

II JORNADAS DE GEOLOGÍA MÉDICA EN ESPAÑA

Octubre de 2017



Elena Giménez-Forcada
Rafael Delgado Calvo-Flores
Editores
2018



Ciencia para la salud y el bienestar



II Jornadas de Geología Médica en España (2. 2017. Salamanca, Madrid y Granada)

II Jornadas de Geología Médica en España [Recurso electrónico]: octubre de 2017: ciencia para la salud y el bienestar/Elena Giménez-Forcada, Rafael Delgado Calvo-Flores, editores. – [Madrid]: Instituto Geológico y Minero de España, 2018

71p.: il.; formato electrónico

ISBN: 978-84-9138-073-3

1.medicina 2. congreso 3. España I. Instituto Geológico y Minero de España, ed. II. Giménez-Forcada, Elena, ed. III. Delgado Calvo-Flores, Rafael, ed.

551:61(460)(042.3)

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

Libro completo:

Giménez-Forcada, E., Delgado, R. (coord.) (2018). *Actas II Jornadas de Geología Médica en España: ciencia para la salud y el bienestar*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 71 p.

Capítulo de libro:

Luque, J.A.; Pardo, E.; Chica, M.; Grima, J.; Rodríguez, V.; Grima, C. (2018). Análisis espacial de variables en Geología Médica. En *Actas II Jornadas de Geología Médica en España: ciencia para la salud y el bienestar* (E. Giménez-Forcada, R. Delgado, coord.). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 27-31.

ACTAS - II JORNADA DE GEOLOGÍA MÉDICA EN ESPAÑA. Ciencia para la salud y el bienestar.
Elena Giménez Forcada • Rafael Delgado Calvo-Flores

Edita: Instituto Geológico y Minero de España

ISBN: 978-84-9138-073-3

NIPO: 064-18-020-2

Depósito legal: M-37989-2018

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

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

II JORNADAS DE GEOLOGÍA MÉDICA EN ESPAÑA

Ciencia para la salud y el bienestar

	<i>página</i>
PRÓLOGO	
Diego Fridman. Presidente de la Asociación Internacional de Geología Médica, IMGA	5
PRESENTACIÓN	
Elena Giménez Forcada. Instituto Geológico y Minero de España, IGME. Presidente IMGA-España. Vicepresidente de la Asociación Internacional de Geología Médica, IMGA	7
RESUMEN DE LAS CONFERENCIAS IMPARTIDAS POR JOSE ANTONIO CENTENO	9
Importancia de la geología médica en la salud pública y efectos en la salud de las partículas de polvo	11
<i>José A. Centeno. US Food and Drug Administration, FDA</i>	
Desafíos reglamentarios para dispositivos médicos: modernización de la biocompatibilidad	13
<i>José A. Centeno, US Food and Drug Administration, FDA</i>	
PRESENTACIONES DEL ENCUENTRO CIENTÍFICO EN LA FACULTAD DE FARMACIA DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA	15
Calidad natural de las aguas subterráneas desde la perspectiva de la Geología Médica. Un caso de estudio en el sur de la Cuenca del Duero	17
<i>Elena Giménez Forcada, Instituto Geológico y Minero de España, IGME</i>	
Algunas aportaciones a la Geología Médica desde la reflexión ética	25
<i>Pilar Pena Búa, Universidad de Loyola Andalucía, ULoyola</i>	
Análisis espacial de variables en Geología Médica	27
<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>Juan Grima, Instituto Geológico y Minero de España, IGME.</i> <i>Vicente Rodríguez,</i> <i>Carlos Grima, Universidad Politécnica de Madrid, UPM</i>	
Iberulitos, una partícula atmosférica gigante lanzadera de material biológico (¿infeccioso?) a grandes distancias.	35
<i>Jesús Párraga, Universidad de Granada, UGR</i> <i>Ana Cervera-Mata, Universidad de Granada, UGR</i> <i>María Virginia Fernández-González, Universidad de Granada, UGR</i> <i>Juan Manuel Martín-García, Universidad de Granada, UGR</i> <i>Alberto Molinero-García, Universidad de Granada, UGR</i>	

Implicaciones sanitarias del polvo atmosférico de la ciudad de Granada (España) a partir de los contenidos de REE y la morfología SEM.	45
<i>Alberto Molinero-García, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>Juan Manuel Martín-García, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>María Virginia Fernández-González, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>Rafael Delgado, Universidad de Granada, UGR</i>	
Biofortificación agronómica de alimentos vegetales mediante residuos de la industria cafetera	55
<i>Ana Cervera Mata, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>José Ángel Rufián Henares, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>Silvia Pastoriza de la Cueva, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>Miguel Navarro Alarcón, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>Gabriel Delgado Calvo-Flores, Universidad de Granada, UGR</i>	
De la Farmacocryctología a las terapias balnearias avanzadas. Ciento sesenta y siete años de Docencia e Investigación en Geofarmacía en la Universidad de Granada	63
<i>Rafael Delgado, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>María Virginia Fernández-González, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>Juan Manuel Martín-García, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>Alberto Molinero-García, Universidad de Granada, UGR</i>	
<i>Jesús Párraga, Universidad de Granada, UGR</i>	

PROLOGO

Cuando me propusieron escribir este prólogo, me sorprendí al advertir la similitud entre el abordaje de la Geología Médica, que continuamente atraviesa en ambos sentidos el puente que vincula a las Ciencias de la Salud con las Ciencias de la Tierra, y la estructura del libro, que nos deleita con un despliegue itinerante de actividades en Salamanca, Madrid y Granada.

En el libro se destacan las contribuciones del Dr. José Antonio Centeno, cofundador y ex presidente de IMGA y las investigaciones de los participantes.

Desde la Asociación Internacional de Geología Médica celebramos esta iniciativa del Capítulo de España, liderado para la Dra. Elena Giménez Forcada, que nos enseña con esta propuesta que debemos ser perseverantes para lograr los objetivos propuestos.

Felicitemos también a los organizadores, investigadores y a todos los involucrados en la Jornada por la tarea realizada y los alentamos a continuar trabajando para que la disciplina se expanda y otros países se vean reflejados y puedan replicar esta valiosa iniciativa.

Recomiendo una lectura atenta, que permita despertar el interés y reconocer la necesidad de promover la investigación interdisciplinaria para mejorar la calidad de vida de la población.

Quedo a vuestra disposición para colaborar en futuros emprendimientos.

Dr. Diego Fridman
Presidente de la Asociación Internacional de Geología Médica
Internacional Medical Geology Association (IMGA)
<http://www.medicalgeology.org>

PRESENTACIÓN

Las II Jornadas de Geología Médica en España tuvieron un carácter itinerante. Se desarrollaron entre tres ciudades: Salamanca, Madrid y Granada. En varios centros de Salamanca, el Dr. José Antonio Centeno, co-fundador de la Asociación Internacional de Geología Médica (*International Medical Geology Association*, IMGA) y expresidente de esta misma asociación, que actualmente desarrolla su actividad como directivo en la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA), impartió diversas conferencias.

Las dos primeras tuvieron lugar el 16 de octubre en la Facultad de Ciencias y, más tarde en la Facultad de Medicina y se dirigieron especialmente a los alumnos de ambas facultades, abordando el tema de la geología médica y el efecto de los materiales y procesos geológicos en la salud. El día siguiente el Dr. Centeno disertó ante el personal del Hospital Clínico de esta misma ciudad sobre los retos para la regulación de dispositivos médicos y la modernización de la biocompatibilidad. En Madrid, la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía acogió, en su salón de grados, la disertación del Dr. Centeno. Fue un acto organizado en colaboración con el Instituto Geológico y Minero de España y dirigido a profesores y alumnos de la Escuela, así como a personal investigador y técnico del Instituto.

El itinerario finalizó en la Universidad de Granada, donde el equipo liderado por el Catedrático Dr. Rafael Delgado Calvo-Flores, en colaboración con la real Academia de Medicina de Andalucía Oriental, Ceuta y Melilla (RAMAO), organizó un encuentro científico que tuvo lugar en la Facultad de Farmacia de esta universidad. El acto finalizó con el nombramiento del Dr. Centeno como socio honorario de la RAMAO.

Estas Actas recogen un resumen de las contribuciones de José A. Centeno, que cedió su tiempo y esfuerzo para dar a conocer la Geología Médica en nuestro país. Además, en una segunda parte, ofrecen las investigaciones de los participantes en el encuentro científico celebrado en la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada, en un marco abierto que tiene como centro la Geología Médica y sus múltiples facetas.

Confiamos que este libro logre ayudar a difundir una vez más esta disciplina en España y que contribuya a incrementar el conocimiento en este campo de la ciencia en el que las Ciencias de la Tierra y de la Salud encuentran un espacio común.

Dra. Elena Giménez Forcada
Instituto Geológico y Minero de España, IGME
Presidente IMGA-España
<http://www.geologiamedica.org>
Vicepresidente para CC Geológicas
Internacional Medical Geology Association (IMGA)
<http://www.medicalgeology.org>

**RESÚMENES DE ALGUNAS DE LAS CONFERENCIAS IMPARTIDAS POR J.A. CENTENO
DURANTE LAS II JORNADAS DE GEOLÓGÍA MÉDICA EN ESPAÑA (OCTUBRE DE 2017)**

Importancia de la geología médica en la salud pública, y efectos en la salud de las partículas de polvo

J. A. Centeno¹

¹ US Food and Drug Administration (FDA), co-fundador y expresidente de IMGA

En las últimas décadas, ha habido una concienciación creciente sobre los cambios ambientales naturales, en una escala que afecta a las ecologías globales. Los sistemas atmosféricos, hidrogeológicos y de producción de alimentos en todo el mundo se han transformado en formas que a veces conducen a la aparición (y/o resurgimiento) de problemas de salud en seres humanos y animales.

Aunque se reconoce la influencia de los factores geológicos naturales en un gran número de problemas ambientales y de salud pública que afectan al bienestar de miles de millones de personas en todo el mundo, falta todavía comprender en profundidad la importancia de estos factores en la distribución de patrones de salud. Este vacío, que ya empieza a llenarse, recoge la interrelación entre las investigaciones llevadas a cabo por la comunidad biomédica (especialmente en el ámbito de la salud pública) y la comunidad geocientífica y medioambiental.

La Geología Médica se define como el espacio científico que trata los impactos de los materiales y procesos geológicos naturales en la salud humana e intenta salvar esta brecha al estimular una mayor colaboración entre los investigadores.

La formación en Geología Médica implica a científicos y profesionales de diferentes campos, como la geoquímica, química, toxicología, epidemiología, farmacología, edafología, hidrogeología, geografía, salud pública, etc. que generalmente colaboran en una amplia gama de problemas de salud ambiental en la búsqueda de causas y soluciones. Entre estos problemas se encuentran los efectos a largo plazo para la salud de la exposición a elementos oncogénicos (el ejemplo más destacado es el arsénico) o la exposición a partículas que pueden originarse en polvo geogénico (natural), así como los elementos naturales presentes en aguas subterráneas y, a veces, superficiales (como arsénico, cobre, zinc y hierro). También, los oligoelementos, su bioaccesibilidad y biodisponibilidad, en los suelos, el impacto en la salud pública de procesos naturales como las erupciones volcánicas, erosiones, terremotos, tsunamis, etc., sin olvidar la exposición ocupacional a materiales naturales y radiación natural. Por lo tanto, la Geología Médica puede considerarse como una disciplina complementaria del campo de conocimiento de la medicina ambiental, que se centra en cómo el medio ambiente natural afecta a la salud. Estos impactos, tanto nocivos como beneficiosos, se conocen desde hace milenios, pero es solo en la última década que los científicos interesados en estos fenómenos han comenzado a organizar colaboraciones locales, regionales y globales y desarrollar esta nueva disciplina.

Un caso particular, son los efectos sobre la salud que ocasiona de la exposición a partículas de polvo que se han descrito ampliamente en la literatura sobre enfermedades respiratorias médicas. El contacto directo entre partículas inhaladas, potencialmente dañinas, y las vías respiratorias, finas y frágiles, pone en evidencia que el sistema respiratorio es un objetivo importante para el polvo y los agentes tóxicos. Aunque los agentes tóxicos transportados por

el polvo también pueden ejercer efectos adversos en otras partes del cuerpo, ya que se disuelven en el pulmón y se absorben en el torrente sanguíneo.

Por otra parte, no solo es necesario considerar la vía de inhalación, sino también la mayor exposición por la deposición de polvo en cultivos comestibles y en fuentes de agua potable. Por lo tanto, para establecer medidas preventivas y regulaciones para los niveles de polvo para garantizar la salud pública, es fundamental conocer los posibles efectos en la salud de la exposición ambiental al polvo.

Se necesita información geológica sobre las fuentes de polvo, los procesos que afectan la movilización y el transporte de polvo, así como información toxicológica sobre los efectos y las vías de las partículas de polvo a través de los órganos respiratorios. Además, se requieren estudios cuidadosos sobre los niveles de polvo, la composición química y la patología ambiental.

A lo largo de las presentaciones que se desarrollaron durante esta semana itinerante en diferentes centros, se discutió el impacto global de la geología médica como una disciplina emergente, proporcionando una nueva perspectiva sobre su futuro.

REFERENCIAS SUGERIDAS POR EL AUTOR

Centeno, J.A.; Finkelman, R.B.; Selinus, O. (2016). Medical Geology: Impacts of the Natural Environment on Public Health. *Geosciences*, 6, 8.

Centeno JA. (2008). Introducing a special theme issue on medical geology. *J. Environ. Monit.*, 10, 1391–1393

Olle Selinus (Ed). *Essentials of Medical Geology. Impacts of the Natural Environment on Public Health*. Chapter 24. 1st Edition. Elsevier. Academic Press. 832 pp.

Las opiniones y aseveraciones expresadas en este documento son las del autor y no reflejan la política oficial ni la posición de la *US Food and Drug Administration* y del Gobierno de los EE. UU. La cita de organizaciones comerciales o nombres comerciales en esta presentación no constituye un respaldo oficial por parte de la *US Food and Drug Administration* o del Gobierno de los Estados Unidos.

Desafíos reglamentarios para dispositivos médicos: modernización de la biocompatibilidad

J. A. Centeno¹

¹ US Food and Drug Administration (FDA), co-fundador y expresidente de IMGA

La misión de la División de Biología, Química y Ciencia de los Materiales (DBCMS) bajo el Centro de Dispositivos Médicos y Salud Radiológica en la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA, EEUU) es promover y proteger la salud pública mediante la identificación e investigación de mecanismos biológicos y físico-químicos de interacción entre El cuerpo humano y los dispositivos médicos, cuyo objetivo final es la seguridad y la eficacia de los mismos.

Uno de los trabajos más importantes consiste en realizar investigaciones regulatorias basadas en pruebas de laboratorio sobre biocompatibilidad, toxicología, evaluación de riesgos, biología, química y ciencia de materiales para abordar los desafíos y las preguntas sobre reglamentación.

Esta conferencia* presenta los resultados de la investigación y las instalaciones analíticas en la División de Biología, Química y Ciencia de los Materiales y pretende proporcionar una visión general de los proyectos de investigación llevados a cabo, enfocados en cómo implementar procedimientos de biocompatibilidad, herramientas y enfoques alternativos modernos para abordar los desafiantes problemas regulatorios. Se

Se proporciona asimismo información sobre algunos estudios interesantes con diversos dispositivos médicos.

** Este trabajo se presentó en el Hospital Clínico de Salamanca, España, en octubre de 2017, como parte de las actividades del Capítulo de España sobre Geología Médica y de las II Jornadas de Geología Médica en España.*

Las opiniones y aseveraciones expresadas en este documento son las del autor y no reflejan la política oficial ni la posición de la *US Food and Drug Administration* y del Gobierno de los EE. UU. La cita de organizaciones comerciales o nombres comerciales en esta presentación no constituye un respaldo oficial por parte de la *US Food and Drug Administration* o del Gobierno de los Estados Unidos.

PRESENTACIONES DEL ENCUENTRO CIENTÍFICO EN LA FACULTAD DE FARMACIA DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA



Algunos de los participantes en el encuentro científico en la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada

De izquierda a derecha: Pilar Pena (ULoyola), Gabriel Delgado, Mario Chica, Jesús Párraga y Rafael Delgado (UGR), José Antonio Centeno(FDA), Juan A. Luque (IGME), María Gómez y Elena Giménez (IGME)

Calidad natural de las aguas subterráneas desde la perspectiva de la Geología Médica. Un caso de estudio en el sur de la Cuenca del Duero

E. Giménez-Forcada

¹ Instituto Geológico y Minero de España, IGME. Dpto de Investigación en Recursos Geológicos. Unidad Territorial de Salamanca. Asociación IMGAE-España

Resumen: En el sur de la Cuenca del Duero se localizan aguas subterráneas enriquecidas en arsénico y otros elementos traza geogénicos. Los estudios realizados demuestran que estos elementos están presentes por dos causas: la influencia de aguas del acuífero profundo, a su vez vinculadas químicamente con el basamento cristalino, y el efecto de la intensa explotación del acuífero profundo para obtener agua para riego, que logra incrementar la salinidad del agua y las concentraciones de elementos traza en las mismas.

Palabras clave: arsénico, HidroGeoToxicidad (HGT), Cuenca del Duero

Abstract: *In the south of the Duero Basin there are groundwaters enriched in arsenic and other geogenic trace elements. The studies showed that these elements are present in two causes: the influence of the waters of the deep aquifer (connected chemically at the same time with the crystalline basement) and the effect of the intense exploitation of the deep aquifer to obtain water for irrigation. With that the increasing the salinity of the water and the concentrations of the trace elements in water is achieved.*

Key words: *arsenic, HydroGeoToxicity (HGT), Duero Basin.*

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial y en muchas regiones áridas y semiáridas el agua subterránea es la única fuente de agua potable disponible. Las altas concentraciones de elementos traza geogénicos potencialmente tóxicos (ETGPTs) en el agua de bebida pueden suponer un riesgo para la salud humana e imponer restricciones a la disponibilidad de agua apta para consumo. Uno de los casos más estudiados es el sur de la Cuenca del Duero, donde muchas veces las concentraciones son ligeramente superiores al valor guía establecido para agua potable, pero esta ligera diferencia es suficiente para invalidar su uso como agua de bebida.

Uno de los elementos más estudiados es el arsénico, debido a su ubicuidad y alta toxicidad a concentraciones muy bajas. En algunas áreas del sur de la Cuenca del Duero (CD) (provincias de Ávila, Salamanca, Segovia y Valladolid) las concentraciones de As en el agua subterránea llegan a alcanzar valores de varias centenas de $\mu\text{g/L}$. Las investigaciones realizadas hasta la fecha coinciden en atribuir la presencia de arsénico a las reacciones agua-sedimento en determinado ambiente de pH y redox (Sahún et al., 2004; García-Sánchez et al., 2005; Gómez et al., 2006; Pardo et al., 2008). Pero una característica común a todos los acuíferos afectados por este problema es el elevado grado de variabilidad espacial en la concentración de estos elementos en las aguas subterráneas, lo que hace muy difícil predecir la concentración del elemento en una zona concreta a partir de los resultados de las áreas circundantes.

Los estudios sobre arsénico en aguas subterráneas se centran, generalmente, en aspectos relacionados con los procesos de interacción agua-roca, sin atender al patrón de distribución espacial y las razones que lo regulan. Sin embargo, hay que considerar que el entorno geológico es el que condiciona en mayor medida la presencia de determinados elementos traza en las aguas subterráneas y por tanto conocer el ambiente geológico natural significa poder dar razones sobre la movilidad, presencia y distribución de ETGPTs en las aguas subterráneas.

2. ENTORNO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

Geológicamente el área de estudio se localiza en la zona de contacto entre el borde sur de la CD y el conjunto granítico-metasedimentario del Sistema Central (Figura 1).

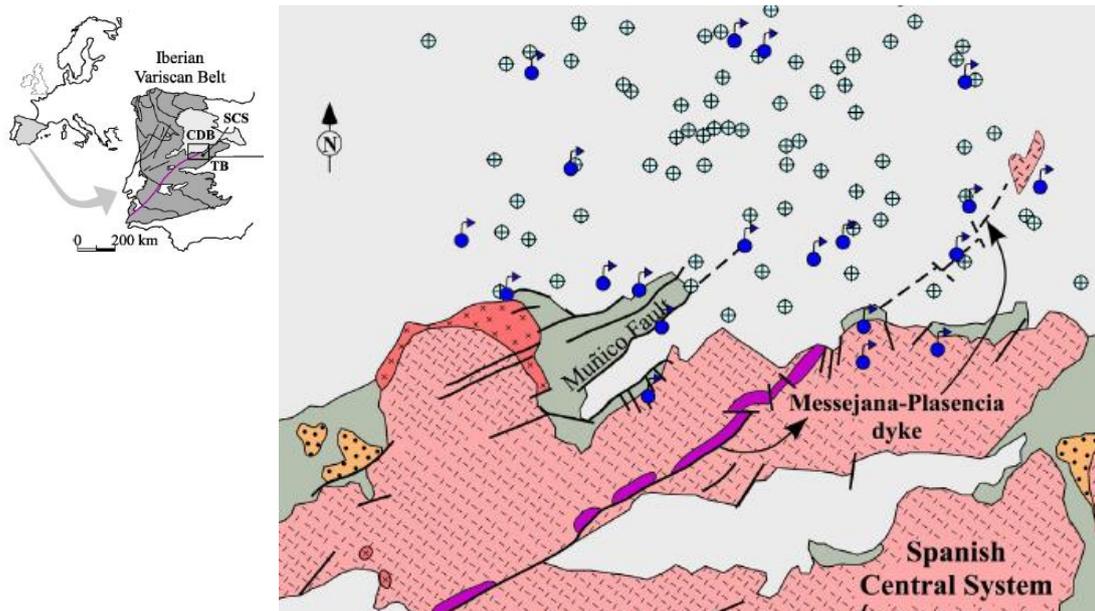


FIGURA 1. Localización de la zona de estudio (de Giménez-Forcada et al., 2017a, modificado).

Es una zona que se caracteriza por estructuras tectónicas muy significativas, como son el cabalgamiento del SC sobre la CD, o el dique Messejana-Plasencia (DMP) que se extiende a lo largo de más de 500 km, desde el S de Portugal y desaparece bajo los sedimentos terciarios de la cuenca, en la provincia de Ávila. La estructuración del SC y del basamento de la CD se encuentra entre uno de los principales factores que controlan la distribución de ETGPT en la CD.

El acuífero detrítico terciario de la Cuenca del Duero es un acuífero multicapa asimilable a un acuífero libre, donde localmente se identifican lentejones confinados en profundidad por las arcillas suprayacentes y cuyo tramo superior es un acuífero libre. La recarga principal para el acuífero libre es a través de la infiltración meteórica, sin descartar la alimentación que recibe de las áreas de borde. En condiciones naturales la descarga principal es el río Duero, que es el canal de drenaje más importante de la cuenca; sin embargo hay que considerar también el volumen de agua que se extrae por bombeo.

De forma muy general, en el acuífero detrítico Terciario de la Cuenca del Duero se diferencian tres tramos, como puede observarse en la (Figura 2).

