

EFFECTOS DE LAS MINAS DE ARINTEIRO (LA CORUÑA) SOBRE LA CALIDAD DE AGUAS SUPER Y SUBSUPERFICIALES*

ROSA CALVO¹, A. PÉREZ OTERO¹ y E. ALVAREZ RODRÍGUEZ¹

RESUMEN

Como consecuencia de la explotación a cielo abierto de la mina de cobre de Arinteiro (La Coruña), se produce una acidificación de las aguas súper y subsuperficiales, alcanzando las primeras concentraciones de H⁺, SO₄²⁻, Aluminio, Cinc, Cobre y Níquel no tolerables para la vida animal, recreo y abastecimiento.

Las aguas freáticas aparecen afectadas, no pudiendo potabilizarse un gran número de ellas y mostrando dos un gravísimo riesgo de toxicidad.

También se manifiesta una influencia negativa en los suelos situados en los márgenes fluviales en los que aparecen signos evidentes de contaminación.

INTRODUCCION

Los principales yacimientos de cobre existentes en Galicia están asociados al macizo básico de Santiago, formado casi exclusivamente por rocas anfibólicas, que presentan localmente una mineralización masiva de pirita, pirrotina y calcopirita. Como consecuencia de la explotación de la mina de Arinteiro, hoy abandonada, existe una amplia superficie cubierta por escombreras, zonas de corta, labores e infraestructura, que no han sido restauradas en su totalidad, ejerciendo un impacto negativo en su área de influencia.

El objetivo de este trabajo se centra en el estudio de la contaminación de las aguas fluviales y freáticas, así como el efecto sobre los suelos bañados por ellas, como primer paso para conocer la situación actual y elaborar un programa de restauración que elimine los impactos.

MATERIAL Y METODOS

Se han recogido 23 muestras de aguas superficiales (escorrentía, cauces fluviales y lagunas sobre superficies excavadas) y 22 muestras de aguas de pozos,

fuentes y abastecimiento a núcleos de población en diferentes fechas de 1988 a 1990. Asimismo, se analiza la solución extraída de suelos (ADAMS, 1974) situados en los márgenes de las cuencas. La localización de los puntos de muestreo se recoge en las Figuras 1 y 4. En todos los casos los parámetros analizados fueron: pH, conductividad eléctrica, contenido de sulfatos (por turbidimetría según BARDSLEY y LANDCASTER, 1960); aluminio (por colorimetría con violeta de pirocatocol, DUGAN y WILSON, 1974), Fe, Mn, Ni, Cu, Ca y Mg (por espectrofotometría de absorción atómica) y Na y K (por espectrofotometría de emisión).

RESULTADOS

Aguas superficiales

Una simple observación de los datos obtenidos pone de manifiesto una fuerte variación entre los diferentes puntos de muestreo. Así, en el caso del pH, mientras que en una serie de muestras se presentan unos valores entre 6,0 y 7,0, típicos de cauces fluviales de Galicia, especialmente los que recorren terrenos sobre rocas pobres en cuarzo (el punto número 1 puede tomarse como referencia al haberse seleccionado fuera del entorno de las minas), se produce un descenso brusco, hasta valores

* Este estudio ha sido financiado por la Agencia de Calidad Ambiental de la Xunta de Galicia, 1989.

¹ Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidad de Santiago.

