuflaciones tubo-timpánicas, el método de desplazamiento de PROËTZ o las inyecciones subepidérmicas de gas termal (Meijide, 2006)

Técnicas complementarias

Son técnicas de tratamiento que se utilizan en los balnearios pero que no emplean ninguno de los agentes termales y habitualmente están relacionadas con la medicina física. Las más frecuentes son: diversas modalidades de masaje manual, electroterapia, presoterapia vascular, parafina y parafangos, cinesiterapia, actividad física, psicoterapia.

ACCIONES FISIOLÓGICAS Y TERAPÉUTICAS DE LAS AGUAS MINERALES Y MINERO-MEDICINALES

El tratamiento termal va a ejercer sus efectos sobre el organismo a través de varios mecanismos de acción: Acciones específicas derivadas de la mineralización del agua y de la vía de administración; y acciones generales e inespecíficas debidas a los estímulos físicos al que sometemos a la persona dando lugar a una serie de respuestas neuro-hormonales e inmunológicas que van a ser comunes a toda terapia termal (Maraver, 2013; Maraver y Armijo, 2010).

Acciones específicas derivadas de la mineralización del agua

Las aguas mineromedicinales, dependiendo de su composición química, tanto predominante como de sus componentes minoritarios, van a ejercer efectos específicos sobre el organismo (tabla 4). El hombre y los minerales son sistemas químicos que comparten una posición común, que comprende elementos químicos mayores, menores y traza, tales como oxígeno, hidrógeno, carbono, azufre, fósforo, calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro, silicio, zinc, selenio, cobre, manganeso y flúor, todos esenciales para la vida. Aunque no están totalmente aclarados, los principales efectos de los distintos tipos de aguas dependiendo de sus componentes mayoritarios y de la vía de administración son:

Las aguas sulfatadas son aguas en las predomina el azufre en forma oxidada, que es poco asimilable biológicamente. En este caso, son los cationes en equilibrio con los sulfatos los que juegan un papel determinante en las acciones biológicas: el calcio, el sodio y sobretodo el magnesio intervienen tanto en la función renal como en la del tubo digestivo y sus glándulas anejas fundamentalmente hígado y vías biliares. Las aguas magnésicas producen estímulo de la motilidad y tránsito digestivos estando indicadas como laxantes en el estreñimiento crónico. Un ejemplo de agua sulfatada magnésica, de venta en las farmacias, es el agua de Carabaña. La ingestión de aguas sulfatadas-bicarbonatadas aumenta el flujo biliar por contracción de la vesícula biliar estando indicadas en discinesia biliar y en el síndrome post-colecistectomía. Algunos de los balnearios con aguas sulfatadas son: Montanejos (Castellón), Alhama de Murcia, Cofrentes (Valencia), Cestona (Guipúzcoa), Vallfogona (Tarragona).

Las aguas sulfuradas se caracterizan por la presencia de azufre en estado reducido y parcialmente almacenado en estado gaseoso que provoca el olor característico a huevos

podridos. La presencia de hidrógeno sulfurado permite que estas aguas sean las de mayor interés terapéutico ya que participan en múltiples procesos de óxido-reducción a nivel metabólico. Son utilizadas por sus propiedades antibacterianas, tróficas y mucorreguladoras a nivel de las mucosas respiratorias en enfermedades inflamatorias otorrinolaringológicas y de vías respiratorias; por sus efectos anti-inflamatorios, anti-seborreicos e inmuno-reguladores sobre la piel en dermatosis; por su posible efecto sobre el cartílago en los procesos reumáticos; por su efecto antioxidante metabólico como anti-envejecimiento. La ingestión de estas aguas, cuando el bicarbonato acompaña al sulfuro está indicada en la diabetes mejorando la tolerancia a la glucosa y neutralizando la acidosis metabólica en la diabetes descompensada. Además del bicarbonato, en las aguas sulfuradas pueden estar presentes otros elementos que modularán los efectos del hidrógeno sulfurado, y este será el motivo por el cual no todos los balnearios con aguas sulfuradas tienen las mismas indicaciones terapéuticas. En España hay muchos balnearios con aguas sulfuradas, siendo especialmente abundantes en Galicia y Pirineos. Ejemplos de balnearios con aguas sulfuradas sódicas son Lugo, Guitiriz (Lugo), Cuntis (Pontevedra), Carballo (Coruña), Carballino (Ourense), Caldas de Reyes (Pontevedra), Montemayor (Cáceres), Ledesma (Salamanca), Boí (Lérida), Carratraca (Málaga), Liérganes (Cantabria), Archena (Murcia), Paracuellos (Zaragoza), Alceda (Cantabria), etc.

Las aguas cloruradas sódicas indican claramente su origen marino original, o su circulación por capas de sal gema, residuos de mares desecados hace miles o millones de años. Sus efectos cuando se aplica por vía externa son similares a los del agua de mar y su utilización en talasoterapia. Se suelen emplear generalmente en aplicaciones externas como estimulantes de las funciones orgánicas y metabólicas en la rehabilitación de procesos reumatológicos, traumatológicos y ortopédicos y en afecciones del sistema nervioso. En los balnearios de aguas cloruradas se utilizan también las denominadas aguas madre por su efecto remineralizador. Las aguas con cloruro sódico cuando son ingeridas, generalmente diluidas, estimulan la peristalsis intestinal y la secreción de agua y electrolitos. También tienen un efecto sobre la vesícula biliar incrementando su secreción. Balnearios españoles con aguas cloruradas son: La Toja (Pontevedra), Arnedillo (La Rioja), Caldas de Besaya (Santander), Fitero (Navarra), Caldas de Montbui (Barcelona), Arteixo (Coruña), Fortuna (Murcia).

Las aguas bicarbonatadas presentan gran diversidad y con frecuencia asocian la presencia de anhídrido carbónico libre en cantidades variables que le confiere ciertas propiedades terapéuticas que justifican una categoría particular. Gran parte de las aguas embotelladas para consumo alimentario son bicarbonatadas. Son aguas que estimulan la digestión ya que neutralizan la secreción ácida, aceleran el vaciamiento gástrico, favorecen la actividad pancreática estando indicadas en el reflujo gastroesofágico y en la dispepsia. La ingestión de aguas bicarbonatadas durante la actividad física restaura líquidos y sales, facilita el aclaramiento del nitrógeno y mejora la acidosis metabólica típica del esfuerzo post-deporte. El gas carbónico además de sus efectos sobre el aparato digestivo, cuando se aplica externamente es un potente vasodilatador arterial distal aumentando la circulación local y utilizándose junto con la rehabilitación en vasculopatías periféricas. Son aguas bicarbonatadas sódicas: Cabreiroá (Orense), Caldas de Malavella (Gerona), Mondariz (Pontevedra), Fargas (Canarias); bicarbonatadas cálcicas: Alhama de Aragón (Zaragoza) Lanjarón-Capuchina (Granada), Marmolejo (Jaén), etc.

Las aguas débilmente mineralizadas se caracterizan por su bajo contenido en minerales y por la presencia de una gran variedad de oligoelementos. Tienen un efecto diurético produciendo una acción mecánica de lavado y arrastre de sedimentos dificultando el depósito de cálculos en vías urinarias y facilitando su eliminación. Son aguas débilmente mineralizadas: Solares (Cantabria), Solán de Cabras (Cuenca), Corconte (Burgos), Jaraba (Zaragoza), Alzola (Guipúzcoa), Lanjarón-salud (Granada), etc.

Las aguas ferruginosas contienen ion ferroso que activa la eritropoyesis y las enzimas oxidantes siendo utilizadas en anemia ferropénica y en hipertiroidismo. Son aguas ferruginosas: Incio (Lugo), Graena (Granada), Fuencaliente (Ciudad Real), Lanjarón (Granada).

Las aguas radiactivas se caracterizan por la presencia de gas radón que produce efecto sedante, analgésico y regulador del sistema neurovegetativo. En España son aguas radiactivas: Alange (Badajoz), Almeida (Zamora), Caldas de Oviedo, Molgas (Orense).

ACCIONES DE LAS AGUAS MINERALES DERIVADAS DE LA MINERALIZACIÓN	
Cloruradas	<p><i>Por vía tópica:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Estimulantes de las funciones orgánicas y metabólicas - Potenciadora del trofismo celular y de los procesos de cicatrización y reparación tisular - Favorecen la circulación sanguínea y linfática
Sulfatadas	<p><i>Por vía oral:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Purgantes o laxantes - Coleréticas - Colagogas y estimulantes do peristaltismo intestinal
Bicarbonatadas	<p><i>Por vía oral:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Antiácidas - Aumentan la actividad pancreática - Favorecen el poder saponificador de la grasa por la bilis - Hepatoprotectoras - Favorecen la glicogénesis - Favorecen la movilización y eliminación de ácido úrico en la orina
Carbogaseosas	<p><i>Por vía oral: (más de 1000 mg/L)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Facilitan la digestión; enmascaran los sabores - Estimulan la secreción y motilidad gástrica - Facilitan la función intestinal <p><i>Por vía tópica (más de 400 mg/L)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Acción vasodilatadora periférica - Diminuyen el umbral térmico
Sulfuradas	<ul style="list-style-type: none"> - Activan los procesos óxido-reductores metabólicos - Efectos antitóxicos, antialérgicos y mejoradores del trofismo - Acción reguladora de las secreciones respiratorias - Efectos inmunológicos en la piel
Ferruginosas	<p><i>Por vía oral:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Activan la hematopoyesis y las funciones oxidativas celulares - Mejoran el trofismo tisular
Radioactivas	<ul style="list-style-type: none"> - Sedativas y analgésicas - Antiespasmódicas y decontracturantes - Reguladoras del sistema nervioso vegetativo
Con mineralización inferior a 500 mg/L	<ul style="list-style-type: none"> - Efectos diuréticos - Acción mecánica de lavado y arrastre que dificulta todo tipo de calculos

TABLA 4. Acciones de las aguas minerales derivadas de la mineralización.

Acciones específicas derivadas de la vía de administración. Aplicación externa (Meijide, 1998)

Acciones mecánicas

La aplicación externa del agua ya sea mineromedicinal, de mar o potable ordinaria se utiliza en terapéutica por:

- los efectos físicos mecánicos producidos por la flotación y presión hidrostática
- los efectos mecánicos de la proyección de agua a presión sobre la superficie corporal
- los efectos físicos térmicos derivados de la aplicación de calor superficial o frío sobre el organismo
- los efectos químicos derivados de la absorción de componentes del agua a través de la piel

Un cuerpo, cuando se sumerge en el medio acuático, experimenta la acción de nuevas leyes físicas que van a modificar su comportamiento. Al eliminar la gravedad, el movimiento se ve facilitado en el agua. Pero, al mismo tiempo, el agua ofrece resistencia al movimiento en su seno (42 veces mayor que el aire) en una proporción directamente proporcional a varios factores denominados hidrodinámicos: viscosidad y densidad del agua, superficie del cuerpo y velocidad de desplazamiento. La flotación y presión hidrostática derivadas de la inmersión en el agua van a ser utilizadas:

- como asistencia al ejercicio
- como un medio de resistencia para mejorar la fuerza muscular
- para reducir el estrés sobre las articulaciones proporcionando apoyo o asistencia.
- Para recuperar el apoyo y la marcha progresivamente
- Para mejorar la estabilidad postural
- Para provocar estímulos propio e exteroceptivos mejorando la percepción de la posición de los miembros.
- Para mejorar el equilibrio y la marcha
- Para mejorar el estado psicológico y emocional
- Para facilitar la circulación de retorno
- Para producir relajación muscular

Acciones térmicas

Desde el punto de vista térmico el agua posee un calor específico muy elevado, mil veces mayor que el aire, y una conductividad térmica elevada, 25 veces mayor que el aire, que hace que sea un excelente método termoterápico, tanto para aportar como para restar calor al organismo. Una de las mayores ventajas que aporta la hidroterapia es, sin duda alguna, la posibilidad de combinar los efectos del calor o frío con el ejercicio en desgravación. Con mucha frecuencia se utilizan técnicas que combinan calor y frío, llamadas de contraste, por su marcada acción de estímulo vascular. En patología reumática es una de las técnicas de tratamiento más indicadas.

La temperatura del agua cuando se utiliza como agente termoterápico, suele oscilar entre 36,5 y 40,5 °C. Los principales efectos térmicos de la hidroterapia caliente se pueden resumir en los siguientes:

- Analgesia
- Aumento del flujo sanguíneo superficial
- Aumento del metabolismo celular
- Efecto antiinflamatorio
- Efecto antiespasmódico y relajante muscular
- Efecto sedante
- Aumento de la elasticidad y disminución de la viscosidad del tejido conjuntivo.

Acciones inmunológicas

Los efectos de las aguas mineromedicinales y productos termales actúan sobre los mediadores de la respuesta inmune y la inflamación (Fioravanti *et al.*, 2011)

- Reducción de los niveles de citocinas inflamatorias en pacientes con artrosis

- Reducción de los niveles de productos de oxidación celular

INDICACIONES TERAPEUTICAS DE LA TERAPIA TERMAL

Los balnearios suelen estar especializados en dos o a lo sumo tres especialidades terapéuticas. Las principales indicaciones de la terapia termal ordenadas por especialidades son (Syndicat, 2004):

Reumatología: Supone alrededor del 65% del total: las artrosis (vertebrales, cadera, rodilla, mano, etc.), las tendinopatías crónicas, la fibromialgia, las secuelas de traumatismos, los reumatismos inflamatorios crónicos (artritis reumatoide, espóndilo-artropatías no tratadas con inmunosupresores y a distancia de un brote evolutivo), la terapia termal está particularmente indicada en todos aquellos casos en los que una intolerancia digestiva o cutánea limite el uso de los fármacos habituales.

Patología Bronquial y ORL: Patología O.R.L infecciosa: las rinofaringitis recidivantes, las rinitis y las rino-sinusitis crónicas, las otitis agudas recidivantes y las otitis seromucosas, la amigdalitis crónica y las anginas recidivantes en caso de que la amigdalectomía esté contraindicada, las laringitis subglóticas, si hay recidivas frecuentes o si existe patología rinosinusal asociada; Patología O.R.L alérgica: la rinitis alérgica y las rino-sinusitis alérgicas, la conjuntivitis alérgica crónica, la tos espasmódica asociada o no a reflujo gastro-esofágico, o inducida por la exposición al aire frío o al esfuerzo; Patología bronquial: el asma del adulto, del adolescente o de la infancia ya sea extrínseca o intrínseca, las bronquitis disneicas o espásticas de la infancia, las bronquitis de repetición, la bronquitis crónica sin lesión anatómica o las debidas a una dilatación de los bronquios secundaria al tabaquismo activo o pasivo, la dilatación de los bronquios no secundaria a una enfermedad difusa o subsidiaria de tratamiento quirúrgico .

Enfermedades del Aparato Digestivo y Metabólicas: Digestivas: alteraciones funcionales intestinales definidas según los criterios de Roma, enfermedad diverticular; Metabólicas: sobrepeso y obesidad, alteraciones del metabolismo lipídico, diabetes.

Flebología y Enfermedades Cardio-Arteriales: insuficiencia venosa con edema crónico y trastornos tróficos venosos varices y complicaciones de las varices perforantes; secuelas de flebitis profunda y superficial; dermatitis, hipodermatitis, úlceras; insuficiencia linfática;; afecciones arteriales (sobre todo la arteriopatía ocliterante de miembros inferiores) y los acro-síndromes vasculares y los fenómenos de Raynaud.

Enfermedades Aparato Urinario: litiasis urinarias, destacando las principales variedades químicas: oxalato-cálcicas, fosfato-cálcicas y ácido úrico; infecciones urinarias, recidivantes o crónicas, de vías urinarias altas, renales, vías urinarias bajas.

Dermatología: eczemas, psoriasis, otras indicaciones (ictiosis; algunos liquen planos, algunas cicatrices de acné, cicatrices de quemaduras.

Neurología: secuelas motrices de afecciones neurológicas no evolutivas, sobretodo hemiplejías consecuencia de un accidente vascular cerebral; secuelas de traumatismos cráneo-encefálicos; secuelas de la poliomiélitis anterior aguda; secuelas de debilidad motriz de origen cerebral; trastornos de motricidad y problemas neuro-ortopédicos observados en sujetos que presentan afecciones neurológicas o neuromusculares crónicas en fase estacionaria: enfermedad de Parkinson, esclerosis en placas, encefalopatías crónicas y distrofias musculares.

Afecciones Psicosomáticas: trastornos de ansiedad; trastornos del sueño; trastornos de la adaptación; trastornos secundarios a estados de estrés prolongados; trastornos depresivos reaccionales; deshabitación frente a la dependencia o el abuso de sustancias psicotrópicas.

Ginecología: las afecciones inflamatorias crónicas del aparato ginecológico; los trastornos de la menopausia entre otros la sequedad de las mucosas, la osteoporosis que puede beneficiarse de las prácticas termales.

Pediatría: enuresis a partir de 5 años, primaria idiopática, poliuria nocturna, primaria o secundaria de origen psicógeno; retraso de consolidación ósea después de una fractura; tras intervención ortopédica; deficiencia física del niño, congénita o a la marcha.

Afecciones Mucosas Buco-Linguales y Parodontopatías: las parodontopatías constituyen la indicación principal; otras indicaciones (líquenes planos bucales, leucoqueratosis, estomatitis, glositis, glosodíneas, aftosis, aftas gigantes y recidivantes).

Nuevas indicaciones y orientaciones: Los avances de la Farmacología y de la Cirugía han ido desplazando algunas de las indicaciones clásicas de la crenoterapia. Por el contrario, se incorporan otros procesos susceptibles del tratamiento termal. Así, al lado de estas aplicaciones clásicas de la balneoterapia, debemos de tener en cuenta cuatro indicaciones que han de constituir una parte muy considerable de la clientela balnearia del futuro: Aplicaciones en el deporte; Envejecimiento y mayores; Enfermedades crónicas como el cáncer; Prevención de patologías ligadas al estilo de vida.

La terapia termal representa un modelo particular de la terapéutica del futuro porque, además de curar y mejorar desarrolla un importante papel en la prevención y en la rehabilitación; porque intenta cumplir la máxima de la OMS de conducir a la persona al estado de mejor bienestar físico, mental, social y laboral; porque supone el restablecimiento de un equilibrio perdido o alterado; y también porque su acción es retardada pero estable.

SITUACION ACTUAL

Desde hace algunos años, en todo el mundo, estamos asistiendo a un auge de la demanda de tratamientos preventivos y terapéuticos en balnearios y en centros termales. En todos los países, no sólo los europeos con gran tradición termal, existe un crecimiento del número de balnearios y un aumento de la oferta y demanda de tratamientos en centros termales. Paralelamente a su empleo terapéutico en balnearios, se ha desarrollado una cultura del agua que promueve su uso como fuente de bienestar potenciándose los programas de descanso dentro de los propios balnearios y también en los centros de talasoterapia y centros spa.

Esta mayor demanda es debida a varios factores. Por una parte, el envejecimiento de la población, con una mayor prevalencia de enfermedades crónicas, patologías que muchas de ellas encuentran alivio en los balnearios. Otro factor es la mayor concienciación de la población sobre la necesidad de adoptar estilos de vida saludables como métodos para la prevención de la enfermedad y promoción de la salud formando parte los tratamientos en los balnearios de las políticas de salud de los países europeos, en los sectores de prevención, rehabilitación y salud pública. Además, la sociedad actual, urbana fundamentalmente, y necesitada de romper temporalmente con su rutina estresante, busca, y encuentra habitualmente en los balnearios, mejorar su bienestar físico y mental. Pero existen más causas, y una de ellas es el valor creciente que la sociedad actual otorga a la apariencia física y a la belleza, y buscan en los balnearios tratamientos de belleza y relax, muchos de ellos basados en sus recursos naturales. Existe además

un aumento de la conciencia del valor de lo natural que lleva a una mayor demanda de viajes a lugares preservados naturalmente, en muchos casos con arquitectura singular que ofrecen productos naturales. La mayor facilidad para viajar y las nuevas tecnologías son también factores que influyen. Estos motivos han hecho que, no sólo en España, la principal actividad de un Centro Termal no sea solamente la terapéutica. La realidad es que de manera preponderante los balnearios y centros termales estén orientados a una triple vertiente: sanitaria, socio-sanitaria y de turismo de salud. Atendiendo así a todos los segmentos del mercado .

INVESTIGACIÓN EN HIDROLOGÍA MÉDICA EN ESPAÑA

La Hidrología médica en España no ha seguido la misma evolución que en el resto de Europa. Al no haber sido incluidos los tratamientos termales en la sanidad pública, pocos balnearios permanecieron abiertos. Y la llama de la hidrología médica se ha mantenido en España gracias a la Cátedra de Hidrología Médica de la Universidad Complutense de Madrid. La Medicina Termal se ha desarrollado en España, en la última década, gracias a las ayudas institucionales, sobre todo del Programa de Termalismo Social del IMSERSO que ha duplicado la asistencia a los balnearios, debido a los programas socio-sanitarios. Sin embargo, la investigación en termalismo no ha seguido el mismo desarrollo, pues a diferencia de otros países de nuestro entorno como Francia e Italia en que la Administración ha estimulado la creación de instituciones como la AFRETH o la FoRST que garantizan investigación termal de calidad, aquí no se ha abordado aún.

No obstante, en la actualidad la investigación sobre “Balneoterapia” y “Peloterapia” en España se desarrolla fundamentalmente en la Universidad Complutense de Madrid, en la Escuela Profesional de Hidrología Médica así como en otras Universidades como son: Autónoma de Madrid (Departamento de Geología y Geoquímica), A Coruña (Departamento de Medicina), Extremadura (Departamento de Terapéutica Médico-Quirúrgica), Granada (Departamentos de “Edafología y Química Agrícola” y “Farmacia y Farmacia Tecnológica”), Sevilla (Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola), Vigo (Departamento de Física Aplicada) y Zaragoza (Departamento de Medicina, Psiquiatría y Dermatología); y en la Fundación Bilibis. Sobre “Hidroterapia y Terapia Acuática” en las Universidades: Católica San Antonio de Murcia (Departamento de Ciencias de la Salud), Extremadura (Departamento de Terapéutica Médico-Quirúrgica), Granada (Departamento de Fisioterapia) y Málaga (Departamento de Psiquiatría y Fisioterapia); y sobre “aguas minerales naturales”, en la Universidades Complutense de Madrid, A Coruña y en la Rovira Virgili (Departamento de Bioquímica y Biotecnología); así como, el Instituto del Frío del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de Madrid y el laboratorio Oliver-Rodés de Barcelona.

CONCLUSIONES

La hidrología médica, cada vez más basada en la evidencia científica, tiene su espacio dentro del arsenal terapéutico como tratamiento coadyuvante. Las aguas minero-medicinales y productos termales, con una gran tradición de uso terapéutico en Europa tienen unas indicaciones y contraindicaciones precisas. La terapia termal representa un modelo particular de la terapéutica del futuro porque, además de curar y mejorar desarrolla un importante papel en la prevención y en la rehabilitación; porque intenta cumplir la máxima de la OMS de conducir a la persona al estado de mejor bienestar físico, mental, social y laboral; porque supone el restablecimiento de un equilibrio perdido o alterado.