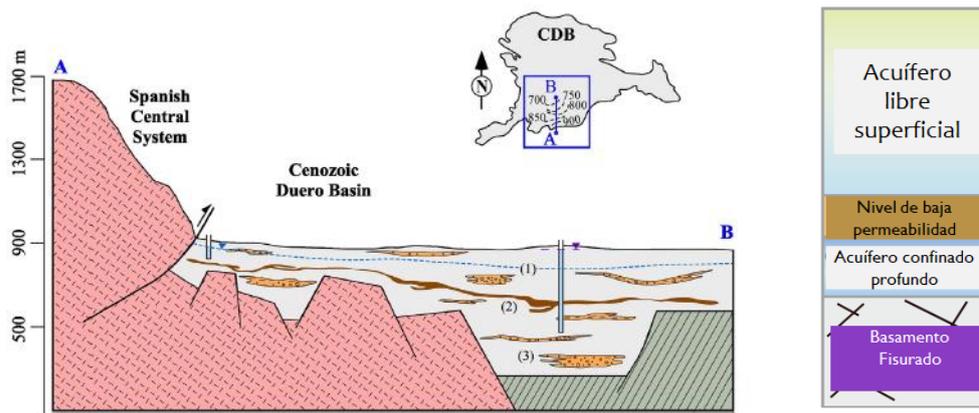


FIGURA 2. Esquema hidrogeológico de la relación entre el basamento fisurado y los sedimentos de la Cuenca (Giménez-Forcada et al., 2017a, modificado), así como la principal distribución de niveles hidrogeológicos en la vertical, en el acuífero detrítico terciario.

En general, se distinguen tres unidades: (1) nivel acuífero no confinado superior (<130 m, incluye pocas decenas de metros, correspondientes al cuaternario), (2) un nivel intermedio discontinuo de limos y arcillas (alrededor de 130–200 m) y (3) un tramo acuífero semi-confinado profundo estrechamente vinculado al basamento, que se ve afectado por fallas locales y regionales (>200 m).

La explotación del acuífero profundo ha producido importantes descensos piezométricos, tal como podemos observar en la figura 3, que recoge la evolución del n.p. de un piezómetro durante más de 30 años y un descenso de 35 m.

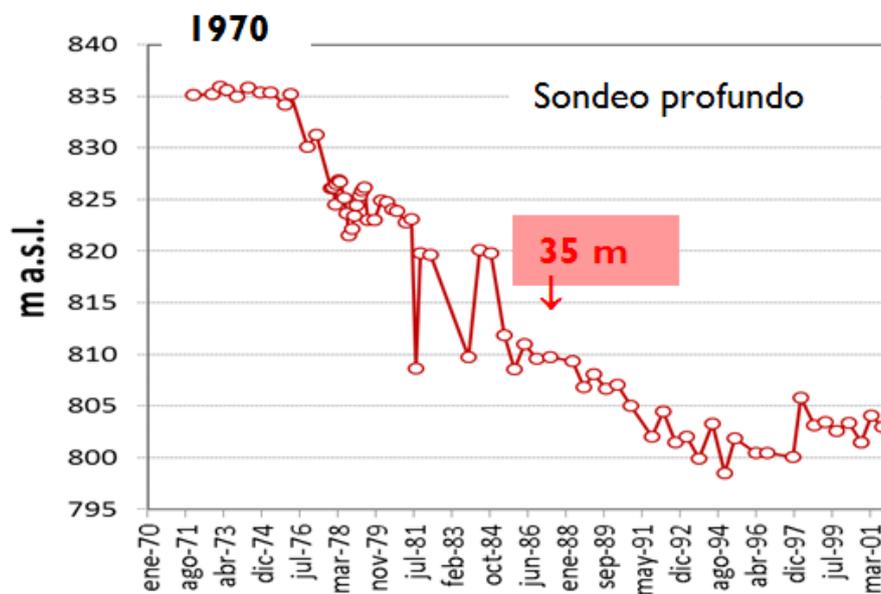


FIGURA 3. Evolución piezométrica de un piezómetro instalado en el acuífero profundo, entre 1970 y 2001.

3. CALIDAD QUÍMICA DE LAS AGUAS

En la CD se identifican concentraciones de algunos ETGPT que pueden tener un origen común y/o comportamiento similar. Regionalmente su distribución es irregular, sin un patrón que las regule. Los resultados previos planteaban que las áreas fuente son las mineralizaciones hidrotermales a veces asociadas a fracturación del SC y del basamento. En los trabajos realizados más recientemente se ha demostrado el control estructural de la distribución de estos elementos en las aguas subterráneas (Giménez-Forcada y Smedley, 2014; Giménez-Forcada et al., 2017a, 2017b).

Las aguas con mayores concentraciones de As, U, V, W, etc. son muy características, se conocen por su carácter bicarbonatado sódico, pH muy alcalino (puede superar las 10 unidades) y ambiente moderadamente oxidante o reductor. Estas aguas parecen estar relacionadas con el acuífero confinado profundo y a estructuras de falla (estas aguas se caracterizan a veces también por las altas concentraciones de F y B). Sin embargo, en algunas áreas de la cuenca (hacia el NE) también se identifican altas concentraciones de estos elementos en pozos de escasa profundidad.

En este sentido, ha resultado de mucha utilidad analizar las facies hidroquímicas de las aguas con el Diagrama de Evolución de Facies Hidroquímicas (HFE-Diagrama)¹ (Giménez-Forcada 2010; Giménez-Forcada 2014; Giménez-Forcada y Sánchez, 2015). Aunque fue ideado para discriminar fases de intrusión activa y lavado (o retroceso) en un proceso de salinización de acuíferos costeros detríticos afectados por intrusión marina, su aplicación puede ser de gran utilidad también en otras casuísticas más generales, como es este caso. Además, al tratarse de una representación X-Y, se pueden representar otros parámetros físico-químicos en relación con la evolución del porcentaje de cationes (X) como de aniones (Y).

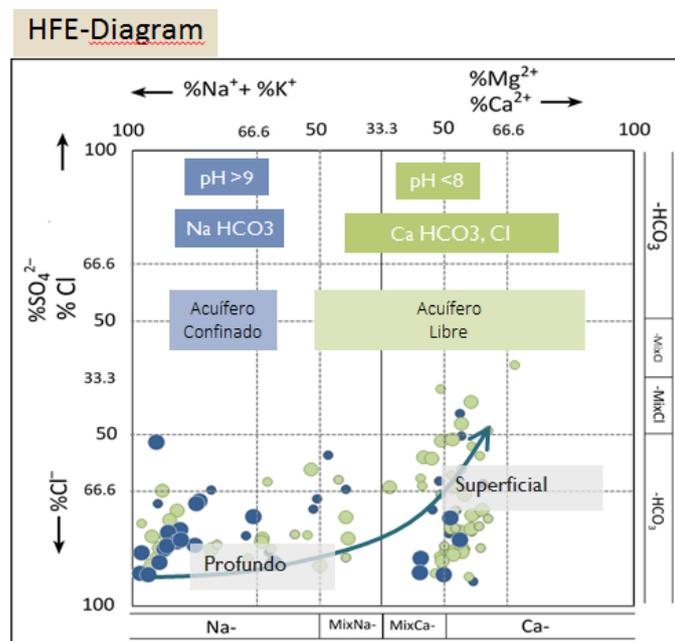


FIGURA 4. Representación de las muestras de agua y diferenciación de facies hidroquímica y factores físico-químicos entre las aguas del acuífero profundo y superficial (extraído de Giménez-Forcada et al., 2017a).

¹ Para descargar la macro Excel del Diagrama (HFE-Diagrama) y los artículos relacionados, por favor, visite la página: <http://www.geologiamedica.org/HFE-Diagram>

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el estudio de Giménez et al. (2017a) se investigaron las correlaciones de As con otras variables hidroquímicas mediante el análisis estadístico clúster y el análisis de componentes principales. Se comprobó que As, V, Cr y el pH están relacionados de forma progresiva y que también hubo correlaciones cercanas con la temperatura y el Na. Las concentraciones más altas de arsénico y otros elementos traza geogénicos potencialmente tóxicos asociados (PTGTE) se vinculan con aguas alcalinas NaHCO_3 (pH ≈ 9), condiciones oxidantes moderadas y temperaturas en torno a 18 °C a 19 °C. La hipótesis más plausible para explicar las altas concentraciones de arsénico es la contribución de flujos regionales profundos con un componente hidrotérmico significativo (aguas hidrotermales frías), que fluyen a través de fallas en la roca del basamento.

En la Figura 5 se reconoce la distribución de las aguas profundas, bicarbonatadas sódicas y enriquecidas en ETGPTs, a la vez que con pHs alcalinos, individualizadas con el análisis estadístico. Su distribución sigue las principales directrices de fractura del basamento en la zona.

Con esta investigación se ha conseguido explicar la distribución espacial de As y otros ETGPTs en el sur de Cuenca del Duero, abogando por la existencia de un control estructural del basamento de la cuenca, que regula las entradas de aguas enriquecidas en elementos traza en los niveles más profundos del acuífero terciario. Las aguas alcalinas de NaHCO_3 , caracterizadas por un potencial redox moderadamente oxidante y baja conductividad eléctrica, son una fuente primaria de estos elementos en la cuenca.

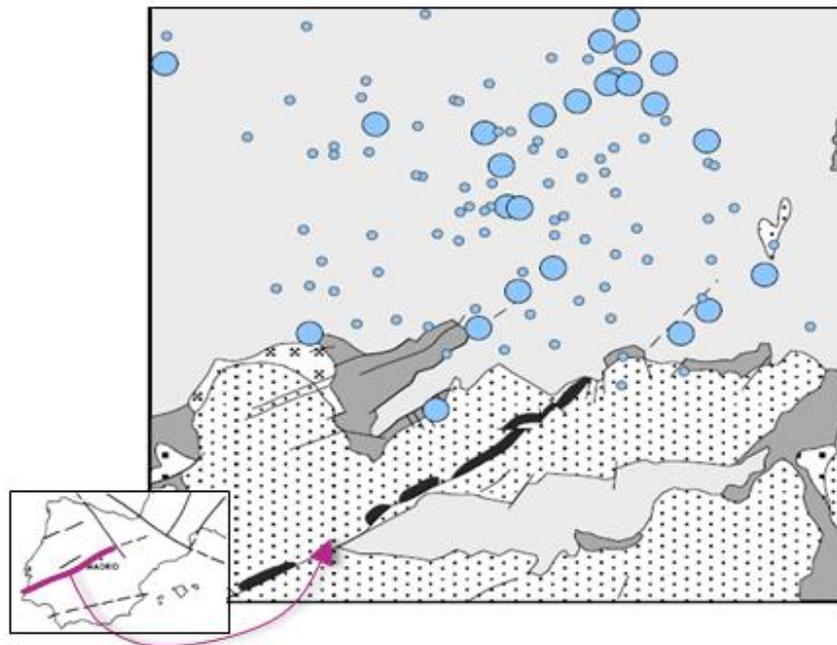


FIGURA 5. Distribución de las aguas que el análisis estadístico ha diferenciado del resto de aguas estudiadas, por presentar características propias: pHs alcalinos, altas concentraciones de As, V, Cr (y U). La distribución se adapta a las principales líneas de fracturación de la zona. (Giménez-Forcada et al., 2017a, modificado)

Si bien existe un riesgo evidente para la salud, el control estricto de la calidad del agua potable por parte de las autoridades competentes significa que éste generalmente es mínimo. Sin embargo, cuando las aguas NaHCO_3 del acuífero profundo son utilizadas para riego existe

un riesgo de tipo secundario que debe tenerse en cuenta porque afecta a la calidad de los suelos irrigados (que pueden ser sodificados y enriquecidos en estos elementos traza), y de las aguas subterráneas del acuífero no confinado, que ven incrementada su salinidad a la vez que la concentración de ETGPTs, a medida que el agua procedente del acuífero profundo entran en ciclos de riego sucesivos en los niveles superficiales. Esto explica por qué, en algunos casos, la salinidad se acompaña de altas concentraciones de As y otros elementos traza asociados. Además, la interferencia entre el ambiente físico-químico profundo y las características del acuífero libre implica la reactivación de los mecanismos que liberan arsénico, debido a los altos valores de pH y la competencia aniónica ejercida por los iones HCO_3 de las aguas profundas, sin olvidar el efecto de contaminantes como el NO_3 .

5. CONCLUSIONES

Usando una combinación de herramientas estadísticas y análisis hidroquímicos para interpretar los datos, junto con el conocimiento de la geología, características estructurales, hidrogeología y factores ambientales, se ha ofrecido una explicación de la distribución de arsénico disuelto y de otros elementos traza asociados en las aguas subterráneas del área de estudio.

REFERENCIAS

- García-Sánchez, A., Moyano, A., Mayorga, P. (2005). High arsenic in groundwater of central Spain. *Env.Geol.* 47, 847-854.
- Giménez-Forcada, E. (2010). Dynamic of Sea Water Interface using Hydrochemical Facies Evolution Diagram. *Ground Water*, 48, 2: 212-216.
- Giménez-Forcada, E. (2014). Space/time development of seawater intrusion: a study case in Vinaroz coastal plain (Eastern Spain) using HFE-Diagram, and spatial distribution of hydrochemical facies. *Journal of Hydrology*, 517, 617–627.
- Giménez-Forcada, E.; Sánchez San Román, F.J. (2015). An Excel Macro to Plot the HFE-Diagram to Identify Sea Water Intrusion Phases. *Groundwater*, 53, 5: 819-824.
- Giménez-Forcada, E.; Smedley, P.L. (2004). 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.; 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: 211-226.
- Giménez-Forcada, E.; Timón-Sánchez, S.; Kohfahl, C. (2017b). Distribution of hydrogeotoxicity by arsenic and uranium in the SE edge of the Duero Basin, Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, 183: 197-205.
- Gómez, J.J., Lillo, F.J., Sahún, B. (2006). Naturally occurring arsenic in groundwater identification of the geochemical sources in the Duero Cenozoic Basin, Spain. *Environ Geol* 50, 1151-1170.

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.

ALGUNAS REFLEXIONES ÉTICAS EN TORNO A LA GEOLOGÍA MÉDICA

P. Pena Búa¹

¹Universidad Loyola Andalucía

Resumen: La implementación de los resultados que la geología médica puede aportar se encontrará, en muchos casos, con dificultades derivadas de intereses económico-financieros y políticos. En este marco la labor ética puede ofrecer una reflexión crítica sobre las estructuras sociales existentes, y la acción colectiva a favor de su reforma, sustitución por otras nuevas, etc. Para la ética la cuestión fundamental es qué tipo de hombre queremos formar, qué tipo de sociedad queremos construir.

Palabras clave: Geología Médica, Ética

Abstract: *The implementation of the results that medical geology can contribute will find, in many cases, with difficulties derived from economic-financial and political interests. In this framework, ethical work can offer a critical reflection on existing social structures, and collective action in favor of its reform, replacement with new ones, etc. For ethics the fundamental question is what kind of man we want to form, what kind of society we want to build.*

Key words: *Medical Geology, Ethics*

1. GEOLOGÍA MÉDICA Y ÉTICA

La ciencia en su proceso evolutivo, sobre todo a partir de los siglos XVI y XVII, se separa de la filosofía. Si para Aristóteles la ciencia es un saber riguroso capaz de ofrecer una estructura fundamental de la realidad, la revolución científica de la temprana modernidad puso el acento en la experimentación y en la matemática. Esta nueva orientación, centrada en lo falsable, empírico y medible, degeneró hasta reducir el saber racional sólo al saber científico empírico, y otorgó carta de ciudadanía al cientifismo. En este contexto materialista, que se extiende hasta la actualidad, el común denominador es el análisis coste-beneficio y la simplificación para la toma rápida de decisiones, obviando aquellos parámetros que cuidan del desarrollo armónico de las diversas dimensiones del ser humano: salud, alimentación, sostenibilidad, etc. Sin embargo, "la ciencia es una forma de conocimiento, pero no es la única forma. El conocimiento deriva de otras fuentes, tales como el sentido común, la experiencia artística y religiosa y la reflexión filosófica" (Ayala, XXX; Bermúdez de Castro, 2002).

El necesario cambio de paradigma exige recuperar la dimensión del sentido de las cosas, de la ciencia y de la técnica. Es imperioso incorporar de manera expresa el sentido como finalidad instrumental de la ciencia y de la técnica y el sentido como significado profundo y final que damos a la realidad. La finalidad instrumental ha de estar sometida a unos fines que se representan a través de la dignidad humana y de las personas concretas. El saber científico tendrá que complementarse con el saber moral, con un nivel de reflexión meditativa capaz de poder tomar distancia de las cosas² (Heidegger, 1994), que requiere tiempo, idónea para

² "¿Qué gran peligro se avecinaría entonces? Entonces, junto a la más alta y eficiente sagacidad del cálculo que planifica e inventa, coincidiría la indiferencia hacia el pensar reflexivo, una total ausencia de

analizar críticamente el papel de la ciencia en la sociedad o cómo su actuación incide en ella (Habermas, 1986).

La geología médica, disciplina emergente, relativamente joven, en la medida en que trata de relacionar los factores geológicos con los patrones geográficos de salud se ubica en las coordenadas exigibles a toda ciencia, a saber, explicar el qué y el porqué, lo que es tan antiguo como el propio hombre; hunde sus raíces en la aseveración aristotélica: “todos los hombres tienen por naturaleza el deseo de saber” (Metafísica, cap. I). La filosofía, como hemos apuntado, también trata de explicar el qué y el porqué de las cosas, pero su discurso no es de índole experimental, sino teórico-reflexivo. No obstante, la ética es un saber práctico, es decir, un tipo de saber que pretende orientar la acción humana, nuestro obrar, en un sentido racional; pretende que obremos racionalmente. Así ante las revelaciones de la geología médica, que ofrece un conocimiento de la naturaleza orientado hacia el desarrollo humano integral, en tanto que trata de alertar de riesgos sanitarios y favorecer el progreso social y económico de las poblaciones y áreas afectadas, la ética propone obrar de acuerdo a los principios de solidaridad, justicia, equidad y participación en orden a solucionar situaciones que, básicamente por motivos político-económicos, se eternizan en el *status quo* y afectan con más violencia a las comunidades más indigentes y a las zonas menos favorecidas del planeta.

2. ÉTICA SOCIAL Y LA GEOLOGÍA MÉDICA

La implementación de los resultados que la geología médica puede aportar para mejorar la habitabilidad de espacios y la supervivencia de comunidades y personas se encontrará, en muchos casos, con dificultades derivadas de intereses económico-financieros y políticos. En este marco la labor ética puede ofrecer una reflexión crítica sobre las estructuras sociales existentes, y la acción colectiva a favor de su reforma, sustitución por otras nuevas, etc. Para la ética la cuestión fundamental es qué tipo de hombre queremos formar, qué tipo de sociedad queremos construir.

La geología médica, por tanto, se verá afectada en sus ejecuciones por las relaciones que se establezcan entre ética y política, ética y derecho, ética y economía. Al igual que la ética y la geología médica, la política, el derecho y la economía son saberes prácticos que pretenden orientar la acción y son normativos, ya que ambicionan dar indicaciones sobre el cómo deben realizarse determinados procesos y comportamientos. Si definimos la política como la búsqueda del bien común, el derecho como la búsqueda de la justicia y la economía como la búsqueda de la satisfacción de las necesidades humanas, entonces las conclusiones/consecuencias de la geología médica encontrarán un campo abonado para su realización.

Porque la ética del poder político habría puesto a la persona en el centro de sus preocupaciones, siempre como fin y nunca como medio. Sin confundir la norma jurídica con el mandamiento moral: “La validez del derecho se basa en la moral, porque el fin del derecho se endereza hacia una mera moral. Distinto de aquélla por su contenido está unido a ella por un doble vínculo: la moral es el fundamento sobre el que descansa la validez del derecho, porque el hacer posible la moral constituye una meta del orden jurídico” (Radbruch). Asimismo, la coherencia entre ética y economía habría examinado los valores que se esconden detrás de las diferentes propuestas económicas, el horizonte de globalidad necesario de la actividad

pensamiento. ¿Y entonces? Entonces el hombre habría negado y arrojado de sí lo que tiene de más propio, a saber: que es un ser que reflexiona. Por ello hay que salvaguardar esta esencia del hombre. Por ello hay que mantener despierto el pensar reflexivo”. Heidegger, M.,

económica y el carácter humano y humanizador de la misma, diferenciando radicalmente entre fines y medios.

Este es el reto que aborda la relación ética y geología médica, en él se ven involucrados actores globales, es decir, empresas y gestores financieros, políticos y analistas políticos, gobiernos nacionales, así como grupos no gubernamentales... todos ellos pueden trabajar a favor de una mayor justicia. Se trata de compartir una visión del bien común global, de lo contrario las medidas no serán eficaces o, en todo caso, quedarían reducidas a una mera anécdota. Si definimos el bien común como el conjunto interrelacionado de valores sociales que son compartidos por todos los miembros de una comunidad, al menos en el grado exigido por su común humanidad, estamos afirmando que es un bien que beneficia simultáneamente a la comunidad y a cada uno de sus miembros. Por ejemplo, expresado negativamente, cuando en un área existen factores geológicos nocivos para la salud estamos ante algo dañino para toda la comunidad y también para cada uno de sus miembros. Un bien auténticamente común o compartido no es, por tanto, lo mismo que la suma agregada de bienes poseídos por los miembros individuales de la sociedad. Es decir, una sola comarca afectada, desprovista de medidas para subsanar el problema, desacredita la promoción del bien común, ya que se trata de generar recursos y actuaciones suficientes para apoyar el bienestar de todos y garantizar que todos puedan participar de un bienestar humano.

Por todo ello la geología médica tendrá que esforzarse, si desea ser eficaz, por alcanzar una gestión integradora que combine sus propios conocimientos con las diferentes disciplinas que interactúan en estos procesos. El enorme beneficio que pueden aportar sus investigaciones plantea un desafío más profundo y fundamental de lo que muchos habían supuesto hasta ahora.

REFERENCIAS

Ayala, F. *El azar y la selección natural*.

Bermúdez de Castro, J. M., *El chico de la Gran Colina. En los orígenes de lo humano*, Ed. Crítica (Madrid, 2002) 67.

Habermas, J. (1986). *Ciencia y técnica como ideología*, Tecnos. Madrid.

Heidegger, M. (1994). *Serenidad*. Ed. del Serbal. Barcelona.

Análisis espacial de variables en Geología Médica

J.A. Luque¹, E. Pardo², M. Chica³, J. Grima⁴, V. Rodríguez⁵ y C. Grima⁶

¹ Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 18006 Granada. ja.luque@igme.es

² Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 28003 Madrid. e.pardo@igme.es

³ Universidad de Granada. 18006 Granada. mchica@ugr.es

⁴ Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 41004 Valencia. j.grima@igme.es

⁵ Universidad de Sevilla. 41004 Sevilla. vrgaliano@us.es

⁶ Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía (UPM). carlos.grima@upm.es

Resumen: La mayor parte de las variables de interés en Geología Médica (GM) tienen una componente espacial y, por tanto, una variabilidad que es necesario conocer y cartografiar como parte de un primer análisis. Igualmente, la relación entre diferentes parámetros es una línea de trabajo de gran interés en esta disciplina. En este contexto, la Geoestadística ofrece un conjunto de herramientas óptimas que permiten modelizar el comportamiento espacial y estimar de forma continua las variables estudiadas. En este trabajo se presenta dos aplicaciones de diferente grado de complejidad para determinar la distribución del As, Sb y el Pb mediante krigeaje ordinario (KO), así como el grado de correlación entre ambos elementos mediante cokrigeaje (CK). El KO permite conocer la distribución más probable con un error de estimación mínimo. En este trabajo se ha empleado el cokrigeaje factorial (CKF) que, además, permite cartografiar por separado las componentes modelizadas en el variograma. Esta descomposición es muy útil pues se puede cartografiar por separado las anomalías y el fondo geoquímico. En ambos casos, el soporte de estimación ha sido una malla de 2km por 2km.

