

Evaluación del Riesgo para la Salud Humana en Suelos Agrícolas del Entorno de Mina Sotiel (Huelva)

/ VÍCTOR GABARI BOA (1) / JUAN CARLOS FERNÁNDEZ-CALIANI (2)*

(1) Befesa Gestión Residuos Industriales. Avenida de la Buhaira, 28. 41018, Sevilla (España)

(2) Departamento de Geología. Universidad de Huelva. Campus de El Carmen s/n. 21071, Huelva (España)

INTRODUCCIÓN

Los suelos contaminados por los residuos y drenajes ácidos de las minas de sulfuros metálicos constituyen un riesgo potencial para la salud de las personas y los ecosistemas afectados, debido a sus elevadas concentraciones de elementos tóxicos (e.g. Plumlee y Morman, 2011). Las condiciones físico-químicas de los suelos de mina, normalmente ácidos y oxidantes, y su limitada capacidad para neutralizar la acidez e inmovilizar metales, aumentan su peligrosidad ambiental. El riesgo es especialmente importante en los suelos agrícolas inundables con aguas ácidas, donde una fracción de los metales más móviles podría estar biodisponible y transferirse a la cadena trófica. El análisis de riesgos es crucial para definir y justificar actuaciones de recuperación ajustadas a las condiciones específicas del suelo contaminado (Fernández-Caliani, 2012), que garanticen la protección de la salud humana y el medio ambiente. La aplicación de la metodología de Acciones Correctivas Basadas en el Análisis de Riesgo (Risk-Based Corrective Actions, RBCA), normalizada por la ASTM (American Society for Testing and Materials), es una potente herramienta para la toma de decisiones y la gestión de suelos contaminados. Con este trabajo se pretende evaluar el riesgo para la salud humana de suelos potencialmente contaminados por metales y metaloides pesados de origen minero, aplicando la metodología RBCA con la finalidad de determinar los niveles objetivos de remediación basados en la cuantificación del riesgo. En este caso, el emplazamiento evaluado es una parcela localizada en el enclave minero de Sotiel Coronada, en la mar-



Fig 1. Localización geográfica de la parcela agrícola estudiada en el entorno de la mina Sotiel (Huelva).

gen derecha del río Odiel, a unos 50 km al norte de Huelva (Fig. 1).

El uso actual del suelo es agrícola (cultivo de hortalizas). Según Fernández-Caliani et al. (2009), el suelo presenta una textura franco-arenosa, reacción neutra (pH en agua: 7,1), y los siguientes contenidos en carbono orgánico (2,8%), carbonatos (1,7%), hierro libre (28,26 g/kg) y capacidad de cambio catiónico (10,19 cmol/kg).

METODOLOGÍA

Los elementos esenciales del análisis de riesgos son: la caracterización del emplazamiento, el análisis de exposición, el análisis de dosis/respuesta y, finalmente, la valoración del riesgo, que combina la información de exposición y dosis/respuesta para predecir la probabilidad de que aparezcan efectos adversos sobre la salud en poblaciones objetivo.

palabras clave: Análisis de riesgos, Suelos, Contaminación, Metales pesados, Mina Sotiel

key words: Risk analysis, Soils, Pollution, Heavy metals, Sotiel mine

Para la caracterización geoquímica del suelo, se tomaron 10 muestras representativas del suelo superficial (20 cm de profundidad) de una parcela agrícola de ~1 ha, que potencialmente está contaminada por residuos mineros y drenajes ácidos del antiguo complejo minero-químico de Sotiel. Las muestras se analizaron por ICP-MS en Eurofins Analytico, un laboratorio acreditado según la norma ISO/IEC 17025, y se midieron las concentraciones totales de As, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en la fracción granulométrica menor de 2 mm.

El análisis de la exposición contempla principalmente las vías asociadas al suelo superficial (ingestión de suelo, contacto dérmico, inhalación de partículas, ingestión de hortalizas) y al aire (inhalación de volátiles y partículas). No se ha tenido en cuenta la ingestión de aguas subterráneas ya que no existen pozos de abastecimiento en las proximidades.