REFERENCIAS

- Armijo M.; San Martín J. (1994). *Curas Balnearias y Climáticas, Talasoterapia y Helioterapia*. Madrid: Ed. Complutense, Madrid,
- Bobet J. (1999) Il était une fois... la thalassothérapie. Biarritz: Atlantica,
- Bruce BE, Cole AJ. (2011). *Comprehensive Aquatic Therapy*. Washington: Washington State University Press.
- Fioravanti A., Cantarini L., Guidelli G.M., Galeazzi M. (2011). Mechanisms of action of spa therapies in rheumatic diseases: what scientific evidence is there?. *Rheumatol Int.* 31 (1): 1-8
- González Soutelo S. (2011). *El valor del agua en el mundo antiguo: Sistemas hidráulicos y aguas mineromedicinales en el contexto de la Galicia romana (Galicia histórica)*. Editorial: Fundación Barrié. A Coruña.
- Gomes C., Carretero MI, Pozo M, Maraver F, Cantista P, Armijo F, Legido JL, Teixeira F, Rautureau M, Delgado R. (2013). Peloids and Pelotherapy: Historical Evolution, Classification and Glossary. *Appl Clay Sci.*: 28-38.
- Gutenbrunner C., Bender T., Cantista P., Karagülle Z. (2010). A proposal for a worldwide definition of health resort medicine, balneology, medical hydrology and climatology. *Int J Biometeorol.*;54(5):495-507.
- Ley 5/1995, de 7 de junio, de regulación de las aguas minerales, termales, de manantial y de los establecimientos balnearios de la Comunidad Autónoma de Galicia.
- Maraver F. (2003). Importancia terapéutica de las aguas mineromedicinales. En: Maraver F. (dir.). *Vademécum de Aguas Mineromedicinales Españolas*. Madrid: ISCIII: 13-22.
- Maraver F., Armijo F. (2010). *Vademecum II de aguas mineromedicinales españolas*. Madrid: Complutense,
- Meijide R., Rodríguez-Villamil J.L., Teijeiro J. (1998). Técnicas hidroterápicas. En: Martínez M, Pastor JM, Sendra F. (edit.). *Manual de Medicina Física*. Madrid: Harcourt Brace de España.
- Meijide R. (2006). Afecciones broncopulmonares y ORL. En: Hernández-Torres A. (coord.). *Técnicas y Tecnologías en Hidrología Médica e Hidroterapia*. Madrid: Ministerio de Sanidad y Consumo ISCIII.
- Programa de la especialidad médica de Hidrología. (1996). Consejo Nacional de Especialidades Médicas. *Ministerio de Sanidad y Consumo, Ministerio de Educación y Cultura*.
- Real Decreto 1277/2003, de 10 de octubre, por el que se establecen las bases generales sobre autorización de centros, servicios y establecimientos sanitarios. BOE. 2003; 254: 37893-3702.
- Real Decreto 1798/2010, de 30 de diciembre, por el que se regula la explotación y comercialización de aguas minerales naturales y aguas de manantial envasadas para consumo humano
- San Martín J. (2006). Conceptos generales. Terminología. Curas balnearias como agentes terapéuticos. Bases biológicas. En: Hernández-Torres A. (coord.). *Técnicas y Tecnologías en Hidrología Médica e Hidroterapia*. Madrid: ISCIII: 27-32.
- Syndicat National des Médecins de Stations Thermales, Marines et Climatiques de France. 2004. *Le guide des bonnes pratiques thermales*. Press Thermal Clim.; 141:101-143
- van Tubergen A, van der Linden S. (2002). A brief history of spa therapy. *Ann Rheum Dis.* Mar; 61(3):273-5.

GEOLOGÍA MÉDICA EN IBERIA

Geologia Médica: Um tópico multidisciplinar em crescente desenvolvimento

C. Patinha^{1,2}

1 Secretária da International Medical Geology Association, IMGGA

2 GEOBIOTEC, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal, cpatinha@ua.pt

Resumo: Neste trabalho pretende-se fazer uma breve abordagem sobre os conceitos inerentes à Geologia Médica, assim como acerca do estabelecimento e evolução desta como uma ciência em crescente desenvolvimento. O foco principal desta ciência é compreender, por um lado, os impactos "negativos" dos materiais geológicos, agentes ou processos e, por outro lado, os benefícios do uso dos materiais geológicos na saúde humana e animal. A importância da Geologia Médica é atualmente reconhecida, na qual a Associação Internacional de Geologia Médica (IMGGA), fundada em 2006, tem tido um papel crucial na disseminação científica desta ciência. Esta associação tem atualmente cerca de 200 membros de 46 países, dos quais 20 dos países têm representação (capítulos) da associação, sendo estes números bastante expressivos para uma associação tão recente. O crescente interesse nesta temática e o papel ativo da IMGGA são bons indicadores para o futuro da Geologia Médica como uma ciência fundamental, a qual possa contribuir para o desenvolvimento e bem-estar das populações.

Palavras-chave: Geologia Médica, Associação Internacional de Geologia Médica (IMGGA), Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs), saúde humana

Abstract: *In this paper a brief approach is given regarding the concepts, and the establishment and evolution of Medical Geology as a science. The focus of this science was devoted to understand the "negative" impacts and consequences of geological materials, agents or processes, and also the benefits of geological materials uses in human and animal health. Therefore, the importance of Medical Geology is currently recognized, for which the International Medical Geology Association (IMGGA), founded in 2006, has been having a crucial role in this scientific subject dissemination. This association accounts nowadays with about 200 members from 46 countries, in which 20 have chapters. These numbers are very expressive for a quite recent association. The increasing interest on this subject and the very active paper of IMGGA are good indicators for the future consideration of Medical Geology as a fundamental science that can contribute to the development and well-being of the populations.*

Key words: *Medical Geology, International Medical Geology Association (IMGGA), Potential Toxic Elements (PTEs), Human health*

GEOLOGIA MÉDICA: CONCEITOS E DESAFIOS

Desde há muito que a relação entre o ambiente natural e a saúde humana é reconhecida. Já no século V a.C., Hipócrates referiu que "se quisermos saber acerca da saúde de uma população, devemos atender ao ar que eles respiram, à água que eles bebem e aos lugares onde eles vivem".

A geologia médica é a ciência que trata das relações complexas entre fatores geológicos naturais e/ou processos geológicos e seus impactos na saúde dos seres humanos e animais (Finkelman *et al.*, 2001, Selinus, 2002, Centeno *et al.*, 2007). Embora muitas definições refiram apenas as características geológicas como causa direta dos efeitos na saúde humana, na verdade, muitos desses impactos resultam da ação humana nos diferentes compartimentos ou processos de natureza geogénica. Por esta razão, o impacto de fontes antropogénicas no ambiente tem que ser considerado nos estudos de geologia médica (Boulos e Le Blond, 2016).

O aumento do interesse público na geologia médica neste tema decorre da expansão dos impactos na saúde associados às alterações ambientais (por exemplo, alterações climáticas), às regulamentações de exposição cada vez mais restritivas (por exemplo, níveis de contaminantes nos alimentos, águas e poeiras atmosféricas) e à crescente consciência social das relações entre exposição aos contaminantes e as consequências na saúde humana (Bundschuh *et al.*, 2017).

Por conseguinte, identificar e quantificar os riscos para a saúde humana a partir do ambiente geológico e compreender a influência desses fatores na distribuição geográfica dos problemas de saúde são desafios atuais da geologia médica. Bundschuh *et al.* (2017) refere que a investigação na área da geologia médica deve ser focada numa melhor compreensão dos riscos associados à exposição aos contaminantes geogénicos, com especial destaque para os Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs). Assim, a existência de uma base científica robusta ajudará no desenvolvimento de regulamentos e diretrizes adequadas para a desenvolvimento de soluções adaptativas, de modo a aumentar a prevenção, preparação e resposta aos impactos na saúde humana causados por esses agentes a partir de fontes geogénicas.

Duas abordagens fundamentais poderão ser consideradas para iniciar uma investigação em geologia médica: a identificação do problema de saúde, que pode ser expresso por uma doença concreta ou por padrões de saúde deficitários em pessoas ou populações; e o reconhecimento do problema ambiental, isto é, a presença de um elemento, mineral ou composto no ambiente que poderá afetar a saúde humana (Figura 1).

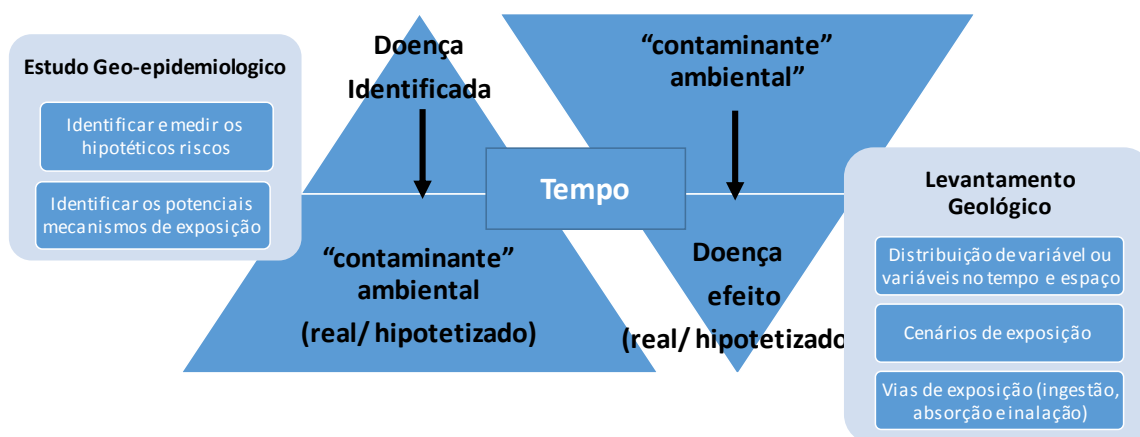


FIGURA 1. Representação esquemática de duas abordagens diferentes sobre a fase inicial de uma investigação em geologia médica (adaptada de Boulos e Le Blond, 2016).

No primeiro caso, a identificação de problemas de saúde súbitos numa população, com a suspeição de ser causada pela exposição a um perigo natural, pode instigar um estudo geo-epidemiológico. Deste modo, a aquisição de dados epidemiológicos é normalmente a resposta inicial, sendo seguida pela obtenção de informações geológicas para complementar este conjunto de dados, onde uma gama de variáveis pode ser medida para determinar o risco

hipotético. Além disso, devem ser considerados os potenciais mecanismos de exposição (por exemplo, o tipo de agente ambiental e a via de exposição) e as características intrínsecas de cada indivíduo (por exemplo, propensão genética, idade, peso, altura, hábitos) de modo a desenvolver uma relação resposta-dose para um determinado risco (Wardrop e El Blond, 2015). No segundo caso, há abordagem mais pró-ativa, em que são identificados os potenciais poluentes (por exemplo, os EPTs), sem esperar por uma manifestação de efeitos adversos à saúde (Bundschuh *et al.*, 2017). Assim, um levantamento geológico é o primeiro passo, onde uma perspectiva mais ampla deve ser adotada para identificar adequadamente as características da área de estudo, e em que o plano de amostragem deverá de ser suficientemente robusto de modo a refletir o objetivo principal da investigação. Além disso, um vasto número de possíveis cenários de exposição ambiental deve ser considerado em diferentes matrizes ambientais (por exemplo, ar, solo, alimento e água) e nas diversas vias exposição (ingestão, absorção e inalação). Contudo, e independentemente da abordagem adotada, a escala temporal é sempre uma questão fundamental nos estudos de saúde. Este aspeto é relevante quer no que se refere ao desenvolvimento do foco de contaminação no ambiente, quer à exposição dos indivíduos, quer ainda no desenvolvimento e manifestação da doença.

A geologia médica tem vindo dedicar-se intensivamente aos aspetos mais "negativos" que os agentes e/ou processos geológicos exercem sobre a saúde humana. De facto, muitos dos métodos de investigação, interpretação e decisões regulatórias atualmente empregados na geologia médica foram inicialmente desenvolvidos por especialistas em saúde ocupacional, que tinham como objetivo primordial reduzir a exposição dos funcionários a condições perigosas, em diferentes contextos e condições industriais (Boulos e Le Blond, 2016). Contudo, os benefícios do uso de determinados materiais geológicos na saúde humana, tais como lamas ou águas de origem geotérmica para tratamentos terapêuticos, tem vindo a receber especial atenção, no sentido de se perceber de que modo e quais os reais efeitos destes materiais na saúde, facto que já é consumado desde longa data.

Pelo exposto, pode-se considerar a geologia médica como uma ciência multidisciplinar e interdisciplinar emergente, à semelhança da medicina ambiental e da climatologia médica (Bunnell, 2004; Khandare, 2012). Por conseguinte, qualquer projeto nesta área só faz sentido se envolver uma multitude de disciplinas e especialistas no estudo das relações entre o ambiente complexo e a saúde. Uma equipa coletiva (medicina, epidemiologia, toxicologia, geociência e informática) é crucial, mas todos os intervenientes devem estar dispostos a falar uma língua que seja translacional a todas as ciências para incentivar uma compreensão integrada do problema. Todas estas disciplinas estão ligadas por uma componente espacial, mas enquanto a epidemiologia, a toxicologia, a informática e as geociências abordam os dados em termos de populações, a medicina tende a trabalhar com os próprios indivíduos ou com os mecanismos individuais que descrevem a doença (Boulos e Le Blond, 2016).

INTERNATIONAL MEDICAL GEOLOGY ASSOCIATION (IMGA)

O esboço daquilo que viria a ser a atual "International Medical Geology Association" (IMGA) teve início em 1996, quando a comissão COGEOENVIRONMENT da União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS) estabeleceu um Grupo de Trabalho Internacional sobre Geologia Médica (IWGMG), liderado por Olle Selinus dos Serviços Geológicos da Suécia (Skinner and Berger, 2000; Selinus, 2002; Bowman *et al.*, 2003). Mais tarde, no ano 2000, o mesmo grupo (IWGMG), presidido por Olle Selinus e seus coadjuvantes Peter Bobrowsky (Canadá) e Ed Derbyshire (Reino Unido), foi responsável pelo projeto "IGCP 454 Medical Geology", estabelecido pelo "International Geological Correlation Programme" (IGCP), onde ficou

ênfatisada a importância dos fatores geológicos que afetam a saúde humana e animal. Dois anos mais tarde, em março de 2002, a IUGS, reconhecendo as conquistas significativas do IWGMG, promoveu este grupo para a categoria de “Special Project Status” com Olle Selinus como diretor, e Robert Finkelman (US Geological Survey) e Jose Centeno (U.S. Armed Forces Institute of Pathology) como co-diretores.

Foi em agosto de 2004, durante o 32º Congresso Geológico Internacional (realizado em Florença, Itália) que uma proposta formal para estabelecer a Associação Internacional de Geologia Médica (IMGA) foi aprovada por 80 participantes do Congresso. Esta decisão foi ratificada pelos 250 membros da IWGMG em 2005 e, em janeiro de 2006, a IMGA (www.medicalgeology.org) foi finalmente lançada, constando já conselheiros e divisões regionais estabelecidas em todo o mundo.

Tem sido fortemente encorajada pela IMGA a formação de representações (capítulos) locais para promoção da geologia médica. Assim, em 2016, a IMGA era composta por cerca de 200 membros de 46 países (Figura 2), sendo que 20 países tinham já representações da IMGA (Figura 3).

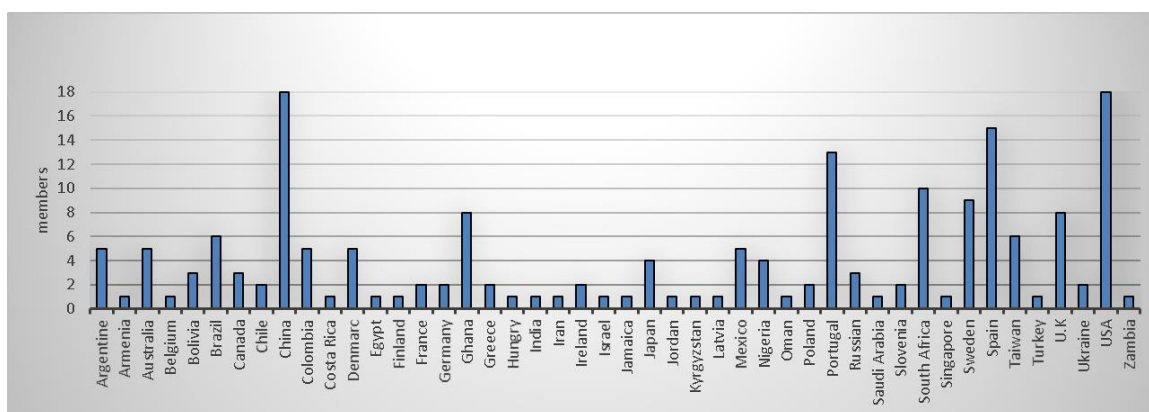


FIGURA 2. Número de membros da IMGA nos diferentes países (ano de 2016).



FIGURA 3. Países com representação da IMGA (ano de 2016).

Várias atividades têm sido desenvolvidas e apoiadas pela IMGA: (1) cursos de curta duração têm sido uma das atividades mais importantes na promoção da geologia médica e difusão de informações sobre este assunto entre os cientistas e profissionais de saúde pública. Estes cursos de curta duração foram até agora apresentados em 44 sessões um pouco por todo o mundo e têm sido frequentados por milhares de estudantes e profissionais (Figura 4); (2) vários *webinars* foram promovidos e participados pelos membros da IMGA nos últimos anos (2014 - “Health and Earth – Medical Geology. Building a Safer Environment”, por Jose Centeno; 2015 – “Estimating Human Exposure to Potentially Harmful Elements in Soils” por Mark R. Cave; 2015 - “Medical Geology - What we need to do for a healthy future”, por Robert Finkelman e Olle Selinus; and 2016 - “Determination of trace elements and their concentrations in clay balls: problem of geophagia in Ghana”, por Dr. Emmanuel Arhim); (3) a organização da “International Conference on Medical Geology” (MedGeo) em cada dois anos; (4) a (co-)organização de outras conferências internacionais em que a questão da geologia médica é abordada, sendo alguns dos exemplos a destacar as seguintes:

- O “1st Hemispheric Conference on Medical Geology” organizado em Puerto Rico
- O “international Symposium on Medical Geology “ em 2006, Universidade de Stockholm;
- O forum em “Medical Geology: impacts of natural environment on health”, 2007 no “Institute Geology Malaysia”, Kuala Lumpur, Malasia;
- O “2nd Hemispheric Conference on Medical Geology” em Atibaya, Brasil;
- O “3rd Hemispheric Conference on Medical Geology” em Montevideo, Uruguai;
- “27th European Conference and Workshops of the Society for Environmental Geochemistry and Health (SEGH): Environmental Quality and Human Health - harmony between man and earth”, Galway, Irlanda, 2010;
- “International Symposium on Medical Geology”, Geological Survey of Iran Tehran, Iran, 2010
- “1st International Symposium on Medical Geology” em “Autonomous University of Chihuahua”, Chihuahua, Mexico.
- “GEOMED2011-Geological and Medical Sciences for a Safer Environment” Bari, Italy, 2011
- Várias atividade relacionadas com a geologia médica durante o “45th Brazilian Geological Congress “ em Belém, Brasil, 2011.
- “9th International Symposium on Environmental Geochemistry” na Universidade de Aveiro, Portugal, 2012.
- IMGA foi co-organizador do “XXIX Congress of the International Academy of Pathology (IAP), e co-patrocinador do “Symposium on Environmental Pathology entitled “Pathology, Toxicology, and Public Health - Impacts of Environmental Disasters”, South Africa, 2012;
- “International Workshop and Regional Conference on Medical Geology Chihuahua”, Mexico, 2013;
- “1st Conference on Medical Geology in Republic of Ukraine”, Kiev, 2013;
- “First Interdisciplinary and Scientific Meeting on Environmental Toxicology and Medical Geology”, Universidad de la Republica, Montevideo, Uruguai, 2013;
- “5th International Conference on Medical Geology” (MEDGEO2013), em Arlington, VA, USA;
- “Second International Symposium on Medical Geology” em Rasht, Iran, 2014.
- “DUST 2014 – International Conference on Atmospheric Dust”, Castellaneta Marina (Taranto, Italy), 2014.
- “1st International Symposium in Medical Geology in Africa” (ISMGAf), University of Johannesburg, South Africa, 2014.

- “6th International Conference on Medical Geology – MedGeo’15”, Universidade de Aveiro, Portugal, 2015



FIGURA 4. Cursos de curta duração em Geologia Médica (2001 a 2015).

Paralelamente à organização de conferências e cursos, a geologia médica tem testemunhado um crescimento constante em bibliografia desta especialidade, muitos dos quais apoiados pela IMGA, sendo alguns dos exemplos de livros mais emblemáticos nesta temática os seguintes:

- **Medical Geography**. A Nordic outlook, 2014, Schaerström, A., Jörgensen, S.H., Kistemann, T., Sivertun, Å. Eds. NTNU Norway.
- **A History of Geology and Medicine**, 2013, edited by C.J. Duffin, R.T.J. Moody and C. Gardner-Thorpe, Geological Society of London Special publication 375.
- **Soils and Human Health**, 2013, edited by Eric C. Brevik and Lynn C. Burgess, Taylor and Francis, CRC Press.
- **Essentials of Medical Geology**, Revised Edition, 2013, edited by Olle Selinus, Brian Alloway, Jose A. Centeno, Robert B. Finkelman, Ron Fuge, Ulf Lindh, and Pauline Smedley. Springer.
- **Medical Geochemistry**, 2013, edited by Paolo Censi, Thomas Darrah, and Yigal Erel. Springer.
- **Elements of Geochemistry, Geochemical Exploration and Medical Geology**, 2013, K.R. Randive. Research Publishing. 448 p.
- **Environmental Geochemistry and Health: Report to the Royal Society's British National Committee for Problems of the Environment** (GeoJournal Library reprint of a 1985 report), 2013, S.H. Bowie (Editor), I. Thornton (Editor)
- **Medical Geology: A Regional Synthesis**, 2010, edited by Olle Selinus, Robert B. Finkelman, and Jose A. Centeno. Springer.
- **Introduction to Medical Geology**, 2009, C.B. Dissanayake and Rohana Chandrajith, Springer.

- **Earth Materials and Health**, 2007, National Research Council, National Academy of Science.
- **Medical Mineralogy and Geochemistry**, 2006, edited by Nita Sahai and Martin A. A. Schoonen, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Volume 64, Mineralogical Society of America.
- **Minerals and Human Health**, 2006, Celso Gomes and Joao Silva, in English and Portuguese.
- **Essentials of Medical Geology**, 2005, edited by Olle Selinus, Brian Alloway, Jose A. Centeno, Robert B. Finkelman, Ron Fuge, Ulf Lindh, and Pauline Smedley. Elsevier. Also Chinese edition by Science Press.
- **Medical Geology: Effects of Geologic Environments on Human Health**, 2004, Miomir M. Komatina, Elsevier.
- **Geology and Health: Closing the Gap**, 2003, edited by H. Cathrine Skinner and Anthony R. Berger, Oxford Press.
- **Healing Earths: The Third Leg of Medicine**, 2002, W. Rudolph Reinbacher.
- **Environmental Geochemistry and Health**, 1996, edited by J.D. Appleton, R. Fuge, and G.J.H. McCall, Geological Society of London Special Paper 113.
- **Health Effects of Mineral Dusts**, 1993, edited by George D. Guthrie, Jr., and Brooke T. Mossman, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Volume 28, Mineralogical Society of America.
- **Environmental Life Elements and Health**, 1990, edited by Tan Jianán, P.J. Peterson, Li Ribang and Wang Wuyi, Science Press.
- **Geomedicine**, 1990, Jul Lag, CDC Press.
- **Geochemistry and Health: Proceedings of the Second International Symposium**, 1988, J.N. Martin, CRC Press, 272 p.
- **Aging and the Geochemical Environment**, 1981, National Academy Press.
- **Geochemistry of Water in Relation to Cardiovascular Disease**, 1979, The National Research Council, National Academy of Sciences.
- **Trace Element Geochemistry in Health and Disease**, 1975, edited by Jacob Freedman, Geological Society of America Special Paper 155.
- **Geochemical Environment in Relation to Health and Disease**, 1970, edited by Helen L. Cannon and Howard C. Hopps, Geological Society of America Special Paper 140.