Palabras clave: análisis espacial, Geoestadística, As, Sb, Pb.

Abstract: *In Medical Geology most of the variables of interest have a spatial component and, therefore, mapping variability is required as part of a preliminary analysis. Likewise, relationship between different parameters and covariates is a line of work of great interest in this discipline. In this context, Geostatistic offers a set of optimal tools that allow modelling spatial behaviour and estimation of studied variables. This paper presents two applications with different degree of complexity to determine distribution of As, Sb and Pb by means of ordinary kriging (OK), as well as the degree of correlation between both elements with the aid of cokriging (CK). OK allows knowing the most probable distribution with a minimum estimation error. In this work, factorial cokriging (FCK) has been used which, in addition, allows mapping variogram components individually. This decomposition is very useful because anomalies and geochemical background can be mapped separately. In both cases, the estimation is based on a 2x2 km grid.*

Key words: *Spatial analysis, Geoestatistic, As, Sb, Pb.*

1. INTRODUCCIÓN

El análisis numérico en GM es fundamental pues es muy habitual trabajar con multitud de parámetros y gran cantidad de registros, tanto de tipo numérico como categórico. En este sentido, la Geoestadística ofrece un conjunto de herramientas y métodos de estimación y simulación óptimos (Chica-Olmo y Luque-Espinar, 2002; Goovaerts 2005; Goovaerts et al., 2005; Journel y Huijbregts, 1978) que permiten predecir o simular el valor de las variables experimentales donde no ha sido posible tomar muestras. La exactitud con la que se realicen las predicciones o estimaciones es fundamental, sobre todo cuando esta información se vaya a

utilizar para tomar decisiones sobre la gestión del territorio o, como es el caso de la GM, sobre la salud pública. Los métodos geoestadísticos no sólo predicen el valor más probable, basado en el modelo de variograma ajustado a los datos experimentales, sino que también aporta el valor del error de estimación. El error de estimación no sólo informa sobre la precisión de la estimación, también se puede utilizar como criterio para mejorar la red de observación basándose en el valor máximo de error de estimación que se desea asumir.

El As, Sb y Pb presenta afinidad geoquímica pero determinadas actividades antrópica pueden propiciar el incremento de estos elementos tanto en suelos como en aguas subterráneas. Desde el punto de vista de la salud, los efectos del As son bien conocidos, cáncer, problemas cardíacos, diabetes, ... (Camacho et al., 2011, entre otros). De igual forma, El Sb y el Pb también están asociados a diferentes enfermedades relacionadas con la piel, el corazón o abortos (Mitchel et al., 2011, entre otros).

En este trabajo se presenta la estimación de tres elementos mediante KO y, con los mismos elementos, la aplicación de CKF. Los tres elementos son valores experimentales de concentración en el suelo tomados del Atlas geoquímico de España (Locutura Rupérez et al., 2012).

2. METODOLOGÍA

La Geoestadística se fundamenta en la Teoría de las Variables Regionalizadas (Matheron, 1965) que interpreta los datos 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. El variograma es la herramienta que permite determinar y modelizar el comportamiento espacial de las variables.

$$\gamma(h) = 1/2E\{Z(x) - Z(x + h)\}^2$$

Una vez calculado el variograma experimental se ajusta alguno de los modelos permitidos o bien una combinación de ello. El krigeaje permite estimar el valor más probable en cualquier punto de la zona de trabajo (Journel y Huijbregts, 1978) a partir del modelo de variograma ajustado. Hay diferentes métodos de estimación que se adapta a diversas situaciones relacionadas con los problemas de conocer la variable en puntos no muestreados.

La Geoestadística también permite analizar y estimar más de una variable a la vez mediante el CK. El CK es la extensión multivariante del krigeaje, en el que se realiza la estimación de una variable en función de la correlación con el resto. El CK permite la descomposición espacial de la variabilidad total en escalas de variación espacial o factores (Pardo-Igúzquiza y Dowd, 2002). Una de las ventajas del CK es que las variables costosas de adquirir se pueden estimar correctamente y con errores de estimación menores que si se estima individualmente.

3. RESULTADOS

La Tabla I muestra los estadísticos de las variables estudiadas. No obstante, dado que la distribución de las tres variables muestra un fuerte sesgo, se ha calculado el logaritmo en base 10, de esta forma la distribución de las concentraciones de los elementos en el suelo es prácticamente normal, que es uno de los requisitos del KO. Una vez realizado el análisis variográfico, los variogramas ajustados han sido los siguientes (Tabla II). El análisis variográfico ha permitido en los tres casos determinar la existencia de tres estructuras de variabilidad muy claras que se utilizarán en el CKF para cartografiar cada una de las escalas de variabilidad que representan las estructuras mencionadas.

Una vez ajustado el modelo de variograma, se ha realizado la estimación de cada variable. La Figura 1 muestra la estimación de As. Los valores por encima del percentil 95% se observan, principalmente sobre rocas del hercínicas, en rocas del Paleozoico de las Béticas y en rocas de origen volcánico. Igualmente, en algunos detríticos del centro, sur y este de la zona de trabajo también se observan. La estimación del Sb (Figura 2) muestra que las mayores concentraciones presentan una distribución similar a la del As, salvo que aparecen más anomalías en Sierra Morena y en algunos detríticos costeros del Mediterráneo. Las mayores concentraciones de Pb (Figura 3) se presentan en Sierra Morena, zona norte y en todo el borde mediterráneo. De forma dispersa también se observan en algunos detríticos de las cuencas del Duero, Guadalquivir y Ebro.

En relación con los resultados del CKF, se muestran el factor 3 o de mayor alcance que está relacionado con el fondo geoquímico de cada elemento (Figuras 4, 5 y 6). Prueba de ello es que las mayores concentraciones de los elementos, tomando como referencia el percentil 95%, se distribuyen de forma bastante homogénea por toda la zona de estudio.

	Min	Max	Media	Desv Estan	1 Q	Mediana	3 Q
As	0.1	2510	15.5	46.6	5.5	9.2	15.4
Sb	0.02	333.2	0.9	4.7	0.2	0.4	0.8
Pb	0.01	9120.2	35.1	176.8	15.5	21.6	32.1

TABLA I. Estadísticos de los análisis de suelos.

	Estructura 1		Estructura 2		Estructura 3	
	Meseta	Alcance	Meseta	Alcance	Meseta	Alcance
As	0.1	3500	0.05	18000	0.039	70000
Sb	0.06	3000	0.03	13500	0.07	65000
Pb	0.05	4000	0.018	13000	0.03	98000

TABLA II. Variogramas ajustados. En todos los casos el modelo ha sido del tipo esférico.

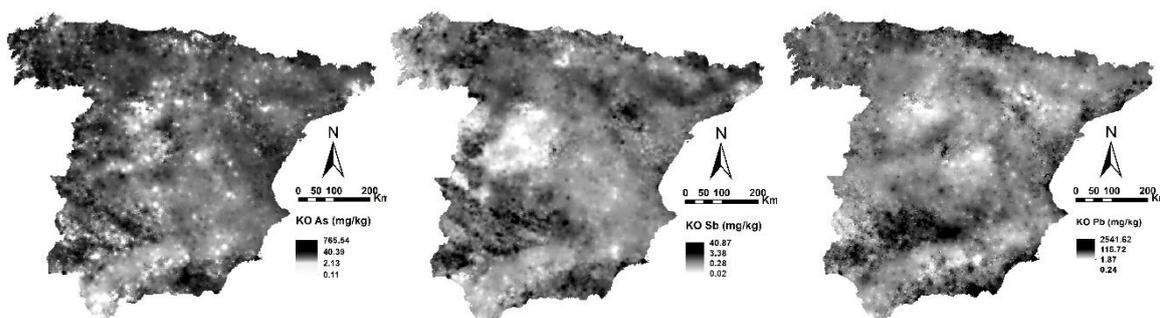


FIGURA 1. KO de As.

FIGURA 2. KO de Sb.

FIGURA 3. KO de Pb.

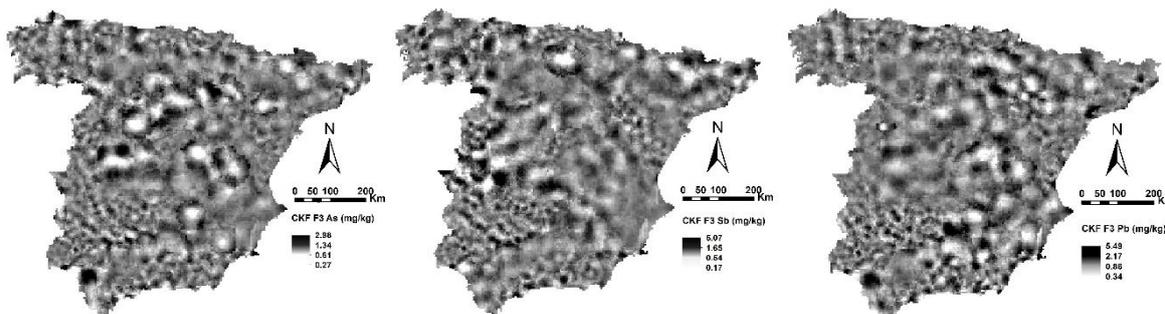


FIGURA 4. CKF de As (Factor 3).

FIGURA 5. CKF de Sb (Factor 3).

FIGURA 6. CKF de Pb (Factor 3).

Mediante una superposición en ArcGis de las estimaciones mediante KO, se aprecia un importante grado de coincidencia en la distribución de valores elevados. No obstante, hay mayor coincidencia entre las parejas As-Sb y Pb-Sb que entre As-Pb. Si se realiza esta misma comparación entre factores, se puede comprobar que la coincidencia en la pareja As-Pb es bastante mayor que en las otras parejas. La pareja que presenta menor coincidencia es As-Sb, casi 20 veces menos que As-Pb.

4. CONCLUSIONES

La Geoestadística proporciona herramientas eficaces y óptimas para analizar el comportamiento espacial de las variables de interés para la GM, así como estimaciones continuas en el espacio con errores de estimación cuantificables y mínimos. Igualmente puede afrontar análisis multivariantes, muy comunes en esta disciplina.

En función del problema que se quiere analizar, la Geoestadística ofrece un conjunto de métodos de estimación basadas en el variograma. En este sentido, el KO ofrece una estimación óptima de una variable y, debido a que permite conocer los errores de estimación, define los sectores de la zona de trabajo donde hay más déficit de información experimental.

Por otra parte, CKF es un método más complejo, es multivariable y proporciona una cartografía por separado de todos los factores o componentes que presenta el modelo de variograma, de ahí su gran utilidad en GM.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos de investigación CGL2015-71510-R, KARSTCLIMA, del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad y el proyecto SOILWATER del Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

REFERENCIAS

- Camacho, L.M., Gutiérrez, M., Alarcón-Herrera, M.T., Villalba, M., Deng, S. (2011). Occurrence and treatment of arsenic in groundwater and soil in northern Mexico and southwestern USA. *Chemosphere*, 83: 211–225.
- Chica-Olmo, M. y Luque-Espinar J.A. (2003). Interpolación espacial en la creación de cubiertas temáticas en SIG. En: *Los sistemas de información geográfica en la gestión de los riesgos geológicos y el medio ambiente* (L. Laín Huerta, ed). IGME. España, 181-198.
- Goovaerts, P. (2005). Analysis and detection of health disparities using geostatistics and a space-time information system. The case of prostate cancer mortality in the United States, 1970-1994. En: *Proceedings of GIS planet*. 1-20.
- Goovaerts, P., Avruskin, G., Meliker, J., Slotnick, M., Jacquez, G., Nriagu, J. (2005). Geostatistical modeling of the spatial variability of arsenic in groundwater of southeast Michigan. *Water Resour. Res.* 41, 1–19.
- Journel, A.G. y Huijbregts, C.J. (1978). *Mining Geostatistics*. Academic Press, London. 600 pp.
- Locutura Rupérez, J., Bel-lan Ballester, A., García-Cortés, A., Martínez Romero, S. (2012). *Atlas Geoquímico de España*. IGME. Madrid. 592 pp.

- Matheron, G. (1965). *Les Variables Regionalisées et leur estimation*. Masson et Cie. Paris. 305 pp.
- Mitchell, E., Frisbie, S., Sarkar, B. (2011). Exposure to multiple metals from groundwater a global crisis: geology, climate change, health effects, testing, and mitigation. *Metallomics*, 3 (9): 874–908.
- Pardo-Igúzquiza, E., Dowd, P.A. (2002). FACTOR2D: a computer program for factorial cokriging. *Comput. Geosci.* 28, 857–875.

Iberulitos, una partícula atmosférica gigante lanzadera de material biológico (¿infeccioso?) a grandes distancias.

J. Párraga¹, A. Cervera-Mata¹, M.V. Fernández-González¹, J. M. Martín-García¹ y A. Molinero-García¹

¹ Departamento de Edafología y Química Agrícola, Facultad de Farmacia, Universidad de Granada, Campus Universitario Cartuja, 18071, Granada, España. Autor para correspondencia: amolinerogarcia@ugr.es

Resumen: Anualmente, entre 1 y 3 billones de toneladas de polvo mineral es emitido a la atmósfera desde las zonas áridas y semiáridas, siendo el foco principal la región del Sahara y el Sahel. La Península Ibérica, muy expuesta, está sufriendo severas sequías y olas de calor consecuencia de esas entradas de masas de aire cálido sahariano que también vienen cargadas de polvo. Dicho polvo atmosférico contiene minerales, partículas carbonáceas, fibras, brocosomas, polen, todo tipo de microorganismos como bacterias, virus, hongos (y sus esporas) y partículas atmosféricas gigantes (iberulitos) recientemente descubiertas.

En el presente trabajo se analizan 14 muestras, de polvo atmosférico, del verano de 2010 recogidas en régimen de deposición seca en la ciudad de Granada.

La tasa de deposición de polvo atmosférico para el periodo estudiado es de 55.08 mgm⁻² día⁻¹, con aproximadamente el 90% del peso por debajo de las 200 µm. Las concentraciones de partículas en la ciudad de Granada exceden los valores máximos marcados por la normativa europea. Entre estas partículas depositadas se encuentran los iberulitos que pueden transportar componentes biológicos en su seno, pudiendo calificarlos de geovectores de virus y bacterias.

Palabras clave: Iberulitos, polvo atmosférico, PM10, vector biológico

Abstract: *Annually, between 1 and 3 billion tons of mineral dust is emitted into the atmosphere from arid and semi-arid zones, with the Sahara and the Sahel region being the main focus. The Iberian Peninsula, which is very exposed, is suffering from severe droughts and heat waves as a result of those inlets of warm Saharan air that are also charged with dust. This atmospheric dust contains minerals, carbonaceous particles, fibers, brocosomes, pollen, all kinds of microorganisms such as bacteria, viruses, fungi (and their spores) and giant atmospheric particles (iberulitos) recently discovered. In the present work, 14 samples of atmospheric dust are analyzed, from the summer of 2010 collected in the dry deposition regime in the city of Granada. The deposition rate of atmospheric dust for the period studied is 55.08 mgm⁻² day⁻¹, with approximately 90% of the weight below 200 µm. The concentrations of particles in the city of Granada exceed the maximum values set by European regulations. Among these deposited particles are the iberulites that can transport biological components, being able to qualify them as geovectors of viruses and bacteria.*

Key words: *Iberulitos, atmospheric dust, PM10, biological vector*

1. INTRODUCCIÓN

La Península Ibérica está sufriendo durante las últimas décadas severas sequías y olas de calor consecuencia de la gran incidencia de episodios de entrada de masas de aire cálido sahariano que transporta un elevado contenido de polvo de diferentes tamaños (Salvador et al., 2014). Este fenómeno no sólo afecta a la Península ibérica sino a una gran parte de Centroeuropa y Europa occidental e incluso a otras partes del globo (Mahowald et al., 2003) haciendo la atmósfera cada vez más polvorienta, modificando el clima y afectando negativamente a la

salud humana (Goudie, 2014). La materia particulada atmosférica (“Particulate Matter”, PM) procede fundamentalmente de suelos y fragmentos de roca (“terrestrial dust”), erupciones volcánicas, aerosoles de mar, quemados de biomasa y de actividades antropogénicas (deforestación, degradación de suelos, combustión de fuel y procesos industriales) (Seinfeld y Pandis 2006). Estas partículas incluyen polvo mineral, partículas carbonáceas, fibras, brocosomas, polen y todo tipo de microorganismos: bacterias, virus, hongos y sus esporas (Griffin et al., 2001, Párraga et al., 2013). Además, un nuevo tipo de partícula atmosférica gigante llamada iberulito, que describiremos posteriormente.

Tal incremento de polvo mineral en la atmósfera se debe a que los suelos situados en desiertos y en zonas peridesérticas y semiáridas, sin apenas cobertura vegetal, presentan una sequía extrema, debido a las altas temperaturas, siendo muy susceptibles a la erosión eólica, por lo que es finalmente la expansión de los desiertos y zonas áridas la causante principal del incremento de PM en la atmósfera (Reynolds et al., 2007). Se estima que el Sahara lo hace a una velocidad de 600 m año^{-1} (UNU, 2007). Prácticas agrícolas inadecuadas han contribuido también a la formación de polvo favoreciendo el proceso de desertificación, con pérdidas por encima de 12 millones de hectáreas de tierra de cultivo por año en todo el mundo. Un cuarto de la superficie de España está afectada por un proceso de desertificación (Vicente-Serrano et al., 2012).

Anualmente, 1-3 billones de toneladas de polvo mineral es emitido a la atmósfera desde las zonas áridas y semiáridas siendo el foco principal la región del Sahara y el Sahel, los cuales son responsables del 50-70% de la emisión global de polvo (Pey et al., 2013). El polvo sahariano transporta a Europa entre 80 y 120 Tg año^{-1} . La zona mediterránea, en concreto España, y especialmente la urbe de Granada, situada al sur, a unos 50 Km de la costa mediterránea, se está viendo muy afectada –de forma creciente- por la relativa cercanía a estas áreas fuente de polvo atmosférico (Mandija et al., 2017).

El incremento de la concentración de polvo durante las fuertes intrusiones a menudo exceden los estándares de PM_{2.5} y PM₁₀ para la Unión Europea incrementando los niveles de materia particulada en el aire y afectando a la salud humana (Varga et al., 2014, MAPAMA 2017). Recientemente, se ha observado una relación entre intrusiones de PM sahariano, unido a olas de calor con el incremento de ingresos en hospitales y mortalidad senil en Madrid (Jiménez et al., 2010; Reyes et al., 2014) y en Barcelona (Perez et al., 2012). Otro ejemplo concreto, la meningitis en el Sahel, que afecta anualmente a más de 200.000 personas, se relaciona con las tormentas de polvo Sahariano y de exposición a alta temperatura (Cuevas et al., 2011)

El polvo de origen sahariano que llega a España, contiene un porcentaje variable, hasta un 47%, de partículas atmosféricas gigantes, generadas por agregación atmosférica, de tamaño entre 30 y $200 \mu\text{m}$, poliminerálicas, denominadas iberulitos por Díaz Hernández y Párraga (2008), quienes las describieron a partir del estudio del polvo atmosférico depositado en las cercanías de la ciudad de Granada, durante el período 1999 a 2005. Los iberulitos también han sido observados en aerosoles atmosféricos procedentes de Arabia Saudí (Posfai et al., 2013) y probablemente en polvo asiático (Jeong et al. 2014). La potencial incidencia de estos iberulitos para la salud, radica en que están constituidos principalmente por minúsculas partículas minerales potencialmente nocivas, de menos de $10\text{-}15 \mu\text{m}$ (PM₁₀, PM_{2.5}) y que además pueden transportar material biológico, siendo lanzaderas potenciales de patologías infecciosas de hombres y animales (Párraga et al., 2013).

En los eventos de polvo, la composición mineralógica y morfología de las partículas de suelo transportadas es muy variable y depende de las características geológicas y edáficas de las

áreas de emisión del polvo. Las partículas de polvo son un complejo ensamblaje de varios minerales con propiedades fisicoquímicas que varían de unos minerales a otros (Journet et al., 2014).

2. OBJETIVOS

Para evaluar la influencia demostrada de las intrusiones de polvo atmosférico sobre la salud humana y el medioambiente (en las zonas que sufren su impacto) hemos investigado desde el año 2000 el polvo mineral sedimentable de la ciudad de Granada, como zona piloto del sur de España, a partir de sus tasas de deposición, propiedades físicas granulométricas, mineralogía, microestructura, microanálisis electrónicos y evidencias de actividad biológica. Nos centraremos, en este trabajo, principalmente en el verano del 2010.

3. MUESTREO Y METODOLOGÍA

Se preparó una estación de muestreo a nivel de suelo, situada en las cercanías de Granada (37° 08' 59" N y 03° 37' 59" W), y se sigue utilizando en la actualidad. Se recogieron 14 muestras en régimen de deposición seca en el verano de 2010, entre el 1 de Junio y el 31 de Octubre. Para más detalles metodológicos remitimos a los trabajos de Díaz Hernández y Párraga (2008), y Párraga et al (2013).

4. RESULTADOS

Tasas medias de deposición de PM10, tasas deposición total y distribución de tamaño de polvo e iberulitos

De forma general, la medida de las PM10 en suspensión es muy variable a lo largo de todos los años. En los meses de verano se pueden superar los $50 \mu\text{g m}^{-3}$, encontrando los mayores valores en los meses de agosto, donde se pueden sobrepasar los $200 \mu\text{g m}^{-3}$. A partir de finales de agosto, las cantidades de PM10 suelen ser menores, aunque en episodios puntuales se superaran los $50 \mu\text{g m}^{-3}$. Las tasas de deposición total a lo largo de los años son muy variables, oscilando entre 20 y $200 \text{ mg/m}^2\text{día}$. Ascenden de manera irregular en los meses de verano, julio, agosto y el primer otoño, septiembre y descienden en el mes de octubre.

Con respecto al verano del 2010, la tasa media de deposición en régimen de "dry deposition" fue de $55.08 \text{ mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. En este periodo el polvo sedimentable está constituido mayoritariamente por partículas menores de $200 \mu\text{m}$ (media = 80-90%), le siguen en mucha menor cantidad las comprendidas entre 500 y $200 \mu\text{m}$ (media = 5-10%) y en último término las mayores de $500 \mu\text{m}$ (media = 1-2%). También se hicieron curvas granulométricas mediante difracción láser. Una de las muestras correspondiente a tasas altas de deposición, presenta el menor tamaño medio ($51.79 \mu\text{m}$), el menor rango y la mayor proporción de partículas menores de $10 \mu\text{m}$ de todas las muestras estudiadas (10%). Otra de las muestras que corresponde a tasas de deposición bajas presenta un tamaño medio algo mayor ($100.31 \mu\text{m}$) que la muestra anterior y un rango de tamaño más amplio. El porcentaje de partículas menores de $10 \mu\text{m}$ es bajo (3.8%). Otra muestra que corresponde a tasas de deposición media presenta un tamaño intermedio entre las dos muestras extremas ($79.92 \mu\text{m}$). El porcentaje de partículas menores de $10 \mu\text{m}$ es bajo (3.4%). La mayor cantidad de PM10 en el polvo sedimentable corresponde a las mayores tasas de deposición.