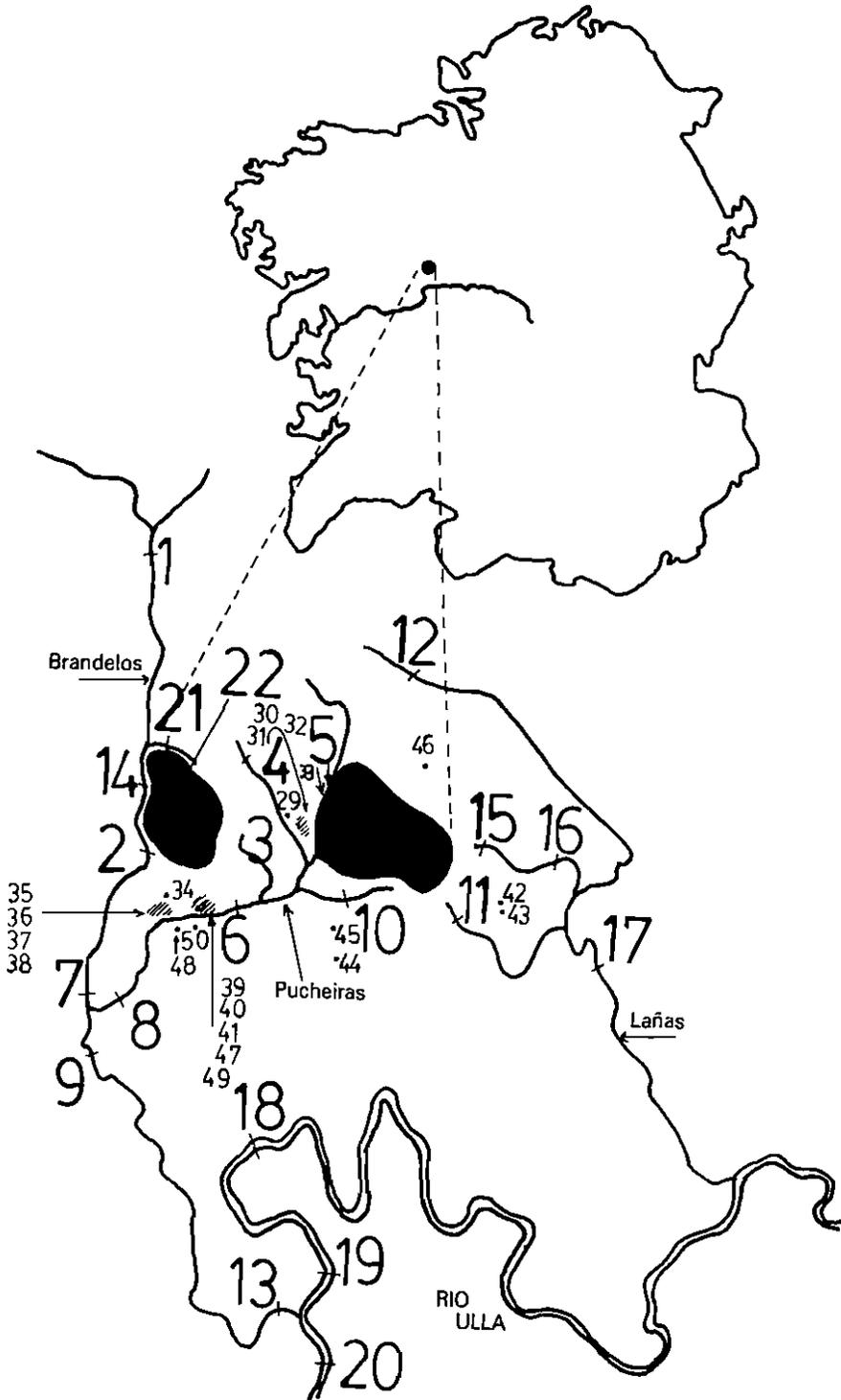


Fig. 1. Localización del área de estudio. 1-22: puntos de muestreo de aguas superficiales. 29-50: aguas subterráneas.

de pH de 3,0, en el resto de las muestras analizadas, es decir, las situadas en la proximidad y aguas abajo de las minas, en los ríos Pucheiras, Brandelos y Lañas (Apéndice 1). Los puntos más afectados se presentan en contacto con los taludes de las escombreras (5) y en lagunas interiores sobre las superficies excavadas (21 y 22). Atendiendo exclusivamente a este parámetro, todo el tramo fluvial señalado se encuentra fuera del rango de permisibilidad para la vida piscícola, según las normas comunitarias (pH inferior a 6,0).

La concentración de sulfatos sigue un fuerte paralelismo con los resultados anteriores, obteniéndose para los mismos tramos (especialmente los puntos 5, 6, 21 y 22) unas concentraciones muy superiores al umbral máximo permitido por la legislación de la CEE (250 ppm) («BOE», 1974; CEE, 1975). Obviamente, estos resultados deben interpretarse en base a las reacciones de oxidación de sulfuros de Fe y de Cu y Fe, expuestos en una gran superficie como consecuencia de la fragmentación de los materiales originales. Datos de potencial ácido de este tipo de material en condiciones de oxidación forzada han sido aportados por URRUTIA *et al.*, 1987. La fuerte acidez provoca el desencadenamiento de procesos acidolíticos que afectan a los minerales primarios, causando un incremento en la solubilidad de sus elementos constituyentes (Apéndice 1) y, en consecuencia, el incremento de

la fuerza iónica de las soluciones, que llega a superar ampliamente el nivel de tolerancia admitido por la legislación (1.000 $\mu\text{mhos/cm}$ de CE).