É pois de registrar o crescente interesse pela geologia médica, não só pelo número de livros, mas também pelo número de teses de doutoramento, nesta área. Por exemplo, em 2014, foi publicada a tese "Balneology and Medical Hydrogeology of Nigerian oil field" por K'tso Nghargbu. Também no mesmo ano, como parte do projeto GEOCENTER "Iodine in the hydrological cycle in Denmark: implication for human health", apoiada pela IMGA, Denitza D. Voutchkova defendeu a sua tese de doutoramento intitulada "Iodine in Danish ground and drinking water".

AGRADECIMENTOS

A autora agradece à Elena Gimenez-Forcada pelo convite para participar como palestrante convidada no 1º Seminário sobre Geologia Médica organizado pelo Capítulo de Espanha e agradece igualmente ao Comité Executivo da IMGA por todo o apoio dado.

REFERÊNCIAS

- Boulos, M. N. K. y Le Blond, J. (2016). On the road to personalised and precision geomedicine: medical geology and a renewed call for interdisciplinarity, *International Journal of Health Geographics*, 15:1-12.
- Bowman, C., Bobrowski, P. T, Selinus, O. (2003). *Medical Geology: New relevance in the Earth Sciences*. Episodes, 26 (4): 270-278.
- Bundschuh, J., PrakashMaity, J., Mushtaq, S., Vithanage, M., Seneweera, S., Schneider, J., Bhattacharya, P., Khan, N. I., Hamawand, I., Guilherme, L. R.G., Reardon-Smith, K., Parvez, F., Morales-Simfors, N., Ghaze, S., Pudmenzky, C., Kouadio, L., Chen, C.-Y. (2017). Medical geology in the framework of the sustainable development goals. *Science of the Total Environment*, 581–582: 87–104.
- Bunnell, J. (2004). Medical geology: emerging discipline on the ecosystem–human Health interface. *EcoHealth*, 1: 15–18.
- Centeno, J.A. (2005). Introduction, in *Essentials of Médical Geology: impacts of the natural environment on public health* (O. Selinus, B. Alloway, J. A. Centeno, R. B. Finkelman, R. Fuge, U. Lindh and P. Smedley, eds), Burlington, Elsevier Académie Press: 527-528.
- Finkelman, R. B., Centeno, J. A., Selinus, O. (2004). The Emerging Medical and Geological Association. *Transactions of the American Clinical and Climatological association*, 116: 155–165.
- Finkelman, R.B., Skinner, H.C.W., Plumlee, G.S., Bunnell, J.E. (2001). *Medical Geology*. *Geotimes* November, 20–23.
- Khandare, H.W. (2012). Medical geology: an emerging field of interdisciplinary research on geology and human health. *Int J Chem Tech Res*, 4: 1792–1796.
- Selinus, O. (2002). *Medical Geology. Method, theory and practice*. In: *Geoenvironmental Mapping* (Bobrowsky Ed.), Balkema Press: 473-496.
- Skinner, C, and Berger, A. (2000). *Geology and Public Health—Closing the Gap*, Oxford Press, 179 pp.
- Wardrop, N.A., Le Blond, J.S. (2015). Assessing correlations between geological hazards and health outcomes: addressing complexity in medical geology. *Environ. Int.* 84: 90–93.

Presentación del Capítulo Español de Geología Médica

E. Giménez-Forcada^{1,2}

1 Presidente capítulo español de la International Medical Geology Association, IMGA-España.

IMGA-Spain@hotmail.com

2 Dpto. Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, IGME. 37001 Salamanca.

e.gimenez@igme.es

En 2015 la Asociación Internacional de Geología Médica (International Medical Geology Association, IMGA) propuso crear el capítulo español. Gracias al apoyo de varios compañeros del Instituto Geológico y Minero de España, IGME, que se sumaron a la iniciativa se presentó nuestra candidatura en la Conferencia Internacional de Geología Médica 'MedGeo' que tuvo lugar ese mismo año en Aveiro, Portugal. Finalmente su creación fue aprobada y el capítulo español quedó instituido a finales de 2015 (Figuras 1 y 2).

MEDICAL GEOLOGY NEWSLETTER

INTERNATIONAL MEDICAL GEOLOGY ASSOCIATION



www.medicalgeology.org

Newsletter 3 November 2015

ISSN 1651-5250

IN THIS ISSUE

Chairman's message

A short note from the editor.

Book Review and book list

An update on the activities of the IMGA chapters

Upcoming conferences and events

Recent publications

CHAIRMAN'S MESSAGE

Dear friends and colleagues

It is a great pleasure to welcome you to our 26th edition of the International Medical Geology Association (IMGA) Newsletter.

IMGA was founded in 2006 and since then, one of the main objectives of the executive committee has been to inform members about Medical Geology education and research international opportunities and affairs as well as various activities worldwide through IMGA Newsletters. Besides, several IMGA e-news are being published along the year to let you know about the main news and advances in our association, as the last special e-news edition devoted to our traditional International Medical Geology Association MEDGEO 2015 Conference, held in Aveiro, Portugal.

We want to welcome new members and congratulate the establishment of new chapters as United Kingdom, Spain, Nigeria and Ireland-China concord and thank you all again for your great support and contributions on behalf of IMGA.

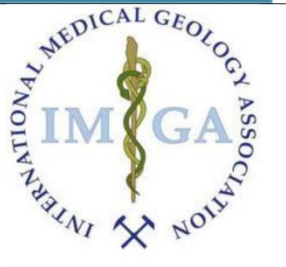
Now we are beginning our second period of this IMGA chairing and the EC councilors have changed by the nomination and elections process. The Secretary and Webmaster positions also changed hands this year and some of our advisory committees will need new volunteers, so we will be very glad if you join one of them.

Enjoy this IMGA Newsletter N°26 edition

Sincerely Yours

Prof Dr Nelly Mañay

Chairperson, International Medical Geology Association



"Punctuality is the thief of time."

Oscar Wilde (1854 - 1900)

FIGURA 1. Anuncio en el boletín informativo de Noviembre de 2015 de la creación del capítulo español de la IMGA, junto con los del Reino Unido, Nigeria e Irlanda-China.



FIGURA 2. Certificado de reconocimiento del capítulo español por el comité ejecutivo de la IMGA.

Introducir la Geología Médica en España por primera vez, darle un significado y un espacio de conocimiento propio ha sido y es nuestro primer reto y el principal interés y, aunque es muy corta nuestra historia, podemos hablar de un cierto recorrido.

El primer acto oficial organizado por nuestro grupo fue la celebración de la I Jornada de Geología Médica en España (JGM), con el título 'La Geología Médica, una disciplina emergente', en Salamanca, el 19 de septiembre de 2016.

Queremos manifestar nuestra más sincera gratitud a todos los asistentes a esta primera reunión científica sobre Geología Médica en nuestro país. También queremos agradecer especialmente el apoyo y acogida que brindó la Universidad de Salamanca y el Instituto Geológico y Minero de España, que ampararon la celebración de la reunión. Sin olvidar al Ayuntamiento de la ciudad y a la Excm. Diputación de Salamanca, que con su generosidad y respaldo hicieron posible su celebración. Y por supuesto a AQUALIA, del grupo Fomento Construcciones y Contratas, que nos brindó su ayuda y patrocinio. También queremos agradecer la ayuda recibida por el equipo de Congresual en todo lo concerniente a la organización del evento.

La JGM se inició con la conferencia inaugural, que impartió la Dra. Laura Börgel, de la Universidad de Chile, y la conferencia invitada, que corrió a cargo de la Dra. Rosa Meijide, de la Universidad de A Coruña. Posteriormente en el apartado dedicado a la Geología en Iberia disfrutamos de la intervención de la Dra. Carla Patinha, de la Universidad de Aveiro y Secretaria de la IMGA, así como de la conferencia que impartió el Dr. Eduardo Da Silva, de la misma Universidad y presidente del capítulo portugués de la IMGA. Poder contar con su presencia fue un honor para nuestro capítulo, por representar la acogida de la IMGA a nuestro recién formado grupo, IMGA-España, y por simbolizar a su vez el hermanamiento entre los capítulos portugués y español.

La segunda parte de la JGM se dedicó a la presentación de las investigaciones que se están llevando a cabo por miembros del grupo IMGAE-España. El Dr. Eduardo de Miguel, de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) inició esta segunda parte de la reunión exponiendo los resultados de la investigación que su grupo lleva a cabo sobre la influencia del medio urbano en la salud infantil. A continuación el Dr. Juan Antonio Luque, del Instituto Geológico y Minero de España, IGME nos puso al corriente de las ventajas del uso de herramientas geoestadísticas en los estudios de geología médica. La última parte de la reunión se centró en un área de investigación denominada HidroGeoToxicidad que estudia el origen y distribución de Elementos Traza Geogénicos Potencialmente Tóxicos (ETGPT) en el agua subterránea. Su presencia se relaciona con la calidad química natural del agua, reflejo del ambiente geológico por el que circula el agua subterránea. Las principales conclusiones del proyecto HiroGeoTox (2014-2017) se presentaron a continuación y se iniciaron con la introducción que hizo la Dra. Elena Giménez-Forcada (IGME), coordinadora del mismo. Seguidamente, la Dra. María del Carmen Rey (IGME), la Dra. Susana Timón (IGME), el Dr. Manuel García (UNED) y la Dra. Agustina Fernández (USAL) expusieron los principales resultados obtenidos en los estudios realizados en el sur de la Cuenca del Duero, en el marco de este proyecto financiado por el IGME.

La idea de participar activamente en la divulgación de la Geología Médica en nuestro país nace de considerar el medio geológico como un factor claramente condicionante de la salud ambiental de un área. A partir de esta afirmación podemos intentar establecer relaciones entre el medio natural y la salud de la población. Y esta relación se puede establecer tanto en zonas urbanas como rurales, aunque si hablamos de medio natural, de entorno geológico, este nexo es especialmente evidente en las zonas rurales y principalmente en las más pobres y desfavorecidas. De esta manera introducimos un aspecto no menor sobre la importancia de los estudios de Geología Médica: tienen una clara componente social que intenta, desde el conocimiento y a través del mismo, ayudar a vivir mejor, a que el individuo interactúe mejor con su entorno y, si éste es poco favorable, ayudarle a convivir con él del mejor modo posible.

Pero antes de llegar aquí es necesario comprender y conocer. Definir el medio geológico significa entenderlo en su globalidad y complejidad. Es decir, requiere una estrecha colaboración entre los diferentes campos del saber, áreas de conocimiento y especialidades. Y no es fácil. Tras la especialización que hemos vivido en las últimas décadas parece que el futuro nos pide que volvamos a unirnos para que desde esa especialidad ya encontrada nos pongamos al servicio de un conocimiento más general y seamos capaces de interactuar y colaborar entre nosotros para resolver problemas reales y atender la demanda de la sociedad. Y posiblemente sea éste uno de los retos más importantes: la colaboración interdisciplinar, que nace de la necesidad de comprender un todo, complejo y complicado si no se aborda con rigor desde todas las parcelas del conocimiento, intentando encontrar una respuesta global.

Los seis primeros integrantes del capítulo español de la IMGAE se han multiplicado en unos meses y actualmente ya somos más de 20 los que formamos parte de IMGAE-España. Confiamos en que este crecimiento siga su tendencia.

**PRESENTACIÓN DE ACTIVIDADES DEL GRUPO ESPAÑOL DE
GEOLOGÍA MÉDICA, IMGA-España**

Evaluación de la exposición a elementos traza de la población infantil en ambientes urbanos: el caso de la ciudad de Madrid

M. Izquierdo¹, F. Barrio-Parra¹, E. De Miguel¹

¹ Laboratorio de Investigación e Ingeniería Geoquímica Ambiental, Universidad Politécnica de Madrid. 28003 Madrid. miguel.izquierdo@upm.es; fernando.barrio@upm.es; eduardo.demiguel@upm.es

Resumen: Con el fin de caracterizar la exposición de fondo a elementos traza en poblaciones infantiles de áreas urbanas, se evaluó la contribución de (a) la ingesta de alimentos, (b) la ingesta, inhalación y absorción dérmica de partículas de suelo de parques infantiles y (c) la ingesta y absorción dérmica de partículas de polvo del interior de las viviendas. El contenido en Cr, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn fue determinado mediante espectroscopía de absorción atómica por cámara de grafito (GF-AAS) para cada tipo de matriz. Las tasas de ingesta fueron estimadas mediante la metodología estándar de la USEPA. Los resultados de la evaluación de riesgos muestran que la mayor contribución al riesgo total está asociado a la ruta de ingesta para los tres medios de exposición. En términos de riesgo no cancerígeno, el Mn resulta ser el mayor contribuyente en los parques infantiles, el Cu en el polvo del interior de las viviendas y el Zn en los alimentos infantiles. Entre las fuentes de incertidumbre asociadas a este estudio se encuentra la no inclusión de elementos tóxicos relevantes y la imprecisión en la caracterización de las variables de exposición de la población estudiada.

Palabras clave: Población infantil, Vías de exposición, Evaluación del riesgo para salud humana, Elementos traza, Ambiente Urbano.

Abstract: *In order to assess background exposure to trace elements of the infant population in urban areas, the contribution of three potentially contaminated media, i.e. infant food, playground soil and household indoor dust was evaluated. Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn concentrations were determined by graphite furnace atomic absorption spectroscopy (GF-AAS) for each type of matrix. Intake rates were estimated using the standard USEPA methodology. Results from the risk assessment showed that the greatest contribution to the overall risk was associated with the route of ingestion for the three scenarios. The results of this preliminary assessment also indicate that food intake may result in unacceptable levels of risk. In terms of non-carcinogenic risk, Mn was found to be the largest contributor in playgrounds, Cu in indoor dust and Zn in infant food. Several sources of uncertainty affect the outcome of this risk assessment, chiefly the absence of relevant toxic elements and the imprecise characterization of the population exposure variables.*

Key words: *Children, Exposure pathways, Human health risk assessment, Trace elements, Urban environment.*

INTRODUCCIÓN

Los niños que residen en zonas urbanas están expuestos a elementos traza a través de múltiples vías de exposición, entre las que se incluyen la alimentación, la inhalación de partículas, y la ingesta directa de suelo y/o polvo del interior de edificios (hogares y escuelas), parques y huertos urbanos (Barrio-Parra *et al.* 2017; De Miguel *et al.* 2012, 2017; Gómez-San Martín A., De Miguel E., Izquierdo M. n.d.; Izquierdo *et al.* 2016; Mingot *et al.* 2011). Los niños

son el subconjunto poblacional más vulnerable a los peligros ambientales (Kurt-Karakus 2012) debido a que su organismo se encuentra menos desarrollado (Ljung *et al.* 2006; USEPA 2008a) y a que presentan mayores tasas de ingesta relativas a su peso corporal (Hodel and Chang 2002; Mejía *et al.* 2011; Petruzzelli *et al.* 2010; USEPA 2008b).

El objetivo del presente estudio es la evaluación de riesgos por exposición de fondo a elementos traza para la población infantil de un área urbana, tomando como zona de estudio la ciudad de Madrid.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo una evaluación de riesgos para la población infantil (entre 6 meses y 2 años de edad) en ambientes urbanos, se tomaron muestras de alimentos infantiles (potitos de pescado, carne, frutas y verduras, y preparados de cereales y leche en polvo), de suelo de zonas de juego infantiles y jardines municipales, y de polvo del interior de viviendas.

Las muestras de alimentos liofilizados y de polvo recogidas mediante toallitas húmedas ("Ghost Wipes®") (USEPA 1995) fueron digeridas con HNO₃ y H₂O₂ (Barrio-Parra *et al.* 2017; Izquierdo *et al.* 2016), mientras que las muestras de suelo de parques fueron atacadas con agua regia (De Miguel *et al.* 2012). El contenido de Cr, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn fue determinado mediante espectroscopia de absorción atómica por cámara de grafito (GF-ASS).

Para realizar la caracterización del riesgo se consideraron dos tipos de escenarios: a) exposición promedio (parámetros de exposición representativos de la tendencia central de la población y concentraciones medias obtenidas) y b) conservador (considerando los límites superiores (percentiles 95) de los factores de exposición de la población razonablemente más expuesta, que para la ingesta de alimentos incluye únicamente a los que reportaron un consumo, y el límite superior del intervalo de confianza del 95%, en torno a la media como término de concentración).

Las tasas de ingesta (CDI) se calcularon siguiendo la metodología estándar de la USEPA. En el caso de la ingesta de polvo, se emplearon las ecuaciones del modelo de Wilson *et al.* (2015). Para evaluar los efectos no cancerígenos y cancerígenos se estimó el índice de peligro (HI, Eq. 1) y el nivel de riesgo de cáncer (Eq. 2) respectivamente. Para ello se consideraron las respectivas dosis de referencia (RfD) y el factor de pendiente oral (SF), asumiendo aditividad de efectos adversos para mezclas y múltiples vías. Se considera que los receptores están en peligro cuando HI > 1 o RISK > 10⁻⁵. Los valores de toxicidad fueron tomados de la base de datos RAIS (University of Tennessee 2013).

$$HI = \sum_i HQ_i \quad HQ_i = \frac{CDI_i}{RfD_i} \quad [1]$$

$$RISK = \sum_i RISK_i \quad RISK_i = CDI_i \times SF_i \quad [2]$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los elementos con una mayor concentración en los alimentos infantiles preparados analizados en este estudio fueron el Zn y Mn. En muchas ocasiones, para asegurar la dosis de ingesta diaria recomendada por los organismos internacionales de la salud, los fabricantes de este tipo

de alimentos enriquecen los potitos y las leches de continuación con diferentes oligoelementos. Por su parte, la procedencia de los elementos traza en el polvo (con mayores contenidos de Zn y Cu) se debe principalmente a dos factores: la introducción de partículas de suelo exterior adherido al calzado y ropa (se observaron mayores cargas en el vestíbulo de entrada), y la presencia de fumadores en la vivienda. Por el contrario, los niveles de elementos traza en parques infantiles están relacionados con la contaminación derivada del tráfico, de la quema de combustibles y de la industria, por lo que los elementos más comunes son los vinculados a estas actividades (i.e. Cr, Pb, Zn).

Comparando los resultados con los niveles máximos admisibles para la salud humana, los valores obtenidos en el polvo para los elementos que tienen un dato publicado se encuentran por debajo del máximo establecido. De igual forma, el contenido en los parques infantiles no superan los niveles genéricos de referencia para uso urbano, entre los que se incluyen las actividades recreativas. Sin embargo, para los alimentos si se considera el receptor más expuesto se excedería la ingesta diaria recomendada en prácticamente todos los casos, llegando a sobrepasar el Zn el nivel superior de ingesta tolerable. No obstante, para la población promedio, las dosis estarían próximas a las cantidades diarias recomendadas para cubrir las necesidades nutricionales de la mayoría de la población.

Los resultados de la evaluación de riesgos mostraron que la mayor proporción al riesgo total estaba asociada con la ruta de ingesta (alimentos, polvo y suelo) en los tres escenarios. En concreto, la ingesta de alimentos presentó la mayor contribución de los tres escenarios (Figura 1) y los valores obtenidos para algunos elementos superaron el umbral de seguridad para la salud humana.

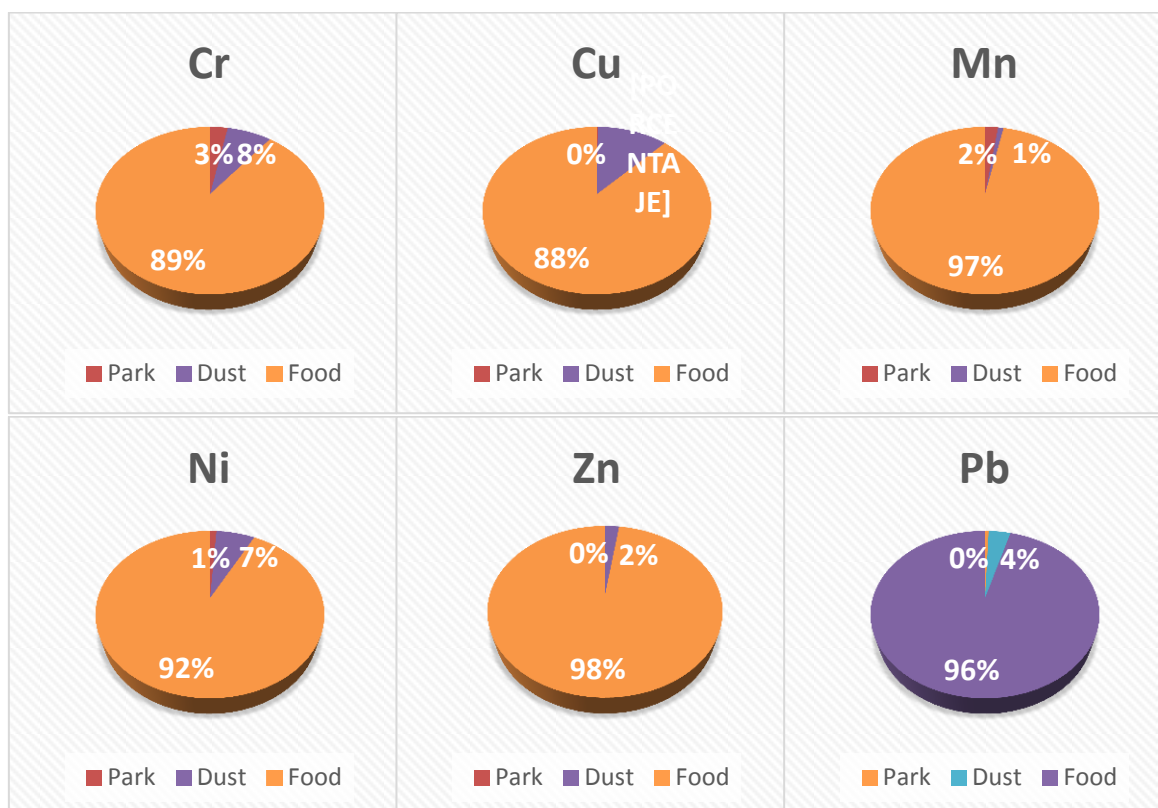


FIGURA 1. Resultados de la evaluación del riesgo por elemento y ruta.

En términos de efectos no cancerígenos, el Mn presentó un mayor porcentaje del riesgo en los parques, el Cu en el polvo del interior de las viviendas y el Zn en los alimentos infantiles. En el caso de sustancias cancerígenas (de los elementos considerados únicamente el plomo presenta un factor de pendiente), el riesgo se encontraría dentro del umbral de aceptabilidad.

A diferencia del escenario conservador, empleando los valores de la población promedio tan solo se supera ligeramente el valor límite de riesgo para los niños de 12 a 24 meses para sustancias no cancerígenas (Tabla 1). Asimismo, se realizó una aproximación de la biodisponibilidad de los elementos traza con ensayos de bioaccesibilidad oral para las muestras de suelos de parques infantiles y tomando valores bibliográficos de estudios sobre el polvo y alimentos para estimar el riesgo con mayor realismo. Los resultados muestran que considerando la bioaccesibilidad, el riesgo agregado para sustancias carcinogénicas y no carcinogénicas sería aceptable para la salud humana, sin embargo contribuye de manera notable a la contribución global que experimentaría un niño.