El porcentaje de iberulitos aislado de estas muestras del verano del 2010 es muy variable, oscila de muy bajo, 0.7% a bajo-medio, 9.2 % con una media de 2,6 % (± 2.3). El diámetro medio aparente de los iberulitos recogidos es también variable, desde $34 \mu\text{m}$ a $111 \mu\text{m}$ con una media de $61(\pm 20 \mu\text{m})$. Por microscopía electrónica se comprueban estas medidas (Figura 1 y Figura 2A) así como que las partículas constituyentes de los iberulitos pueden alcanzar tamaños menores de $1 \mu\text{m}$ (Figura 2I).

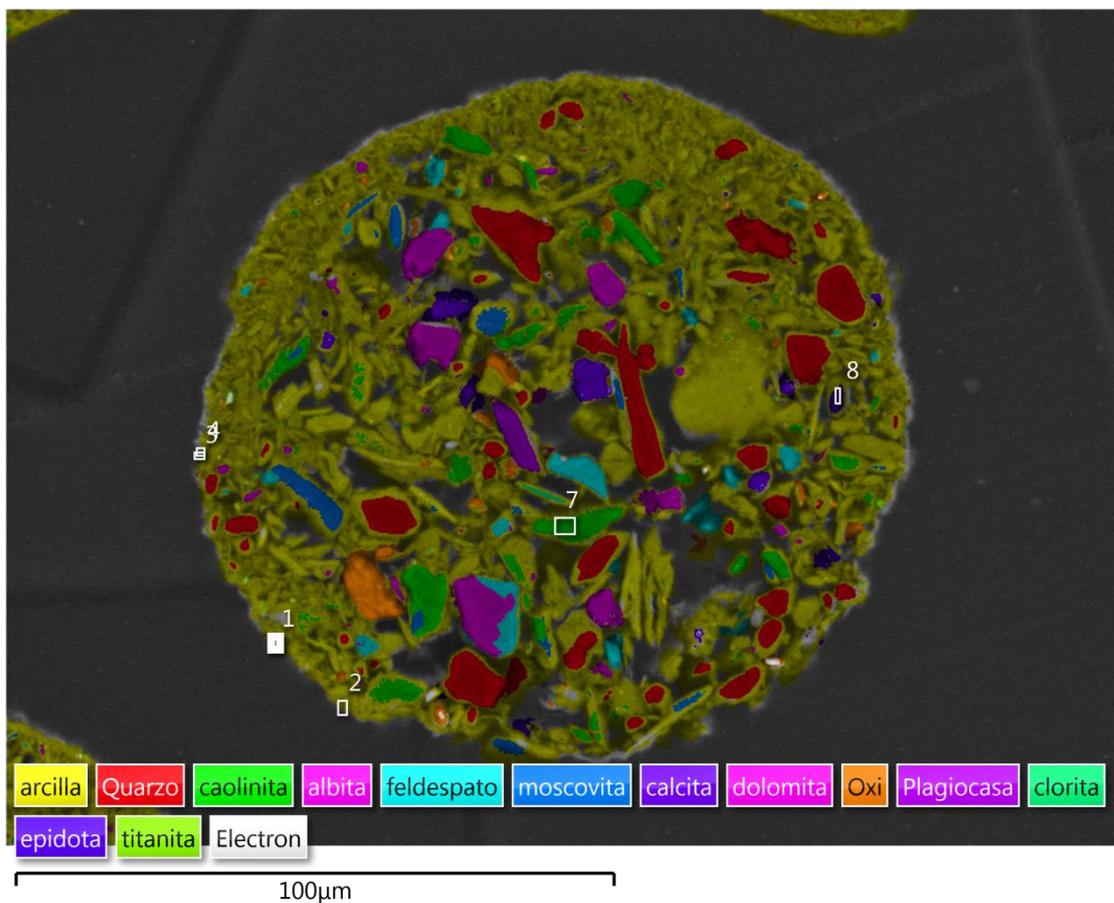


FIGURA 1. Corte de un iberulito (SEM), mostrando las partículas constituyentes y los principales minerales detectados por EDX. Los números corresponden a espectros EDX para la identificación mineral.

Caracterización mineralógica por difracción de rayos X (DRX) del polvo y de los iberulitos

Nos referimos a las muestras recogidas en el verano del 2010. En el orden cualitativo y semicuantitativo las especies minerales detectadas en el polvo sedimentado han sido: laminares (15-56%) (sensus Schultz, 1964: LSCH), illita (7-31%), cuarzo (13-64%), calcita (4-19%), dolomita (15-35%) y en menores cantidades clorita (1-4 %), plagioclasas (<3%), óxidos de hierro (hematites y goetita) y yeso.

En los iberulitos recogidos en ese muestreo del verano del 2010 no pudo realizarse el análisis DRX, por las pequeñas cantidades recogidas, pero los minerales presentes son similares al polvo como se deduce por las técnicas de microscopía electrónica y microanálisis en cortes de iberulitos (Figura 1).

Microscopía electrónica y microanálisis de los iberulitos

La mayoría de los iberulitos muestreados, tanto en el verano del 2010 como en el resto de años, tienen formas cuasiesféricas (Figura 2B,I) de color rojizo y se muestran como agregados de partículas, aunque unos pocos tienen forma de huso porque incorporan una partícula vegetal filamentosa sobre la que presumiblemente se han formado. La estructura de los iberulitos es compleja (Figura 2I) y se pueden describir tres partes: el núcleo ("core"), el vórtex y la cobertura o corteza (rind). El núcleo o zona interna alberga las partículas de mayor tamaño (muchas de 10 µm y menores y hasta 20 µm de diámetro máximo), aparentemente sin agentes que cementen las partículas entre ellas, presenta la mayor porosidad de la masa del iberulito.

El “vórtex” es un pequeño “cráter” situado en uno de los polos estando definido por unas laderas cóncavas que vergen hacia él. La corteza es la cobertura externa del iberulito. Su aspecto y espesor son variables según el iberulito estudiado y la zona del mismo. En el casquete esférico correspondiente al vortex, la corteza se encuentra sobreengrosada pudiendo alcanzar varias decenas de micrómetros de espesor, indicando una mayor abundancia de las partículas más finas, laminares, frecuentemente de 2 μm o menos. Para más detalles ver Díaz-Hernández y Párraga 2008.

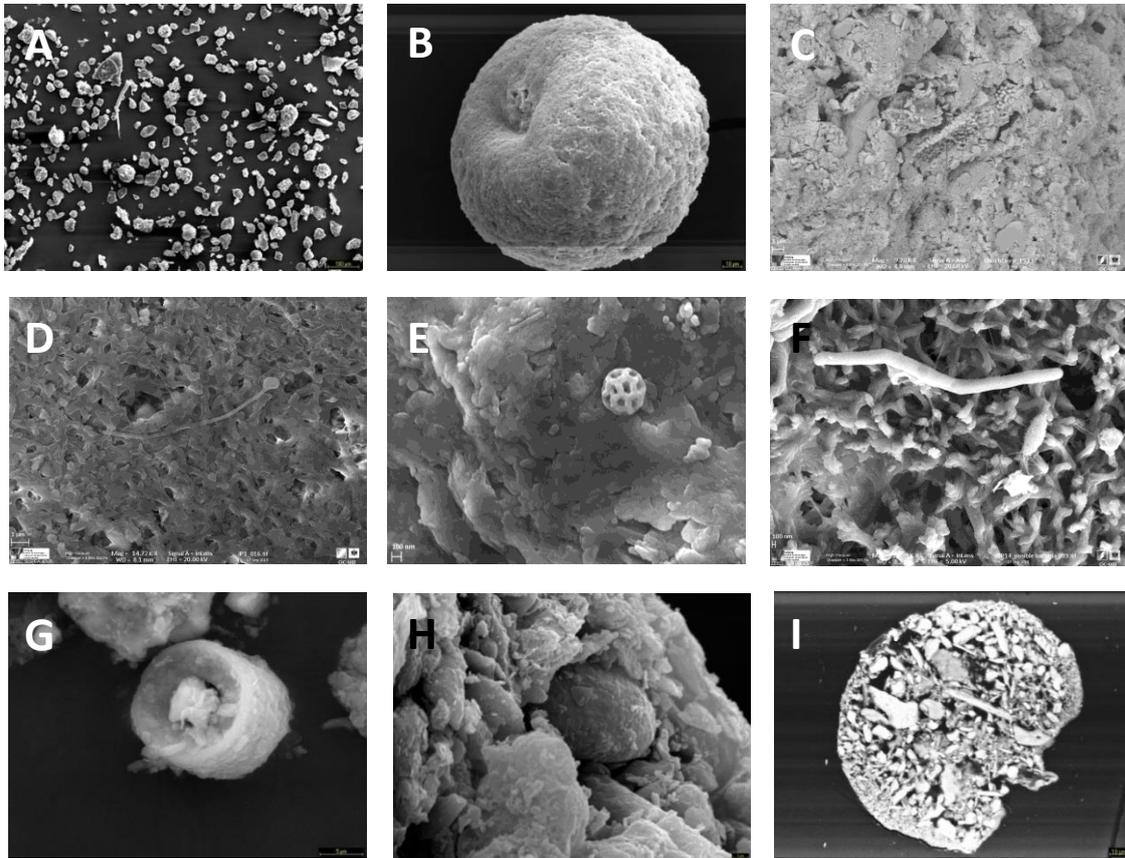


FIGURA 2. Microfotografías SEM de campo de iberulitos y polvo atmosférico (A), de un iberulito (B) y detalle de su superficie con nanobacterias arracimadas (C). Bacterias aisladas del polvo atmosférico sobre un filtro de papel (D y F), restos de diatomeas posiblemente del Chad y espécimen desconocido (G y H). Corte pulido de un iberulito (I) donde se aprecia el vortex y un filamento vegetal a modo de pedúnculo incrustándose en el vortex.

El estudio de EDX revela informaciones compositivas, de orden químico y mineral, relacionadas a la morfología previamente descrita. La Figura 1 presenta un mapa de los principales minerales detectados en un corte de iberulito.

Los microanálisis de la superficie del iberulito sin seccionar detecta como principales constituyentes: O, Si, Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Ti y S. La mineralogía DRX encontrada justificaría esta composición elemental, puesto que describíamos tectosilicatos (cuarzo y feldspatos) y filosilicatos (micas, caolinita, esmectitas, fases mezcladas y clorita) que contienen O, Si, Al, K, Fe, K, Mg, Na, Ti; carbonatos cálcicos y calcomagnésicos (calcita y dolomita): O, Ca, Mg; óxidos de hierro (hematites y goetita): O, Fe; y sulfatos (yeso): Ca, S.

Rasgos de actividad biológica de los iberulitos

En los iberulitos recolectados tanto a lo largo de todo el periodo muestreado (verano 2010), como en años posteriores, se han detectado con SEM rasgos de origen biológico de muchos

tipos y naturaleza (Figura 2): bacterias (Figura 2D-F), nanobacterias (Figura 2C), restos de diatomeas y de un espécimen desconocido (Figura 2 G,H), e incluso brocosomas (Figura 2E) que son partículas superhidrofóbicas secretoras de proteínas de 0.2-20 μm de tamaño producidas por los túbulos de Malpigio de saltamontes (Cicadellidae), una de las más diversas y abundantes familias de insectos (Rakitov y Gorb 2013). También se han observado granos de polen de distintos tipos y tamaños, y formas de indubitable origen biológico pero de difícil adscripción. La presencia de restos biológicos en iberulitos ya fue reportada por Díaz-Hernández et al (2012) and Párraga et al (2013) aunque con otras tipologías que en el presente estudio. Describen restos de plantas y diversos restos de esqueletos externos de microorganismos eucarióticos (protistas fotosintéticos o heterotróficos, o metazoos), células bacterianas y esporas bacterianas.

Especial interés poseen las bacterias. De acuerdo con Sánchez de la Campa et al. (2013), los microorganismos más abundantes asociados con una de las mayores intrusiones de polvo del desierto del Sahara sobre el Sur de España en 2010 (el mismo año de recogida de nuestras muestras de polvo) fueron Proteobacteria (74% del total) y Firmicutes (19% del total) con mucha menor presencia de Bacteroidetes y Actinobacteria (menos del 1%) and 5% de secuencias de microbios desconocidos. Como nosotros hemos visto, las bacterias están presentes y tienden a aparecer en colonias como campos y arracimadas en micrositios situados frecuentemente en microdepresiones de la superficie del iberulito (Figura 2 B,C); aunque a veces (las bacterias) están inmersas en la matriz del iberulito.

5. CONSIDERACIONES FINALES

La presencia de componentes biológicos en los iberulitos los podría calificar como posibles vectores de enfermedades (Párraga et. al, 2013), que se desplazan gracias al viento y saltan las fronteras entre países y continentes.

Desde los suelos no cubiertos de vegetación, las partículas minerales junto con materia orgánica del suelo y los microorganismos asociados con ellas son incorporados en la atmósfera, pudiendo converger en una columna atmosférica de polvo. Tanto las bacterias como el polvo pueden tener diversos tamaños: las células microbianas observadas entre 0.1-2 μm de diámetro y las partículas minerales integrantes de los iberulitos hasta 20 μm por lo que pueden ser transportados a grandes distancias. Respecto al polvo sedimentable casi más del 90% en peso está por debajo de las 200 μm . El polvo y los microbios asociados cruzan el Océano Atlántico o el mar Mediterráneo y pueden asociarse y mezclarse con otras partículas y compuestos como spray marino, brocosomas, especímenes planctónicos, otros microorganismos presentes en la atmosfera y compuestos gaseosos atmosféricos. Después del largo recorrido en la atmósfera el material suspendido puede convertirse mediante una serie de mecanismos descritos en Díaz-Hernández y Párraga (2008) en un iberulito que junto con el polvo finalmente caen a tierra bien por “dry deposition” (deposición seca) controlada por gravedad o impacto o por “wet deposition” (deposición húmeda).

Los niveles registrados de concentración de partículas en los últimos años en la ciudad de Granada superan con creces el valor máximo que la Unión Europea considera seguro para la salud en sus normativas públicas: 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM10). De hecho, según la EC Council Directive (2008/50/CE), sobre el control de la calidad del aire en Europa, las mediciones no deberían superar este valor en más de 35 ocasiones por año. A pesar de ello, las de Granada mostraron estar muy por encima de este límite desde 2004. Así en 2015, de los 365 días, 302 se saldaron con picos registrados superiores a los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, duplicando este valor durante un período total de casi dos meses a lo largo del año. De acuerdo con CALIMA (www.calima.ws), durante el período junio-octubre de 2010 hubo 18 intrusiones saharianas con un total de 64 días (mayormente en julio -24 días- y agosto -21 días-), que supone aproximadamente la mitad de

los días del verano. Esto coloca a Granada como una de las ciudades con mayor contaminación del aire de España; un hecho que encuentra explicación parcial por su situación geográfica en una depresión. El viento es escaso y las partículas apenas se mueven y se van acumulando. Las fracciones menores de 2,5 μm (PM 2.5) pueden penetrar hasta la región alveolar, donde se produce retención de PM. Está demostrada la asociación entre ambientes con concentraciones de partículas finas (menores a 2,5 μm) y el riesgo de mortalidad por enfermedades cardiopulmonares y cáncer de pulmón.

En Granada no se dispone de datos que relacionen las variaciones (sobre todo incremento) de PM10 del aire africano con la salud de la población. En otras ciudades españolas, sin embargo, algunos trabajos encuentran correlación epidemiológica entre ese incremento de PM10 y los riesgos para la salud humana. Las principales enfermedades asociadas a la inhalación de PM10 descritas son: rinitis, laringitis, asma, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, fibrosis pulmonar, menor desarrollo pulmonar en niños, incremento significativo de mortalidad en enfermedades cardio-vasculares y cardio-pulmonares, así como cáncer y toxicidades específicas. Tampoco es descartable la asociación entre las intrusiones de aire norteafricano y la activación del sistema trigémino vascular, que deriva en cefaleas (Párraga et al 2013).

Los iberulitos son verdaderas lanzaderas, a modo de naves espaciales, que pueden transportar microorganismos y especímenes biológicos de un lugar a otro del mundo, a miles de kilómetros, permitiendo su supervivencia y suministrándoles un medio rico en nutrientes, gracias a la capacidad higroscópica de las arcillas. Los iberulitos podrían considerarse como un geovector de virus y bacterias. Se presenta como un aspecto novedoso de importancia en la salud humana y aún desconocido para muchos. Hay que profundizar más en el estudio de las bacterias atmosféricas como una fracción importante y subestimada de los aerosoles atmosféricos de tamaño micrométrico.

El trabajo que se ha expuesto supone un avance relevante en el conocimiento sobre las características del polvo atmosférico mineral en el sur de España y concretamente para el estudio de las partículas gigantes atmosféricas descritas en 2008, de nombre "iberulitos".

REFERENCIAS

- CALIMA. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, España. Enlace <http://www.calima.ws/>
- Cuevas, E., Pérez, C., Baldasano, J.M., Camino, C., Alonso-Pérez, S. y Basart, S. (2011). Long-term retrospective analysis of dust and AI with meningitis epidemics data, MACC O-INT WP3. (Meningitis linked to mineral dust transport in the Sahel). 2nd. Delivery Report. 1-50.
- Díaz Hernández, J.L. y Párraga, J. (2008). The nature and tropospheric formation of iberulites: Pinkish mineral microspherulites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 3883-3906.
- Díaz-Hernández, J. L., Sánchez-Soto, P. J., & Serrano, A. (2012). Biological nanostructures associated to iberulites: a SEM study. *Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology* (A. Méndez-Vilas, Ed.)
- EC (European Commission). Council Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Brussels: Off J Eur Communities L Legis. 2008; 152: 1-44

- Goudie, A.S. (2014). Desert dust and human health disorders. *Environment international*, 63, 101-113.
- Griffin, D.W., Garrison, V.H., Herman, J.R. y Shin, E.A. (2001). African desert dust in the Caribbean atmosphere: Microbiology and public health. *Aerobiologia*, 17, 203-213.
- Jeong, G. Y., Kim, J. Y., Seo, J., Kim, G. M., Jin, H. C. y Chun, Y. (2014). Long-range transport of giant particles in Asian dust identified by physical, mineralogical, and meteorological analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(1), 505-521.
- Jiménez, E., Linares, C., Martínez, D. y Díaz, J. (2010). Role of Saharan dust in the relationship between particulate matter and short-term daily mortality among the elderly in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 408(23), 5729-5736.
- Journet, E., Balkanski, Y. y Harrison, S. P. (2014). A new data set of soil mineralogy for dust-cycle modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(8), 3801-3816.
- Mahowald, N. y Luo, Ch. (2003). A less dusty future? *Geophysical Research Letters*, 30(17), 1903.
- Mandija, F. , Sicard, M., Comerón, L. , Alados-Arboledas, Guerrero-Rascado, J., Barragan, R. , Bravo-Aranda, J., Granados-Muñoz M. , Lyamani, H., Muñoz Porcar, C., Rocadenbosch, R.A. , Valenzuela, F.A. y García Vizcaíno, D. (2017). Origin and pathways of the mineral dust transport to two Spanish EARLINET sites: effect on the observed columnar and range-resolved dust optical properties. *Atmospheric Research*, 187, 69-83.
- MAPAMA, 2017. Evaluación y datos de calidad del aire. Fuentes naturales. <http://www.mapama.gob.es./es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/evaluacion-datos/Fuentes-naturales/default.aspx>. (acceso: 17 de Noviembre de 2017)
- Párraga, J., Delgado, G., Martín-García, J.M., Olmo, F.J. y Delgado, R. (2013). Iberulitos: partículas atmosféricas “gigantes” potencialmente inhalables. *Actualidad Médica*, 98, 86-91.
- Perez, L., Tobías, A., Querol, X., Pey, J., Alastuey, A., Díaz, J. y Sunyer, J. (2012). Saharan dust, particulate matter and cause-specific mortality: a case–crossover study in Barcelona (Spain). *Environment international*, 48, 150-155.
- Pey, J., Querol, X., Alastuey, A., Forastiere, F. y Stafoggia, M. (2013). African dust outbreaks over the Mediterranean Basin during 2001–2011: PM10 concentrations, phenomenology and trends, and its relation with synoptic and mesoscale meteorology. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 1395-1410.
- Posfai, M., Axisa, D., Tompa, E., Freney, E., Brintjes, R. y Buseck P. (2013). Interactions of mineral dust with pollution and clouds: An individual-particle TEM study of atmospheric aerosol from Saudi-Arabia. *Atmospheric Research*, 122, 347-361.
- Rakitov, R. y Gorb, SN (2013). Brochosomes protect leafhoppers (Insecta, Hemíptera, Cicallidae) from sticky exudates. *J R Soc Interface*, 10 (87): 20130445

- Reyes, M., Díaz, J., Tobias, A., Montero, J.C. y Linares, C. (2014). Impact of Saharan dust particles on hospital admissions in Madrid (Spain). *International Journal of Environmental Health Research*, 24(1), 63-72.
- Reynolds, J.F., Smith, D.M., Lambin, E.F., Turner, B.L., Mortimore, M., Batterbury, S.P., Downing, T.E., Dowlatabadi, H., Fernández, R.J., Herrick, J.E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F.T., Ayarza, M. y Walker, B. (2007). Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 31, 847-851.
- Salvador, P., Alonso-Pérez, S., Pey J., Artiñano, B., de Bustos J.J., Alastuey A., et al. (2014). African dust outbreaks over the western Mediterranean Basin: 11-year characterization of atmospheric circulation patterns and dust source áreas. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 6759-6775.
- Sánchez de la Campa, A.S., García Salamanca, A., Solano, J., De la Rosa, J. and Ramos, J.L. (2013). Chemical and microbiological characterization of atmospheric particulate matter during an intense african dust even in southern Spain. *Environ. Sci. Technol.* 47(8), pp 36360-3638.
- Seinfeld, J.H. y Pandis, S.N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change*. Wiley: New Jersey.
- United Nations. UNU (2007). Earth Summit +5: UN conventional to combat Desertification, DPI/1870/SD.
- Varga, G., Újvári, G. y Kovács, J. (2014). Spatiotemporal patterns of Saharan dust outbreaks in the Mediterranean Basin. *Aeolian Research*, 15, 151-160.
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno J.I., Beguería S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C. y Morán-Tejeda, E. (2012). Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17, 318-332.