La estrecha relación existente entre pH y concentración de sulfatos se recoge gráficamente en la Figura 2. Por debajo de pH 4,0 las concentraciones de sulfatos se disparan, superándose ampliamente las 100 ppm, mientras que el descenso es notorio por encima de pH 6,0.

El impacto ácido sobre la solubilidad del Al, uno de los elementos menos móviles de los medios naturales, resulta notorio. Mientras algunos puntos muestran valores inferiores a 0,5 ppm (e incluso no detectables, lo cual es lo habitual en las aguas superficiales de la zona, CALVO *et al.*, 1987), en los tramos acidificados el Al llega a presentar concentraciones entre 30 y 40 ppm, creándose un fuerte riesgo de toxicidad; el río Pucheiras y las balsas de decantación interiores son los puntos más afectados. De todas formas, la interpretación de estos resultados debe sufrir algunas matizaciones, dado que la toxicidad por aluminio parece corresponder fundamentalmente a la actividad de la especie Al^{3+} (PAVAN y BINGHAM, 1982; BLAMEY *et al.*, 1983) más que a las concentraciones brutas de Al, que incluyen formas hidroxiladas simples, $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$; complejos organoaluminicos, formas poliméricas, pares con F^- , sulfatos... (ROBERSON *et*

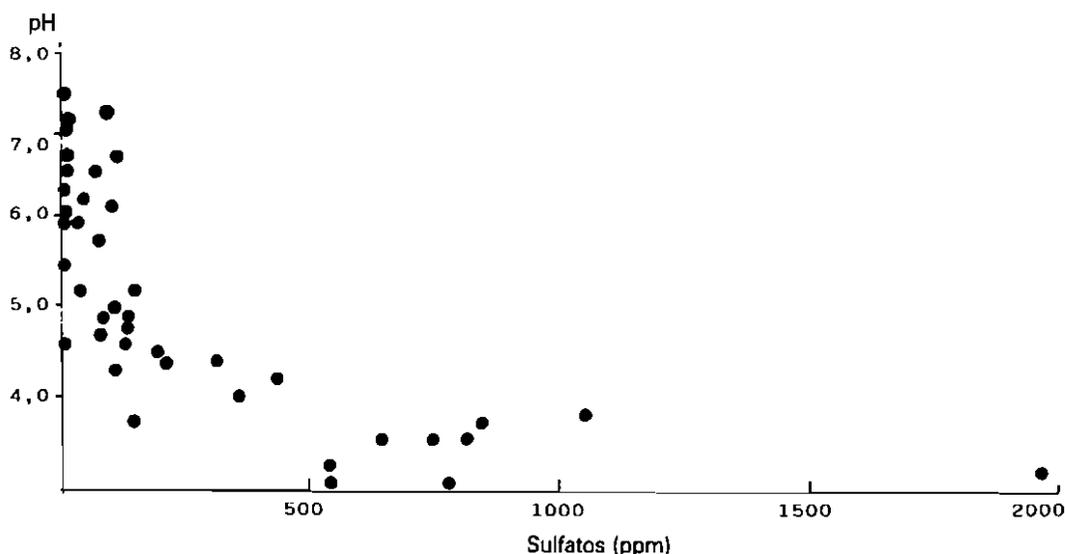


TABLA I
CONCENTRACION DE ALUMINIO Y ACTIVIDAD DE Al³⁺ EN ALGUNAS MUESTRAS DE AGUAS SUPERFICIALES DEL ESTUDIO (n.d.: NO DETECTABLE)