Concentración	Riesgo	Tipo de receptor (meses)			
		Conservador		Promedio	
		(6-12)	(12-24)	(6-12)	(12-24)
Pseudototal	HI	3,80	5,65	0,83	2,19
	RISK	9,72E-07	2,57E-06	1,89E-07	8,76E-07
Bioaccesible	HI	1,38	1,92	0,29	0,67
	RISK	3,36E-07	8,94E-07	6,17E-08	2,86E-07

TABLA 1. *Riesgo agregado sistémico y cancerígeno para todas las rutas de exposición y elementos analizados. En negrita se indican los valores que superan los límites marcados por la USEPA para la salud humana.*

CONCLUSIONES

A pesar de las importantes fuentes de incertidumbre asociadas a la caracterización del riesgo llevada a cabo en este estudio (ausencia de As de la cohorte de elementos analizados, caracterización inespecífica de factores de exposición y ausencia de información consistente acerca de la biodisponibilidad - relativa a concentraciones (pseudo)totales - de los elementos evaluados), los niveles de exposición determinados para la población infantil en ambientes urbanos resultan en valores de riesgo para su salud, suficientemente elevados como para ser ignorados en la legislación ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha financiado a través del programa de investigación CARESOIL-CM (S2013/MAE-2739) concedido por el Gobierno Regional de Madrid (Comunidad de Madrid).

REFERENCIAS

Barrio-Parra, F., De Miguel, E., Lázaro-Navas, S., Gómez, A., & Izquierdo, M. (2017). Indoor Dust Metal Loadings: A Human Health Risk Assessment. *Exposure and Health*.

- doi:10.1007/s12403-017-0244-z
- De Miguel, E., Izquierdo, M., Gómez, A., Mingot, J., & Barrio-Parra, F. (2017). Risk assessment from exposure to arsenic, antimony and selenium in urban gardens (Madrid, Spain). *Environmental toxicology and chemistry / SETAC*, 36(2), 544–550. doi:10.1002/etc.3569
- De Miguel, E., Mingot, J., Chacón, E., & Charlesworth, S. (2012). The relationship between soil geochemistry and the bioaccessibility of trace elements in playground soil. *Environmental Geochemistry and Health*, 34(6), 677–687. doi:10.1007/s10653-012-9486-7
- Gómez-San Martín A., De Miguel E., Izquierdo M., M. J. (n.d.). Trace elements in commercial infant food in Spain: Evaluation of exposure and risk assessment.
- Hodel, D. R., & Chang, A. C. (2002). Trace Elements and Urban Gardens, 4.
- Izquierdo, M., Gómez, A., De Miguel, E., Barrio-Parra, F., Cabezas, A., Mingot, J., & Charlesworth, S. (2016). Trace Elements in commercial infant food: A simplified risk assessment. In *18th International Conference on Heavy Metals in the Environment* (pp. 293–294). Ghent (Belgium): Universiteit Gent. www.ichmet2016.ugent.be
- Kurt-Karakus, P. B. (2012). Determination of heavy metals in indoor dust from Istanbul, Turkey: estimation of the health risk. *Environment international*, 50, 47–55. doi:10.1016/j.envint.2012.09.011
- Ljung, K., Selinus, O., & Otabong, E. (2006). Metals in soils of children's urban environments in the small northern European city of Uppsala. *The Science of the total environment*, 366(2–3), 749–759. doi:10.1016/j.scitotenv.2005.09.073
- Mejía, J. F., Choy, S. L., Mengersen, K., & Morawska, L. (2011). Methodology for assessing exposure and impacts of air pollutants in school children: Data collection, analysis and health effects – A literature review. *Atmospheric Environment*, 45(4), 813–823. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.11.009
- Mingot, J., De Miguel, E., & Chacón, E. (2011). Assessment of oral bioaccessibility of arsenic in playground soil in Madrid (Spain): A three-method comparison and implications for risk assessment. *Chemosphere*, 84(10), 1386–1391. doi:10.1016/j.chemosphere.2011.05.001
- Petruzzelli, G., Gorini, F., Pezzarossa, B., & Pedron, F. (2010). The fate of pollutants in soil. *CNR Environment and health inter-departmental project: present knowledge and prospects for future research.*, 38.
- University of Tennessee. (2013). The Risk Assessment Information System (RAIS). <http://rais.ornl.gov/>. Accessed 19 May 2015
- USEPA. (1995). *Residential Sampling for Lead: Protocols for Dust and Soil Sampling*.
- USEPA. (2008a). *Child-Specific Exposure Factors Handbook. EPA/600/R-06/096F*. Washington, DC: National Center for Environmental Assessment. United States Environmental Protection Agency. doi:EPA/600/R-06/096F.
- USEPA. (2008b). Children's Environmental Health Disparities: Hispanic and Latino American Children and Asthma, (EPA 100-F-08-031), 4. https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-05/documents/hd_hispanic_asthma.pdf
- Wilson, R., Mitchell, I., & Richardson, G. M. (2015). Short communication: Estimation of dust ingestion rates in units of surface area per day using a mechanistic hand-to-mouth model. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 7039(December). doi:10.1080/10807039.2015.1115956

Aplicaciones de la geoestadística a estudios de Geología Médica

J.A. Luque¹, E. Pardo², M. Chica³, V. Rodríguez Galiano y J. Grima⁴

¹ Dpto. Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, IGME. 18006 Granada.

ja.luque@igme.es

² Dpto. Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, IGME. 28003 Madrid.

e.pardo@igme.es

³ Dpto. Geografía física y análisis geográfico regional. Universidad de Sevilla, US. 41004 Sevilla. virgaliano@us.es

⁴ Dpto. Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, IGME. 46004 Valencia.

j.grima@igme.es

Resumen: La creación de cubiertas temáticas o cartografías constituye uno de los problemas fundamentales en estudios geoambientales y, por supuesto, en geología médica. En definitiva, se trata de estimar el valor más probable de la variable experimental en todo el ámbito de estudio a partir de un conjunto de datos limitado. En este sentido, la Geoestadística ofrece un conjunto de métodos que permiten dar soluciones a los problemas de estimación de una variable. El Krigeaje Ordinario permite obtener el valor más probable mientras que el Krigeaje de Indicadores obtiene una aproximación discreta a la función de distribución condicional. Los métodos mencionados se ilustrarán con datos del acuífero de la Vega de Granada, en concreto desde el punto de vista del riesgo sanitario derivado de la ingestión de agua subterránea como agua de consumo.

Palabras clave: Mapas temáticos, Geoestadística, Krigeaje, Riesgo sanitario.

Abstract: *Developing thematic maps and cartographies is essential in environmental studies and, of course, in medical geology. The main purpose is to estimate the most probable value of experimental data in the study area. Geostatistics offers a wide range of tools to solve estimation problems. Ordinary kriging estimates the most probable value while Indicator kriging provides a discrete approach to the conditional distribution function. The mentioned methods are showed by means of a nitrates case study in a detrital aquifer of Granada. A specific health risk analysis due to groundwater ingestion has been carried out.*

Key words: *Thematic maps, Geostatistics, Kriging, Sanitary risk.*

INTRODUCCIÓN

Cada día estamos expuestos en mayor o menor medida a elementos y compuestos presentes en el suelo, aguas subterráneas, atmósfera, etc., tanto de origen natural como originados por la actividad humana. La exposición puede producirse a través de varias rutas, como el consumo agua y alimentos o sencillamente al respirar. Como parece lógico, estos compuestos y elementos presentan una distribución en el espacio que debe conocerse y cartografiarse, con el fin de identificar con la mayor precisión posible aquellos valores que puedan ser perjudiciales para la salud. De la exactitud con que se determine dicha distribución pueden depender decisiones sobre la gestión del territorio o la salud pública, ambas con unas connotaciones socioeconómicas evidentes. En este contexto, los métodos geoestadísticos aportan un conjunto de herramientas de análisis y de estimación de variables geoambientales o de cualquier otra naturaleza muy adecuado para caracterizar su distribución espacial (como el valor más probable de la variable) o para la elaboración de mapas probabilísticos de

previsión de distribución de valores de interés, tales como niveles máximos admitidos por la legislación o de exposición a un determinado elemento.

METODOLOGÍA

La Geoestadística, desarrollada precisamente en el campo de la Geología, tiene su fundamento en la Teoría de las Variables Regionalizadas (Matheron, 1965). Interpreta los datos experimentales como variables regionalizadas, es decir, como variables que presentan una distribución espacial caracterizada por una estructura de correlación o variabilidad espacial. Este aspecto reviste gran importancia para elegir el modelo de estimación espacial más apropiado.

Una variable regionalizada representa una función aleatoria $Z(x)$, que proporciona el valor del atributo de la variable geoambiental estudiada Z en un punto del espacio. En esencia, las variables regionalizadas presentan dos características fundamentales: el carácter aleatorio que induce a la noción de variable aleatoria y el carácter estructural, propio de la característica estudiada en relación con la calidad del agua o variable geoambiental, caracterizado por la función variograma.

En este apartado se describirán los aspectos más relevantes de los métodos que se emplearán en este trabajo. Existen muchos más métodos de estimación, así como de simulación de variables experimentales, cuya aplicación constituye el otro gran campo de utilidad de la Geoestadística.

Krigeaje Ordinario

Este método estima el valor experimental en localizaciones no experimentales y proporciona un estimador óptimo del valor de la variable $Z(x)$ en el soporte de información, bien sea puntual o el valor medio en una malla. Para ello, utiliza el conjunto de datos experimentales $\{z(x_i), i=1... n\}$ y la función variograma $\gamma(h)$ que caracteriza la estructura de variabilidad espacial de la variable (Journel y Huijbregts, 1978).

Krigeaje de Indicatrices

En el estudio de la distribución espacial de parámetros de calidad del agua o de composición del suelo, aparecen ciertos problemas que no pueden ser resueltos mediante la estimación directa del valor de la variable en un punto, como se efectúa en el caso de Krigeaje Ordinario. La resolución de estos problemas requiere la estimación de la función de distribución condicional local. Este problema es muy frecuente en estudios geoambientales en relación con la calidad de las aguas subterráneas o de la composición del suelo, cuando se buscan localizaciones en las que un determinado parámetro, supera un valor límite o "problema de alarma". El Krigeaje de Indicatrices (Deutsch y Journel, 1993) se basa en una transformación binomial de la variable $Z(x)$ en la variable indicatriz, es decir, valores por encima del valor de corte (1) o por debajo (0). La idea del método es repetir el proceso de estimación de las indicatrices obtenidas para diferentes valores de corte, para obtener una aproximación discreta a la función de distribución condicional.

RESULTADOS

En el primer caso de estudio se analiza el problema de los nitratos en el acuífero de la Vega de Granada a partir de 180 muestras de agua con valores medios superiores a los 70 mg/L. Para ello, se ha calculado el variograma experimental y se ha ajustado un modelo teórico (Figura 1).

A continuación se ha estimado mediante Krigeaje Ordinario el valor más probable de la concentración de nitratos en toda el área de trabajo, unos 200 km², en una malla de 250m x 250m. Esta representación continua de la variable estimada es en sí misma un objetivo, además puede implementarse en un sistema soporte a la toma de decisiones para gestión de información sobre Geología Médica.

Por otra parte, presenta gran interés en estudios de Geología Médica averiguar la probabilidad de superar un valor de concentración de un elemento o compuesto, bien porque la legislación así lo establezca o por cualquier otra razón relacionada con el estudio que se está realizando. En este sentido, el Krigeaje de Indicatrices obtiene una aproximación discreta a la función de distribución condicional. Como ejemplo, se mostrará una aplicación con los datos de nitrados mencionados anteriormente. En este caso, se ha estudiado la probabilidad de no superar 50 mg/L de nitratos (Figura 2) que establece la Directiva 91/676/CEE relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura.

No obstante, en cualquier estudio y para una misma variable puede haber diferentes valores de corte o interés que se quieran representar en una misma cubierta temática, como sucede con los nitratos. La Directiva Marco del Agua indica la necesidad de tomar medidas para la inversión de tendencias cuando la concentración de nitratos supere el 75% del estándar de calidad (37,5 mg/L) en las aguas subterráneas. En este sentido, los resultados del Krigeaje de Indicatrices para ambos valores de corte se pueden representar en una misma cartografía (Figura 3). En este caso se han representado tres clases de acuerdo con el rango de variación de los nitratos en cada una de ellas, hasta 37.5 mg/L, entre 37.5 y 50 mg/L y mayor de 50 mg/L. La utilidad de estos mapas temáticos en Geología Médica es indudable pues, además de definir con claridad y precisión zonas con diferente grado de riesgo, constituye una herramienta de apoyo en la toma de decisiones de gran utilidad.

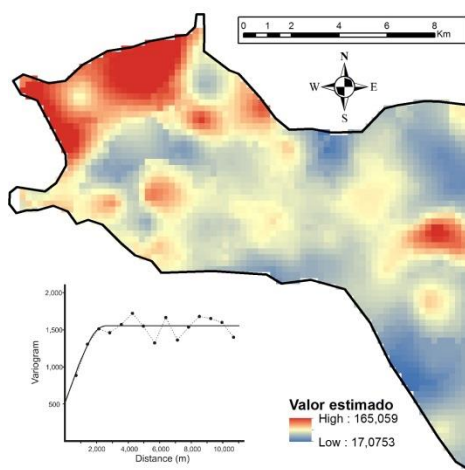


FIGURA 1. Variograma experimental y modelo esférico ajustado. Estimación de nitratos mediante Krigeaje Ordinario.

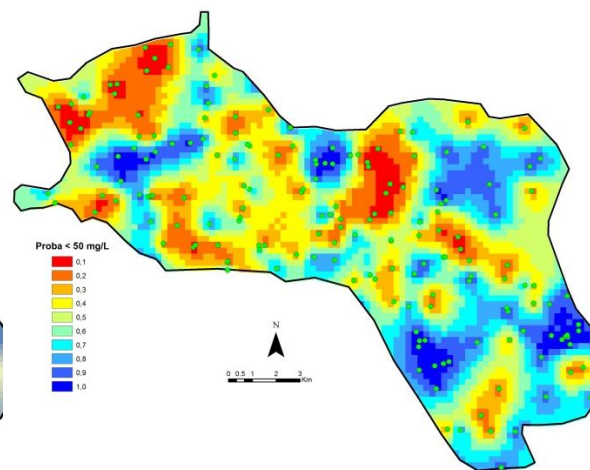


FIGURA 2. Probabilidad de no superar los 50 mg/L estimada mediante Krigeaje de Indicatrices. Los círculos de color verde representan los valores experimentales.

Siguiendo la secuencia lógica, falta por calcular el riesgo para la salud ligado a la exposición a este contaminante. Para ello, se ha aplicado un modelo de riesgo probabilístico (Fryer *et al.*, 2006; USEPA, 1992; USEPA, 2015) que tiene en cuenta la cantidad de nitratos consumida y

diferentes rangos de edades, infantil, adultos y ancianos. El riesgo calculado se puede representar de forma continua o referido como moda para el percentil 95 o riesgo máximo a escala municipal (Figura 4).

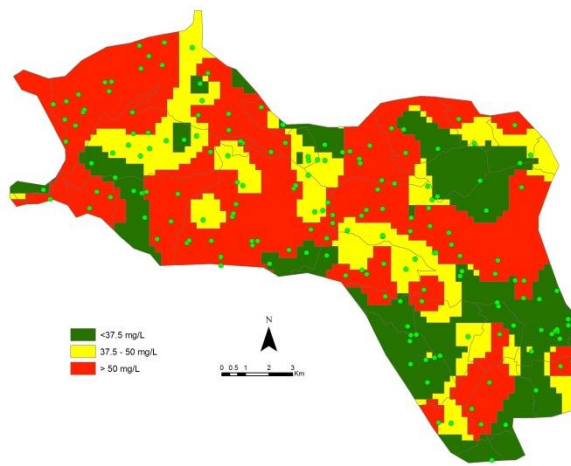


FIGURA 3. Mapa de categorías obtenidas mediante Krigeaje de Indicatrices. Los límites se han establecido para un 90% de confianza. Las líneas grises representan los límites de los términos municipales.

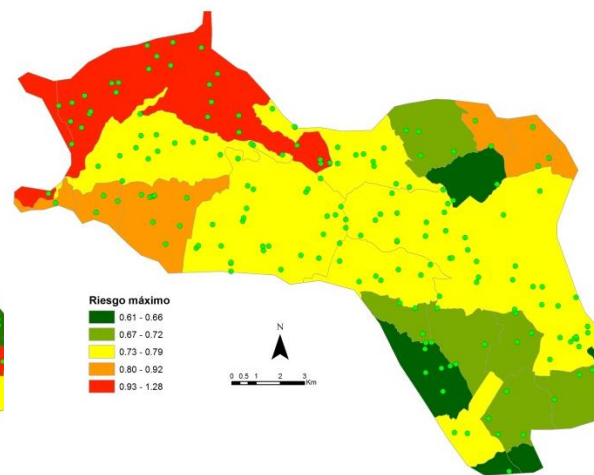


FIGURA 4. Mapa de riesgo sanitario máximo para menores de 10 años de acuerdo con el percentil 95.

CONCLUSIONES

La Geoestadística ofrece un conjunto de métodos de estimación espacial muy robustos para analizar problemas relacionados con la Geología Médica, tanto de variables numéricas como categóricas. Permite, además, obtener mapas temáticos que definen la probabilidad de superar valores umbral o delimitan zonas contaminadas.

De forma sencilla, se pueden obtener mapas temáticos donde se definan categorías de calidad de aguas y suelos en distintos soportes de estimación puntual o real (definidas por límites de municipios, por ejemplo). Ambos casos, muy útiles en Geología Médica, tanto como objetivos de análisis como paso previo para crear un sistema soporte a la toma de decisiones en el campo de la salud ambiental.

La metodología expuesta permite modelar el riesgo sanitario ligado a la exposición de elementos o compuestos que puedan afectar a la salud, integrando métodos que reproducen las pautas de exposición al riesgo estudiado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con la financiación del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), a través del proyecto SOILWATER y con el apoyo del Grupo de Investigación RSGIS RNM 122 de la Universidad de Granada.

REFERENCIAS

- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23.10.2000: A framework for Community action in the field of water policy.* Official Journal of the European Communities, L327, 0001–0073.
- Directiva 91/676/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura
- Deutsch, C. y Journel, A.G. (1993). *GSLIB: Geostatistical Software Library and Users Guide.* Oxford University Press, London. 369 pp.
- Fryer, M., Collins, C. D., Ferrier, H., Colvile, R. N. y Nieuwenhuijsen, M. J. (2006). Human exposure modelling for chemical risk assessment: A review of current approaches and research and policy implications. *Environmental Science and Policy*, 9(3), 261–274.
- Journel, A.G. y Huijbregts, C.J. (1978). *Mining Geostatistics.* Academic Press, London. 600 pp.
- Matheron, G. (1965). *Les Variables Regionalisées et leur estimation.* Masson et Cie. Paris. 305 pp.
- USEPA (1992). *Guidelines for exposure assessment.* (Vol. Fed. Reg. 57:22888-22938). Washington, USA: Environmental Protection Agency.
- USEPA (2015). *IRIS Integrated risk information system database.* <http://www.epa.gov/iris>.

PROYECTO HIDROGEOTOX, HGT

Presentación del proyecto HidroGeoTox: Factores que controlan la distribución de arsénico y otros elementos traza asociados en el sur de la Cuenca del Duero

E. Giménez-Forcada¹

¹ Dpto. Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, IGME. Salamanca.
e.gimenez@igme.es

Resumen:

El Proyecto HidroGeoTox (2013-2017) ha sido financiado por el Instituto Geológico y Minero de España con el propósito de conocer los factores que controlan la HidroGeoToxicidad (HGT) por arsénico y otros Elementos Trazas Geogénicos Potencialmente Tóxicos (ETGPTs), en algunas áreas afectadas por altas concentraciones de estos elementos en el agua subterránea. El Proyecto se fundamenta en la premisa de que es el contexto geológico el que condiciona en gran medida la presencia de determinados ETGPTs en las aguas subterráneas. Con este análisis se pretende ofrecer herramientas útiles para la planificación hidrológica y la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos en las áreas afectadas. El área piloto elegida para presentar sus resultados ha sido el borde meridional de la Cuenca del Duero, en su extremo centro-oriental (provincias de Ávila, Salamanca y Segovia, principalmente). Los resultados del análisis hidroquímico relacionan las altas concentraciones de As con flujos de componente hidrotermal, de temperaturas en torno a 19 °C, pH alcalino, y potencial redox moderadamente oxidante, con significativas concentraciones de As y otros ETGPTs, como V, Cr y U. Estas características relacionan el contenido de As en las aguas de la cuenca con la influencia de estos flujos ligados al basamento fisurado ígneo-metamórfico.

Palabras clave: HidroGeoTox Project, Arsénico, Elementos Trazas Geogénicos Potencialmente Tóxicos (ETGPT), Cuenca del Duero.

Abstract:

The HidroGeoTox Project (2013-2017) has been funded by the Instituto Geológico y Minero de España in order to know the factors that control HydroGeoToxicity (HGT) by arsenic and other Potentially Toxic Geogenic Trace Elements (PTGTEs) in some areas affected by high concentrations of these elements in groundwater. The Project is based on the premise that it is the geological context that largely determines the presence of certain PTGTEs in groundwater. This analysis aims to provide useful tools for hydrological planning and the sustainable management of groundwater resources in affected areas. The pilot area selected to present its results has been the southern edge of the Duero Basin, at its central-eastern end (Avila, Salamanca and Segovia provinces, mainly). The results of the hydrochemical analysis relate the high concentrations of As with hydrothermal component flows, characterized by temperatures around 19 °C, alkaline pH, and moderately oxidizing redox potential, with significant concentrations of As and other PTGTEs, as V, Cr and U. These characteristics relate the content of As in the groundwaters of the Duero Basin with the influence of these flows associated to the igneous-metamorphic fissured basement.

Key words: HydroGeoTox Project, Arsenic, Potentially Toxic Geogenic Trace Elements (PTGTE), Duero Basin.

INTRODUCCIÓN

Las altas concentraciones de arsénico y otros Elementos Traza Geogénicos Potencialmente Tóxicos (ETGPT) en el agua de bebida pueden suponer un riesgo para la salud humana e imponer restricciones a la disponibilidad de agua apta para consumo. Desde que entró en vigor el RD 140/2003 en varios áreas de España se identificaron problemas relacionados con la presencia de arsénico en el agua subterránea de origen natural, en concentraciones superiores a los nuevos valores umbral establecidos para el agua potable. En el caso del arsénico esta concentración límite era previamente de 50 µg/L, mientras que el nuevo valor umbral se fijaba en 10 g/L. De esta realidad, que comprometía numerosos abastecimientos en todo el territorio nacional, surgió la necesidad de hacer una investigación que tuviera en cuenta el entorno geológico natural como factor decisivo a la hora de conocer el origen y entender los patrones de distribución de As y otros ETGPTs en el agua subterránea.