Implicaciones sanitarias del polvo atmosférico de la ciudad de Granada (España) a partir de los contenidos de REE y la morfología SEM

A. Molinero-García¹, J. M. Martín-García¹, M.V. Fernández-González¹, y R. Delgado¹

¹ Departamento de Edafología y Química Agrícola, Facultad de Farmacia, Universidad de Granada, Campus Universitario Cartuja, 18071, Granada, España, emails: amolinerogarcia@ugr.es; jmmartingarcia@ugr.es

Resumen: La contaminación atmosférica ocupa un lugar relevante entre las preocupaciones de nuestra sociedad. El polvo atmosférico tiene una incidencia negativa en la salud humana (fundamentalmente por inhalación), en el funcionamiento de los ecosistemas y en los procesos de cambio climático. Las partículas PM10 (Particulate Matter <10 µm) y PM2.5 (Particulate Matter <2.5 µm) son peligrosas para nuestra salud por poder penetrar hasta la región traqueobronquial y alveolar, respectivamente. Estas afecciones negativas se potencian si las partículas tienen morfologías fibrosas y composiciones tóxicas. Por ejemplo, altas concentraciones de REE (Rare Earth Element) influyen negativamente en la salud humana. Estas REE, además, pueden ser usadas como trazadoras de procedencia de sedimentos eólicos, aportando información sobre el área fuente del polvo atmosférico.

En este trabajo se analizan muestras de polvo sedimentado en la ciudad de Granada entre 2012 y 2015. Se estudiaron sus contenidos en REE (con ICP-ms), y sus tamaños, morfologías y composición (con SEM-EDX).

El polvo sedimentado en la ciudad de Granada parece tener una mayor influencia local, con aportes menores de zonas del Sahara-Sahel. Aunque el polvo sedimentado no se cataloga como tóxico, no se puede considerar inocuo, pues presenta bajos contenidos de: 1) partículas PM10 y PM2.5, 2) REE, 3) morfologías fibrosas y 4) minerales como cuarzo.

Palabras clave: Elementos traza; trazadores de procedencia de polvo eólico; anomalías geoquímicas; morfología de partículas eólicas.

Abstract: Air pollution is a concern of our society. Atmospheric dust has a negative impact on human health (mainly by inhalation), on ecosystems and on the processes of climate change. The particles PM10 (Particulate Matter <10 µm) and PM2.5 (Particulate Matter <2.5 µm) are dangerous for our health because they can penetrate into the tracheobronchial and alveolar region, respectively. These negative conditions are enhanced if the particles have fibrous morphologies and toxic compositions. For example, high concentrations of REE (Rare Earth Elements) have a negative influence on human health. These REEs can also be used as dust fingerprints, providing information on the source area of atmospheric dust.

In this work, atmospheric sedimented dust sampled between 2012 and 2015 in Granada was analyzed. REE contents (with ICP-ms) and sizes, morphologies and composition (with SEM-EDX) were studied.

Atmospheric sedimented dust in Granada seems to have a greater local influence, with minor contributions from the Sahara-Sahel areas. Although the dust is not classified as toxic, it cannot be considered harmless, due to the low contents of: 1) PM10 and PM2.5 particles, 2) REE contents, 3) fibrous morphologies and 4) minerals such as quartz.

Key words: Trace elements; dust fingerprints; geochemical anomalies; dust morphology.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica ocupa un lugar relevante entre las preocupaciones de nuestra sociedad. El número de estudios sobre polvo atmosférico ha aumentado en las últimas dos décadas debido, entre otros factores, a la negativa incidencia de la inhalación de este polvo en la salud humana, por su afección a los sistemas respiratorio y cardiovascular (Fowler et al., 2009; Jiménez et al., 2010; OMS, 2013). Además, el polvo atmosférico tiene gran incidencia en el funcionamiento de los ecosistemas y en los procesos de cambio climático (IPCC, 2013; Fuzzi et al., 2015). Los principales componentes de polvo atmosférico son iones inorgánicos (los aniones son principalmente nitrato, sulfato y amonio), granos minerales, granos de sal marina y aerosoles carbonosos; el polvo mineral es un constituyente prioritario en el Sur de Europa (Fuzzi et al., 2015).

Las tasas de deposición de polvo atmosférico en la superficie terrestre son cada vez mayores (Prospero et al., 2002). Los vientos erosionan los suelos de los principales desiertos mundiales, transportando grandes cantidades de partículas fundamentalmente hacia las regiones periféricas de los mismos. Éste es el caso de la región mediterránea, donde el principal foco emisor está en las zonas desérticas y subdesérticas de África del Norte, con cantidades medias de 800 Tg año^{-1} lo que equivale aproximadamente a un 70% del polvo atmosférico mundial (Huneeus et al., 2011). Giannadaki et al. (2014) han demostrado que el polvo atmosférico procedente de zonas desérticas es responsable de muertes de enfermos cardiopulmonares a escala global, con una mayor incidencia en los países del "cinturón del desierto" del norte de África, Medio Oriente y sudeste de Asia y donde las ciudades son enclaves especialmente sensibles (Yang et al., 2007; Xie et al., 2014).

El interés ambiental de las tierras raras (REE: lantánidos más itrio) se debe principalmente a que son buenas trazadoras tanto en los estudios de procedencia de materiales (localización del área fuente) como en la identificación de los procesos geoquímicos acaecidos en los distintos ambientes terrestres (Rollinson, 1993). Por ello han sido ampliamente utilizados en estudios paleoambientales, paleoclimáticos, en origen de sedimentos y procesos tectónicos (Chen et al., 2014; Och et al., 2014) y son uno de los principales trazadores en los estudios de movimiento de sedimentos eólicos (Moreno et al., 2006; Yang et al., 2007; Cidu et al., 2013; Xie et al., 2014; Censi et al., 2017; Wang et al., 2017).

Existen numerosos estudios sobre concentraciones de REE en humanos (e.g., Redling, 2006; Chen et al., 2008; Wei et al., 2013; Vergauwen et al., 2018). Destaquemos el estudio de Wei et al. (2013) donde analizan el contenido de REE en el pelo de habitantes en los alrededores de una mina de extracción de REE, concluyendo que la población más próxima a la mina (más expuesta) es donde se encontraron concentraciones mayores y que iban descendiendo conforme se alejaban del foco emisor, poniendo en evidencia la importancia del transporte eólico de estos materiales ricos en REE.

Se ha demostrado que altas concentraciones de REE influyen negativamente en la salud humana. Así, se han descrito sus efectos tóxicos, tales como: fibrosis sistémica nefrogénica (a consecuencia del empleo de agentes de contraste ricos en REE), trastorno neurológico, lesión tisular, estrés oxidativo, neumoconiosis, citotoxicidad y esterilidad masculina (Pagano et al., 2015 a,b; Gwenzi et al., 2018).

La exposición humana a las REE puede ocasionarse por ingesta de agua o alimentos que las contienen, por inhalación de partículas atmosféricas y/o por dosis directas en tratamientos médicos (Li et al., 2013; Wang y Liang 2015; Zhuang et al., 2017a,b; Gwenzi et al., 2018). Es el sistema respiratorio la principal vía de entrada del material particulado en el organismo. Las partículas $<10 \mu\text{m}$ (PM10, partículas torácicas) penetran hasta la región traqueobronquial y las de $<2.5 \mu\text{m}$ (PM2.5, partículas alveolares) pueden alcanzar la cavidad alveolar provocando

mayores afecciones, que se potencian si las partículas tienen morfologías fibrosas (EPA, 2002). De tal manera el tamaño y la morfoscopia resultan de gran interés para caracterizar la nocividad de las partículas. A estos parámetros añadiríamos la composición, detectando como más peligrosas las variedades anfíbol y serpentina o incluso el cuarzo, pudiendo originar problemas de asbestosis y silicosis (Xue et al., 2017).

El presente estudio tiene por objeto caracterizar el polvo atmosférico sedimentado en la ciudad de Granada (España) y sus posibles efectos en la salud humana a partir de los contenidos de REE, y del tamaño, morfología y composición de las partículas estudiada con SEM-EDX. Además se hará referencia al empleo de las REE como trazadoras de procedencia del polvo atmosférico, tópico nunca estudiado en dicha urbe. Un avance de este estudio focalizado en sus aspectos de contenidos de REE se presentó en XII Congreso Nacional de Geoquímica y XI Congreso Ibérico de Geoquímica (Molinero-García et al., 2017).

2. MATERIALES

El material del presente estudio está constituido por 22 muestras recogidas con un equipo colector de polvo atmosférico sedimentable (Orden Ministerial de 10 de agosto de 1976) situado en el Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos (IAG), en el Campus Universitario de Cartuja (Granada). El periodo de recogida comenzó en Marzo de 2012 y finalizó en Mayo de 2015, con una frecuencia del muestreo mensual. Sólo se analizaron 22 muestras, aquellas cuyas cantidades permitieron estos análisis.

3. METODOLOGÍA

A 0.1 g de muestra digerida en HNO_3 y HF se le determinó los contenidos de REE con un ICP-ms (inductively coupled plasma mass spectrometry) con fuente de ionización por antorcha de plasma y filtro de iones por cuadrupolo ICP_MS NEXION 300D del Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada. Las REE fueron agrupadas en: Ligeras (LREE: La, Ce, Pr, Nd); Medias (MREE: Sm, Eu, Gd, Tb, Dy); y Pesadas (HREE: Ho, Er, Tm, Yb, Lu); el Y no se considera en esta clasificación.

Las concentraciones de REE fueron normalizadas a condrito (standard CI chondrite de McDonough y Sun, 1995), representando Y entre Ho y Er (Korotev, 2009), y calculando los índices geoquímicos $\text{HREE}_N/\text{LREE}_N$ y $\text{MREE}_N/\text{LREE}_N$ y las anomalías Ce/Ce^* , Eu/Eu^* , Y/Y^* y Er/Er^* ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = \text{Ce}_N/(\text{La}_N \times \text{Pr}_N)^{1/2}$; $\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_N/(\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2}$; $\text{Y}/\text{Y}^* = \text{Y}_N/(\text{Ho}_N \times \text{Er}_N)^{1/2}$; $\text{Er}/\text{Er}^* = \text{Er}_N/(\text{Y}_N \times \text{Tm}_N)^{1/2}$) (Mourier et al., 2008; Laveuf y Cornu, 2009; Feng et al., 2011); el sufijo "N" indica que se emplea el valor normalizado a condrito.

Las muestras fueron montadas en portamuestras de aluminio y metalizadas con carbono. Se ha utilizado el instrumental perteneciente a la Unidad de Microscopia Electrónica de Barrido del Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada (Facultad de Farmacia). Se utilizó el microscopio electrónico de barrido (SEM), modelo Hitachi S-510 (voltaje de aceleración 25kV) dotado de un detector de EDX Rontec, 288, M-Serie, Edwin.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran las sumatorias de los contenidos medios de REE por estaciones (otoño, invierno, primavera, verano) de las muestras analizadas. La más abundante fue la ΣLREE , seguida de la ΣMREE , y la ΣHREE está en menor cantidad. En el periodo otoñal fue cuando se recogieron mayores cantidades (93.07 ppm), seguido del verano (74.01 ppm), primavera (61.41 ppm) e invierno (53.51 ppm); este mismo orden de abundancia siguen las ΣLREE y ΣMREE , mientras que en las ΣHREE el orden es otoño>verano>invierno>primavera (Tabla 1).

TABLA 1 Valores medios estacionales de REE (ppm) (y desviación estándar) de muestras de polvo atmosférico sedimentado de la ciudad de Granada (periodo Marzo de 2012 a Mayo de 2015)

	Otoño (n=4)		Invierno (n=3)		Primavera (n=8)		Verano (n=7)		Total (n=22)	
	Media	Desv. típica	Media	Desv. típica	Media	Desv. típica	Media	Desv. típica	Media	Desv. típica
Σ LREE	75.15	15.71	43.35	21.12	48.80	27.60	59.27	25.28	56.18	25.10
Σ MREE	7.53	1.30	4.01	2.26	5.26	2.92	6.25	2.79	5.82	2.65
Σ HREE	2.27	0.45	1.86	1.77	1.60	0.79	1.96	0.82	1.87	0.89
Σ REE	93.07	18.67	53.51	27.60	61.41	34.40	74.01	31.48	70.10	31.21

En la Figura 1 se muestra la normalización a condrito de las muestras, evidenciándose los siguientes hechos: 1) en todos los casos los valores son superiores a 1 (mayores cantidades que en el meteorito de referencia); 2) el polvo muestra un enriquecimiento de LREE, apareciendo una fuerte pendiente en el perfil que se dulcifica a partir del elemento Eu y que se aproxima a casi plano en la región de las HREE; esto se corrobora con los valores de las razones $MREE_N/LREE_N$ y $HREE_N/LREE_N$ de la Tabla 2, que se encuentran próximos a 0.17 y 0.13, respectivamente; 3) se aprecia una pronunciada anomalía negativa de europio (Eu/Eu*) en las muestras (0.56); en cuanto al resto de anomalías (Ce/Ce*, Y/Y* y Er/Er*) es de destacar la anomalía positiva de Er/Er* (1.20); 4) en las muestras de suelos españoles y europeos se aprecian enriquecimientos de LREE (con fuertes pendientes) y perfiles casi planos en la región de las HREE; 5) En las muestras de Sahara-Sahel tienen un comportamiento en diente de sierra a partir de la anomalía de europio; 6) Es de destacar la pronunciada anomalía de erbio de las muestras de polvo, asemejándose a las muestras del Sahara-Sahel.

El contenido de Σ REE en los materiales sedimentados en la ciudad de Granada (70.1 ppm; Tabla 1) es inferior a la de los horizontes superficiales de los suelos españoles (187.6 ppm) (Locutura et al., 2012), a la de los suelos europeos (125.6 ppm; sin considerar Y) (Salminen et al., 2005) y a la de los suelos y materiales resuspendidos del corredor Sahara-Sahel (entre 142.5 y 379.0 ppm) (Moreno et al., 2006).

Respecto a los índices geoquímicos calculados como fingerprints de procedencia del polvo atmosférico, el índice geoquímico $HREE_N/LREE_N$ (0.13) (Tabla 2) es más parecido al de los suelos españoles (0.10) y algo próximo a los suelos europeos; en el caso del índice $MREE_N/LREE_N$ es idéntico al de los suelos españoles (0.17) y parecido a los suelos de Europa y a muestras del Sahara Sahel.

Respecto a las anomalías geoquímicas de las REE (Tabla 2), la de cerio es positiva (1.09) idéntica a la de Níger. En el caso de la Eu/Eu*, siempre es negativa (<1) y las de Granada (0.56) son casi idénticas a la de los suelos españoles (0.58) y muy parecidas a los suelos europeos (0.61) y los materiales de Níger (0.53). En la anomalía de itrio (siempre negativa), en cambio, las de nuestros polvos eólicos (0.88) son iguales a las del Macizo Hoggar (0.88). Por último, las del erbio de nuestras muestras no reflejan un gran parecido con ninguno de los materiales comparados. Por tanto, del análisis detallado de las REE (concentraciones, índices geoquímicos –incluyendo anomalías– y perfil normalizado a condrito) de los polvos eólicos de la ciudad de Granada se puede deducir que su procedencia es variada.

TABLA 2 Índices geoquímicos de REE (media y desviación estándar) de muestras de polvo atmosférico sedimentado de la ciudad de Granada y de suelos y materiales resuspendidos del corredor Sahara-Sahel (Moreno et al., 2006).

	HREE _N / LREE _N		MREE _N / LREE _N		Ce/Ce*		Eu/Eu*		Y/Y*		Er/Er*	
	Media	Desv. típica	Media	Desv. típica	Media	Desv. típica	Media	Desv. típica	Media	Desv. típica	Media	Desv. típica
Este estudio (n=22)	0.13	0.02	0.17	0.01	1.09	0.13	0.56	0.07	0.88	0.13	1.20	0.55
Suelos de España ^a	0.10		0.17		1.01		0.58		0.98		1.03	
Suelos de Europa ^b	0.17		0.22		1.01		0.61		nd		nd	
Materiales de Sahara-Sahel ^c												
Macizo Hoggar	0.24		0.21		1.06		0.30		0.88		0.83	
Cuenca del Chad	0.19		0.25		0.98		0.76		0.69		1.02	
Níger	0.26		0.23		1.09		0.53		0.67		1.04	
Sahara Oeste	0.20		0.24		1.05		0.49		0.55		1.39	
Media Sahara-Sahel	0.22	0.03	0.23	0.03	1.04	0.05	0.51	0.21	0.68	0.13	1.10	0.32

nd, no hay datos

^a media de horizontes superficiales de suelos españoles (Locutura et al., 2012)

^b media de horizontes superficiales de suelos europeos (Salminen et al., 2005)

^c suelos, polvo resuspendido y polvo eólico depositado de Sahara-Sahel (Moreno et al., 2006)

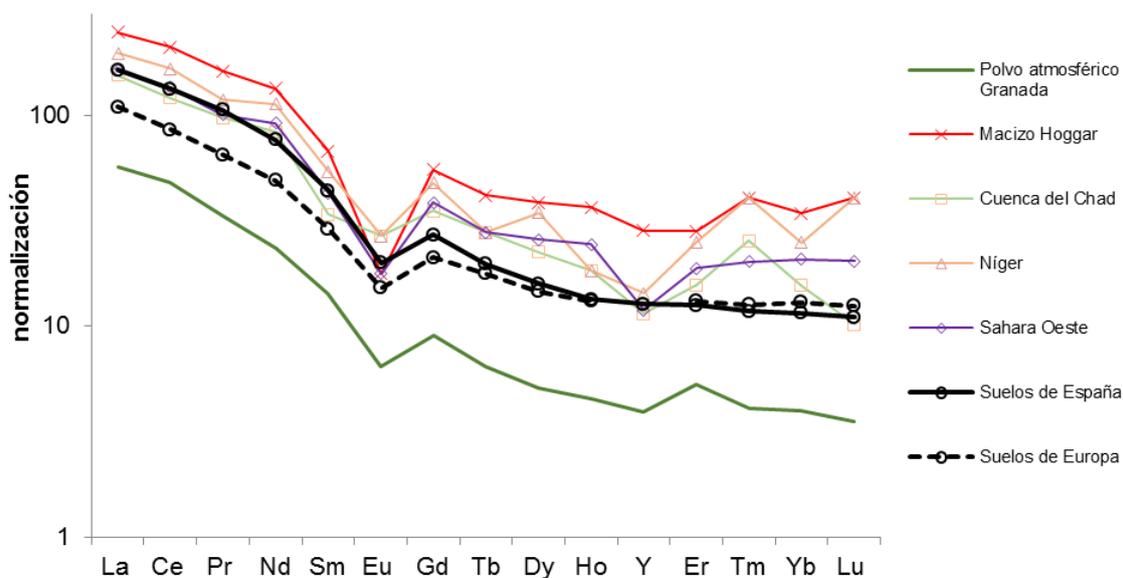


FIGURA 1. Concentraciones de REE normalizadas a condrito en los polvos sedimentados en la ciudad de Granada, los materiales del corredor Sahara-Sahel y las medias de los suelos españoles y europeos

La incidencia de las REE procedentes de inhalación de polvo atmosférico en la salud humana es un aspecto poco estudiado (Li et al., 2018; Gwenzi et al., 2018), y existe una gran incertidumbre al no haberse establecido ningún valor límite de inhalación para REE. En cambio, existen trabajos sobre evaluación de riesgos para la salud humana por ingesta de vegetales cultivados sobre suelos contaminados con REE (Li et al., 2013). Éstas se concentran en los tejidos vegetales diferencialmente, dependiendo de la parte de la planta (Zhuang et al., 2017a). Li et al. (2013) concluyen en su análisis de vegetales cultivados en suelos con relativas altas concentraciones de REE, por ubicarse en los alrededores de minas a cielo abierto de REE, que la ingesta de dichos vegetales (donde el contenido de REE en tejido oscila entre 0.07 y 64.42 ppm) no debe suponer un riesgo para la salud humana. A la misma conclusión llegan

Zhuang et al. (2017a) sobre la ingesta de vegetales con REE (entre 0.04 y 0.24 ppm) en zonas de suelos contaminados.

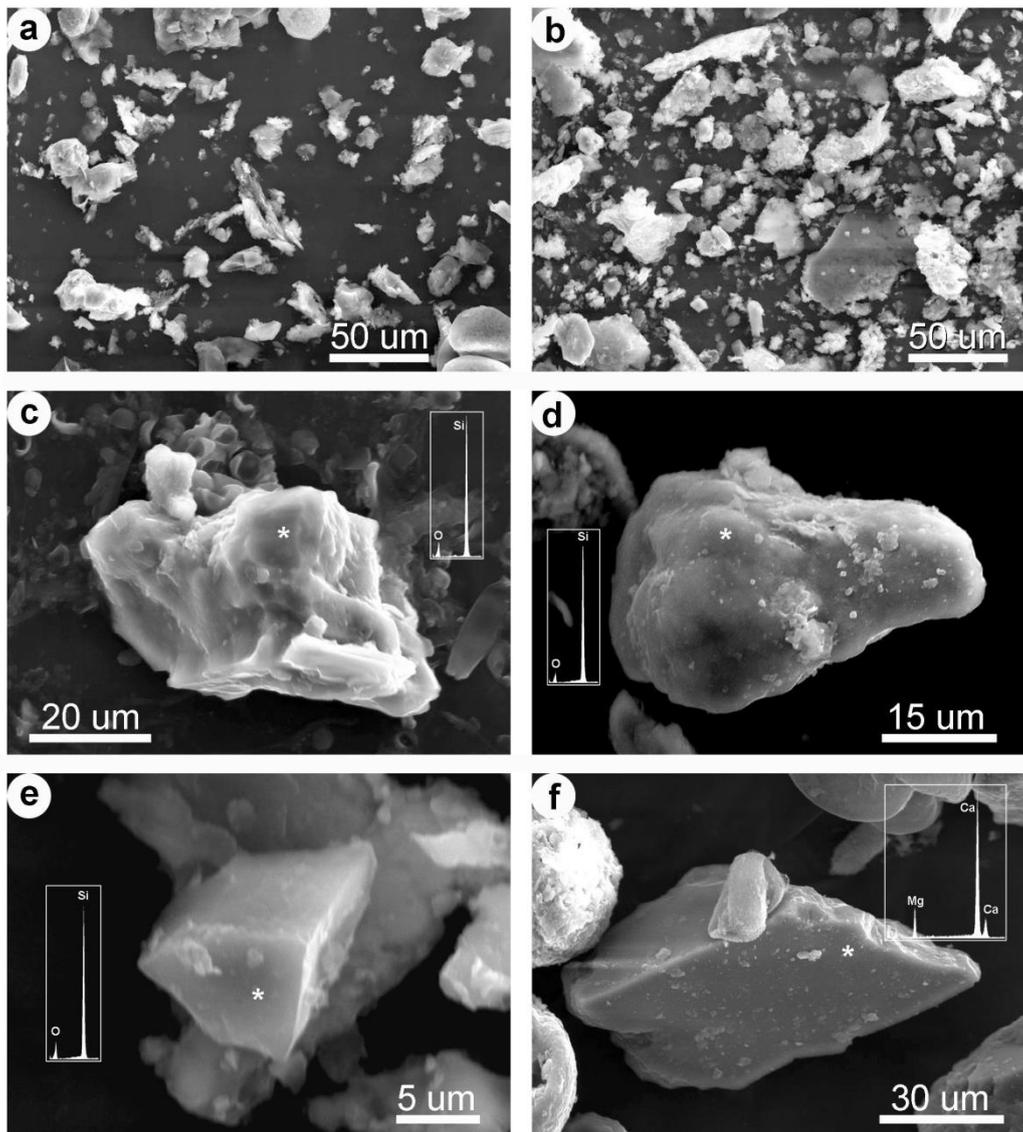


FIGURA 2. Imágenes SEM-EDX del polvo atmosférico de la ciudad de Granada. a) y b) campo de partículas. Destacan algunas fibrosas ($L/A \geq 3$) y las menores de 5 y 2.5 μm . c) partícula de cuarzo elongada, de unas 60 μm , con la superficie irregular y aristas angulosas. Sobre ella, al sur-este tiene adherida una partícula fibrosa ($L/A \approx 4$). d) partícula de cuarzo elongada, de alrededor de unas 60 μm , con la superficie subredondeada. e) partícula de cuarzo pseudopoliédrica, de unas 10 μm , con aristas agudas. f) partícula de dolomita cercana a las 100 μm , elongada ($L/A \approx 2$) y con aristas subagudas.