Muestra	Al total mol.L ⁻¹		aAl ³⁺	
	Septiembre 1988		Diciembre 1988	
	Al total	aAl ³⁺	- Al total	aAl ³⁺
1	—	n.d.	—	n.d.
2	3.10 ⁻⁵	10 ^{-4.61}	10 ⁻⁴	10 ^{-3.18}
3	n.d.	10 ^{-9.09}	10 ⁻⁵	n.d.
4	8.10 ⁻⁶	10 ^{-7.78}	6.10 ⁻⁵	10 ^{-7.23}
5	1,2.10 ⁻³	10 ^{-3.65}	1,6.10 ⁻³	10 ^{3.69}
6	1,2.10 ⁻³	10 ^{-3.84}	1,1.10 ⁻³	10 ^{-4.68}
7	1,5.10 ⁻⁴	10 ^{-4.61}	10 ⁻⁴	10 ^{-4.37}
8	19.10 ⁻³	10 ^{-3.70}	1,4.10 ⁻³	10 ^{-4.31}
9	16.10 ⁻³	10 ^{-3.76}	9.10 ⁻⁴	10 ^{-4.39}
10	n.d.	10 ^{-7.24}	4.10 ⁻⁵	n.d.
11	2.10 ⁻⁵	—	10 ⁻⁴	10 ^{-5.30}
12	2.10 ⁻⁶	—	n.d.	10 ^{-7.8}

TABLA II

APTITUD DE LAS AGUAS FLUVIALES PARA DIFERENTES USOS. LIMITACIONES POR pH, CONTENIDO DE SULFATOS (S), COBRE (Cu), MANGANESO (Mn), HIERRO (Fe) Y CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (E) SE CONSIDERAN LOS PARAMETROS OBSERVADOS EN LAS NORMATIVAS CEE Y USA PROPIOS DEL TIPO DE CONTAMINACION ANALIZADA

	ACTIVIDADES RECREATIVAS		VIDA PISCICOLA Y LIBRE		USOS AGRICOLAS		ABASTECIMIENTO PARA AGUA POTABLE (*)	
	USA	CEE	USA		USA		USA	CEE
			VP	VL	Granjas	Riegos		
1								Fe
2						pH/Mn	pH	Fe/pH/Mn
3						pH/Mn/Fe	pH	Fe/Mn
4						Mn/Fe		Fe/Mn
5	pH	pH	pH	pH	pH	pH/Mn/Fe/Cu	pH	S/pH/Mn/Fe/Cu
6	pH	pH	pH	pH	pH	pH/Mn/Fe/Cu	pH	S/pH/Mn/Fe/Cu
7	pH	pH	pH	pH	pH	pH/Mn		pH/Mn
8	pH	pH	pH	pH	pH	pH/Mn/Fe	pH	Fe/Mn/E/pH/S/Zn
9	pH	pH	pH	pH	pH	pH/Mn	pH	S/pH/Mn/Fe
10								
11	pH	pH	pH	pH	pH	pH/Mn/Fe	pH	S/pH/Mn/Fe
12								Fe/Mn/E/pH/S
13	pH	pH	pH	pH	pH	pH/Mn	pH	pH/Mn
14						pH/Mn/Fe		pH/Mn/Fe
15	pH	pH	pH	pH		pH/Mn/Fe	pH	S/pH/Mn/Fe
16								Fe/Mn/E/pH/S
17								Mn
18								
19								
20								
21	pH	pH	pH	pH		pH/Mn/Fe	pH	S/pH/Mn/Fe
22	pH	pH	pH	pH		pH/Mn/Fe	pH	S/pH/Mn/Fe

* Susceptible de depuración.

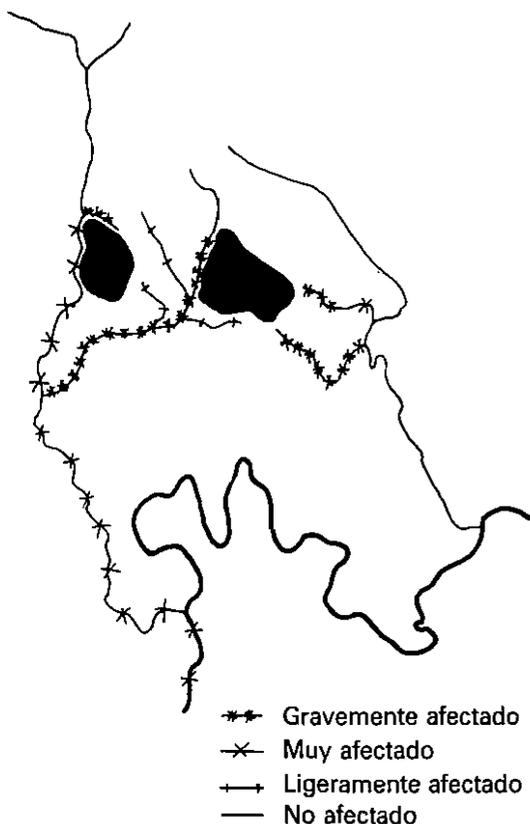


Fig. 3. Síntesis del estado actual de las aguas superficiales analizadas.