La relación entre la concentración de un determinado elemento traza y la concentración límite establecida para el agua de bebida, se puede expresar en términos de HidroGeoToxicidad (HGT). La HGT se define como el cociente entre la concentración de un determinado ETGPT en una muestra de agua concreta y el valor límite máximo para ese elemento en el agua potable de acuerdo con las recomendaciones establecidas por diferentes legislaciones o recomendaciones de distintas instituciones, como la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Giménez-Forcada et al., 2017b):

$$HGT_{ETGPT} = [ETGPT_{\text{agua}}] / [ETGPT_{\text{OMS}}]$$

Valores de $HGT_{ETGPT} > 1$ indican que las concentraciones superan los límites admisibles para agua de bebida. En zonas donde se identifican altas concentraciones de más de un ETGPT en el agua subterránea, hay que tener en cuenta la posible HGT combinada, o suma de varias HGT_{ETGPTs} .

El Proyecto HidroGeoTox (2013-2017) (IGME-2303), titulado *‘Identificación de factores geoambientales que controlan la distribución de arsénico y otros ETGPT como herramienta de gestión en la planificación hidrológica de masas de agua con riesgo hidrogeotóxico’*, es un proyecto que ha sido financiado en su totalidad por el Instituto Geológico y Minero de España y en el que han participado investigadores del IGME y de otros centros de investigación y universidades de España y del extranjero. Sus principales objetivos han sido (i) ampliar el conocimiento sobre factores que controlan la HGT por arsénico y otros ETGPTs, para de este modo (ii) ofrecer herramientas de análisis que ayuden en la planificación hidrológica y en la gestión de los recursos hídricos subterráneos. Las dos áreas de estudio principales abordadas han sido (a) el Dominio Triásico de las Sierras Espadán y Calderona (provincias de Castellón y Valencia), como zonas de recarga lateral y aporte de ETGPTs al Sistema costero Plana de Castellón-Plana de Sagunto (Giménez-Forcada & Vega-Alegre, 2015) y con especial interés, dada la amplitud y complejidad del área de estudio, (b) el estudio de la distribución de As y otros ETGPTs en el borde meridional de la Cuenca del Duero, en su extremo centro-oriental, en la zona de contacto con el Sistema Central (provincias de Ávila, Salamanca y Segovia, principalmente) (Giménez-Forcada & Smedley, 2014; Giménez-Forcada & Vega, 2015, Giménez-Forcada et al., 2017a; Giménez-Forcada et al., 2017b).

Una de las principales características del proyecto HidroGeoTox ha sido su carácter interdisciplinar, derivado de la necesidad de incorporar diferentes campos de las Ciencias de la Tierra para comprender el patrón de distribución espacial de As en las aguas subterráneas. Por ahora los cuatro principales factores considerados en la interpretación de los resultados han sido: (a) la estructura de la cuenca, (b) las fuentes primarias relacionadas con el conjunto

ígneo-metasedimentario del Sistema Central, (c) el flujo subterráneo de la Cuenca cenozoica del Duero y (d) las fuentes secundarias o reacciones agua-sedimento en la propia cuenca.

Otra importante particularidad de este proyecto ha sido la colaboración y participación activa de los ayuntamientos y usuarios en la configuración de la red de muestreo. Gracias a esta colaboración ha sido posible configurar una red de observación con suficiente densidad como para permitir contrastar con rigor y solvencia los resultados hidroquímicos con los factores geológicos antes mencionados.

A continuación se exponen los principales resultados del análisis hidroquímico del proyecto HidroGeoTox realizado hasta ahora en un área localizada en el borde más meridional de la Cuenca del Duero, provincias de Ávila, Salamanca y Segovia. Este estudio servirá de base para analizar la influencia de los factores geológicos que se expondrán a continuación en los siguientes trabajos.

METODOLOGÍA

A lo largo de estos años se han recogido más de trescientas muestras de agua en una campaña que se considera única. Las variaciones en la concentración de As y otros parámetros físico-químicos de un mismo punto son mínimas en el tiempo y las principales variaciones se relacionan con el factor espacial.

Se han tomado muestras representativas en el conjunto detrítico terciario, tanto del tramo acuífero más superficial (30-200 m), como del confinado profundo (>200 m). En el campo se han determinado pH, temperatura, ORP, conductividad y oxígeno disuelto, utilizando una sonda multiparamétrica Hanna HI-9125. Las muestras de agua fueron filtradas a través de filtros de nitrocelulosa (0.45 μm) y recogidas en botellas de polietileno. Las muestras de agua recogidas para el análisis de metales fueron acidificadas al 1% con HNO₃ Suprapur® (65%). Desde el punto de muestreo hasta el laboratorio las muestras han sido transportadas en nevera portátil y, posteriormente, almacenadas a 4°C. Los análisis se han realizado en los laboratorios del IGME. Los iones carbonato y bicarbonato fueron determinados *in situ* por volumetría (titrimetría ácido/base). Los iones cloruro, sulfato, calcio y magnesio se determinaron por un analizador de flujo continuo, por espectrofotometría UV-vis. El potasio y sodio fueron analizados por espectrometría de emisión atómica. Los nitratos se determinaron por cromatografía iónica. Los elementos traza fueron analizados por ICP-MS. En todos los casos el porcentaje de error de balance iónico (EBI) fue inferior al 3%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución de concentraciones de arsénico en la zona de estudio puede verse en la Figura 1. El patrón de distribución es aleatorio, con puntos muy cercanos mostrando muy diferente concentración y altas concentraciones dispersas en la zona y no asociadas a un área concreta. Las concentraciones de As en las aguas subterráneas analizadas en el área principal (231 muestras, Figura 1) oscilan entre <1 $\mu\text{g/L}$ y 241 $\mu\text{g/L}$, con un valor promedio de 19 $\mu\text{g/L}$. Atendiendo a los valores de pH y Eh, el As está presente como especie HAsO₄²⁻, tal como puede observarse en el diagrama Eh-pH de la figura 2a, propia de un ambiente moderadamente oxidante y un rango de valores de pH 6-10. Las mayores concentraciones de As se relacionan con aguas de marcado carácter alcalino. En el diagrama de Piper (Figura 2b) se han representado las muestras, utilizando símbolos de diferentes tamaños, según distintos rangos de concentración de As. En él se aprecia que las concentraciones más altas de As se

encuentran en aguas de facies NaHCO_3 .

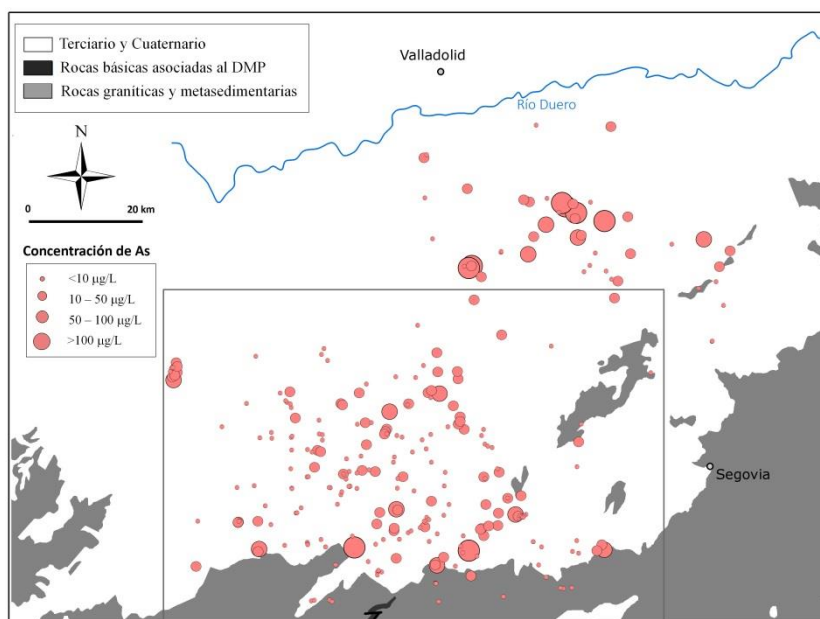


FIGURA 1. Esquema geológico e hidrogeológico de la zona de estudio, con la distribución de la concentración de As en las aguas. En el recuadro se enmarca el área principal, sobre la que se ha realizado el estudio hidroquímico.

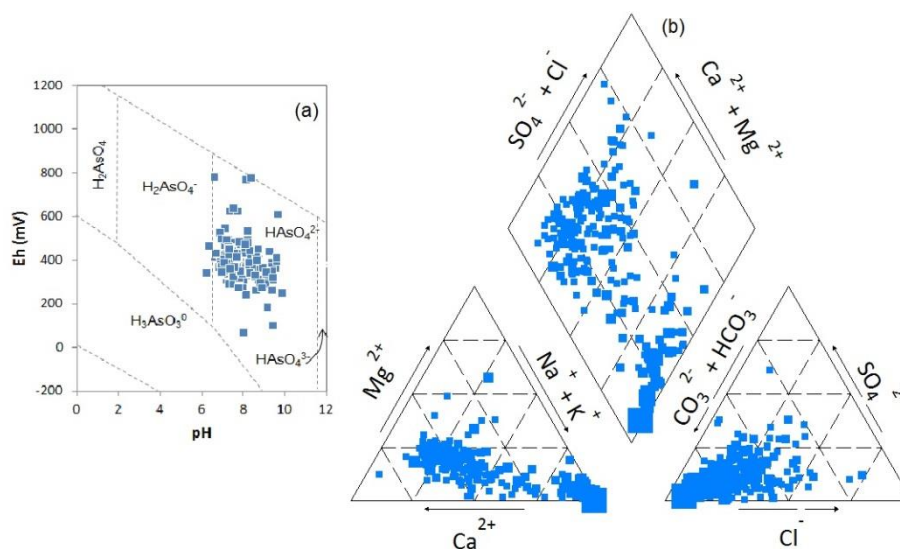


FIGURA 2. (a) diagrama pH-Eh para el sistema As-O-H; (b) Diagrama de Piper. Las muestras representadas corresponden al área principal de la zona de estudio.

Aunque la mayoría de los estudios realizados en la CD asocian la movilización de arsénico con procesos de interacción agua-sedimento (e.g. Sahún et al., Pardo et al., 2008) y procesos de movilización por desorción de los oxi-hidróxidos de Fe y Mn en condiciones oxidantes y pH alcalino, las mayores concentraciones no pueden atribuirse únicamente a este mecanismo. Es necesario considerar otro aporte de As al agua subterránea.

Las aguas con mayores concentraciones de As tienen características físico-químicas (pH, Eh, T, CE) poco variables en el tiempo. Se trata de aguas de pH alcalino, Eh moderadamente oxidante, temperaturas moderadamente cálidas (18-19°C), si se tiene en cuenta que las

temperaturas medias del aire en la zona se estiman en torno a 11°C, y valores de conductividad inferiores a 400 µS/cm. Este tipo de aguas se encuentra en determinados manantiales del Sistema Central y en algunos sondeos profundos del acuífero detrítico terciario. En algunos de ellos se encuentran las mayores concentraciones de As y otros ETGPTs.

Han sido definidos como flujos con una posible componente hidrotermal, estrechamente vinculados a los niveles profundos del acuífero terciario, a su vez influenciado por el basamento fracturado. Cuando en los niveles más superficiales se identifican altas concentraciones de arsénico, estas se asocian con altos índices de salinidad, y esto se interpreta como un enriquecimiento secundario ligado a la explotación del acuífero.

CONCLUSIONES

El estudio hidroquímico determina que las mayores concentraciones de As en el agua subterránea deben relacionarse con aportes de flujos de componente hidrotermal asociados al basamento fisurado. En una segunda etapa, las reacciones de interacción agua-roca en el seno de la cuenca regulan estas concentraciones, siendo las condiciones físico-químicas reinantes las que controlan los procesos de adsorción-desorción de As en el sedimento y por tanto su liberación al agua subterránea.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al Proyecto HidroGeoTox (IGME2303, 2013-2017) financiado por el Instituto Geológico y Minero de España. También queremos agradecer la colaboración de ayuntamientos y particulares al facilitarnos la toma de muestras de agua en sus instalaciones.

REFERENCIAS

- Giménez-Forcada, E., Smedley, P.L. (2014). Geological factors controlling occurrence and distribution of arsenic in groundwaters from the southern margin of the Duero Basin, Spain. *Environmental Geochemistry and Health*. 36(6):1029-47.
- Giménez-Forcada, E., Vega-Alegre, M. (2015). Arsenic, barium, strontium and uranium geochemistry and their utility as tracers to characterize groundwaters from the Espadán-Calderona Triassic Domain, Spain. *Science of The Total Environment* (512–513): 599-612
- Giménez-Forcada, E., Timón-Sánchez, S. (2017a). Characterization of regional cold-hydrothermal inflows enriched in arsenic and associated trace-elements in the southern part of the Duero Basin (Spain), by multivariate statistical analysis. *Science of The Total Environment* (593–594): 211-226.
- Giménez-Forcada, E., Timón-Sánchez, S., Kohfahl, C. (2017b). Hydrogeotoxicity from arsenic and uranium in the southern Duero Basin, Spain. *Journal of Geochemical Exploration*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.03.009>. *In press*.
- Pardo, R., Vega, M., Carretero, M.C., Medina, J., Delgado, J. (2008). The occurrence and geochemistry of arsenic in an aquifer of the Tierra de Pinares region, Duero basin, Spain. In *Arsenic 2008, 2nd International Congress on Arsenic in the Environment: Arsenic from nature to humans*, Valencia (España), 21-23 Mayo 2008.
- Sahún, B., Gómez, J.J., Lillo, J., Del Olmo, P. (2004). Arsénico en aguas subterráneas e interacción agua-roca: Un ejemplo en la cuenca terciaria del Duero, Castilla y León, España. *Rev. Soc. Geol. España* 17, 137-155.

Control morfoestructural de la distribución de arsénico en el sur de la Cuenca del Duero

C. Rey-Moral ¹, D. Gómez-Ortiz ², E. Giménez-Forcada ³ y M.T. López-Bahut ¹

¹ Área de Geofísica y Teledetección. Instituto Geológico y Minero de España, IGME. 28760 Tres Cantos, Madrid.

c.rey@igme.es; mt.lopez@igme.es

² Universidad Rey Juan Carlos, Área de Geología, c/Tulipán s/n, 28933 Móstoles, Madrid. david.gomez@urjc.es

³ Dpto. Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, IGME. 37001 Salamanca.

e.gimenez@igme.es

Resumen: El principal objetivo de este trabajo es conocer los factores geológico-estructurales que controlan la distribución de As en el límite sur de la Cuenca del Duero. El análisis del mapa de anomalía residual de Bouguer define un conjunto de lineamientos que ayudan a reconocer la estructura del borde sur de la Cuenca del Duero, que junto con la modelización 2+1/2D de tres perfiles permite conocer las estructuras principales a favor de las cuales pueden generarse zonas de flujo preferente que propicia la entrada de elementos traza como el As. Independientemente de la influencia que pueden tener las rocas que conforman el basamento (metasedimentarias o graníticas), la fracturación alpina parece determinante en la distribución de As disuelto.

Palabras clave: arsénico, modelización, gravedad, magnetismo, Cuenca del Duero

Abstract: *The aim of this work is to study the structural and geological patterns that control the distribution of As in the south of the Duero Basin. Residual Bouguer anomaly map depicts a set of lineaments that helps to unravel the structure of the Duero Basin southern limit, together with the 2+1/2D modelling of three profiles. The main structures promote fluids that encourage the input of some trace elements as As. Regardless of the basement (metasedimentary or granitic), Alpine fracturing seems to be the key of the distribution of dissolved As.*

Key words: *arsenic, modelling, gravimetry, aeromagnetic, Duero Basin*

INTRODUCCIÓN Y METODOLOGÍA

En varias áreas sedimentarias cenozoicas en España se han identificado problemas relacionados con la presencia de As de origen natural en concentraciones superiores a los valores límite de potabilidad establecidos por la legislación vigente (10 µg/L). Una de las áreas más afectadas es el sur de la Cuenca del Duero. Una característica común a todos los acuíferos contaminados por As es el elevado grado de variabilidad espacial en la concentración de As en las aguas subterráneas, de manera que es muy difícil predecir la concentración del elemento en una zona concreta a partir de los resultados de las áreas circundantes.

El principal objetivo de este trabajo es conocer los factores morfoestructurales que controlan la distribución de As en el límite sur de la Cuenca del Duero. A grandes rasgos uno de estos factores es la fracturación y en general la estructura del basamento. Según Giménez-Forcada & Smedley (2014), las principales fuentes de As se relacionan con grandes fracturas del basamento interpretadas como vías de flujo preferente que aportan aguas con pH alcalino y de carácter oxidante, de facies bicarbonatada sódica. Una vez en la cuenca existen reacciones entre la fase acuosa y la fase sólida, relacionadas con la adsorción/desorción de metal(oid)es del sedimento. En algunas zonas de inter-falla la concentración de As en las aguas

puede llegar a ser mínima, alcanzando concentraciones mínimas o nulas (<dl) en áreas de sub-cuenca.

El conocimiento de la estructura del basamento a través de datos de gravimetría y aeromagnetismo, junto con 3 modelos 2+1/2D, puede ayudar a definir diferentes áreas en la cuenca y con ello enfocar el estudio hidrogeoquímico en un contexto geológico que aporte perspectiva a la interpretación de los datos y finalmente permita definir diferentes grados de vulnerabilidad a la anomalía hidrogeotóxica por As. Se ha tenido en cuenta una red de observación de 233 puntos de agua, correspondiente a una campaña de toma de muestras realizada entre 2012 y 2015. Las muestras de agua corresponden tanto al conjunto acuífero más superficial y libre (<130m) como al semiconfinado profundo (>200m). Las aguas fueron filtradas (0.45µm) y recogidas en botellas de polietileno. Las muestras para análisis de metales fueron acidificadas 1% v/v con HNO₃ Suprapur® (65%). Las concentraciones de As en agua subterránea oscilan entre 0.05µg/L y 241µg/L, con una mediana de 8µg/L y un promedio de 19µg/L. En las condiciones que establecen los valores de pH y Eh registrados, el As está presente como especie HAsO₄²⁻. Las mayores concentraciones se relacionan con sondeos que captan el acuífero profundo, estrechamente ligado al basamento.

GEOLOGÍA Y CAMPOS POTENCIALES

En la zona de trabajo se sitúa la unión del extremo norte del Sistema Central con la Cuenca del Duero (Figura 1), que ocupa una importante área en el centro peninsular cuyo relleno sedimentario está controlado por la actividad tectónica de sus márgenes.

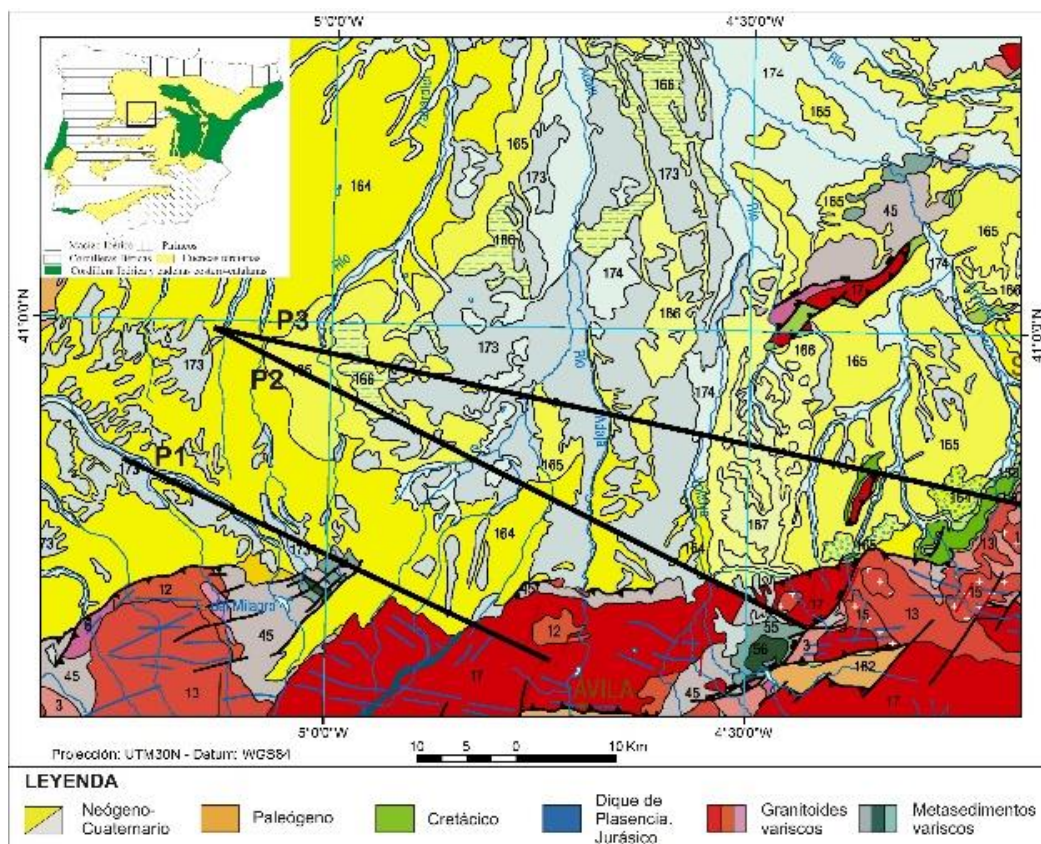


FIGURA 1. Mapa geológico de la zona de estudio (extraído de Rodríguez Fernández et al, 2014) con superposición de los perfiles modelizados.

Al sur afloran rocas ígneas variscas orladas por metasedimentos variscos. El dique básico de Messejana-Plasencia (DMP), con una longitud de más de 500 km, forma una de las principales estructuras a escala peninsular, cuyo extremo norte desaparece bajo la Cuenca del Duero. El basamento de la cuenca lo componen rocas precámbricas a mesozoicas y la fracturación en el límite sur de la cuenca confirma el carácter tectónico de este límite. Los lineamientos gravimétricos (Figura 2A) reflejan estructuras de basamento que deben afectar al relleno sedimentario. Estudios sedimentológicos confirman el control tectónico de las unidades estratigráficas en esta zona (Alonso Gavilán *et al.* 2004).

Al mapa observado de anomalías de Bouguer, realizado expresamente para este trabajo (SIGEOF; Gómez Ortiz, 2001), con una densidad de 2 puntos por km², y paso de malla 500 m, se le ha sustraído la primera derivada para obtener el **mapa residual de anomalías de Bouguer** (Figura 2A). Los valores positivos relativos de anomalía de Bouguer (+14 mGal) están relacionados con los afloramientos de metasedimentos precámbricos en el límite sur de la zona, y en parte también con los granitoides post-orogénicos que se sitúan hacia el este. Además los afloramientos paleozoicos en la esquina noreste (Macizo de Santa María la Real de Nieva) con una dirección NE-SO producen máximos gravimétricos relativos. Valores medios relativos de gravedad (-8 mGal) corresponden a los granitoides sin-orogénicos localizados en los alrededores de Peñaranda de Bracamonte, que tiene su continuidad hacia el norte, limitando los sedimentos de la Cuenca del Duero. Prácticamente la totalidad de la cuenca sedimentaria está ocupada por valores relativos bajos de gravedad (entre -10 y -20 mGal), situándose en el centro de la cuenca dos grandes mínimos (-28 mGal), relacionados con los depocentros y el mayor espesor de sedimentos en esta zona (Blanco & Merten, 1974). El análisis de los máximos, mínimos y gradientes de este mapa permite definir una serie de lineamientos (Figura 2A) que contribuyen a dibujar la estructura oculta bajo la cuenca sedimentaria.