Comparando estos datos con los contenidos de REE del polvo atmosférico en la ciudad de Granada (70 ppm de valor medio –Tabla 1–, contenido en el polvo sedimentado durante aproximadamente 30 días, a una razón de 2.33 ppm diarios), y haciendo la salvedad de que los vegetales son ingeridos pasando al tracto digestivo, mientras que el polvo es inhalado pasando al tracto respiratorio, podemos inferir que las cantidades diarias de REE inhaladas en la ciudad de Granada no son potencialmente peligrosas, al estar dentro del rango de valores que Zhuang et al. (2017a) y Li et al. (2013) consideraron no peligrosos en la ingesta de vegetales.

La Figura 2 recoge los resultados de SEM-EDX. No se descarta en el polvo sedimentado la presencia de partículas con tamaños que pertenecerían a la fracción PM10 e incluso algunas a PM2.5. El tamaño medio, sin embargo, se encuentra entre las 50 y las 100 μm . Con estos tamaños, las partículas menores podrán penetrar hasta la Región Traqueobronquial (PM10-2.5) e incluso Alveolar (PM<2.5), mientras que las de mayor tamaño quedarán en la Región Extratoracica (>PM10). La relación de dimensiones de las partículas puede calificar a la partícula como fibra tóxica, cuando la partícula posee una longitud >5 μm , diámetro o anchura <3 μm y una relación longitud/diámetro ≥ 3 . La relación longitud/diámetro ≥ 3 aparece en las muestras en un porcentaje inferior al 10%, mientras que si tomamos en cuenta el resto de criterios, el porcentaje es prácticamente inapreciable. Respecto a la morfoscopía de la superficie hemos encontrado cosas diferentes que abarcan las subredondeadas (Figura 2-d), hasta subangulosas (Figura 2-c), e incluso angulosas (Figura 2-e). Estas últimas subangulosas y angulosas se consideran más agresivas para las células de los epitelios. El parámetro composición química determinado con EDX (y sus equivalencias minerales) nos habla de que el polvo carece de materiales altamente tóxicos como variedades de serpentinas (crisotilo) y anfíbol, pero si presenta cuarzo (SiO_2) y carbonatos tipo dolomita.

5. CONCLUSIONES

Con la información aportada mediante las REE, se puede saber que el área fuente del polvo sedimentado en la ciudad de Granada, en el periodo estudiado, es variada. Hay una mayor influencia de los suelos circundantes y menor de los materiales procedentes del Sahara-Sahel. La exposición a REE de la población de Granada a través del polvo atmosférico depositado, no parece ser suficiente como para afectar a la salud de los habitantes. Es necesario evaluar también otras posibles vías de entrada como la absorción dérmica o la ingestión, para poder conocer con mejor criterio la exposición completa de la población a contaminantes de este tipo. El estudio SEM-EDX refleja un material que no siendo de nocividad alta tampoco puede considerarse inocuo, debido a la presencia, aunque en bajas cantidades, de partículas PM2.5 y de morfologías subangulosas y angulosas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España de título 'Tipologías de Suelos Mediterráneos versus Cuarzo. En la frontera del conocimiento edafogenético' (CGL2016-80308-P).

REFERENCIAS

- Censi, P., Cibella F., Falcone, E.E., Cuttitta, G., Saiano, F., Inguaggiato, C. y Latteo, V. (2017). Rare earths and trace elements contents in leaves: A new indicator of the composition of atmospheric dust. *Chemosphere*, 169, 342-350.
- Chen, M., Sun, M., Cai, K., Buslov, M.M., Zhao, G. y Rubanova, E.S. (2014). Geochemical study of the Cambrian–Ordovician meta-sedimentary rocks from the northern Altai-Mongolian terrane, northwestern Central Asian Orogenic Belt: implications on the provenance and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 96, 69–83.
- Chen, Z. Y. y Zhu, X. D. (2008). Accumulation of rare earth elements in bone and its toxicity and potential hazard to health. *J Ecol Rural Environ*, 24, 88-91.
- Cidu, R., Biddau, R. y Antisari, L.V. (2013). Investigation on REE transported by airborne dust and deposited on vegetation. *Procedia Earth and Planetary Science*, 7, 69-72.
- EPA (2002) Third external review draft of air quality criteria for particulate matter. USEPA

- Feng, L.J., Gao, S.P. y Zhang, J.F. (2011). Lanthanide tetrad effect in ferromanganese concretions and terra rossa overlying dolomite during weathering. *Chemie der Erde*, 71, 349–362.
- Fowler, D., Pilegaard, K., Sutton, M., Ambus, P., Raivonen, M., Duyzer, J., et al. (2009) Atmospheric composition change: Ecosystems-Atmosphere interactions, *Atmos. Environ.*, 43, 5193–5267.
- Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier Van Der Gon, H., Facchini, M. C., et al. (2015). Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric chemistry and physics*, 15(14), 8217-8299.
- Gwenzi, W., Mangori, L., Danha, C., Chaukura, N., Dunjana, N. y Sanganyado, E. (2018). Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants. *Science of The Total Environment*, 636, 299-313.
- Huneeus, N., Schulz, M., Balkanski, Y., Griesfeller, J., Prospero, J., Kinne, S., et al. (2011). Global dust model intercomparison in AeroCom phase I. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 7781–7816.
- IPCC: Fifth Assessment Report: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.- K., Tignor, M., Allen, S. K., Doschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press.
- Jiménez, E., Linares, C., Martínez, D. y Díaz, J. (2010). Role of Saharan dust in the relationship between particulate matter and short-term daily mortality among the elderly in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 408(23), 5729-5736.
- Korotev, R.L. (2009). “Rare earth plots” and the concentrations of rare earth elements (REE) in chondritic meteorites. Recuperado de <http://meteorites.wustl.edu/goodstuff/ree-chon.htm>.
- Laveuf, C. y Cornu, S. (2009). A review on the potentiality of rare earth elements to trace pedogenetic processes. *Geoderma*, 154, 1–12.
- Li, X., Chen, Z., Chen, Z., y Zhang, Y. (2013). A human health risk assessment of rare earth elements in soil and vegetables from a mining area in Fujian Province, Southeast China. *Chemosphere*, 93(6), 1240-1246.
- Li, K., Liang, T., Wang, L., y Tian, S. (2018). Inhalation exposure and potential health risk estimation of lanthanides elements in PM 2.5 associated with rare earth mining areas: a case of Baotou city, northern China. *Environmental geochemistry and health*, 1-11.
- Locutura, J., Bel-lan, A., García, C.A. y Martínez, S. (2012). Atlas Geoquímico de España. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- McDonough, W.F. y Sun, S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253.
- Molinero-García, A., Martín-García, J.M., Párraga-Martínez, J., Fernández-González, M. V. y Delgado, R. (2017). Concentración de REE en polvo atmosférico de la ciudad de Granada.

- En: XII congreso nacional y XI ibérico de geoquímica. Investigar los recursos cuidando el ambiente, Comunicación: 212-215.
- Moreno, T., Querol, X., Castillo, S., Alastuey, A., Cuevas, E., Herrmann, L., Mounkaila, M., Elvira, J. y Gibbons W. (2006). Geochemical variations in aeolian mineral particles from the Sahara-Sahel Dust Corridor. *Chemosphere*, 65, 261-270.
- Mourier, B., Poulénard, J., Chauvel, C., Faivre, P. y Carcaillet, C. (2008). Distinguishing subalpine soil types using extractible Al and Fe fractions and REE geochemistry. *Geoderma*, 145, 107–120.
- Och, L.M., Muller, B., Wichser, A., Ulrich, A., Vologina, E.G. y Sturm M. (2014). Rare earth elements in the sediments of Lake Baikal. *Chemical Geology*, 376, 61–75.
- OMS: Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project, World Health Organisation, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, 2013.
- Pagano, G., Aliberti, F., Guida, M., Oral, R., Siciliano, A., Trifuoggi, M. y Tommasi, F. (2015a). Rare earth elements in human and animal health: state of art and research priorities. *Environmental research*, 142, 215-220.
- Pagano, G., Guida, M., Tommasi, F., y Oral, R. (2015b). Health effects and toxicity mechanisms of rare earth elements—Knowledge gaps and research prospects. *Ecotoxicology and environmental safety*, 115, 40-48.
- Prospero, J., Ginoux, P., Torres O. y Nicholson S.E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40(1), 1002.
- Redling K. (2006). Rare Earth Elements in Agriculture with Emphasis on Animal Husbandry. Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft Giessen, München.
- Rollinson, H.R. (1993). Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Harlow: Prentice Hall.
- Salminen, R. (Chief-editor), Batista, M. J., Bidovec, M., Demetriades, A., De Vivo, B., De Vos, W., et al. (2005). Geochemical Atlas of Europe. Part 1: Background Information, Methodology and Maps. Espoo, Geological Survey of Finland. Recuperado de <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/index.php>
- Vergauwen, E., Vanbinst, A.M., Brussaard, C., Janssens, P., De Clerck, D., Van Lint, M., et al. (2018). Central nervous system gadolinium accumulation in patients undergoing periodical contrast MRI screening for hereditary tumor syndromes. *Hereditary Cancer Clin. Pract.* 16 (1), 2.
- Wang, L. y Liang, T. (2015). Geochemical fractions of rare earth elements in soil around a mine tailing in Baotou, China. *Scientific reports*, 5, 12483.
- Wang, G., Li, J., Ravi, S., Van Pelt, R.S., Costa P.J.M. y Dukes D. (2017). Tracer techniques in aeolian research: Approaches, applications, and Challenges. *Earth-Science Reviews*, 170, 1–16.

- Wei, B., Li, Y., Li, H., Yu, J., Ye, B. y Liang, T. (2013). Rare earth elements in human hair from a mining area of China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 96, 118-123.
- Xie, Y., Meng, J. y Guo, L. (2014). REE geochemistry of modern eolian dust deposits in Harbin city, Heilongjiang province, China: Implications for provenence. *Catena*, 123, 70-78.
- Xue, C., Wu, N., Li, X., Qiu, M., Du, X. y Ye, Q. (2017). Serum concentrations of Krebs von den Lungen-6, surfactant protein D, and matrix metalloproteinase-2 as diagnostic biomarkers in patients with asbestosis and silicosis: a case–control study. *BMC pulmonary medicine*, 17(1), 144.
- Yang, X., Liu, Y., Li, C., Song, Y., Zhu, H. y Jin, X. (2007). Rare earth elements of aeolian deposits in Northern China and their implications for determining the provenance of dust storms in Beijing. *Geomorphology*, 87, 365–377.
- Zhuang, M., Zhao, J., Li, S., Liu, D., Wang, K., Xiao, P., et al. (2017a). Concentrations and health risk assessment of rare earth elements in vegetables from mining area in Shandong, China. *Chemosphere*, 168, 578-582.
- Zhuang, M., Wang, L., Wu, G., Wang, K., Jiang, X., Liu, T., et al. (2017b). Health risk assessment of rare earth elements in cereals from mining area in Shandong, China. *Scientific reports*, 7(1), 9772.

Biofortificación agronómica de alimentos vegetales mediante residuos de la industria cafetera

A. Cervera Mata¹, J.A. Rufián Henares², S. Pastoriza de la Cueva², M. Navarro Alarcón²,
G. Delgado Calvo-Flores¹

¹ Dpto. de Edafología y Química Agrícola, Facultad de Farmacia, Universidad de Granada

² Dpto. de Nutrición y Bromatología, Facultad de Farmacia, Universidad de Granada

Resumen: La biofortificación agronómica, basada principalmente en la adición al suelo de sales o quelatos, incrementa el contenido mineral de los alimentos para corregir deficiencias en los mismos. Por su alta producción anual, se hace necesaria una reutilización posos de café (SCG) y teniendo en cuenta su marcada capacidad quelante, el objetivo de este trabajo es evaluar su papel como agentes biofortificantes de plantas alimenticias. Para ello, se ensayaron dos tipos de suelo (Vega y Rojo), dos dosis de SCG (2.5 y 10% w:w) y cuatro tiempos (15, 30, 45 y 60 días). El ensayo *in vitro* se llevó a cabo con lechugas (*Lactuca sativa*) en cámara climática. En las muestras con SCG se incrementaron el Ca, Mg, Cu, Fe y Zn durante el tiempo de cultivo, en ambos tipos de suelos. La adición de SCG incrementó el porcentaje de la *cantidad diaria recomendada* de Ca (48%), Fe (69%), Mg (29%), Cu (22%) y Zn (5.7%). El incremento de elementos nutrientes en lechugas con la presencia de SCG, podría explicarse por la quelación por parte de las melanoidinas y polifenoles, componentes de los SCG. En conclusión, la adición de SCG genera lechugas con un mayor valor nutritivo.

Palabras clave: posos de café, elementos minerales, enmienda orgánica, biofortificación agronómica, lechuga

Abstract: *Agronomic biofortification, based mainly on the addition of salts and chelates to soils, increases the mineral content of foods to correct deficiencies in them. Because of its high annual production, it is necessary to reuse spent coffee grounds (SCG) and taking into account its marked chelating capacity, the objective of this work is to evaluate its role as biofortifying agents of food plants. Two types of soil (Vega and Red), two doses of SCG (2.5 and 10% w: w) and four cultivation times (15, 30, 45 and 60 days) were tested. The in vitro assay was carried out with lettuce (Lactuca sativa) in a climatic chamber. The concentrations of Ca, Mg, Cu, Fe and Zn increased during the cultivation time in samples added with SCG. The addition of SCG increased the percentage of the recommended daily amount of Ca (48%), Fe (69%), Mg (29%), Cu (22%) and Zn (5.7%). The increase of nutrient elements in samples added with SCG with respect to the control samples could be explained by the chelation of some components of the SCG, such as melanoidins and polyphenols. In conclusion, the addition of SCG generates lettuces with a higher nutritional value.*

Keywords: *spent coffee grounds, mineral elements, organic amendment, agronomic biofortification, lettuce*

1. INTRODUCCIÓN

La biofortificación es un procedimiento que tiene como objetivo incrementar la extracción y la acumulación de micronutrientes (ej. Fe, I, Cu, Zn, Mn, Co, Se) en cosechas a través de la fertilización y la manipulación de las prácticas agrícolas (biofortificación agronómica), o de la ingeniería genética (Bouis y Saltzman, 2017). La mayor parte de las estrategias que se emplean para biofortificar agronómicamente los alimentos consisten en añadir al suelo sales inorgánicas o quelatos de los elementos deficitarios (Yin y Yuan, 2012). La biofortificación se ha

utilizado recientemente para paliar la malnutrición por micronutrientes o déficit de vitaminas y minerales, también conocida como hambre oculta (hidden hunger) (Godecke et al., 2018). El hambre oculta afecta a más de dos billones de personas en todo el mundo (FAO et al., 2015), con una mayor prevalencia en los países en vías de desarrollo.

Los los posos de café (spent coffee grounds, SCG), son un bioresiduo obtenido durante la producción de café soluble tras el tratamiento del café en polvo crudo con agua caliente o vapor a presión (Mussatto et al., 2011). Los SCG representan una producción anual alrededor de 6 millones de toneladas (Tokimoto et al., 2005). Además, los SCG son un subproducto de la industria cafetera que conlleva un gran impacto medioambiental debido a su alta humedad, pH ácido, y compuestos fenólicos como los taninos y cafeína (Leifa et al., 2000). Por tanto, se hace necesaria una alternativa de reutilización para su manejo sostenible.

Recientemente se han llevado a cabo diferentes estudios de reutilización de SCG como enmiendas orgánicas de suelos para la posible mejora de la nutrición mineral de plantas alimenticias (Cruz et al., 2014; Cruz et al., 2015), ya sean frescos, previamente compostados o mediante compostaje directo en el suelo. La adición de SCG frescos a sustratos para el cultivo produce una disminución de Mg, P, Ca, Na Fe, Mn, Zn and Cu, lo que es atribuido por los autores citados a la retención de minerales por la matriz de posos de café a través de la presencia de sustancias quelantes de metales o debido a la presencia de cafeína. Sin embargo, en las mismas condiciones, los SCG compostados, en dosis bajas, mejoran el estatus de Mg, Mn, K y Na en planta, debido a la mejor fitodisponibilidad de dichos elementos generada durante el compostaje, así como por la degradación de la cafeína (Cruz et al., 2014). En otro estudio estos autores compostaron los SCG directamente en el suelo durante 4 meses y encontraron que las lechugas tratadas con 20% and 30% de SCG presentaban altos contenidos de minerales totales en comparación con las lechugas a las que se le habían adicionado bajos porcentajes de SCG (Cruz et al., 2015). Otros investigadores también encontraron un incremento en el contenido mineral (Fe, Zn and Mn) de arroz integral tras la aplicación de SCG enriquecido con Fe y Zn (Morikawa y Saigusa, 2011). El grupo de Kasongo et al. (2013) también investigaron la adición de otro tipo de residuos del café (cascarilla y pulpa de café) en la nutrición mineral de plantas y encontraron que la aplicación de este tipo de residuos de café estimulaban la absorción de Ca, Mg, K N y P y disminuía las cantidades de Cu, Zn, Mn y Fe. Sin embargo, todos los autores citados con anterioridad no emplearon suelos de cultivo típicos, sino que adicionaron los SCG a suelos muy arenosos, contaminados o a sustratos de cultivo, como turba. Esto es un aspecto a tener en cuenta ya que las características nutricionales de una planta van a depender de las propiedades químicas, físicas y fisicoquímicas del tipo de suelo o del sustrato de cultivo empleados (Ceglie et al., 2015). El comportamiento descrito de los SCG se puede atribuir a la capacidad quelante de los alguno de los compuestos que contienen como las melanoidinas o polifenoles (Rufián Henares y Pastoriza, 2009). Estos quelatos son estables y podrían degradarse en el suelo y hacer más disponibles los elementos para la planta (Cervera-Mata et al., 2018).

Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores los SCG se podrían utilizar como agentes biofortificantes. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar y cuantificar los efectos de los SCG como tales, evaluando su efecto sobre la calidad nutricional de plantas alimenticias (lechugas), más específicamente sobre su contenido en elementos minerales.

2. METODOLOGÍA

Suelos, posos de café y lechuga

Las muestras de suelo se obtuvieron de la capa arable (0-20cm) de dos suelos de clima mediterráneo (Andalucía, sur de España): suelo de Vega (Typic Calcixerept, típico, arcilloso, ilítico y méxico (Soil Survey Staff, 2015), y suelo Rojo (Cálcico Rhodoxeralf, álcico, arcilloso, de

mineralogía mixta y méxico (Soil Survey Staff, 2015)). El suelo de Vega (37° 14'07.1"N 3° 45'40.7"W) es típico para el cultivo de cosechas de maíz y alfalfa bajo riego, y el suelo Rojo (36° 59'02.8"N 3° 36'54.3"W) se utiliza para los cultivos de cereales en secano. Las muestras de suelo fueron secadas al aire y tamizadas (<2 mm).

Los granos de café (100% Arábica) empleados para la obtención de los SCG, fueron suministrados por la empresa granadina Café Cumbal, S.A. Los SCG fueron obtenidos por molienda, mezcla con agua destilada hirviendo y filtrado, en proporción 50g de café, por litro de agua. (Rufián-Henares y Pastoriza, 2009). Los SCG fueron secados al aire para su análisis y posterior empleo como enmienda orgánica.

El ensayo se llevó a cabo con *Lactuca sativa* var. *longifolia* (Little Duende). Las lechugas fueron adquiridas con 30 días de vida en un centro de jardinería (Saliplant, Granada, España). Es una de las variedades más pequeñas, lo que hace que se adapte bien para experimentos en cámara climática.

Diseño experimental

El ensayo se llevó a cabo con tres replicas, dos suelos diferentes (Vega y Rojo), dos dosis de SCG (2.5 and 10%) y cuatro tiempos de cultivo (15, 30, 45 y 60 días). Se emplearon muestras control a tiempo 0 y 0 dosis de SCG. El total de muestras fue de 72. En todos los casos la muestra de tierra fina de suelo (< 2mm) fue mezclada con diferentes cantidades de SCG para obtener un total de 400g de mezcla suelo-SCG. Las plántulas de lechuga de 30 días de edad, fueron sembradas en los 400g de mezcla Suelo-SCG, dentro de una maceta de PVC de 300ml de capacidad. Las macetas fueron cerradas en su parte inferior con una doble malla de fibra de vidrio lavada a los ácidos, para evitar la pérdida de partículas finas, pero que permita el tránsito de agua y aire. La humedad de las macetas se mantuvo entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. Las macetas fueron incubadas en una cámara climática para estandarizar las condiciones ambientales. El fotoperiodo fue de 12/12h; la humedad relativa, 60/80% (día/noche) y la temperatura, de 22/18 °C (día/noche). La densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) fue de 350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}^1$, medida en la parte superior de la planta con un sensor 190 SB (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA).

Análisis del contenido mineral en las muestras de lechuga

Las muestras de lechuga se desecaron a 65°C durante 24h. Posteriormente se llevó a cabo una digestión con ácido nítrico y perclórico y los contenidos de Ca, Mg, Cu, Fe y Zn se cuantificaron mediante espectrofotometría de absorción atómica (Perkin Elmer), según el método de Oliveira et al. (2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución del contenido en elementos minerales

La adición de 2.5 y 10% SCG incrementa el contenido de Ca, Mg, Cu, Fe y Zn en las lechugas cultivadas tanto en el suelo de Vega como en el Suelo Rojo (Figura 1). Tampoco se observan diferencias entre los contenidos mayores y menores de SCG. Se puede decir que el efecto biofortificante se garantiza en los bajos porcentajes, lo que facilita su empleo a nivel de campo. A excepción del Ca y del Mg, durante los primeros 15 días de cultivo, se produce una disminución de elementos, debida probablemente al estrés sufrido por la planta al ser trasplantada. Esta disminución por estrés queda atenuada en aquellas muestras adicionadas con SCG, lo que puede suponer una ventaja desde el punto de vista agronómico. Durante el resto del tiempo de cultivo los elementos minerales aumentaron hasta superar los valores iniciales tanto con SCG como sin SCG, pero con SCG el aumento fue mayor, salvo en el caso del Cu y del Zn.