al., 1969; BOURNIE, 1981...). Teniendo en cuenta la elevada fuerza iónica y el alto contenido en sulfatos de las soluciones consideradas, sería de esperar que la actividad del Al^{3+} fuese bastante inferior a los valores totales de concentración. La aplicación del programa de cálculo SOLMINEQ-88 a algunos de los puntos del estudio da como resultado una estimación de la actividad del Al^{3+} variable entre «no detectable» y $10^{-3.65}M$ en los puntos más afectados (Tabla I), es decir, valores entre 10 y 100 veces inferiores a las concentraciones de Al total en estas muestras. No obstante, si se valoran estos resultados teniendo en cuenta las observaciones realizadas por CAMERON *et al.*, 1986, según las cuales las actividades de Al^{3+} superiores a $2,10^{-6}M$ afectan gravemente al desarrollo radicular de algunas especies, se confirma, para los puntos de mayor impacto ácido, la existencia de

toxicidad por Al (al menos para especies vegetales), al superarse ampliamente el umbral señalado.

Los análisis de Fe, Mn, Zn, Ni y Cu arrojan resultados similares, superando para las mismas muestras los niveles de tolerancia propuestos por las legislaciones europeas.

A partir de los resultados anteriores, se ha evaluado la aptitud de las aguas para diferentes usos, siguiendo las normativas USA Y CEE («BOE», 1984; CEE, 1975; CEE, 1978; MOPU, 1984), de las que se han obviado aspectos no relacionados con el impacto que nos ocupa, tales como presencia de coliformes, bacterias, nitratos, amonio, fosfatos... de diverso origen (Tabla II). La acidez del agua induce ineptitud para actividades recreativas, vida piscícola, organismos de vida libre, usos agrícolas y abastecimiento (no admiten potabilización) en un amplio número de muestras, lo que se hace extremo en las correspondientes al río Pucheiras. Los niveles de cobre, aluminio y sulfatos (ver Fig. 2) (y probablemente de Cr, Zn y Ni, si estos elementos fuesen contemplados en dichas normativas), así como la alta CE, se añaden al efecto ácido, induciendo por sí mismos la ineptitud para usos agrícolas y abastecimiento.

Una síntesis del estado actual de los diferentes parámetros analizados se recoge en la Tabla III, a partir de la cual hemos elaborado el diagnóstico final de la cuenca (Fig. 3).

El impacto final sobre el río Ulla puede apreciarse si se comparan los valores alcanzados por algunos parámetros antes y después de la recepción del río Brandelos (Tabla IV). En general, se observa un incremento de conductividad eléctrica, grado de oxidación, concentración de protones, aluminio y sulfatos, lo que es más notorio cuando, debido al cierre de las compuertas del embalse situado aguas arriba, el caudal del Ulla aparece disminuido. En épocas de mayor caudal la recuperación de las aguas después del impacto del río Brandelos puede tener lugar a los pocos kilómetros (Tabla IV, datos de la muestra 23).

Análisis de aguas subsuperficiales

En la Tabla V se recogen los datos obtenidos en distintas fechas en muestras de aguas de pozo,

TABLA III
GRADO DE IMPACTO OBSERVADO PARA DIFERENTES PARAMETROS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES MUESTREADAS

Muestras	pH	CE	Sulfatos	Aluminio	Zn	Ni	Cu
1	○	○	—	—	—	—	—
2	*	○	*	●	*	○	○
3	○	○	—	—	○	○	—
4	○	○	○	●	—	○	—
5	●	●	●	●	●	●	●
6	●	●	●	●	●	●	●
7	*	○	*	*	*	○	○
8	●	●	●	●	●	*	*
9	*	○	*	●	*	—	○
10	*	○	*	—	○	—	—
11	●	●	●	●	○	○	○
12	—	○	—	—	○	—	—
13	*	○	*	●	○	—	—
14	*	○	*	●	○	—	—
15	●	*	●	●	—	—	—
16	*	*	*	○	—	—	—
17	—	—	—	○	—	—	—
18	—	—	—	○	—	—	—
19	—	—	—	○	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—
21	●	●	●	●	●	○	*
22	●	*	●	●	*	—	○