En cuanto al mapa de **intensidad de campo magnético** reducido al polo y corregido IGRF (Fletcher *et al.*, 2011) se dibuja un eje magnético muy claro (Figura 2B) según una dirección NE-SO (20 nT). La parte sur de este eje está claramente relacionado con el afloramiento del DMP y hacia el noreste con la prolongación del mismo en el basamento bajo la Cuenca del Duero. Anomalías de menor amplitud hacia el oeste se han relacionado con facies más magnéticas en los metasedimentos paleozoicos del basamento (ver Figura 3) así como con los granitoides aflorantes.

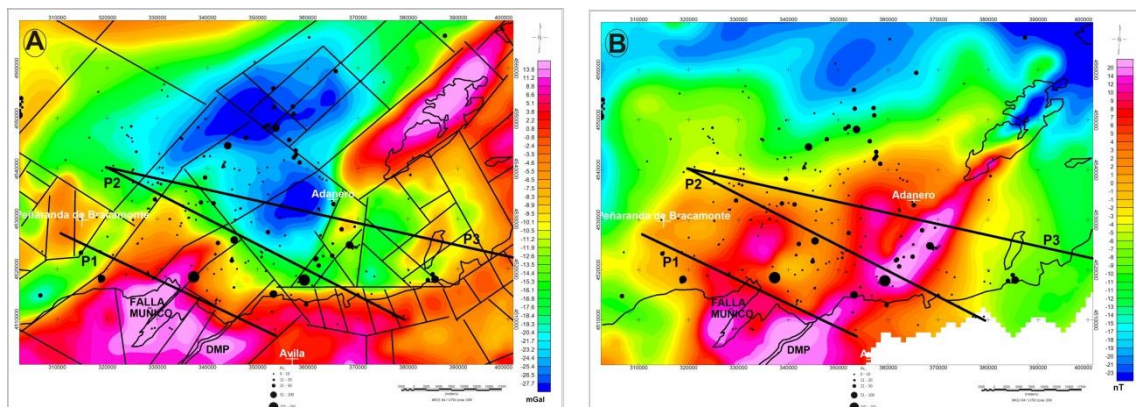


FIGURA 2. A: Mapa residual de anomalía de Bouguer (paso de malla 500 m). B: Mapa de intensidad de campo magnético total reducido al polo y corregido IGRF. Separación de líneas de vuelo 1000 m. Altura nominal del vuelo 1000 m (las áreas en blanco no fueron cubiertas por el vuelo aeromagnético). Se han superpuesto los perfiles modelizados, el límite de la cuenca sedimentaria (traza negra continua), el dique Messejana-Plasencia, DMP, la falla de Muñico y las anomalías de As clasificadas según importancia.

MODELOS 2+1/2D

La modelización gravimétrica y magnética de tres perfiles NO-SE y ONO-ESE está delimitada por la geología superficial y los sondeos de agua existentes en la zona. Los datos de densidad proceden de trabajos previos (Gómez-Ortiz, 2001), mientras que los de susceptibilidad (s) se han obtenido de datos bibliográficos (García-Lobón et al, 2014).

La estructuración del basamento se pone de manifiesto con la existencia de fallas inversas y desgarres como reactivación alpina de fallas y discontinuidades variscas y tardi-variscas, que tiene un claro reflejo en la anomalía de Bouguer con máximos y mínimos relativos a lo largo de los tres perfiles. Se han diferenciado dos tipos de basamento, uno ligeramente más denso, que corresponde al grupo metasedimentario precámbrico ($2.68-2.72 \text{ g/cm}^3$) y los granitoides tardiorogénicos, algo más ligeros, en el sureste de los perfiles ($2.66-2.67 \text{ g/cm}^3$).

En cuanto al magnetismo, los metasedimentos tienen baja susceptibilidad (entre $0-0.0005 \text{ SI}$) en el P1 y extremos NO del P2, mientras que en la parte central del P2 y el P3 aumenta a 0.001 SI . Para conseguir un mejor ajuste a la anomalía positiva que se observa al oeste de Adanero (Figura 3), y que coincide con un mínimo gravimétrico (Figura 2A) en el perfil 3 se ha diferenciado un cuerpo con $s=0.003 \text{ SI}$. Se trataría de una zona tectónicamente complicada donde podría existir un rejuego de cizallas que contribuiría a la creación de minerales más magnéticos. A los granitoides se les ha asignado s medias ($0.0008-0.0012 \text{ SI}$) y en los perfiles 2 y 3 se ha interpretado una aureola magnética, en torno al DMP, de valores altos: $0.0022-0.0025 \text{ SI}$.

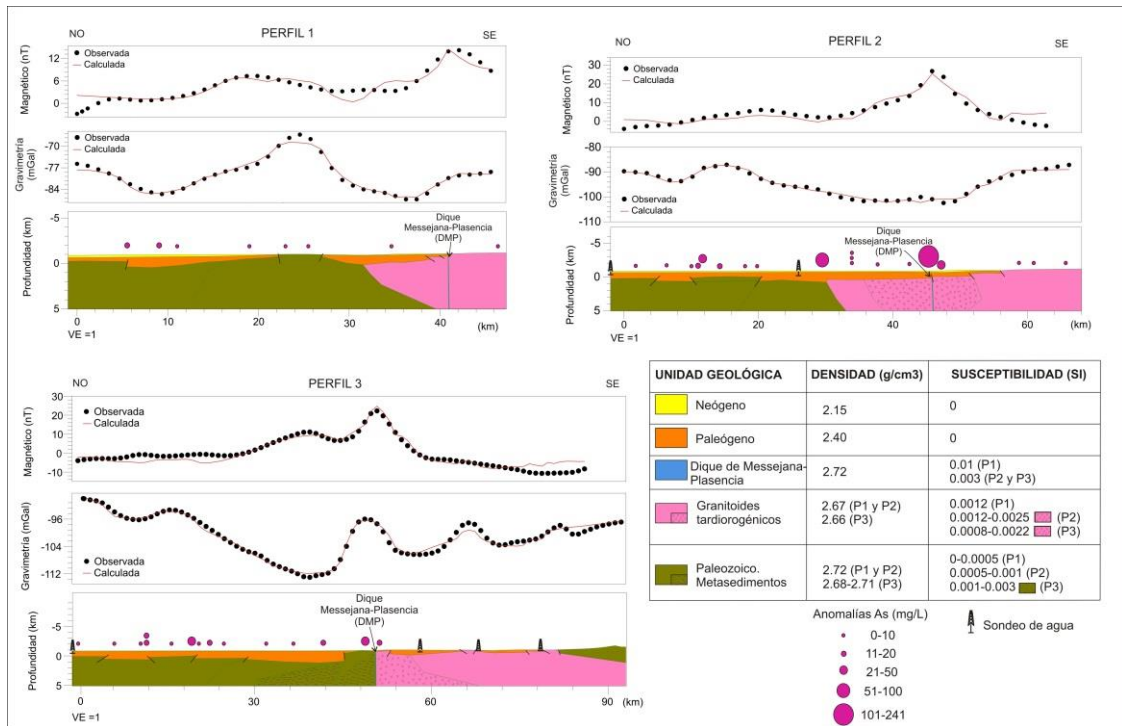


FIGURA 3. Modelos gravimétricos y magnéticos en 2+1/2D (ver localización en Figs. 1, 2A y 2B) junto con las densidades y susceptibilidades utilizadas en la modelización. En algunos casos los valores varían entre perfiles (P1, P2 y P3) tal y como se indica en la tabla. Sobre los perfiles se han proyectado las anomalías de As (proyectados desde 2 km a ambos lados del perfil) y los sondeos de agua utilizados en la modelización.

El DMP es una estructura, de edad jurásica, (con no más de 200 m de espesor en afloramiento), que sin tener expresión gravimétrica (a pesar de su alta densidad, 2.72 g/cm^3), sí tiene relevancia magnética (Figs. 2B, 3) con $s=0.01 \text{ SI}$ en el 1 y 0.003 SI en P2 y P3. En el perfil 3 la prolongación del DMP hacia el norte coincide con el límite entre el basamento metasedimentario y el granítico.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis del mapa de anomalía residual de Bouguer define un conjunto de lineamientos que ayudan a reconocer la estructura del borde sur de la Cuenca del Duero. Sobre este mapa se han representado las anomalías de As, con los rangos (en $\mu\text{g/L}$): 0-10, 11-20, 21-50, 51-100 y 101-241. Los valores por encima de $20 \mu\text{g/L}$ se consideran anomalías significativas. La disposición lineal de anomalías de As $>20 \mu\text{g/L}$, coincidiendo con los lineamientos deducidos, corrobora la relación entre la distribución de altas concentraciones de As y la estructura del basamento. Se observa que las anomalías por As con concentraciones más elevadas se identifican en el área en torno a la prolongación del DMP y más hacia el O en relación con la prolongación de la falla de Muñico (ver Giménez-Forcada & Smedley, 2014). Hacia el centro de la cuenca, en el norte, se reconocen aguas con concentraciones también relativamente altas asociadas a lineamientos de dirección NE-SO y NO-SE, junto a uno de los depocentros identificados en el área. Esta disposición de las anomalías corroboraría el control estructural sobre la distribución de la concentración de As en la cuenca. Las líneas de fracturación actuarían como zonas de flujo preferente aportando aguas alcalinas bicarbonatadas sódicas enriquecidas en ETGPT, como arsénico, uranio, wolframio, vanadio, flúor, boro y litio (Giménez-Forcada & Vega-Alegre, 2015).

La circulación de fluidos hidrotermales en la corteza superior es un proceso geológico común que deriva en una alteración retrógrada continuada de las rocas ígneas y metamórficas así como la formación de depósitos minerales. En el cinturón varisco europeo esas alteraciones hidrotermales y mineralizaciones están asociadas a granitoides variscos y sus diferentes etapas de plutonismo. Sin embargo, datos geocronológicos, isotópicos y de inclusiones de fluidos han demostrado que la mayor parte de la circulación hidrotermal es independiente de la actividad ígnea y está más relacionada con recirculación de fluidos hidrotermales generados durante procesos tectónicos más actuales. En concreto, en la parte oriental del Sistema Central, dataciones sistemáticas y estudios de inclusiones fluidas muestran cuatro episodios hidrotermales principales desde el varisco hasta la actualidad, cada uno de ellos con su contexto estructural, mineralogía, isotopos y signatura de contenido en fluidos (Tornos *et al.*, 2000).

En este contexto, la fracturación asociada a la última reactivación tectónica habría favorecido la circulación de fluidos que controlan la distribución de As en el borde meridional de la Cuenca del Duero. Independientemente de la influencia que pueden tener las rocas que conforman el basamento (metasedimentarias o graníticas) respecto al efecto de los procesos de interacción agua-roca en el quimismo de las aguas subterráneas, la fracturación parece determinante en la distribución de As disuelto. A este factor habría que añadir otros como son los procesos de interacción agua-sedimento en la cuenca, que regulan principalmente las reacciones de adsorción/desorción de arseniatos y la explotación del sistema acuífero terciario, tanto del acuífero más superficial y libre, como del acuífero semiconfinado profundo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el IGME, a través del proyecto HidroGeoTox (Ref. IGME-2303).

REFERENCIAS

- Alonso Gavilán, G., Armenteros, I., Carballeira, J., Corrochano, A., Huerta, P., & Rodríguez, J. M. (2004): Cuenca del Duero. En: J. A. Vera (Ed.), *Geología de España* (pp. 550–556). Madrid: SGE-IGME.
- Blanco, J. & Merten, R. (1974): Mapa de isobatas para el techo del Paleozoico y base del Terciario en la Cuenca del Duero. *Hispanoil*.
- Fletcher, K., Ayala, C., Cabanillas, P.L.M., Fairhead, J.D., Lei, K., Salem, A., (2011): A new higher resolution magnetic database for resource evaluation. *First Break* 29, 41–47.
- García Lobón, J.L., Rey Moral, C, Ayala, C. Martín-Parra, L.M., Matas, J. y Reguera, M.I. (2014): Regional structure of the southern segment of Central Iberian Zone (Spanish Variscan Belt) interpreted from potential field images and 2.5D modelling of Alcudia gravity transect. *Tectonophysics*, 614: 185-202.
- Giménez-Forcada & Vega-Alegre, M. (2015): Multi-Approach assessment of the distribution of arsenic and other potentially toxic elements in groundwater from a southern area of Duero Basin, Spain. 42nd IAH Congress, AQUA2015. Roma.
- Giménez-Forcada, E. & Smedley, P.L. (2014): Geological factors controlling occurrence and distribution of arsenic in groundwaters from the southern margin of the Duero Basin, Spain. *Environ Geochem Health*. 36(6):1029-1047.
- Gómez Ortiz, D. (2001): La estructura de la corteza en la zona central de la Península Ibérica. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 350 p.
- Rodríguez Fernández, L.R., López Olmedo, F., Oliveira, J.T., Matas, J., Martín-Serrano, A., Martín Parra, L.M., Rubio, F., Marín, C., Montes, M., Nozal, F., Medialdea, T., Terrinha. P. (2014): *Mapa Geológico de España y Portugal E 1: 1.000.000*. En: Rodríguez Fernández, L.R., Oliveira, J.T. (Eds.). IGME-LNEG.
- SIGEOf: Sistema de Información Geofísica del IGME: Editor: Área de Geofísica y Teledetección. [Fecha de consulta: 02/06/2015]. Disponible en: <http://info.igme.es/sigeof/>
- Tornos, F., Delgado, A. Casquet, C. y Galindo, C. (2000): 300 Million years of episodic hydrothermal activity: stable isotope evidence from hydrothermal rocks of the Eastern Iberian Central System. *Mineralium Deposita*, 35: 551-569.

Las fuentes primarias de arsénico y otros elementos traza en las aguas subterráneas del sur de la Cuenca del Duero

S.M. Timón-Sánchez¹ y E. Giménez-Forcada²

¹ Dpto. Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Salamanca. 37001 Salamanca. s.timon@igme.es

² Dpto. Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Salamanca. 37001 Salamanca. e.gimenez@igme.es

Resumen: En algunos manantiales y sondeos del sur de la Cuenca del Duero (CD) se han detectado niveles de arsénico, y de otros elementos traza (Cr y V), que exceden los límites de potabilidad del agua. El origen de estos elementos en las aguas subterráneas es geogénico y está presente en las rocas sedimentarias de la cuenca, pero las fuentes primarias no se conocen. Con el fin de saber si las mineralizaciones hidrotermales y el conjunto ígneo-metamórfico pueden ser áreas fuente de estos elementos, se ha llevado a cabo un estudio químico-mineralógico de las fases minerales que los constituyen. Las mineralizaciones de W-As y Sb-As-Au presentes en filones de cuarzo con direcciones NE-SO muestran los contenidos en As más altos. Los análisis de microsonda revelan que los silicatos ferromagnesianos que constituyen el Dique de Messejana-Plasencia (DMP) presentan As, Cr y V en su composición, siendo las enstatitas-ferrosilitas las que muestran mayor contenido en As, con valores máximos del 0,6 % en peso en As₂O₃. Los sulfuros de las venas de cuarzo mineralizadas y los piroxenos del DMP pueden ser considerados fuentes primarias potenciales de los contenidos elevados en As, Cr y V de las aguas subterráneas de la CD.

Palabras clave: fuentes primarias de arsénico, piroxeno, Dique de Messejana-Plasencia, Cuenca del Duero, España.

Abstract: High levels of arsenic, and other trace elements (Cr and V), which are above the drinking-water limits, have been observed in springs and boreholes of the Duero Basin (DB). The source of these elements in groundwater is geogenic and it is present in the sedimentary rocks of the basin, but the primary sources remain unknown. In order to know if the hydrothermal mineralization and the igneous-metamorphic rocks could be some of the multiples sources of these elements, a mineralogical-chemical study of their mineral phases was realized. The highest As content has been detected in the W-As and Sb-As-Au-bearing quartz veins deposits with NE-SO regional structural trend. Microprobe analyses reveal that ferromagnesian silicates from the Messejana-Plasencia dyke (MPD) contain As, Cr and V. Highest As content has been found in Mg-Fe pyroxene of the enstatite-ferrosilite series, with values up to 0.6 wt. % As₂O₃. The sulfide mineralization in quartz veins and the pyroxenes from the MPD can be considered as some of the potential primary sources of the elevated As, Cr and V in groundwater of the DB.

Key words: primary arsenic sources, pyroxen, Messejana-Plasencia Dyke, Duero Basin, Spain

INTRODUCCIÓN

Aunque no como componente mayoritario, el As se encuentra formando parte de un gran número de minerales primarios. Este elemento calcófilo puede llegar a superar el 10% en peso de sulfuros como la pirita, calcopirita, galena y marcasita. También se pueden encontrar altas

concentraciones de As en óxidos e hidróxidos de Fe, Al y Mn, formando parte de su estructura o como especie adsorbida; en la literatura se recogen contenidos en As entre 2,7 y 41 mg kg⁻¹ en las magnetitas de algunas rocas ígneas. También se han hallado contenidos en As de 0,4 mg kg⁻¹ en fosfatos, como los apatitos de rocas dioríticas. La concentración de As en silicatos como el cuarzo, feldespato, biotita, anfíboles, olivino y piroxeno se sitúa alrededor de 1 mg kg⁻¹ (Smedley y Kinniburgh, 2002).

La afinidad que tiene el As para sustituir al Fe en la naturaleza es compartida por otros elementos como son el Cr y el V. Los contenidos en As en los análisis químicos de roca total en las rocas ígneas se sitúa por debajo de 5 mg kg⁻¹, aunque algunas rocas básicas presentan concentraciones de 113 mg kg⁻¹ (Smedley y Kinniburgh, 2002). Las rocas máficas y ultramáficas están enriquecidas en Cr y V en relación a las rocas ígneas silíceas. Por ejemplo, las concentraciones de Cr en los granitos son inferiores a 22 mg kg⁻¹ y en las rocas ultramáficas pueden variar entre 1000 y 3000 mg kg⁻¹ (Fantoni *et al.*, 2002).

Existen numerosos estudios que demuestran que la presencia de As, y otros Elementos Traza Geogénicos Potencialmente Tóxicos (ETGPT), como el Cr y el V, en el agua subterránea del sur de la Cuenca del Duero, está relacionado con los procesos de interacción entre el agua y los sedimentos que forman parte del relleno de la cuenca, principalmente en las de edad Neógena y en la Facies Zaratán del Mioceno Medio. Sahún *et al.* (2004) identifican As asociado a óxidos e hidróxidos de hierro, a pirita autigénica, a óxidos de manganeso, a óxidos de titanio-hierro heredados, a filosilicatos y también a coloides organominerales en la materia orgánica. Sin embargo, las fuentes primarias de este elemento todavía no se conocen.

El objetivo principal de este estudio es realizar una caracterización químico-mineralógica de los minerales que constituyen tanto los depósitos hidrotermales, como de una de las estructuras más relevantes del conjunto ígneo-metamórfico de la región, el Dique de Messejana-Plasencia. Esta caracterización permitirá identificar el contenido en As de dichos minerales y se podrá llegar a considerar si la interacción entre las fases minerales y el agua puede contribuir, al menos en parte, a la presencia de As y otros ETGPT en las aguas subterráneas del borde sur de la Cuenca del Duero.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La zona de estudio se localiza en el borde sur de la Cuenca del Duero (CD), en la zona de contacto entre los sedimentos Terciarios y las rocas ígneas y metamórficas de la parte más occidental de Sistema Central (SC), en la Zona Centrobérica del Macizo Varisco (Figura1). Existe en la zona una red de fracturas de naturaleza penetrativa, siendo el borde sur de la CD de carácter tectónico. El Dique de Messejana-Plasencia (DMP) es una gran estructura de dirección SW-NE, que atraviesa la Península Ibérica, cortando el basamento varisco, desde el sur de Portugal hasta Ávila, donde es cubierto por los sedimentos terciarios. Es un dique dolerítico, con un recorrido de unos 530 km y una anchura entre 25 y 200 m, y tiene una edad de 200 Ma. Desde la Orogenia Varisca hasta la actualidad se reconocen en el SC distintos episodios de actividad hidrotermal en los cuales se desarrollan skarns cálcicos y magnésicos de Sn-W, Fe y Zn-W, mineralizaciones de Cu-Zn-Sn-W asociadas a zonas de cizalla, episienitas y greisens y también venas de cuarzo con mineralizaciones de W-Sn y metales base (Vindel *et al.*, 2000).

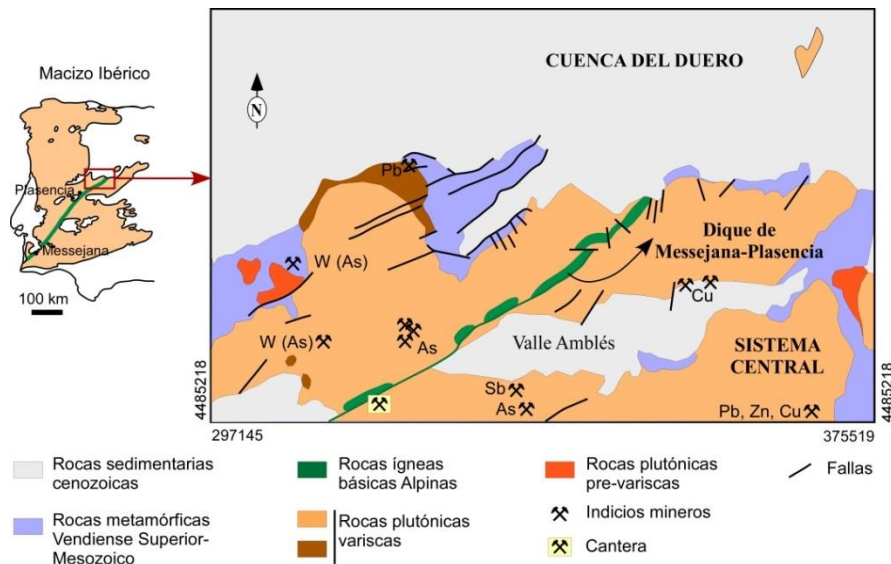


FIGURA 1. Situación geológica del área de estudio, entre el borde sur de la Cuenca del Duero y el Sistema Central, con la localización de algunos de los indicios mineros estudiados y la cantera de Villafranca de la Sierra.

MEDODOLOGÍA

La metodología de estudio seguida ha consistido en el análisis de la información cartográfica y geológico-minera de las hojas del mapa topográfico 1:50.000 que abarcan la zona de estudio, de la información recogida en las bases de datos de indicios mineros del IGME (BDMIN), así como una revisión de los datos de geoquímica total de las rocas de la zona. Se han realizado labores de campo para el reconocimiento de varios indicios mineros y también para la toma de muestras de roca. Posteriormente, se ha llevado a cabo el trabajo de laboratorio que ha consistido en el estudio petrográfico de las láminas delgadas y transparentes-pulidas con un microscopio de polarización Nikon Eclipse-50i-POL. Los análisis químicos de los minerales se han realizado en la microsonda JEOL Superprobe JXA-8900 M, con WDS, del Centro Nacional de Microscopía Electrónica, de la Universidad Complutense de Madrid. Las formulas químicas y las proporciones de los términos extremos de los minerales se han calculado y clasificado de acuerdo a criterios publicados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los **depósitos hidrotermales** reconocidos en el área de trabajo son filones de cuarzo con mineralizaciones metálicas de diferentes tipos. En la provincia de Ávila destacan los de Pb (Zn-Ag-Cu-Ba), en la zona de El Barraco-Hoyo de Pinares, y los de Sb y As-Au del área de la Hija de Dios. Estas venas mineralizadas tienen un fuerte control estructural, con direcciones NE-SO, NO-10E y N80-90E, siendo la dirección predominante SO-NE. Entre la paragénesis metálica, constituida por sulfuros, la arsenopirita es el mineral metálico de As más abundante y también se presenta la pirita arsenical. Entre los minerales secundarios de As se presenta la escorodita. La alteración de estos depósitos metálicos podría suponer un aporte al agua subterránea, de As y otros metales de transición a los que va asociado como el Cd, Pb, Ag, Au, Sb, P, W y Mo. Algunos estudios en minas abandonadas de la zona indican la presencia de elementos traza altamente tóxicos (Cd y Tl) en los sulfuros (Murciego *et al.*, 2010).