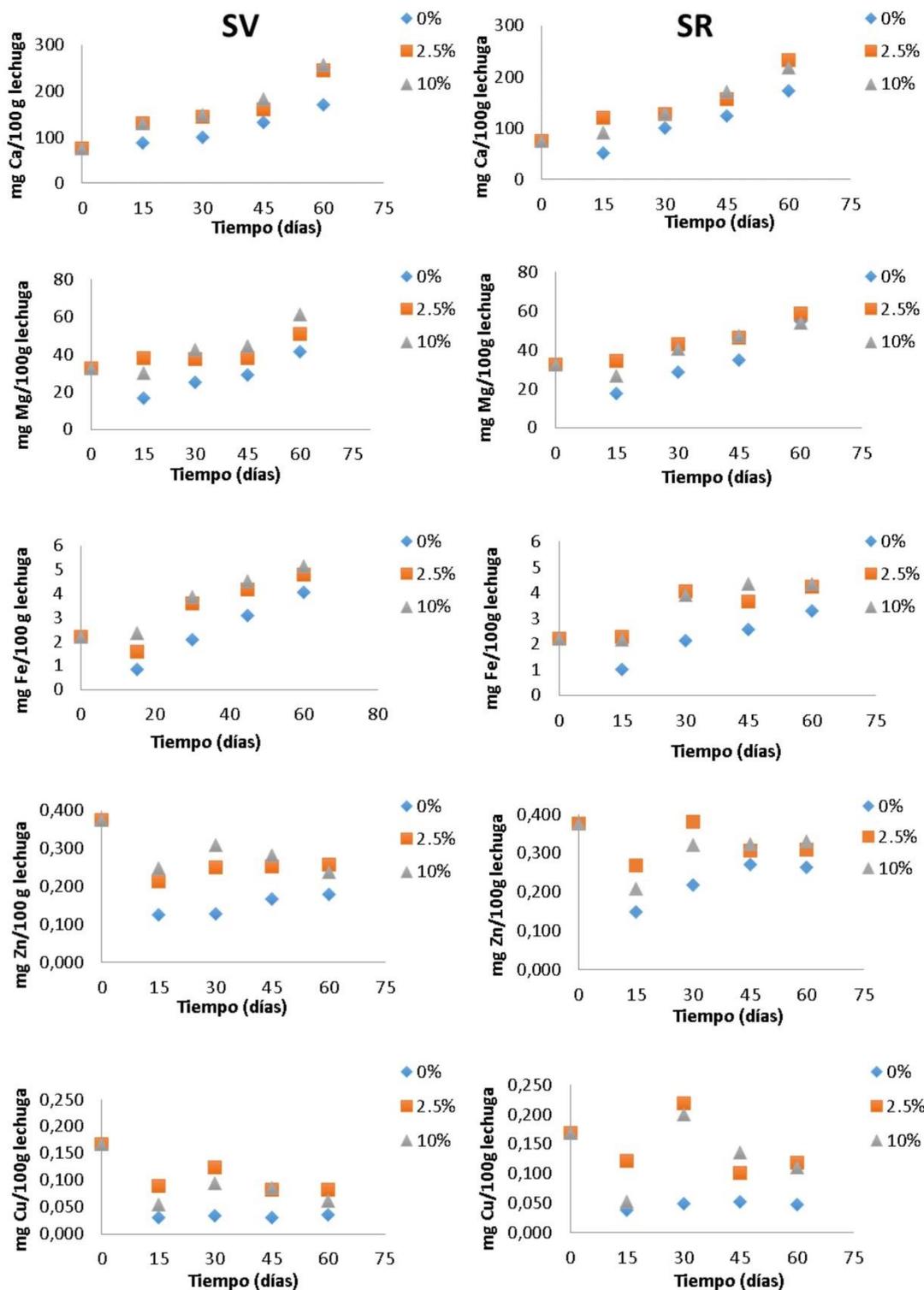


FIGURA 1. Contenido de Ca, Mg, Cu, Fe y Zn durante el cultivo, tras la adición de 0, 2.5 y 10% SCG. SV: suelo de Vega; SR: suelo Rojo

Este aumento en los niveles de elementos nutrientes por SCG y otras residuos del café se ha relacionado con el efecto quelante de algunos de sus componentes, como las melanoidinas,

polifenoles o carbohidratos (Kasongo et al., 2011; Liu et al., 2015). En este sentido, Rufián Henares y Pastoriza (2009) determinaron la capacidad quelante de las melanoidinas extraídas del café frente al Fe y observaron cómo estos compuestos disminuían el Fe libre y aumentaban el Fe quelado. Específicamente, el cincuenta por ciento del hierro fue quelado a una concentración de melanoidina de 2.5 mg / ml. Estos quelatos formados por melanoidinas y otras moléculas quelantes se liberarían poco a poco, mientras que los SCG se degradarían en el suelo. De esta forma, SCG podría convertirse en fertilizante de acción lenta (Ciesielczuk y Rosik-Dulewska, 2015).

Implicaciones nutricionales de la adición de SCG

En la tabla I se muestra la cantidad del Ca, Mg, Cu, Fe y Zn aportados por una ración de 200 g de lechuga (Salas-Salvadó et al., 2000), así como el porcentaje de la cantidad diaria recomendada, CDR (Novartis, 2009) proporcionado por esta ración cuando la lechuga es cultivada con 2.5% SCG. La adición de SCG aumenta el porcentaje de CDR y este aumento es particularmente importante en el caso de Ca (48% de la CDR) e Fe (69% de la CDR). Estos datos son muy relevantes debido a la prevalencia de anemia del 24,8% en la población mundial (WHO, 2008). Los porcentajes de la CDR aportada por las lechugas son menores en el caso de Mg, Cu y Zn.

TABLA I. Cantidad de los diferentes elementos aportados por una ración (200g) de lechuga cultivada con 2.5% SCG, cantidad diaria recomendada (CDR) y tanto por ciento de la CDR proporcionadas por la misma ración de lechuga.

Elemento mineral	Cantidad aportada por 200 g de lechuga (mg)	CDR (mg/día)	% CDR
Ca	477.36	1000	48
Mg	109.46	360	29
Cu	9.04	13	69
Fe	0.57	10	5.7
Zn	0.200	0.9	22

3. CONCLUSIONES

La adición de SCG a dos suelos agrícolas Mediterráneos incrementa el contenido de Ca, Mg, Cu, Fe y Zn de las lechugas cultivadas en ellos. Así mismo, la presencia de SCG amortigua el descenso en el contenido de minerales durante los primeros 15 días de la mayoría de elementos analizados, por lo que las muestras adicionadas no son tan afectadas por el trasplante como las muestras control. El porcentaje de la cantidad diaria recomendada por una ración de lechuga cultivada con SCG se incrementa con respecto a las cultivadas sin SCG. Por tanto se podrían catalogar a las lechugas cultivadas en suelos adicionados con SCG como alimentos biofortificados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto AGL2014-53895-R del Ministerio de Economía y Competitividad de España y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

REFERENCIAS

Bouis, H. E., y Saltzman, A. (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*, 12, 49–58.

- Ceglie, F. G., Bustamante, M. A., Amara, M. Ben, y Tittarelli, F. (2015). The challenge of peat substitution in organic seedling production: Optimization of growing media formulation through mixture design and response surface analysis. *PLoS ONE*, 10(6), 1–14.
- Ciesielczuk, T., Poluszynska, J. y Rosik-Dulewska, C. (2017), Homemade slow-action fertilizers, as an economic solution for organic food production. *Journal of Ecological Engineering*, 18, 78-85.
- Cruz, R., Morais, S., Mendes, E., Pereira, J.A, Baptista, P. y Casal, S. (2014): Improvement of vegetables elemental quality by espresso coffee residues. *Food Chem.* 148, 294–9.
- Cruz, R., Mendes, E., Torrinha, Á., Morais, S., Alberto Pereira, J., Baptista, P. y Casal, S. (2015). Revalorization of spent coffee residues by a direct agronomic approach. *Food Research International*, 73, 190–196.
- FAO, IFAD, WFP, 2015. The State of Food Insecurity in the World 2015. FAO, Rome.
- Gödecke, T., Stein, A. J., y Qaim, M. (2018). The global burden of chronic and hidden hunger: Trends and determinants. *Global Food Security*, 17, 21–29
- Kasongo, R. K., Verdoodt, A., Kanyankogote, P., Baert, G. y Van Ranst, E. (2011). Coffee waste as an alternative fertilizer with soil improving properties for sandy soils in humid tropical environments. *Soil Use and Management*, 27 (1), 94–102.
- Kasongo, R. K., Verdoodt, A., Kanyankogote, P., Baert, G. y Van Ranst, E. (2013). Response of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) to coffee waste application on a humid tropical sandy soil. *Soil Use and Management*, 29, 22-29.
- Leifa, F., Pandey, A. y Soccol, C. R. (2000). Solid State cultivation-an efficient method to use toxic agro-industrial residues. *Journal of Basic Microbiology*, 40, 187-197.
- Liu, C., Pujol, D., Olivella, M. A., de la Torre, F., Fiol, N., Poch, J. y Villaescusa, I. (2015). The Role of Exhausted Coffee Compounds on Metal Ions Sorption. *Water Air and Soil Pollution*, 226 (289), 1-10.
- Morikawa, C.K. y Saigusa, M. (2011). Recycling coffee grounds and tea leaf wastes to improve the yield and mineral content of grains of paddy rice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(11), pp.2108–11.
- Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S., y Teixeira, J. A. (2011). Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4(5), 661–672.
- Novartis (2009). Tabla de Composición de Alimentos.
<https://dieteticaieselgetares.files.wordpress.com/2013/10/tabla-de-composicicic3b3n-de-alimentos-novartis.pdf>
- Oliveira, M., Casal, S., Morais, S., Alves, C., Dias, F., Ramos, S., et al. (2012) Intra- and interspecific mineral composition variability of commercial instant coffees and coffee substitutes: Contribution to mineral intake. *Food Chemistry*, 130, 702–709.

- Rufián-Henares, J. A. y Pastoriza, S.P. (2009): Antimicrobial activity of coffee melanoidins-a study of their metal-chelating properties. *J. Agric. Food Chem.* 57, 432–8.
- Salas-Salvadó J, Bonada A, Trallero R y Engràcia Saló M (Eds). *Nutrición y dietética clínica*. Masson SA. Barcelona. 2000.
- Soil Survey Staff (2015). *Illustrated guide to soil taxonomy*. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska.
- Tokimoto, T., Kawasaki, N., Nakamura, T., Akutagawa, J., y Tanada, S. (2005). Removal of lead ions in drinking water by coffee grounds as vegetable biomass. *Journal of Colloid and Interface Science*, 281, 56–61.
- WHO (2008). *Worldwide prevalence of anaemia 1993–2005: WHO global database on anaemia*. Geneva: Who Press.
- Yin, X. y Yuan, L. (2012). *Phytoremediation and biofortification, two sides of one coin*. Springer, London, 81 pp.

De la Farmacoryctología a las terapias balnearias avanzadas. Ciento sesenta y siete años de Docencia e Investigación en Geofarmacia en la Universidad de Granada

R. Delgado^{1,2}, M.V. Fernández-González^{1,2}, J. M. Martín-García¹, A. Molinero¹ y J. Párraga¹

¹ Grupo de Investigación en Ciencias del Suelo y Geofarmacia. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Farmacia. Universidad de Granada.

² Asociación Internacional de Geología Médica. IMGa España.

Autor para correspondencia mvirginiafernandez@ugr.es

Resumen El estudio de las materias primas minerales farmacéuticas y cosméticas y otros tópicos científicos relacionados (incluyendo como muy importante la Biocristalografía y la Balneoterapia) han focalizado los afanes docentes e investigadores de una escuela científica en la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada desde 1850 a la actualidad. Citaríamos nombres como los de Mariano del Amo y Mora, Carlos Rodríguez López-Neyra de Gorgot, Ángel Hoyos de Castro, Miguel Delgado Rodríguez y los actuales miembros del Grupo de Investigación en Ciencias del Suelo y Geofarmacia. La asignatura que centra la mayor parte de esta historia comenzó en el siglo XIX, con la denominación de Farmacoryctología, para pasar después por Mineralogía, Mineralogía Aplicada, Geología y, en los tiempos actuales (siglo XXI) Geología Aplicada a la Farmacia (Geofarmacia); con una acogida por los alumnos siempre excelente. Las investigaciones han caminado paralelas a la docencia, como necesario substrato de la misma, y en los últimos treinta años son numerosos los artículos científicos en revistas de difusión internacional. Destacan, por su carácter netamente geofarmacéutico, los dedicados al control de calidad de las materias minerales con Farmacopea (especialmente talco, caolín y bentonita), junto a los centrados en peloides, barros de uso balneario, en los que se espera una expansión como agentes terapéuticos, en relación a sus tópicos novedosos y a su interés socioeconómico.

Palabras clave: Materias primas farmacéuticas (talco, caolín y bentonita) de origen mineral, farmacología y farmacia, Facultad de Farmacia de Granada, Geofarmacia, Geología aplicada a la Farmacia.

Abstract: *The study of pharmaceutical and cosmetic mineral raw materials and other related scientific topics (including Biocrystallography and Balneotherapy as very important matters) has focused the efforts of teachers and researchers in a scientific school of the Faculty of Pharmacy from the University of Granada from 1850 to the present. We would mention names such as Mariano del Amo y Mora, Carlos Rodríguez López-Neyra de Gorgot, Ángel Hoyos de Castro, Miguel Delgado Rodríguez and the current members of the Research Group in Soil Sciences and Geopharmacy. The subject that focuses most of this history began in the nineteenth century, with the name of Pharmacology and later changed through Mineralogy, Applied Mineralogy, Geology and, in the current times (XXI century) Geology Applied to Pharmacy (Geopharmacy); the students always had excellently welcomed this subject. The research has walked at the same time that the teaching, as a necessary substrate of the same,*

and in the last thirty years there are numerous scientific articles published in international magazines. They stand out, for their purely geopharmaceutical character, those dedicated to the quality control of mineral materials with Pharmacopoeia (specially talc, kaolin and bentonite), together with those focused on peloids, mud of spa use, in which an expansion is expected as therapeutic agents, in relation to their novelty and its socio-economical interest.

Key words: Pharmaceutical raw materials (talc, kaolin and bentonite) of mineral origin, pharmacology and pharmacy, Granada Pharmacy Faculty, Geopharmacy, Geology applied to Pharmacy.

1. LA FACULTAD DE FARMACIA DE UNIVERSIDAD DE GRANADA (1850-2017)

En 1850 se funda la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada (Real Decreto de 28 de agosto). Desde esa fecha a la actualidad, el Centro, en continuo crecimiento de estudiantes y profesorado, ha mudado de localización varias veces, adaptándose a las necesidades de espacios adecuados. Los años que marcan los cambios son 1921, 1959 y 1988. La Facultad ocupó primero (1850) unos locales en la sede de la Universidad Central, que había sido antes colegio de los Padres Jesuitas (plaza de la Universidad); después, en 1921, se desplazó al que fue palacio de la familia Caicedo (en la calle san Jerónimo); más tarde, 1959, a un edificio propio (calle Rector López Argüeta); y, finalmente, desde 1988 a la actualidad, ejerce sus funciones en un moderno complejo, también propio y construido ex profeso, situado en el Campus Universitario de Cartuja. En la Figura 1, reproducida literal de la exposición gráfica de la conferencia en las Jornadas, se puede observar la realidad física de dichos enclaves.



FIGURA 1. Composición gráfica con fotografías de las distintas localizaciones de la Facultad de Farmacia de la de la Universidad de Granada. Desde 1850 (año de la fundación) a los tiempos presentes. Se recogen también los escudos de la Universidad y la Facultad y una imagen de la Alhambra de Granada, seña de la ciudad. Reproducida literal de la Ponencia dictada el 20 de octubre de 2018.

Son ciento sesenta y siete años que corresponden con tiempos de vertiginoso avance de la Ciencia y de las técnicas de enseñanza, lo que impulsará y conformará los distintos Planes de Estudios de la carrera de Farmacia. Y justo, en los inicios de la singladura, en 1850, se marca el

momento del nacimiento de uno de los sujetos de nuestra conferencia, la *Farmacoryctología*, como parte de la ambiciosa formación en *Materia Farmacéutica*.

2. FARMACORYCTOLOGÍA Y MATERIA FARMACÉUTICA MINERAL (SIGLO XIX)

Corresponde esta fase con la primera cronológica que podemos establecer, correspondiente a los Planes de Estudios de Farmacia de 1850, 1852, 1866, 1868, 1974, 1880 y 1886 (Facultad de Farmacia, 1999). Para el Plan de 1850, se definía Materia Farmacéutica como la ciencia que “tiene por objeto describir los materiales medicamentosos, distinguir los verdaderos de los falsos o adulterados y dar a conocer las alteraciones que podrán experimentar con el transcurso del tiempo. Con este fin utiliza los conocimientos de las Ciencias Naturales” (del Amo, 1864). Podemos considerarla constituida de tres partes: Farmacoryctología, más conocida como *Mineralogía de aplicación farmacéutica* y su Materia Farmacéutica correspondiente, a la que sumar las relativas a la Zoología y la Botánica con las Materias Farmacéutica Animal y la Materia Farmacéutica vegetal, respectivamente.

El profesor encargado de su impartición, Catedrático de la asignatura, de cuyos textos proceden las anteriores definiciones y terminologías, era el Decano-fundador de la Facultad, insigne intelectual, D. Mariano del Amo y Mora (1809-1894), quien ejerció el cargo hasta 1892 (Figura 2). Fue autor del tratado (antes referenciado) de título: *Materia Farmacéutica Mineral y Animal, Explicadas* (del Amo, 1864). La Parte dedicada a los minerales como materias primas, Farmacoryctología, describe más de 200 productos empleados como base de los preparados: Azufre, Bromo, Yodo, Carbono, Nafta, Sílice, Jade, Arcillas, Tierras Selladas, Ocre, Alumbres, Magnesita, etc.

3. MINERALOGÍA Y GEOLOGÍA APLICADA (1892-1987)

Hablamos ahora fundamentalmente de los inicios y el transcurso de la centuria 20 (s. XX). Con el paso de las décadas las enseñanzas en Farmacia iban adaptándose a los avances de la Ciencia, lo que generaba subsiguientes renovadas necesidades de actualizar la formación de los estudiantes; todo lo cual se refleja con prolijidad en los Planes de Estudios (1900, 1914, 1922, 1928, 1930, 1931, 1935, 1944, 1953, 1965, 1973). Y alcanzamos así otro hito en las docencias, correspondiente a una segunda etapa en la serie de catedráticos que han impartido la parcela de la ciencia que estamos considerando (Figura 2), que se sigue denominando como asignatura *Mineralogía* o *Mineralogía aplicada a la Farmacia* (con cita expresa en los Planes más antiguos de la “Materia farmacéutica correspondiente”), y a partir del de 1944 con el nuevo término de *Geología aplicada* (recogiendo específicamente docencias y contenidos en Mineralogía, Petrografía, Edafología e Hidrología). El medio-siglo XX corresponde con nuevos tiempos en los que la preocupación por el medioambiente comienza a aflorar y encuentra eco en la carrera de Farmacia. Asistimos al despertar de un interés mundial por el medio natural y la agricultura al que el farmacéutico -pensemos en el profesional rural- no podía andar ajeno. Por eso, al lado del estudio propio (y centenario) de los materiales minerales de interés medicamentoso (Mineralogía), hay que formar al futuro farmacéutico en asignaturas del medio natural (Petrografía, Edafología e Hidrología).

Como profesores encargados de la asignatura, citaremos en primer lugar de D. Carlos Rodríguez López-Neyra de Gorgot (1885-1958), Catedrático de Mineralogía y Zoología aplicadas a la Farmacia (1911-1945), Decano de la Facultad de Farmacia, ilustre parasitólogo (un centro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas lleva su nombre reconociendo su excelencia) y autor de: *Tratado Elemental de Mineralogía Aplicada a Ciencias Químicas, Farmacia e Industria* (1925). En dicho texto, su título e índice no pueden ser más ilustrativos de los objetivos perseguidos con la asignatura y el nivel de conocimientos que pretende impartir. Se compone de cinco partes. I.- Morfología Mineral (estado de las formas, tanto de los

cristales, como de los cuerpos cristalinos); II.- Física Mineral; III.- Química Mineral; IV.- Yacimientos y V.- Taxonomía.

A D. Carlos sucede en la cátedra D. Ángel Hoyos de Castro (1913-1987), Catedrático de Geología Aplicada entre 1945 y 1962, pues merced al Plan de Estudios de 1945 la asignatura Mineralogía y Zoología se escinde en dos, continuando López Neyra con la parte biológica de la asignatura, derivando al estudio de la Parasitología -en donde, como hemos comentado, alcanzará a ser un especialista de talla internacional-, y Hoyos, que gana la cátedra de Granada, que se encarga de los contenidos de la anterior Mineralogía aplicada a la Farmacia, aunque ahora se denomina Geología Aplicada, con dos cursos que acometen a lado de la propia Mineralogía: Petrografía, Edafología e Hidrología. Nuevamente, el libro de texto de la asignatura en la materia más dirigida a las materias primas medicamentosas nos informa fehacientemente de los contenidos y el nivel científico impartido. Se trata de: *Mineralogía. Una Introducción al Estudio Químico-Estructural de los Minerales* (1947). Índice: I.- Mineralogía General (Cristalografía Geométrica, Estructural, Química, Física, y Ensayos Mineralógicos). II.- Mineralogía Especial (Sistemática de los minerales, basada en la clasificación de Strunz). Las materias primas minerales farmacéuticas se estudian desde una perspectiva moderna, no eludiendo considerar en profundidad un aspecto tan trascendente como la Cristalografía, cuyo ámbito pertenece a todo el estado sólido de la materia y justifica infinidad de propiedades, incluyendo las aplicativas.



FIGURA 2. Composición gráfica con las fotografías de los cuatro catedráticos de las materias primas minerales farmacéuticas de la Facultad de Farmacia de la de la Universidad de Granada, entre 1850 (año de la fundación) y 1987. Reproducida literal de la Ponencia dictada el 10 de octubre de 2018.

La labor de Hoyos la prosigue en la cátedra Miguel Delgado Rodríguez (1921-2003), quien gana en 1963, por oposición, el ingreso al Cuerpo Docente y está en activo hasta 1987. Su cátedra se denomina de Geología Aplicada y Edafología, y las asignaturas que imparte reciben el título respectivo de Geología y Edafología. Delgado Rodríguez supera el nivel de la docencia e inicia las investigaciones científicas sistemáticas sobre minerales de aplicación farmacéutica y cosmética y su control farmacéutico de calidad (específicamente sobre talco, caolín o bentonitas). Además, impulsó el empleo de las técnicas analíticas de estudio de los materiales de naturaleza mineral como Difracción de Rayos X, Microscopía Óptica y Micromorfología, Microscopía Electrónica, Análisis de control de calidad mediante Farmacocea, etc. Quizás por

lo último, su obra escrita científica más destacada atiende a su interés por una de esas técnicas, la Micromorfología: *Soil Micromorphology. Proceedings of the Fifth International Working Meeting on Soil Micromorphology* (1978).