●: no tolerable; *: gravemente afectado; ○: contaminación a bajo nivel; —: no contaminado.
CE: ●: >1 mS/cm; *: 0,4-1; ○: 0,1-0,4; —: <0,1 mS/cm; pH: ●: <5,5 ó >8,5; *: <6,0 ó >8,0; —: 6,0-8,0; sulfatos: ●: >250 ppm; *: 25-250; ○: 10-25; —: <10 ppm; aluminio: ●: >1 ppm; *: 0,5-1,0; ○: 0,2-0,5; —: <0,2 ppm; Zn, Ni, Cu: ●: >1 ppm; *: 0,4-1; ○: 0,1-0,4; —: <0,1 ppm.

fuentes y aguas de traída en localidades del entorno a las minas (Fig. 1).

Independientemente de la fecha de muestreo, un gran número de puntos presentan unas condiciones preocupantes de pH, con valores inferiores a

5,5, por lo que, considerando exclusivamente este parámetro, únicamente cumpliría los requisitos de potabilidad de la OMS (pH=6,5) el agua de la muestra 39, un agua de pozo con una profundidad de exploración de 50 m. Es de destacar, por la gravedad de su situación, una fuente situada en

TABLA IV
IMPACTOS SOBRE EL RIO ULLA: ANALISIS DE LAS AGUAS DEL ULLA ANTES Y DESPUES DE LA RECEPCION DEL RIO BRANDELOS (LA MUESTRA 23 SE LOCALIZA EN P. LEDESMA, SIENDO EL CAUDAL ELEVADO EL DIA DEL MUESTREO)

	SEPTIEMBRE 1988				AGOSTO 1989		
	Río Brandelos	Río Ulla			Río Brandelos	Río Ulla	
		Antes de impacto	Después de impacto			Antes de impacto	Después de impacto
			20	23			23
CE (µS/cm)	413	72	104	88	661	91	84
pH	4,6	7,5	7,2	7,3	4,5	8,3	7,0
Eh (mvol)	514	419	442	411	236	151	178
Al (ppm)	4,2	<0,01	0,04	<0,01	76,3	0,04	0,08
Sulfatos (ppm)	69,8	3,7	90,3	14,6	56,1	0,90	1,03

TABLA V
 POTABILIDAD DE AGUAS SUBSUPERFICIALES (NORMATIVA CEE)

Muestra	Localidad-tipo de muestra	Limitación permanente () eventual	Síntesis permanente () eventual
29	Arinteiro: agua de traída	(pH)	(N. P.)
30	Arinteiro: pozo (5 m)	(pH)	(N. P.)
31	Arinteiro: pozo (8 m)	(pH)	(N. P.)
32	Arinteiro: fuente/lavadero	(pH)	(N. P.)
33	Arinteiro: fuente/ lad. mina	pH, CE, sulfatos Cu, Mn, Zn, Cd y Al	N. P. y gravemente peligrosa
34	Torreis de Abaixo: traída	pH, CE, Cu y Mn	N. P. y gravemente peligrosa
35	Torreis de Abaixo: pozo (5 m)	—	P. tipo A ₂
36	Torreis de Abaixo: pozo (31 m)	pH	N. P.
37	Torreis de Abaixo: pozo (4 m)	(pH), CE	N. P.
38	Torreis de Abaixo: fuente	pH (CE)	N. P.
39	Goritas: pozo (50 m)	—	P. tipo A ₁
40	Goritas: fuente	(pH)	(N. P.)
41	Goritas: fuente/lavadero	pH	N. P.
42	Touro: pozo (29 m)	pH	N. P.
43	Touro: pozo (15 m)	(pH)	(N. P.)
44	Mourellos: fuente	pH	N. P.
45	Mourellos: pozo (18 m)	—	P. tipo A ₂
46	Castelo: pozo (45 m)	(pH)	(N. P.)
47	Goritas: pozo (2 m)	(pH), CE	N. P.
48	Torreis de Abaixo: fuente	—	P. tipo A ₁
49	Goritas: pozo (5 m)	(pH)	(N. P.)
50	Goritas: fuente montaña	—	P. tipo A ₂