Por otro lado, Giménez-Forcada y Smedley (2014) señalaron los depósitos hidrotermales del SC como fuentes de metales y también apoyan la hipótesis de flujos de componente hidrotermal actuales ligados a fracturas del basamento, de tal manera que la distribución de As y otros ETGPT en el agua subterránea está fuertemente controlada por la estructura de la cuenca y asociada a la circulación de aguas bicarbonatadas sódicas oxidantes a través de grandes fallas (Rey-Moral *et al.*, 2016; Giménez-Forcada *et al.*, 2016). En este sentido, el DMP, se considera una de las grandes estructuras a través de la cual se produce una de las entradas más importantes de As en el sistema, capaz de juntar y transmitir flujos de agua rápidos y mantener el carácter oxigenado del agua de recarga. El conocimiento de la naturaleza química del dique se considera primordial para entender la naturaleza química de las aguas subterráneas que se relacionan con dicha estructura.

El Dique de Messejana-Plasencia. Las muestras estudiadas se han tomado en el sector más oriental del dique, cerca de las canteras de Villafranca de la Sierra (Ávila) (Figura 1). El espesor del dique de dirección N60E se sitúa entre 200 y 250 m, y las muestras se tomaron en la parte central del mismo. La mineralogía del dique es la típica de los basaltos toleíticos continentales, y está constituida por clinopiroxeno, plagioclasa, ilmenita y espinela. Los minerales accesorios identificados son ortopiroxeno, biotita, hornblenda, apatito, cuarzo y entre los minerales de alteración actinolita, oxi-hidróxidos de hierro, clorita y otros filosilicatos.

Los piroxenos son los minerales máficos mayoritarios. La composición de la primera generación de clinopiroxeno responde a $Wo_{44-36}En_{50-27}Fs_{31-12}$ y muestra una relación XMg (XMg=Mg/(Mg+Fe)) entre 0,5 y 0,8 por lo que se clasifica como augita. Todas las augitas presentan en menor o mayor medida As y Cr en su composición, variando el contenido en As_2O_3 entre 0,2 y 0,3% y el de Cr_2O_3 entre 0,01 y 0,25%. En ocasiones, esta primera generación de clinopiroxeno puede llegar a mostrar valores máximos de 0,2% en V_2O_3 . La segunda generación de clinopiroxeno es una pigeonita, $Wo_{9-8}En_{64-46}Fs_{46-27}$. Muestra una XMg entre 0,5 y 0,8. El contenido en As en las pigeonitas es menor que el de las augitas, variando entre 0,1 y 0,2 % As_2O_3 en los términos más ricos en hierro y nulo en las pigeonitas más magnésicas. El contenido en Cr_2O_3 es inferior al 0,08% y el V_2O_3 es inferior al 0,16%. Se ha observado la presencia de ortopiroxeno que pertenece a la solución sólida enstatita-ferrosilita $Wo_{5-3}En_{53-37}Fs_{59-42}$. Las enstatitas-ferrosilitas son las que muestran un contenido en As_2O_3 mayor, pudiendo llegar al 0,6% y siendo el contenido medio 0,3%. Asimismo sucede con el contenido en V_2O_3 , que varía entre 0,1 y 0,3%. En cambio, el contenido en Cr es nulo o con valores inferiores al 0,03% en Cr_2O_3 .

Los tipos de piroxeno diferenciados, augita, pigeonita y enstatita, son semejantes a algunos de los grupos reconocidos en un estudio sobre la caracterización de los minerales del dique realizado por Andonaegui *et al.* (2005). Por otro lado, las investigaciones más recientes realizadas sobre la geoquímica de roca total del DMP revelan contenidos en Cr que varían entre 276 y 17 ppm y contenidos en V que varían entre 185 y 527 ppm (Cebriá *et al.* 2003).

CONCLUSIONES

A la luz de los resultados químico-mineralógicos mostrados se puede decir que, además del aporte de As y otros ETGPT que pueda ser atribuido a las rocas sedimentarias, los sedimentos no consolidados y los suelos, es necesario considerar el aporte que pueda derivar de los depósitos metálicos y el conjunto ígneo-metamórfico de la región como áreas fuente probables de dichos elementos. Así, los sulfuros de los filones de cuarzo mineralizados, con W-As y Sb-As-Au, y direcciones preferentes NE-SO y, por otro lado, los silicatos ferromagnesianos que constituyen el Dique de Messejana-Plasencia que presentan As, V y Cr formando parte de

su composición química, se suscriben como fuentes primarias potenciales de los niveles anómalos de estos elementos en las aguas subterráneas de la Cuenca del Duero, poniéndose de manifiesto una vez más la importancia de las reacciones agua-roca y el control estructural en los flujos de agua subterránea.

Como línea de investigación abierta, se siguen realizando estudios químico-mineralógicos en el resto de unidades rocosas que aparecen en el área de estudio para comprobar si existen en ellas minerales con elementos traza de origen natural potencialmente tóxicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Instituto Geológico y Minero de España. Proyecto de Investigación HidroGeoTox. Ref. IGME-2303.

REFERENCIAS

- Andonaegui, P., Villaseca, C., LópezGarcía, J.A. (2005). Caracterización de los minerales del dique gabroideo de Messejana-Plasencia en su sector nor-oriental. *Geogaceta*, 38: 219-222.
- Cebriá, J.M., López-Ruiz, J., Doblas, M., Martins, L.T., Munha, J. (2003). Geochemistry of the Early Jurassic Messejana-Plasencia dyke (Portugal-Spain); Implications on the origin of the Central Atlantic Magmatic Province. *Journal of Petrology*, 44: 547-568.
- Fantoni, D., Brozzo, G., Canepa, M., Cipolli, F., Marini, L., Ottonelo, G., Vetuschi, Zuccolini, M. (2002). Natural hexavalent chromium in groundwaters interacting with ophiolitic rocks. *Environmental Geology*, 42(8): 871-882.
- Giménez-Forcada, E. y Smedley, P.L. (2014). Geological factors controlling occurrence and distribution of arsenic in groundwaters from the southern margin of the Duero Basin, Spain. *Environmental Geochemistry and Health*, 36: 1029-1047.
- Giménez-Forcada, E., Timón-Sánchez, S.M., Vega-Alegre, M., (2016). Influence of hydrothermal fluids enriched in As and F on the chemistry of groundwaters of the Duero Basin. En: *Arsenic Research and Global Sustainability*, Proceedings of the Sixth International Congress on Arsenic in the Environment (As2016).
- Murciego, A., Álvarez, E., García, A., Pellitero, E. (2010). The occurrence of Cd and Tl in the sphalerite from El Losar del Barco Mine (Ávila, Spain): a potential environment hazard. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 13: 163-164.
- Rey-Moral, C., Gómez Ortiz, D., Giménez-Forcada, E., López-Bahut, M.T. (2016). Modelización gravimétrica y aeromagnética en el SE de la Cuenca del Duero (provincias de Ávila y Segovia). Factores geológicos que controlan la distribución de As (Arsénico) y otros ETGPT (Elementos Traza Geogénicos Potencialmente Tóxicos) en las aguas subterráneas. IX Congreso Geológico de España. Huelva 2016.
- Sahún, B., Gómez, J.J., Lillo, J. Del Olmo, P. (2004). Arsénico en aguas subterráneas e interacción agua-roca: un ejemplo en la cuenca terciaria del Duero, Castilla y León. España. *Revista Sociedad Geológica de España*, 17: 137-155.
- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17: 517-568.
- Tornos, F., Delgado, A., Casquet, C., Galindo, C. (2000). 300 Million years of episodic hydrothermal activity: stable isotope evidence from hydrothermal rocks of the Eastern Iberian Central System. *Mineralium Deposita*, 35: 551-569.

El flujo de las aguas subterráneas como regulador de las anomalías hidrogeotóxicas en el sur de la Cuenca del Duero

M. García Rodríguez¹, E. Giménez-Forcada²

1 Dpto. de CC. Analíticas. Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED. 20040 Madrid.

manu.garo@ccia.uned.es

2 Dpto. Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Salamanca. 37001

Salamanca. e.gimenez@igme.es

Resumen: El trabajo caracteriza el tipo de conexión hidráulica entre las diferentes masas de agua subterránea de un área localizada en el sur de la Cuenca del Duero, explicando su evolución piezométrica desde el año 1970 hasta la actualidad. Asimismo plantea la existencia de dos niveles acuíferos (superficial y profundo) separados por un nivel de baja permeabilidad y la relación entre ambos. Finalmente analiza la influencia del flujo subterráneo como agente movilizador del arsénico de origen natural en el agua subterránea, para concluir que su presencia no puede relacionarse con un efecto de dispersión desde una fuente puntual única.

Palabras clave: MAS sur Cuenca del Duero, piezometría, flujo agua subterránea, distribución de As.

Abstract: *The work characterizes the type of hydraulic connection between the different groundwater bodies of an area located in the south of the Duero Basin, explaining its piezometric evolution from 1970 to the present. It also states the existence of two aquifer levels (superficial and deep) separated by a level of low permeability and the relationship between the two. Finally, the influence of the groundwater flow as a mobilizing agent of arsenic of natural origin in the groundwater is analyzed, to conclude that its presence can not be related to a dispersion effect from a single point source.*

Key words: GWB south Duero Basin, piezometry, groundwater flow, As distribution.

INTRODUCCIÓN

Las altas concentraciones de arsénico y otros elementos traza en el agua de bebida pueden suponer un riesgo para la salud humana e imponer restricciones a la disponibilidad de agua apta para consumo. Las aguas subterráneas de algunas zonas de la Cuenca del Duero representan un buen ejemplo de aguas con problemas de potabilidad debidos a la presencia de elementos potencialmente tóxicos de origen natural en concentraciones superiores a los valores permitidos. Algunas investigaciones realizadas hasta la fecha, atribuyen la presencia de arsénico a las reacciones agua-sedimento en determinado ambiente de pH y redox (Gómez *et al.*, 2006; Pardo *et al.*, 2008; Delgado *et al.*, 2009; Giménez-Forcada & Smedley, 2014). Trabajos realizados en la Cuenca del Duero relacionan la distribución de arsénico en las aguas subterráneas con la estructura y morfología de la cuenca, relacionando su presencia con mineralizaciones asociadas al conjunto ígneo-metasedimentario del basamento de la cuenca (Giménez-Forcada & Smedley, 2014). El Dique dolerítico Messejana-Plasencia, que atraviesa la Península desde el sur de Portugal hasta desaparecer bajo los sedimentos de la Cuenca del Duero en la provincia de Ávila, denota una clara influencia sobre la presencia de As en las aguas de su entorno en acuífero detrítico terciario de la Cuenca del Duero. Algunos trabajos muy recientes también plantean la existencia de flujos de hidrotermales del basamento

fracturado enriquecidos en ciertos elementos traza (Giménez-Forcada *et al.*, 2016; Rey-Moral *et al.*, 2016;).

El trabajo estudia el flujo subterráneo en los acuíferos localizados al sur del río Duero. La zona representa una cuenca sedimentaria rellena de materiales procedentes de la erosión del Sistema Central, que fueron depositados durante el Paleógeno y Neógeno. Los materiales de relleno incluyen conglomerados, areniscas, margas, limonitas y yesos, con una disposición clásica de este tipo de cuencas; con las facies más groseras próximas a la Sierra, y las más finas y evaporíticas hacia el río Duero. En conjunto, los sedimentos terciarios conforman dos tramos acuíferos, uno superior y otro inferior, separados por niveles discontinuos de baja permeabilidad que actúan como acuitardos (IGME, 1981). Según el Plan Hidrológico de Cuenca (2015-2021), las masas de aguas subterráneas (MAS) definidas entre el río Duero y el Sistema Central, se denominan, de oeste a este: Salamanca, Tierras de Vino, Medina del Campo, Los Arenales y Cantimpalos, respectivamente (Figura 1).



FIGURA 1. Localización de las MAS definidas al sur de la cuenca del Duero según el PHC (2015-2021).

El objetivo de este trabajo es conocer y valorar cómo influye el flujo de agua subterránea en la distribución del arsénico presente en las masas de agua de esta parte meridional de la Cuenca del Duero. El trabajo estudia el funcionamiento hidrogeológico de la zona desde los años 70 hasta la actualidad, estableciendo relaciones entre las diferentes MAS y entre los niveles acuíferos superficial y profundo.

METODOLOGÍA

Para interpretar el flujo subterráneo y poder conocer cómo influye en la distribución de As, se han dibujado mapas de isopiezas de los tramos acuíferos superficial y profundo, correspondientes a octubre de 2009, febrero 2010, septiembre 2012 y febrero 2013. Para cada año hidrológico se seleccionaron dos fechas: septiembre-octubre, que representa la situación de aguas más bajas tras la época estival de máxima explotación, y febrero, fecha en la que los bombeos de agua subterránea son menores y el acuífero se encuentra en régimen permanente.

La distribución de As en las aguas subterráneas en todos los niveles acuíferos corresponde a la red de observación de más de 300 puntos de agua desarrollada en el proyecto HidroGeoTox

(IGME 2013-2017) formada por manantiales y sondeos pertenecientes al conjunto detrítico terciario de la Cuenca del Duero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento hidrogeológico de los acuíferos de la margen sur del río Duero viene siendo estudiado con detalle desde la década de los años 70. Así por ejemplo, el trabajo del IGME (1981) analizaba la evolución piezométrica del periodo 1972-1981 y diferenciaba dos niveles acuíferos, uno superior y otro inferior. La unidad o nivel superior estaba referida a pozos de profundidades comprendidas entre 40 y 100 m, y se comportaba principalmente como acuífero libre o con un ligero confinamiento. La unidad inferior, claramente en régimen de confinamiento (o semiconfinamiento), quedaba definida por información de pozos perforados con más de 200 m de profundidad. Las unidades superior e inferior están separadas por un nivel intermedio de baja permeabilidad, discontinuo y de espesor variable, formado fundamentalmente por limos y arcillas, y localizado a profundidades de entre unos 130-200 m. Según se interpreta de los mapas de isopiezas realizados en el periodo 1972 - 1981, en esas fechas la unidad hidrogeológica superior tenía conexión hidráulica en toda la superficie comprendida entre el río Duero y el Sistema Central, que incluía las actuales MAS de Salamanca, Tierras de Vino, Medina del Campo, Los Arenales y Cantimpalos (Figura 1). Para ese mismo periodo temporal el acuífero profundo tenía continuidad hidrogeológica entre todas las MAS, salvo con la MAS Cantimpalos que no se estudiaba.

Actualmente no existe continuidad hidráulica entre todas las MAS. Según el funcionamiento hidrogeológico es posible distinguir tres zonas: la zona 1 que estaría formada por las MAS Tierra del Vino, Medina del Campo y Los Arenales, la zona 2 que incluiría sólo la MAS de Salamanca y, la zona 3 formada únicamente por la MAS de Cantimpalos (Figura 1). Al interpretar y comparar los mapas de isopiezas correspondientes al periodo comprendido entre octubre 2009 y febrero 2013 de estas zonas, no se observaron cambios significativos en la dirección y sentido del flujo subterráneo. El comportamiento general de flujo en cada una de ellas es el siguiente:

La **zona 1**, también conocida como la Región de los Arenales o Sistema acuífero nº 8, según la terminología clásica, ocupa el área central del área estudio. Presenta continuidad hidráulica desde su límite sur, en el borde del Sistema Central, hasta el límite norte definido por el mismo río Duero. Su recarga se produce por infiltración directa del agua lluvia y por infiltración desde los ríos que la atraviesan procedentes de la sierra, sin descartar la escorrentía superficial y subterránea que recibe del basamento ígneo y metamórfico fisurado. El flujo subterráneo de los acuíferos superficial y profundo tiene el mismo sentido, con una componente general hacia el norte en la parte más meridional, cambiado hacia el NNW en las proximidades del río Duero, que representa la principal zona de descarga natural del acuífero. El descenso del nivel piezométrico acumulado medio de los acuíferos entre octubre 2009 y febrero 2013, se estima en 84 m para el acuífero superficial, y en 70 m en el profundo.

La interpretación del mapa de isopiezas del acuífero profundo indica que existe una zona de baja permeabilidad en el sector suroriental de la MAS de los Arenales, situada al norte de la localidad de Adanero. En esta zona de baja permeabilidad las isopiezas están más próximas entre sí, señalando la presencia de una barrera natural que ralentiza el flujo de agua subterránea entre las zonas sur y norte (Figura 2).

La MAS de Salamanca (**zona 2**) se localiza en el borde suroccidental de la zona de trabajo y se corresponde parcialmente con el antiguo Sistema acuífero nº 12. Los acuíferos superficial y

profundo de esta MAS tienen un comportamiento independiente. El acuífero superficial presenta un gran cono de bombeo en el entorno del río Tormes y no tiene conexión hidráulica con las MAS colindantes. La recarga de esta MAS se produce principalmente por infiltración directa del agua de lluvia, por escorrentía procedente del macizo cristalino, y por infiltración desde el río Tormes. La mayor parte de la descarga tiene relación con bombeos de agua subterránea para regadío. El flujo subterráneo del acuífero profundo tiene una componente hacia el NNE y presenta cierta conexión hidráulica con la MAS de Medina del Campo. El flujo en la MAS de Salamanca es vertical descendente, donde el acuífero superficial recarga el acuífero profundo (Figura 2a). Entre octubre 2009 y febrero 2013 el descenso del nivel piezométrico medio en la zona 2 fue de 3 m en el acuífero superficial, y de 5 m en el profundo.

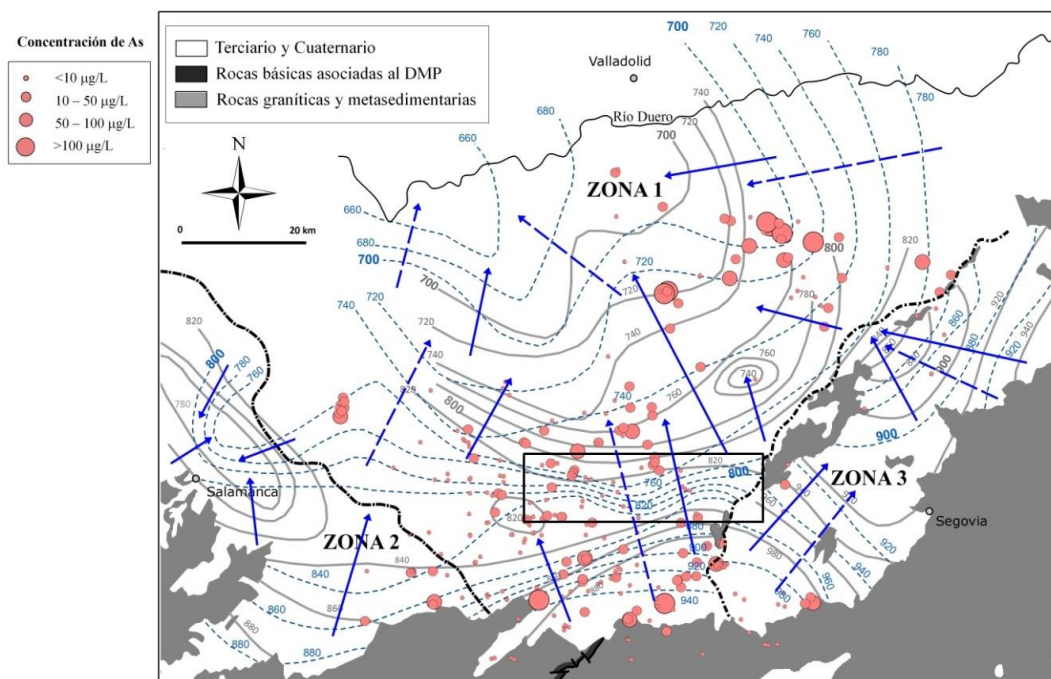


FIGURA 2. a) Relación entre la piezometría del acuífero profundo (en línea discontinua) y superficial (línea continua), correspondiente a octubre de 2009 en las zonas 1, 2 y 3, y distribución de As en la zona de estudio. El 'rectángulo' señala la zona de baja permeabilidad identificada en la Zona 1.

La MAS de Cantimpalos (**zona 3**) se sitúa en borde oriental de la zona de estudio y se corresponde con el anteriormente denominado Sistema acuífero nº 11. Ocupa una cubeta estructural con límites definidos por materiales paleozoicos y mesozoicos, rellena por sedimentos detríticos del Mioceno. El flujo subterráneo tanto de los acuíferos superficial y profundo, tiene sentido hacia el NNE en la parte más meridional, y hacia el NW en la mitad norte donde drena hacia la MAS Los Arenales, a través de una zona muy restringida. La variación acumulada del nivel piezométrico medio entre octubre 2009 y febrero 2013, fue de – 7 m en el acuífero superficial y de +3 m en el profundo. La recarga de agua subterránea de esta MAS se produce por infiltración directa de la precipitación caída sobre la zona, y por escorrentía procedente de los bordes del macizo cristalino. La descarga se realiza por bombeos y por drenaje natural hacia la MAS de los Arenales. Debido al carácter de semiconfinamiento del acuífero profundo, su nivel piezométrico se sitúa por encima del acuífero superficial en varios puntos. La morfología de esta MAS corresponde a una cubeta tectónica, que mantiene cierta independencia de las anteriores (Figura 2).

En esta región de la Cuenca del Duero, los bombeos intensivos de agua subterránea que se vienen realizando desde hace más de 40 años, ha producido descensos puntuales del nivel piezométrico (según la zona considerada) de entre unos 40 y 80 m en el acuífero superficial, y de entre unos 20 y 80 m en el acuífero profundo. Esta explotación intensiva ha producido la recirculación y mezcla del agua subterránea entre los acuíferos superficial y profundo, contribuyendo a la dispersión y mezcla de aguas con distintas características físico-químicas.

Para comprobar la posible relación entre el flujo de agua subterránea y la distribución de concentración de As en la misma se ha representado un mapa de piezometría del acuífero superficial y profundo correspondiente a octubre de 2009 (fecha considerada representativa de la situación en los últimos años y en régimen permanente), y las principales líneas de flujo. Asimismo se ha representado la distribución de la concentración de As en de la red de observación (Figura 2). La interpretación conjunta de ambos mapas no parece indicar que exista una relación entre la dispersión de este metaloide en el agua subterránea y el sentido del flujo del agua subterránea, sino más bien un patrón de distribución relacionado con algunas de las principales líneas de fracturación.

CONCLUSIONES

El estudio del flujo subterráneo parece indicar que la distribución de arsénico no puede atribuirse a una dispersión producida por flujos superficiales ni flujos regionales profundos. Su presencia no responde a un modelo de dispersión desde una fuente puntual única.

La zona de baja permeabilidad relacionada con el acuífero profundo situada al sur de la MAS de los Arenales, representa una barrera natural que separa dos zonas con diferente concentración de As, una al norte y otra al sur. La distribución de As en la zona al norte de la barrera tendría relación con áreas de máximas extracción de agua subterránea. Al sur de dicha barrera, la presencia de As parece alinearse con fracturas que desde el Sistema Central se prolongan hacia la Cuenca por debajo de los sedimentos terciarios.