En el modelo conceptual de riesgo se han considerado dos escenarios de exposición. En el primer escenario, los receptores on site son los agricultores de la parcela objeto de estudio. En el escenario II, los receptores off site son los usuarios reales o potenciales que residen en zonas colindantes (~50 m), que podrían estar afectados por la pluma de contaminación existente.

En la *Figura 2* se muestran los principales mecanismos de transporte y transferencia de contaminantes desde la fuente a los receptores considerados, así como los medios de exposición más efectivos en el caso de estudio.

Los factores de exposición (tiempo y frecuencia de exposición, peso corporal, tasas de ingestión, etc.) utilizados para calcular las dosis diarias de exposición fueron los valores registrados por defecto en el software, dado su carácter conservador.

En relación con los valores límites de riesgo para la salud humana, se ha tomado en consideración lo dispuesto en el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. Así pues, para elementos tóxicos que producen efectos sistémicos, como As, Cu, Pb y Zn, se asume como situación de riesgo aceptable aquella en que, para cada elemento, el cociente entre la dosis de exposición a largo plazo y la dosis máxima admi-

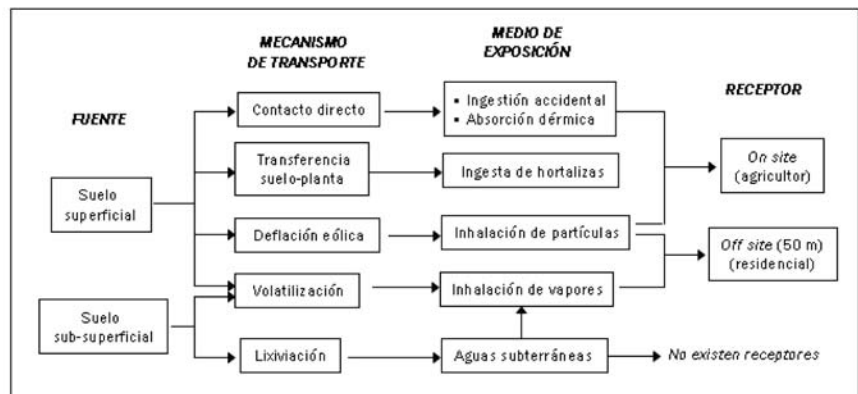


Fig 2. Diagrama de flujo mostrando las relaciones entre los suelos afectados, los mecanismos de transporte de los contaminantes, las rutas de exposición y los receptores implicados en el modelo conceptual de riesgo del emplazamiento.

Muestra	As	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	550	37	64	510	44	2100	300
2	380	25	44	160	54	1500	200
3	2400	17	34	740	30	9500	420
4	330	23	51	610	51	1400	230
5	4800	19	50	780	36	14000	300
6	1900	15	40	900	34	7800	420
7	200	20	53	190	52	820	160
8	610	21	52	820	48	2100	240
9	250	20	51	190	50	970	160
10	1400	21	49	660	41	5100	350
media	1282	21,8	48,8	556	44	4529	278
mediana	580	20,5	50,5	635	46	2100	270
Regional background	25	19	95	32	35	38	76

Tabla 1. Concentraciones totales de los elementos traza analizados (mg/kg), y valores de fondo edafogeoquímico regional según Galán et al., (2008)

sible (dosis de referencia) es inferior a la unidad (Factor 1.0E⁰).

Para elementos carcinogénicos como el As, donde no existe una relación directa, se considera situación de riesgo aceptable cuando la prevalencia de cáncer en una población expuesta no excede de uno por cada cien mil casos, y por tanto el factor de riesgo se establece legalmente en 1.0E⁻⁵.