P: potabilizable (A₁, A₂, A₃): calidad de aguas potabilizables; A₁: potable).
 N. P.: no potabilizable.
 (N. P.): eventualmente no potabilizable.

una de las laderas de la superficie de escombrera (33), que presenta unos valores de pH entre 3,5 y 3,8, además de altos contenidos (superiores a los admitidos) de sulfatos, cobre, cinc, manganeso, cadmio y conductividad eléctrica. Sin llegar a estas condiciones, el agua de traída de la localidad de Torreis (34) también es fuertemente nociva, con incumplimiento de los parámetros de pH, CE, cobre y manganeso, así como altos contenidos de sulfatos.

La gravedad de esta situación se resalta aún más si se considera la susceptibilidad de estas aguas a ser potabilizadas. Siguiendo los criterios de la CE, sólo dos de las 22 muestras analizadas son susceptibles de beberse directamente, al menos según los parámetros analizados, tres requieren tratamientos físico-químicos (nivel A₂), ocho son de dudosa potabilidad (no potabilizables en alguna época del año) y nueve son claramente no potabilizables, lo

cual es realmente grave si se tiene en cuenta que se trata de aguas que se utilizan para abastecimiento doméstico en pequeños núcleos de población. Por último, hay que destacar la acusada peligrosidad de las anteriormente citadas muestras 33 y 34 (Tabla V).

Suelos: estudio de fluvisoles

El impacto ejercido por las aguas de escorrentía provenientes de las áreas de escombreras sobre los suelos anegados por ellas ha sido estudiado analizando la solución extraída de suelos de vega, concretamente las estrechas áreas de fluvisoles desarrolladas sobre sedimentos de río, generalmente con nivel freático elevado y dedicación a pradera. En la Figura 4 se señala la disposición de los suelos muestreados y en la Tabla VI los resultados obtenidos. La observación de los datos pone de ma-

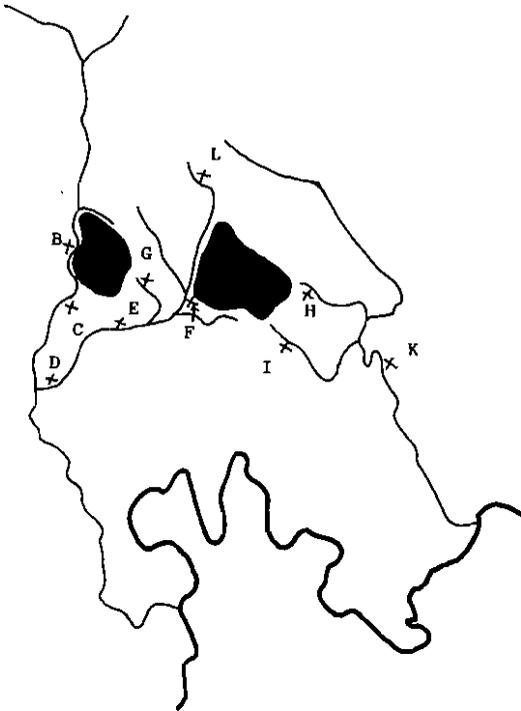


Fig. 4. Localización de los fluvisoles muestreados.

nifiesto claras diferencias según la localización de los puntos analizados, observándose un fuerte impacto en los situados en la base de los taludes de escombrera (B y F), con valores de pH inferiores a 3,9 y altos contenidos en sulfatos, metales pesados y aluminio. Le siguen las muestras cuyo contacto con la escombrera no es directo como en los

casos anteriores (I, C, G y H), aunque sí están próximas a ellas; el pH de estas muestras aparece frecuentemente neutralizado, indicando el poder de amortiguación del suelo sobre las aguas de contacto, provocándose, en consecuencia, un incremento en la solubilidad de los cationes básicos a partir de la hidrólisis ácida de los minerales constituyentes. En un tercer grupo aparecen las muestras E y D, algo más alejadas de los taludes, pero bañadas por el río Pucheiras. Por último, las muestras L y K, que no dan señales de contaminación y aparecen situadas al borde de arroyos que tampoco presentan este impacto.