4. TIEMPOS ACTUALES DE LA DOCENCIA DE LA GEOLOGÍA APLICADA A LA FARMACIA: GEOFARMACIA (1987-2017)

Nos encontramos en los tiempos actuales y recientes: los últimos treinta años. Consideramos los Planes de Estudio de Farmacia de 1995, 2002 y 2010. El Grupo de Investigación en Ciencias del Suelo y Geofarmacia se funda en 1985. La Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada, junto con la de la Universidad Complutense de Madrid, son los únicos Centros a nivel español que han mantenido las docencias sobre las materias primas farmacéuticas (y cosméticas) de origen mineral y otras propiedades de interés relacionadas con dichas materias. La asignatura se denomina ahora Geología Aplicada a la Farmacia (apocopada en Geofarmacia) y sus objetivos conservan bastante de los primeros novecentistas, aunque su campo se ha visto ampliado a los nuevos avances y retos de la Ciencia, todos apasionantes. Las materias primas de origen mineral siguen empleándose en la fabricación de medicamentos, a la par que son básicas para los cosméticos (la Cosmética es campo de gran futuro cercano a la Farmacia). Los fundamentos de Cristalografía -objetivo también de la Geofarmacia que se imparte-, resultan fundamentales pues el estado cristalino alcanza su culmen en los minerales y porque cada día resultan más necesarios para comprender la preparación y acción del fármaco, esté compuesto de materiales minerales o sintéticos. No olvidemos, en ese mismo sentido, que entre los grandes logros científicos de nuestra era científico-tecnológica, se encuentran los de Biología Molecular, muchos basados en la dilucidación de la estructura de las proteínas y el genoma humano, y para dicha dilucidación una de sus herramientas primordiales es la Cristalografía Estructural; lo que condiciona que el farmacéutico deba conocer los principios básicos la Cristalografía si pretende investigar profesionalmente en ese campo; lo mismo se podría afirmar de la Química Farmacéutica en el campo del estudio estructural de las moléculas, esencial para comprender su acción. Otro nuevo ámbito de la Geofarmacia se abre en el de los minerales tóxicos, de interés para la Salud Ambiental y la Medicina Laboral, disciplinas ambas de las Ciencias de la Salud.

Para no ser prolijos en la descripción de la asignatura Geofarmacia, podemos recoger a continuación su definición y su programa (Cuadro I), tal como se imparten en los tiempos presentes en la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada (Delgado et al., 2001 y http://www.ugr.es/~edafolo/pdf/guias/guia_GF_2017-18.pdf):

Geología Aplicada a la Farmacia (Geofarmacia) es una ciencia dedicada al estudio de los minerales con interés farmacéutico y, por extensión, cosmético, así como sus propiedades y métodos de estudio. También pueden considerarse objeto de su estudio las sustancias de aplicación farmacéutica y cosmética que no son minerales, pero que presentan como éstos un estado de orden esencialmente cristalino, así como propiedades y métodos de estudio equivalentes.

Destacar en el Programa de Geofarmacia (CUADRO I), además de los contenidos ya comentados, el Tema 14, Los Suelos y su influencia en la Salud Humana, uno de los paradigmas de la Geología Médica (Selinus et al., 2005), denominada aquí Geomedicina. También, el que hace el número 10, Minerales empleados en Centros Terapéuticos y Estéticos, pues constituye un avance para el alumnado de los contenidos de la Terapias Balnearias Avanzadas (a la que hace alusión el título de esta conferencia), como otro de los campos actuales de docencia e investigación de los profesores del Grupo de Investigación en Ciencias del Suelo y Geofarmacia en la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada. La Balneoterapia se erige hoy como un tópico de gran trascendencia.

En suma, de todo este recorrido desde 1850 a 2017 podemos afirmar sin equivocarnos que la Geofarmacia ha sido trascendente en la historia de la Facultad de Farmacia de Granada y continúa siéndolo para la formación del futuro farmacéutico. Corroboran estas afirmaciones un estudio de satisfacción docente realizado (por los profesores actualmente encargados de su impartición) en el periodo inmediatamente anterior a la entrada del Plan de Estudios de 2010, en que dejó de ser obligatoria para convertirse en optativa; los resultados fueron dados a conocer en el congreso farmacéutico EDUSFARM (Delgado et al., 2010). (Figura 3). En el curso académico 2016-2017, los tres grupos que imparten Geofarmacia suman entre ellos más de 150 alumnos, en la ratio máxima marcada por la Facultad (50/1), lo que refiere la buena aceptación de la asignatura.

PROGRAMA TEÓRICO

- Tema 1.- Concepto de la asignatura
- Tema 2.- Fundamentos de Biocristalografía
- Tema 3.- Principios básicos de cristalización
- Tema 4.- Propiedades de los sólidos cristalinos, de interés farmacéutico y cosmético
- Tema 5.- Polimorfismo farmacéutico
- Tema 6.- Métodos de estudio específicos de los sólidos cristalinos
- Tema 7.- Cristalografía de las macromoléculas biológicas
- Tema 8.- Principios de Mineralogía Farmacéutica. Sistemática mineral aplicada a Farmacia y Cosmética
- Tema 9.- Uso farmacéutico de los Minerales: Principios activos, Excipientes
- Tema 10.- Minerales empleados en centros terapéuticos y estéticos
- Tema 11.- Los minerales en las Farmacopeas
- Tema 12.- Minerales perjudiciales para la salud humana y el ambiente
- Tema 13.- Biominerales
- Tema 14.- Los suelos y su influencia en la salud humana (Geomedicina)

CUADRO I. Programa Teórico de la Asignatura Geología Aplicada a la Farmacia (Geofarmacia). “Biocristalografía y Materias Primas Minerales”. Curso 2017-2018. (Actualización de 12/09/2017). (Fecha de aprobación en Consejo de Departamento de Edafología y Química Agrícola: 06/06/2017).

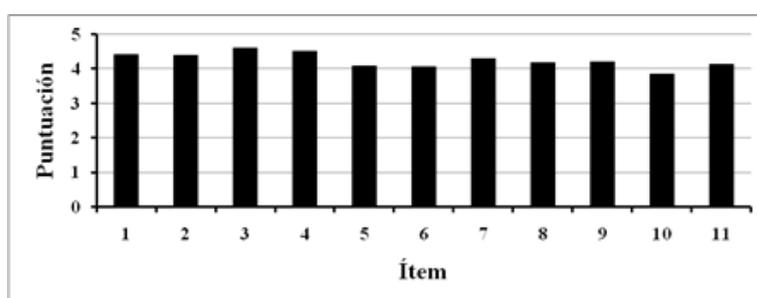


FIGURA 3. Resultados de la encuesta. Curso 2009/2010. Asignatura Geología Aplicada a la Farmacia. Número de alumnos encuestados 367. Extraída textualmente de Delgado et al., 2010.

Leyenda Ítems: 1. ¿Las técnicas docentes (apuntes publicados, exposición mediante power point, clases magistrales, prácticas, trabajos personalizados de los alumnos, etc.) te han resultado?; 2. ¿Cómo ha sido a tu parecer el desarrollo de la asignatura?; 3. ¿Han cumplido los profesores de esta asignatura con sus obligaciones docentes?; 4. ¿El trato recibido por parte de los profesores ha sido correcto?; 5. ¿Has percibido en el profesor interés hacia ti como alumno?; 6. ¿Te han gustado las clases prácticas? ¿Las consideras interesantes?; 7. ¿Piensas que has adquirido conocimientos que te han capacitado en los contenidos siguientes: Principios de Cristalografía aplicada a la Farmacia; biocristalografía (macromoléculas biológicas). Minerales de interés y aplicación en Farmacia, Cosmética y otras Ciencias de la Salud: principios activos, excipientes y tóxicos (fibras). Biominerales humanos

(huesos, dientes, litiasis)?; 8. La ciencia que te han enseñado ¿es moderna y de vanguardia?; 9. ¿Piensas que cursando esta asignatura has aprendido algo valioso para tu carrera?; 10. ¿Esta asignatura ha despertado tu interés científico y personal?; 11. A tu parecer, ¿deberían estudiar todos los alumnos de Farmacia, obligatoriamente, esta asignatura?

5. LA INVESTIGACIÓN EN GEOFARMACIA (VS FARMACORYCOTOLOGÍA)

Centraremos los dos apartados siguientes en la consideración de algunas de las investigaciones actuales de los miembros del grupo de Ciencias del Suelo y Geofarmacia en estos últimos treinta años.

Como marco general de los asuntos objeto de dichas investigaciones, puede servirnos el Discurso de Ingreso en la Real Academia de Medicina y Cirugía de Andalucía Oriental, Ceuta y Melilla de Rafael Delgado Calvo-Flores en 2013 (Figura 4) (<http://www.ramao.es/images/archivo/discursos/rafaeldelgado.pdf>) que engloba todo el corpus de nuestros intereses científicos bajo el epígrafe “Recursos Naturales de interés Farmacéutico”. Considera dichos recursos inorgánicos naturales de interés farmacéutico (en general, sanitario, y también para el campo de la Cosmética): Suelo, Agua, Arcillas, Peloides (intermedios entre Arcillas y Aguas), Minerales, Cristales, Biominerales y hasta Aire y Clima.

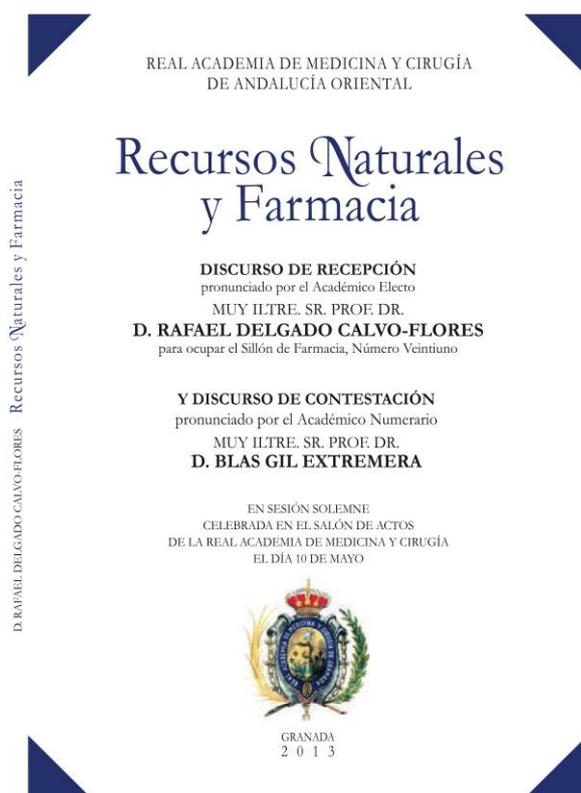


FIGURA 4 Imagen de la cubierta del Discurso de Recepción de Rafael Delgado Calvo-Flores en la Real Academia de Medicina y Cirugía de Andalucía Oriental (2013). (<http://www.ramao.es/images/archivo/discursos/rafaeldelgado.pdf>).

Pero antes de iniciar este breve repaso, dos preguntas transversales al mismo pueden formularse. Primera: ¿los investigadores que citaremos han sido simultáneamente profesores entregados a la docencia; pues investigación y docencia son oficios complementarios en el quehacer profesional universitario? La respuesta es afirmativa y en un siguiente apartado se consignarán tanto un número importante de referencias investigadoras de reconocido

prestigio como su encaje en la docencia universitaria. Segunda: ¿la docencia en Geofarmacia en estos últimos treinta años se ha completado y ampliado a campos cercanos; algo necesario de conocer para explicar también los resultados en investigación? Igualmente, afirmativa. En los tiempos presentes, la oferta docente de los profesores del Grupo en la Facultad de Farmacia se compone de tres materias más relacionadas con la Geofarmacia, como son: Hidrología Farmacéutica (Grado en Farmacia), Producción de Materias Primas y Química Agrícola (ambas en el Grado de Ciencia y Tecnología de los Alimentos) y Metodología de la Investigación Científica (Grado en Nutrición Humana y Dietética). Pues hay que aclarar que desde 2011, la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada alberga la docencia de las tres carreras citadas.

6. ALGUNOS RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN DE ESPECIAL RELEVANCIA, CON ÉNFASIS EN EL CAMPO DE LA BALNEOTERAPIA (1987-2017)

Resulta difícil sintetizar este apartado en pocas líneas, sobre todo cuando abarca tres décadas. Hemos escogido sólo una pequeña selección de resultados, incluidas algunas de las Tesis Doctorales dirigidas por los miembros del Grupo de Ciencias del Suelo y Geofarmacia.

Ateniéndonos a la clasificación de temas antes expuesta (Delgado, 2013), sobre Arcillas y Minerales podemos destacar el estudio realizado para la mejora del control de calidad de caolines bentonitas y talcos españoles, tesis de Gámiz (1987), y el también estudio de mercado de talcos de uso tópico de venta en Farmacias, de ámbito mundial, tesis de Soriano (1994). Como publicaciones derivadas de estas investigaciones, podemos referenciar, a modo de muestra, y en medios internacionales relevantes, la de Delgado et al. (1994) sobre caolines, que abrió la puerta a la preparación a formulaciones con barbitúricos de acción controlada en el tiempo según el valor de la cristalinidad del soporte mineral. Gámiz et al. (2011) demostraron que el test de “impurezas orgánicas” de la monografía del caolín de la Farmacopea Europea (2008) no era aplicable para contenidos por encima del 1% de materia orgánica. Del mismo modo, Soriano et al. (1998) y Soriano et al. (2002) pusieron en evidencia que el color del polvo de talco guarda relación numérica con la pureza mineral y química, algo de gran interés para su control de calidad. En los años 1993-94 miembros del Grupo (Rafael Delgado y Encarnación Gámiz) formaron parte del grupo de expertos de Farmacopea Europea que redactó y puso en marcha la monografía *Talc*. Todas las investigaciones citadas encajarían de lleno con la docencia de Geofarmacia.

Las investigaciones en Peloides (Recursos Naturales intermedios entre Arcillas y Aguas; según terminología de Delgado, 2013), encajarían, como ya ha sido comentado, en el gran epígrafe recogido en el título de la ponencia: Terapias Balnearias Avanzadas. En la docencia a los alumnos de Grado estaríamos hablando de la asignatura Hidrología Farmacéutica. A los peloides estamos dedicando considerables esfuerzos en los últimos tiempos. Tratamos de poner en valor las aguas mineromedicinales de los principales balnearios de la provincia de Granada como materia prima de peloides, al ser un producto escaso en las instalaciones balnearias granadinas, a pesar de su valor socioeconómico y su creciente demanda por el turismo termal. Acometimos la tesis doctoral de Fernández González (2010) y con ella el estudio y publicación en tópicos tan novedosos de la ciencia de los barros medicinales como: 1-establecimiento del tiempo óptimo de maduración de peloides (Fernández González, 2013a), esencial para su preparación; 2-composición de la fase líquida de los peloides en contraste con el agua mineromedicinal de partida (Fernández González, 2013b), importante para conocer sus efectos reales a nivel de la piel; o 3-definición y puesta en marcha del concepto de ultramicrofábrica electrónica del peloide, que se ha revelado como una propiedad física de primer orden para comprender otras como el comportamiento térmico, básico en la aplicación terapéutica (Fernández González, 2017).

Cerraremos este apartado de peloides mencionando al trabajo fundacional de la ciencia de los barros medicinales publicado en la revista *Applied Clay Science* (Gomes et al., 2013) en el que nuestro Grupo tuvo participación (Figura 5).

Otros trabajos de referencia del Grupo de Investigación pertenecen a los campos del Suelo, Cristales, Biominerales o Aire-Clima (en el sentido de Delgado, 2013) (Llácer et al., 2001; Díaz-Hernández and Párraga, 2008; Párraga et al., 2004).

A la vista de todos estos frutos investigadores, podemos afirmar que la Geofarmacia (la Farmacocytología del siglo XXI) y otras materias relacionadas incluidas en el epígrafe "Recursos Naturales de interés Farmacéutico" (en general, sanitario, y también para el campo de la Cosmética): Suelo, Agua, Arcillas, Peloides, Minerales, Cristales, Biominerales, Aire y Clima, como ciencias todas pertenecientes a un campo intermedio de las Ciencias de la Tierra y las Ciencias de la Salud (al igual que le sucede a la Geología Médica) mantienen hoy el mismo interés y vigor científicos que antaño y por ello deben seguir siendo practicadas.

La vertiente aplicada (de innovación) de las referidas materias ocuparía otra ponencia similar en extensión a la que se ha presentado, por lo que sólo haremos una breve referencia que prueba su interés dirigiendo al lector a un artículo específico de prensa dedicado al Grupo de Investigación de Ciencias del Suelo y Geofarmacia, publicado en las páginas especializadas de un diario español de tirada nacional (a página entera) en el año 2018 (<http://www.guiadeprensa.com/suplementos/investigacion-y-desarrollo-mayo-2018/grupo-de-investigacion-de-ciencias-del-suelo-y-geofarmacia-de-la-ugr/>).



FIGURA 5. Cabecera del artículo fundacional de la ciencia de los peloides: Peloides y Peloterapia: Evolución histórica, clasificación y glosario (*Applied Clay Science*, Gomes, et al., 2013)

AGRADECIMIENTOS. A los profesores, doctores y demás personal que en los días presentes componen el Grupo de Ciencias del Suelo y Geofarmacia, que aunque no forman parte del equipo redactor del artículo, son igualmente responsables de la historia y acciones relatadas. Especialmente, a D. Gabriel Delgado Calvo-Flores (Catedrático), Manuel Sánchez Marañón (Profesor titular), Víctor Aranda Sanjuán (Profesor Contratado Doctor), Julio Antonio Calero González (Profesor Contratado Doctor), Ana Gloria Cervera Mata (becaria de investigación), Irene Paola García Rojas (técnico de laboratorio) y M^a Soledad Gil García (técnico de administración).

REFERENCIAS

Del Amo y Mora M. *Materia Farmacéutica Mineral y Animal Explicadas*. Imprenta Ventura, Granada (1864).

- Delgado Rodríguez, M. Soil Micromorphology. Proceedings of the Fifth International Working Meeting on Soil Micromorphology (Vol. I and II). Dpto. Edafología, Granada. 1978.
- Delgado, R., Gámiz, E., Delgado, G., Ruiz, A., Gallardo, V. (1994). The crystallinity of several spanish kaolins. Correlations with sodium amylobarbitone release. *Clay Miner.* 29: 785-797.
- Delgado, R., Párraga, J., Delgado, G., Gámiz, E., 2001. Principios generales de Geología Aplicada a la Farmacia (G.A.F.). Materias Primas Farmacéuticas y Cosméticas de Origen Mineral. Editorial Serrano. Granada, 236 pp.
- Díaz-Hernández, J.L., Párraga, J., 2008. The nature and tropospheric formation of iberulites: Pinkish mineral microspherulites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* Volume 72, Issue 15, 1, 3883-3906.
- Delgado, R., Delgado, G., Martín- García, J.M., Gámiz, E., Márquez, R., Párraga, J. (2010). Ciento Sesenta años de Geología Aplicada a la Farmacia. En la encrucijada de Bolonia. III Internacional Congress on Higher Education in Pharmaceutical Sciences. Libro de Actas, pp 39. Granada (España).
- Delgado, R. (2013). Recursos Naturales y Farmacia. Discurso de recepción en la Real Academia de Medicina y Cirugía de Andalucía Oriental. Real Academia de Medicina y Cirugía de Andalucía Oriental, 133 pág. <http://www.ramao.es/images/archivo/discursos/rafaeldelgado.pdf>.
- European Pharmacopoeia (2008). Vol.2. Convention on the elaboration of a European Pharmacopoeia. European Treaty Series No. 50. Council of Europe, Strasbourg. 3308 pp.
- Fernández- González, M.V. (2010). Proceso de maduración de peloides con fase líquida de las principales aguas minerales y mineromedicinales de la provincia de Granada. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 552 pp.
- Fernández- González, M.V., Martín- García, J.M., Delgado, G., Párraga, J., Delgado, R. (2013 a). A study of the chemical, mineralogical and physicochemical properties of peloids prepared with two mineral-medicinal waters from Lanjarón Spa (Granada, Spain). *Appl. Clay Sci.* 80-81, 107-116.
- Fernández- González, M.V., Martín-García, J.M., Delgado, G., Párraga, J., Carretero, M.I., Delgado, R. (2013 b). Una aproximación al establecimiento de los tiempos óptimos de maduración en Peloides. Proceedings of the 3RD Iberoamerican Congress of Peloids. Sao Miguel, Açores. Pp. 127 – 131.
- Fernández-González, M.V., Martín-García, J.M., Delgado, G., Párraga, J., Carretero, M.I., Delgado, R. (2017). Physical properties of peloids prepared with medicinal mineral waters from Lanjarón Spa (Granada, Spain). *Appl. Clay Sci.* 135, 465–474.
- Gámiz, E., Párraga, J., Sánchez-Marañón, M., Melgosa, M., Fernández González, M. V., Delgado, R. (2011). Is the pharmacopoeia test a good estimator of the organic impurities in kaolin? *Appl. Clay sci.* 51, 431-437.
- Gámiz, E. (1987). Caracterización de caolines, talcos y bentonitas españoles para su posible aplicación en Farmacia (418 pp). Facultad Farmacia, Universidad: Granada, 1987.
- Párraga, J., Rivadeneyra, M.A., Martín-García, J.M., Delgado, R., Delgado, G., 2004. Precipitation of Carbonates by Bacteria from a Saline Soil, in Natural and Artificial Soil Extracts. *Geomicrobiology Journal*, Volume 21, 55-66.

- Gomes, C., Carretero, M.I., Pozo, M., Maraver, F., Cantista, P., Armijo, F., Legido, J.L., Teixeira, F., Rautureau, M., Delgado, R. (2013). Peloids and pelotherapy: Historical evolution, classification and glossary. *Applied Clay Science* 75–76, 28–38. Rodríguez López-Neyra, C., Clavera, J. M., 1950. Primer siglo de la Facultad de Farmacia de Granada. Resúmen histórico. Imprenta Urania, Granada.
- Llácer, J.M., Gallardo, V., Delgado, R., Párraga, J., Martín, D., Ruiz, M.A. (2001). X-ray diffraction and electron microscopy in the polymorphism study of ondansetron hydrochloride. *Drug Dev Ind Pharm.* 27 (9):899-908.
- Rodríguez López-Neyra, C. (1925). *Tratado Elemental de Mineralogía. Aplicada a las Ciencias Químicas, Farmacia e Industrias.* Imprenta Ventura, Granada.
- Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkelman, R.F., Fuge, R., Lindh, U., Smedley, P. (2005). *Essentials of Medical Geology: impacts of the natural environment on public health.* Edit. Elsevier, Amsterdam, 812 pp.
- Soriano, M. (1994). Estudio geofarmacéutico de polvos de talco. Primera aproximación a la Farmacopea Internacional Armonizada. Tesis doctoral. Departamento de Edafología y Química agrícola, Facultad de Farmacia, Granada. 619 pp.
- Soriano, M.; Delgado, G.; Gámiz, E.; Sánchez Marañón, M., Delgado, R. (1995). Mineralogía de especialidades farmacéuticas: polvos de talco europeos y americanos. *Ars Pharmaceutica* 37-2, 293-300.
- Soriano, M., Melgosa, M., Sánchez Marañón, M., Delgado Calvo-Flores, G., Gámiz, E., Delgado Calvo-Flores, R. (1998). Whiteness of talcum powders as a quality index from pharmaceutical uses. *Color Res. Appl.* 23,178-185.
- Soriano, M., Sánchez-Marañón M., Melgosa M., Gámiz E., Delgado Calvo-Flores, R. (2002). Influence of chemical and mineralogical composition on color for commercial talcs. *Color Res. Appl.* 27, 430-440.