La evaluación de riesgos se realizó con el programa informático RBCA Tool Kit for Chemical Releases®, versión 2.0, un paquete integral que permite caracterizar y cuantificar el riesgo específico de cada emplazamiento (Connor et al. 2007).

RESULTADOS ANALÍTICOS

Los resultados analíticos obtenidos (Tabla 1) evidencian que los suelos agrícolas de la parcela muestreada contienen concentraciones muy elevadas de metales y metaloides de origen minero. En particular, las concentraciones medias de As (1282 mg/kg), Cu (556

mg/kg), Pb (2100 mg/kg) y Zn (278 mg/kg) superan ampliamente los valores del fondo edafogeoquímico regional (Galán et al., 2008).

El resto de elemento traza analizados (Co, Cr y Ni) se encuentran en concentraciones compatibles con sus valores naturales, y por ello no se consideraron en el análisis de riesgos.

CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO

En un análisis cuantitativo, el riesgo se expresa matemáticamente, como un valor por encima o debajo de un nivel de referencia específico en caso de riesgos sistémicos, y como una probabilidad en el caso de riesgo asociado a efectos cancerígenos.

En el Escenario I, la probabilidad de riesgo carcinogénico se ha estimado multiplicando el factor de potencia cancerígena del As por la exposición, expresada como ingesta total por las vías de exposición más relevantes consideradas en el modelo, resultando así un valor indicativo de un riesgo inaceptable (1,43E⁻¹).

ESCENARIO I (agricultor on-site expuesto al suelo superficial por ingestión directa, contacto dérmico, inhalación, e ingesta de hortalizas)							
Elemento traza	Concentración (mg/kg)	Tasa de ingesta (mg/kg día)	Ingesta total de elementos carcinogénicos (mg/kg día)		Factor de potencia cancerígena (mg/kg día)		Riesgo carcinogénico
			Ingestión	Contacto dérmico	Oral	Dérmico	
As	5,80E ⁺⁰²	9,28E ⁻⁰²	9,50E ⁻⁰²	1,30E ⁻⁰⁴	1,50E ⁺⁰⁰	1,50E ⁺⁰⁰	1,43E ⁻⁰¹
			Ingesta total de elementos tóxicos (mg/kg día)		Dosis de referencia (mg/kg día)		Coeficiente de riesgo
			Ingestión	Contacto dérmico	Oral	Dérmico	
As	5,80E ⁺⁰²	9,28E ⁻⁰²	6,80E ⁻⁰³	1,20E ⁻⁰³	3,00E ⁻⁰⁴	3,00E ⁻⁰⁴	2,67E ⁺⁰¹
Cu	6,35E ⁺⁰²	4,25E ⁻⁰²	4,20E ⁻⁰²	7,20E ⁻⁰⁴	4,00E ⁻⁰²	4,00E ⁻⁰²	1,07E ⁺⁰⁰
Pb	2,10E ⁺⁰³	-	-	9,10E ⁻⁰³	3,60E ⁻⁰³	5,40E ⁻⁰⁴	1,69E ⁺⁰¹
Zn	2,70E ⁺⁰²	8,10E ⁻⁰³	7,30E ⁻⁰³	8,70E ⁻⁰⁴	3,00E ⁻⁰¹	3,00E ⁻⁰¹	2,72E ⁻⁰²

Tabla 2. Cuantificación del riesgo asociado a cada elemento en el escenario de exposición I.