REFERENCIAS

- PHC (2015). Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero (2015-2021). Memoria del Plan Hidrológico de Cuenca. Ministerio de Agricultura, alimentación y Medio Ambiente.
- Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de Aguas DGOHCA. (2003). Estudio del contenido de arsénico en la zona central de la depresión del Duero. Estudio realizado por CGS, informe nº 3/2003.
- Fletcher, K., Ayala, C., Cabanillas, P.L.M., Fairhead, J.D., Lei, K., Salem, A., (2011). A new higher resolution magnetic database for resource evaluation. *First Break* 29: 41–47.
- Giménez-Forcada, E.; Smedley, P.L. (2014). Geological factors controlling occurrence and distribution of arsenic in groundwaters from the southern margin of the Duero Basin, Spain. *Environ. Geochem. Health*, 36: 1029-1047.
- Giménez-Forcada, E., Timón-Sánchez, S.M., Vega-Alegre, M., (2016). Influence of hydrothermal fluids enriched in As and F on the chemistry of groundwaters of the Duero Basin. En: *Arsenic Research and Global Sustainability*, Proceedings of the Sixth International Congress on Arsenic in the Environment (As2016).
- Instituto Geológico y Minero de España, IGME (1981). Informe IGME: Evolución piezométrica de los acuíferos en la Cuenca del Duero (Periodo 1972-1981).
- Sahún, B., Gómez, J.J., Lillo, J. Del Olmo, P. (2004). Arsénico en aguas subterráneas e interacción agua-roca: un ejemplo en la cuenca terciaria del Duero, Castilla y León. España. *Rev. Soc. Geol. España*, 17: 137-155.

Enriquecimiento de arsénico en niveles limosos de la Cuenca del Duero

A. Fernández Fernández¹, S.M. Timón-Sánchez² y E. Giménez-Forcada³

1 Dpto. de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca 37008 Salamanca; aff@usal.es

2 Dpto. Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Salamanca. 37001 Salamanca. s.timon@igme.es

3 Dpto. Investigación en Recursos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Salamanca. 37001 Salamanca. e.gimenez@igme.es

Resumen: El estudio mineralógico y geoquímico de once muestras tomadas en diferentes niveles de un sondeo, de 500 m de profundidad, en sedimentos neógenos del sector sur de la Cuenca del Duero, ha permitido establecer que dichos sedimentos están constituidos fundamentalmente por porcentajes variables de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y filosilicatos (illita, caolinita y esmectita). Los niveles más limosos y/o arcillosos y con mayores porcentajes en filosilicatos presentan contenidos en As más elevados, siendo estos contenidos localmente anómalos en los niveles más limosos. El As se encuentra asociado a diferentes minerales: filosilicatos, óxidos de Fe y/o Ti y de Mn y, de forma ocasional, sulfuros.

Palabras clave: arsénico, niveles limosos, mineralogía, geoquímica, Cuenca del Duero

Abstract: *A mineralogical and geochemical research work was carried out on eleven samples collected from a borehole 500 m deep performed in the neogene sediments of the southern sector of the Duero Basin. This study has allowed to establish these sediments contain variable amounts of quartz, K-feldspar, plagioclase and phyllosilicates (illite, kaolinite and smectite). Silt- and/or clay-rich beds, with higher percentages of phyllosilicates, show the highest levels of As. These silty beds locally contain anomalous concentrations of As. As is mainly associated with phyllosilicates, Fe and/or Ti and Mn oxides, and sometimes with sulphides.*

Key words: *arsenic, silt-rich beds, mineralogy, geochemistry, Duero Basin*

INTRODUCCIÓN

Los altos niveles de arsénico detectados en las aguas subterráneas en la Cuenca del Duero y sus implicaciones en la salud, ha dado lugar a numerosas investigaciones geológicas, siendo una de ellas la caracterización geológica y geoquímica de los sedimentos neógenos de la Depresión del Duero enriquecidos en As, dado que entre los ambientes geológicos en los que se da la contaminación natural de aguas subterráneas por arsénico están las cuencas aluviales terciarias y cuaternarias, junto con los procesos geotermales y los depósitos minerales, a lo que se pueden sumar causas antropogénicas (Boyle et al, 1998; Smedley y Kinniburgh, 2002).

La Cuenca del Duero ocupa la parte central de Castilla y León y está constituida por el relleno de materiales terciarios y cuaternarios. Estudios previos realizados en la zona central de esta depresión (e.g. Sahún *et al.*, 2004), en los que se han levantado diferentes series estratigráficas y se han realizado algunos sondeos hacia el sector norte, reflejan una coincidencia entre las mayores concentraciones de As de las aguas subterráneas y en los

sedimentos encajantes, lo que sugiere que estos sedimentos podrían funcionar como una fuente del As.

En este contexto, se planteó la realización de un estudio geológico, mineralógico y geoquímico detallado de los sedimentos de un nuevo sondeo, de 500 m de profundidad, ubicado en el sector sur de la Cuenca del Duero, con el objetivo de establecer la relación entre los contenidos de As, la granulometría y las fases minerales que constituyen dichos sedimentos. En este sondeo se han cortado materiales del Cuaternario y del Neógeno, constituidos en general por arenas arcósicas y fangos arenosos con intercalaciones margosas y carbonatadas de diferente potencia (Figura 1).

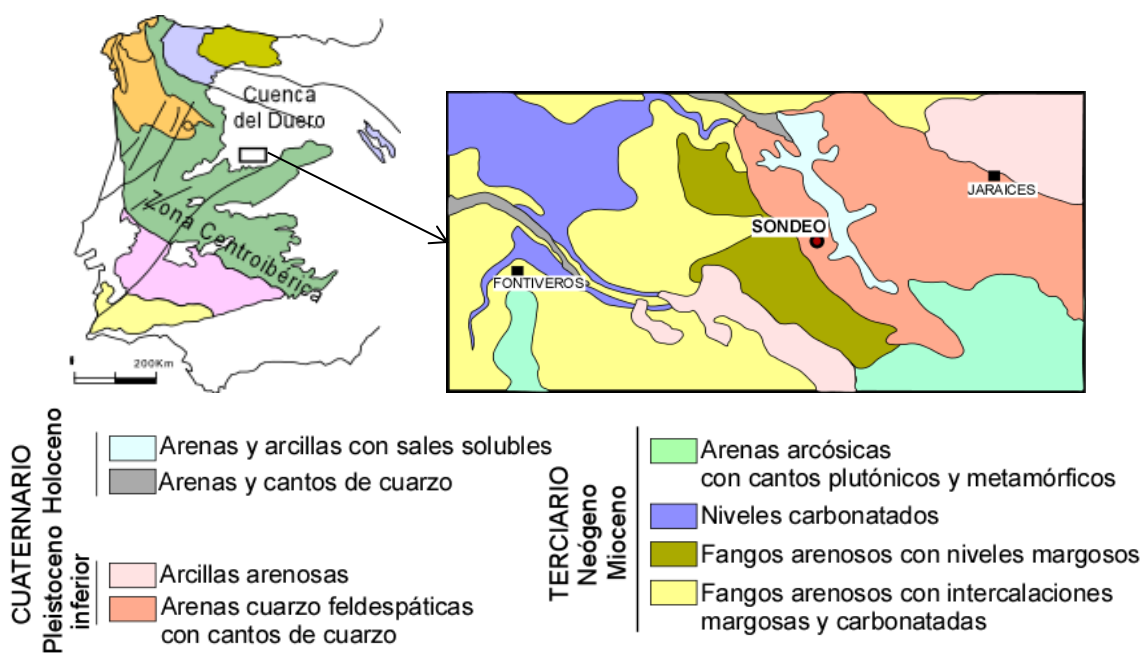


FIGURA 1. Situación geológica de la zona de estudio mostrando la ubicación del sondeo (tomado del Mapa Geológico de España 1: 50.000, Agueda Villar et al., 1980).

METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para dicho estudio se tomaron un total de 11 muestras a diferentes profundidades (Figura 2). En primer lugar se ha realizado un estudio granulométrico, que ha permitido determinar los porcentajes de las fracciones grava, arena, limo y arcilla en cada muestra.

Para el estudio mineralógico, se ha realizado un análisis mediante difracción de rayos X (DRX). Primero sobre las muestras en polvo desorientado. Posteriormente, para la identificación de los minerales de la arcilla, se ha realizado una separación de la fracción inferior a 2 μm , y se han obtenido los difractogramas sobre los agregados orientados AO sin tratar, solvatados con etilenglicol y calentados a 550°C. Finalmente, para la caracterización de la fracción limo, se ha separado la fracción inferior a 20 μm en las dos muestras con mayor porcentaje de limo y se han preparado AO para su análisis. El estudio mineralógico se ha completado mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) (se han obtenido imágenes electrónicas y mapas de rayos X de distribución de elementos) y microsonda electrónica (ME) (análisis químicos puntuales) sobre láminas transparente-pulidas realizadas a partir de la

muestra en grano de la fracción inferior a 20µm, en aquellos campos seleccionados bajo microscopio óptico de polarización (MOP). Para el estudio geoquímico, se han determinado los elementos mayores y 19 elementos traza, mediante fluorescencia de rayos X, con la excepción del Na que ha sido determinado mediante absorción atómica y del S determinado mediante analizador elemental EL TRA CS-800.

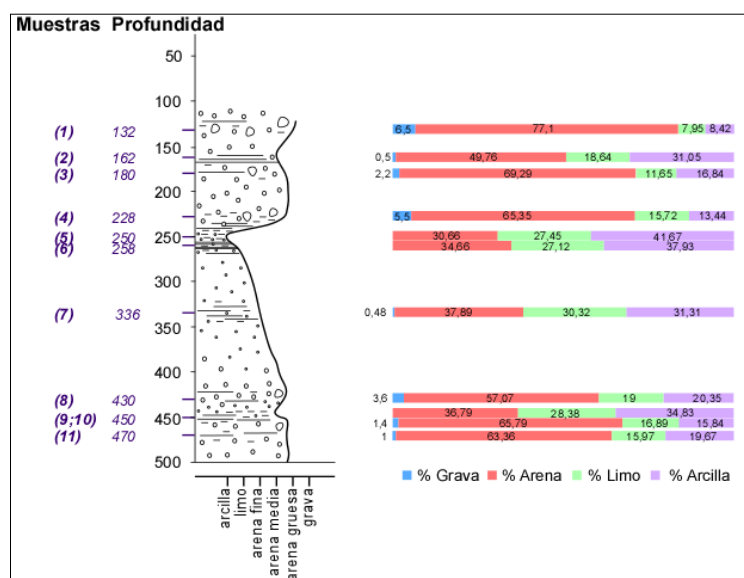


FIGURA 2. Columna esquemática del sondeo, mostrando la situación de las muestras estudiadas y los porcentajes de las diferentes fracciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis granulométrico pone de manifiesto que las muestras 7 y 9 son las más limosas y las muestras 5 y 6 las que presentan mayores porcentajes en la fracción arcilla (Figura 2).

Mineralógicamente todas las muestras están constituidas por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y filosilicatos (illita, caolinita y esmectita), identificados mediante difracción de rayos X sobre polvo desorientado y agregados orientados de las fracciones menores de 2 µm y 20 µm. Los porcentajes de estos minerales varían de unas muestras a otras y también en cada fracción de una misma muestra. Así, las muestras con mayor porcentaje en limo (7 y 9) y en arcilla (5 y 6), presentan porcentajes más altos en filosilicatos: illita, caolinita y esmectita. Además, la muestra 7 se encuentra enriquecida en cuarzo en la fracción limo (Figura 3).

El estudio geoquímico pone de manifiesto que la concentración As que presentan la mayoría de las muestras (7.2 a 31.1 ppm) se encuentra por encima del valor medio del As en la corteza continental superior (1.5 ppm, Taylor y McLennan, 1995), presentando únicamente la muestra 7 un contenido anómalo (31,1 ppm), superior al valor de fondo establecido por Sahun *et al.* (2004) en el zona central de la Cuenca del Duero (28.50 ppm).

En general, las muestras con mayor porcentaje en las fracciones limo y/o arcilla presentan los contenidos más altos en As. La muestra 7, con contenido anómalo en As, ofrece el mayor porcentaje de la fracción limo (Figura 4). Igualmente, el contenido en As es mayor al aumentar los porcentajes en filosilicatos, contrariamente a lo que ocurre con los contenidos en cuarzo, en la roca total y en la fracción menor a 2 µm (Figura 5).

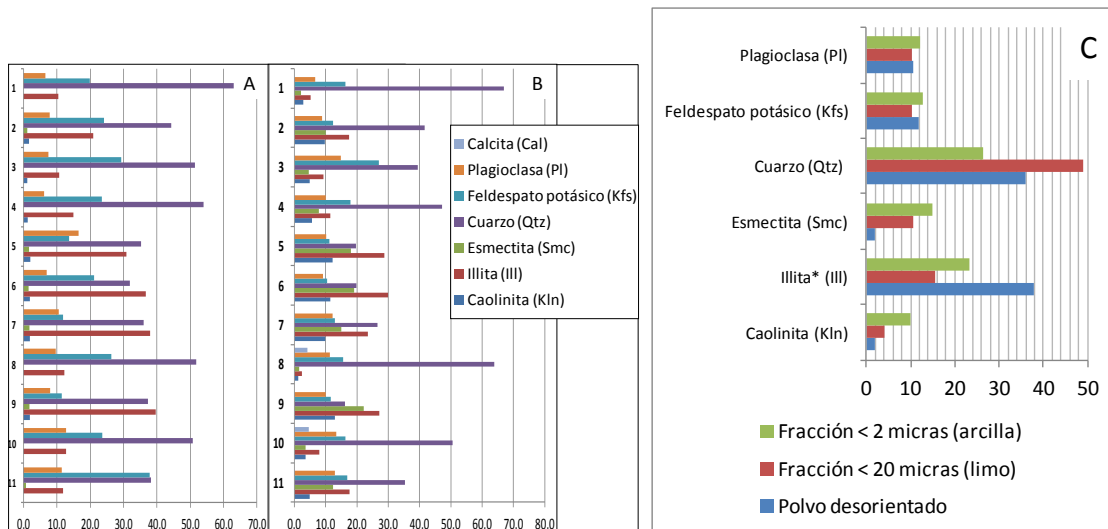


FIGURA 3. Representación gráfica de la composición mineralógica semicuantitativa de las 11 muestras estudiadas a partir de los difractogramas de polvo desorientado (A) y de la fracción $< 2 \mu\text{m}$ (B) y para el caso particular de la muestra 7 (C) comparación de la composición mineralógica de la muestra total y de las fracciones inferiores a 20 y 2 μm

El As presenta coeficientes de correlación significativos y positivos con el Fe (0,595), Ti (0,589), Mn (0,667), y ligeramente más bajo con el Al (0,433), así como con determinados elementos en concentraciones traza como el S (0,697) y el V (0,657), mientras que su correlación con el Si es negativa (-0,488).

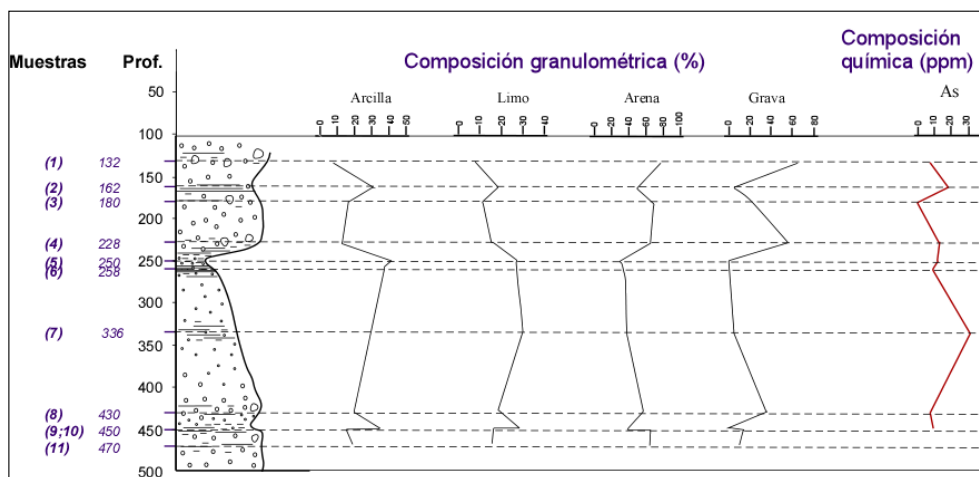


FIGURA 4. Representación gráfica de la composición granulométrica y del contenido en As de las muestras tomadas en los sedimentos neógenos a diferentes profundidades.

Finalmente, en el estudio mediante MEB, los mapas de rayos x para los elementos anteriores ponen de relieve que el As no se asocia a una única fase mineral (Figura 6), lo que se confirma con los análisis químicos puntuales de ME en los que todos los minerales analizados (silicatos y óxidos) presentan contenidos en As significativos en su composición: illita, plagioclase, ilmenita y rutilo (hasta 470, 136, 439 y 9089 ppm, respectivamente).

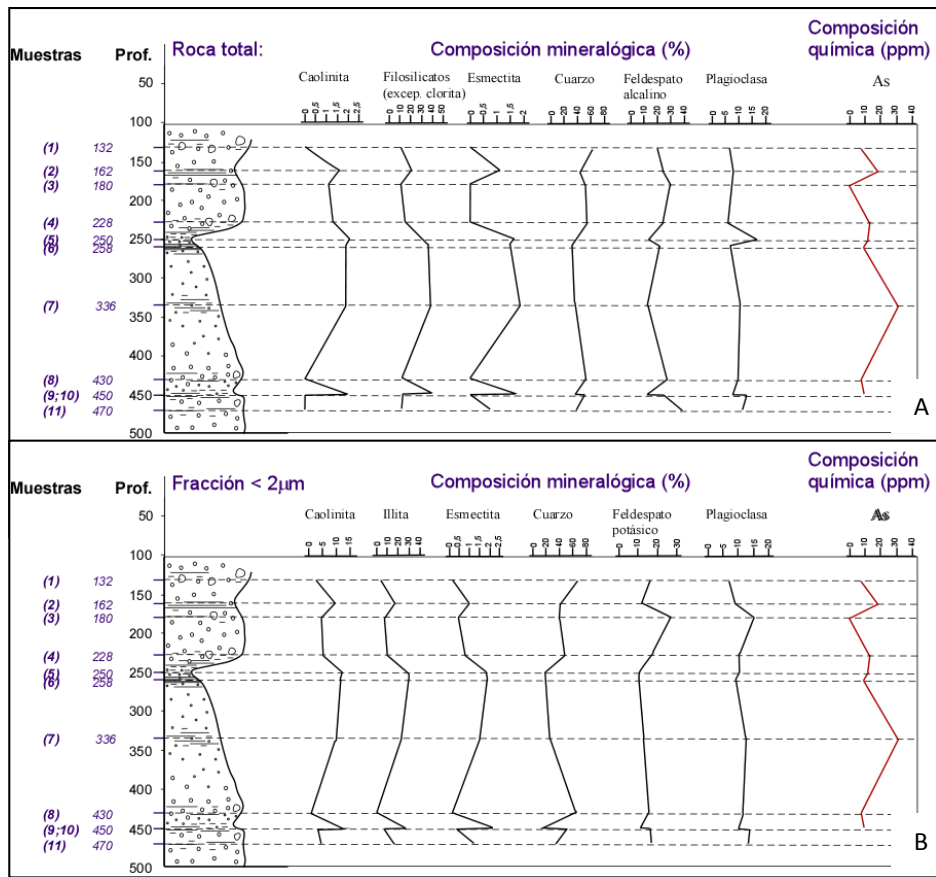


FIGURA 5. Representación gráfica de la composición mineralógica y del contenido en As de las muestras tomadas en los sedimentos neógenos a diferentes profundidades: A) roca total y B) fracción inferior a 2 µm.

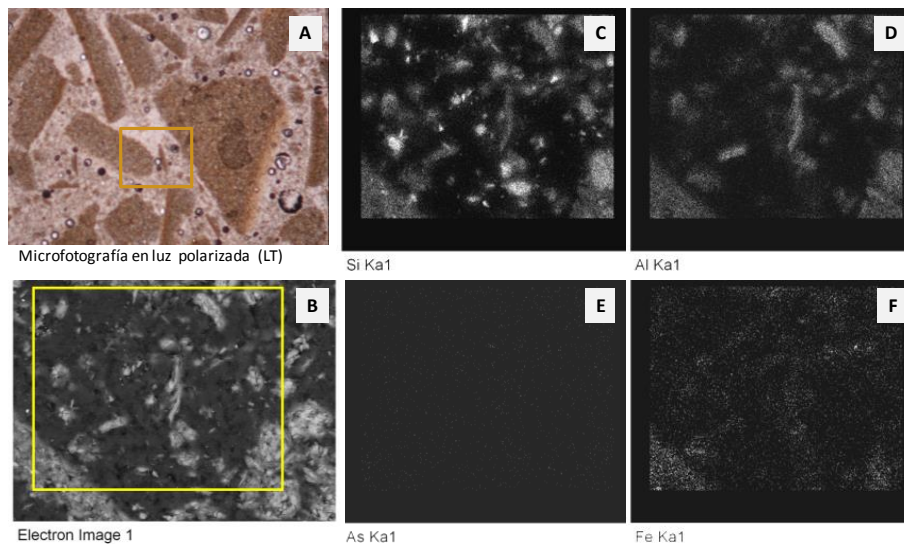


FIGURA 6.- Microfotografías tomadas sobre lámina-transparente pulida: A) con MOP, en luz transmitida (LT) y nículos paralelos (NP), B) con MEB (electrones retrodispersados) y C, D E y F mapas de rayos X con la distribución del Si, Al, As y Fe, respectivamente.

CONCLUSIONES

El estudio granulométrico, mineralógico y químico realizado en once muestras de un sondeo que corta los sedimentos neógenos del sector sur de la Cuenca del Duero, ha permitido obtener las siguientes conclusiones:

- 1) Los sedimentos están constituidos por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y filosilicatos (illita, caolinita y esmectita) en cantidades variables.
- 2) Los contenidos en As son más elevados en los niveles más limosos y/o arcillosos y con mayores porcentajes en filosilicatos (caolinita, illita y esmectita).
- 3) Los niveles más limosos presentan contenidos anómalos en As. La muestra con mayor concentración de arsénico (7) presenta un alto porcentaje de cuarzo en la fracción limo.
- 4) El As se encuentra asociado a diferentes minerales: filosilicatos, óxidos de Fe y/o Ti y de Mn y, de forma accesoria, sulfuros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Instituto Geológico y Minero de España. Proyecto de Investigación HidroGeoTox. (Ref. IGME-2303).

REFERENCIAS

- Agueda Villar, J.A., Colmenero Navarro, J.R., Sanchez de la Torre, L.M., Goy Goy, J.L., Zazo Cardeña, C. (1982). Hoja 480. Mapa Geológico de España. E, 1:50.000. IGME.
- Boyle, D.R., Turner, R.J.W., Hall, G.E.M., 1998. Anomalous arsenic concentrations in groundwaters of an island community, Bowen Island, British Columbia. *Environ. Geochem. Health*. 20: 199–212.
- Sahún, B., Gómez, J.J., Lillo, J. del Olmo, P. (2004). Arsénico en aguas subterráneas e interacción agua-roca: un ejemplo en la cuenca terciaria del Duero, Castilla y León. España. *Rev. Soc. Geol. España*. 17: 137-155.
- Smedley, P.L. y Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem*. 17: 517-568.
- Taylor, S.R. y McLennan, S.M. (1995). The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews in Geophysics*. 33: 241-265.