ESCENARIO II (receptor residencial off-site expuesto a los contaminantes por inhalación)								
Elemento traza	Concentración (mg/kg)	Factor de atenuación natural (m ³ /kg)	Medio de exposición (mg/m ³)	Multiplicador de exposición	Concentración expuesta a inhalación (mg/m ³)	Exposición máxima carcinogénica (mg/m ³)	Factor de riesgo unitario	Riesgo carcinogénico
As	5,80E ⁺⁰²	1,30E ⁺¹¹	4,46E ⁻⁰⁹	4,10E ⁻⁰¹	1,83E ⁻⁰⁹	1,80E ⁻⁰⁹	4,30E ⁻⁰³	7,74E ⁻⁰⁹
						Exposición máxima (mg/m ³)	Dosis de referencia (mg/m ³)	Coeficiente de riesgo
						4,30E ⁻⁰⁹	1,00E ⁻⁰³	4,30E ⁻⁰⁶
Cu	6,35E ⁺⁰²	1,30E ⁺¹¹	4,88E ⁻⁰⁹	9,60E ⁻⁰¹	4,69E ⁻⁰⁹	4,70E ⁻⁰⁹	1,00E ⁻⁰³	4,70E ⁻⁰⁶
Pb	2,10E ⁺⁰³	1,30E ⁺¹¹	1,62E ⁻⁰⁸	9,60E ⁻⁰¹	1,55E ⁻⁰⁸	1,50E ⁻⁰⁸	-	-
Zn	2,70E ⁺⁰²	1,30E ⁺¹¹	2,08E ⁻⁰⁹	9,60E ⁻⁰¹	1,99E ⁻⁰⁹	2,00E ⁻⁰⁹	-	-

Tabla 3. Cuantificación del riesgo asociado a cada elemento en el escenario de exposición II.

La cuantificación del riesgo sistémico debido a elementos tóxicos, se ha realizado en función de la dosis de exposición, expresada como ingesta total de elementos tóxicos a través de las distintas vías de exposición, en comparación con las dosis de referencia recogidas en las bases de datos toxicológicas del RBCA. Según esto, los coeficientes de riesgo (hazard quotient) obtenidos superan la unidad en el caso de As (2,67E⁺⁰¹) y Pb (1,69E⁺⁰¹), y el índice de riesgo (hazard index) o suma de los coeficientes de riesgo de los elementos individuales se eleva a 4,46E⁺⁰¹, por lo que el riesgo sistémico es también inadmisibles para el escenario de exposición y el receptor considerado (agricultor).

En cambio, para los receptores residenciales que se encuentran fuera del emplazamiento (Escenario II), la probabilidad de riesgo carcinogénico (7,74E⁻⁰⁹) y el índice de riesgo sistémico (9,00E⁻⁰⁶) son notablemente inferiores a los valores límites de riesgo para la salud humana establecidos en la legislación española. Por consiguiente, se asume que no existe riesgo para los receptores que se encuentran expuestos a los contaminantes por inhalación de partículas y volátiles.

CONCLUSIÓN

Los suelos agrícolas de la parcela estudiada están contaminados por elementos tóxicos (As y Pb) que comportan riesgos carcinogénicos y sistémicos intolerables para la salud de los agricultores, por ingestión y contacto dérmico, y en consecuencia deberían tomarse medidas preventivas (evitar la exposición) o correctoras de la contaminación.

Los niveles de referencia calculados pueden considerarse representativos de los valores de saneamiento, en función del modelo conceptual definido previamente.

REFERENCIAS

Connor, J.A., Bowers, R.L., McHugh, T.H., Spexet, A.H. (2007): RBCA Tool Kit for Chemical Releases. Software Guidance Manual. GSI Environmental Inc., 120 pp.

Fernández-Caliani, J.C. (2012): Risk-based assessment of multimetallic soil pollution in the industrialized peri-urban area of Huelva, Spain. Environ. Geochem. Health, 34, 123-139

-, Barba-Brioso, C., González, I., Galán, E.

(2009): Heavy metal pollution in soils around the abandoned mine sites of the Iberian Pyrite Belt (Southwest Spain). Water Air Soil Pollut., 200, 211-226.

Galán, E. Fernández-Caliani, J.C., González, I., Aparicio, P., Romero, A. (2008): Influence of geological setting on geochemical baselines of trace elements in soils. Application to soils of South-West Spain. J. Geochem. Explor., 98, 99-106.

Plumlee, G.S. & Morman, S.A. (2011): Mine wastes and human health. Elements, 7, 399-404.