CONCLUSION

Los análisis de aguas súper y subsuperficiales realizados en distintas fechas de 1988 a 1990 en el entorno al área minera de Arinteiro, en La Coruña, ponen de manifiesto los siguientes resultados:

1. Una fuerte toxicidad por H⁺, SO⁻³, aluminio, cinc, níquel y cobre a lo largo de los ríos Pucheiras, Lañas y tramo medio del río Brandelos, que se presentan como no tolerables para la vida animal, vegetal, recreo y abastecimiento.
2. Altos niveles de contaminación en el tramo inferior del río Brandelos hasta su confluencia con el Ulla, que aparece seriamente afectado en las fechas en las que se produce una disminución del caudal en relación a las operaciones realizadas en el embalse situado aguas arriba. Cuando el caudal no ha sido restringido la recuperación se produce a los pocos kilómetros del impacto.
3. La influencia sobre aguas freáticas y contami-

TABLA VI
DATOS ANALITICOS DE LA SOLUCION EXTRAIDA DE FLUVISOLES

Muestra	pH	CE µS/cm	SO ⁻²	Al	Fe	Zn	Cu	Ni	Mn	Cd	Na	K	Ca	Mg	Cr
.....															
ppm															
C	5,7	4.656	99,9	0,20	4,66	0,20	0,01	0,03	0,26	0,01	150,0	810,0	73,0	96,0	n.d.
G	4,8	232	62,2	5,20	2,70	0,58	0,06	0,04	1,35	0,02	9,3	13,7	3,4	1,8	n.d.
L	5,2	161	35,2	0,35	0,00	0,26	n.d.	0,03	0,19	0,01	9,0	3,6	5,8	3,2	n.d.
K	7,1	185	35,2	0,15	0,00	0,09	n.d.	0,02	0,04	0,02	15,8	2,2	3,0	2,9	n.d.
H	6,2	1.335	219,7	0,15	0,15	0,10	0,01	0,03	0,11	0,02	197,0	330,0	5,7	7,5	n.d.
D	4,2	484	224,1	3,05	0,00	0,44	0,06	0,05	0,97	0,02	16,3	4,2	6,1	1,2	n.d.
E	4,3	429	208,1	1,58	28,50	0,56	0,05	0,03	1,40	0,02	13,9	36,0	3,3	6,2	0,01
B	3,5	1.915	1.312,8	106,2	0,30	5,00	1,10	0,28	3,80	0,03	16,2	6,5	47,0	183,0	0,01
I	3,7	928	440,3	0,7	4,63	0,31	0,01	0,03	0,66	0,02	27,6	3,6	86,0	36,0	n.d.
F	3,8	2.265	1.800,6	27,2	1,32	3,60	0,70	0,29	4,60	0,02	27,3	13,1	132,0	275,0	n.d.

nación de acuíferos se hace especialmente evidente en los análisis realizados en pozos, fuentes y aguas de traída de núcleos rurales. De las 22 muestras recogidas sólo dos de ellas son susceptibles de ser bebidas directamente y 17 no son potabilizables en alguna época o durante todo el año. Dentro de estas últimas existe un gravísimo riesgo de

toxicidad por ingestión de dos de ellas.

4. Los suelos situados en los márgenes de los cursos fluviales más afectados presentan signos evidentes de contaminación, al presentar pH inferiores a 3,9 y niveles muy elevados de sulfatos, Al, Zn, Cu, Mn y Ni.

SUMMARY

Exploitation of the opencast copper mine of Arinteiro (La Coruña, Spain) involves an acidification of surface and underground waters, searching H^+ , SO_4^{2-} , Al, Zn, Cu and Ni concentrations which make them inadequate for wildlife and human use.

Many parameters of these waters are beyond the tolerance limits even when physical and chemical treatments are applied. Even more, two samples showed severe toxicity risk.

The negative influence is also found in riverside fluvial soils, with clear evidences of strong contamination.

BIBLIOGRAFIA

- ADAMS, F., 1974: «Soil solution». En: *The plant root and its environment*. E. W. CARSON (ed.), pp. 441-481.
- BARDSLEY, C. E., y LANDCASTER, J. D., 1960: «Determination of reserve Sulfur and solubles sulfates in soil». *Sci. Soc. Am. Proc.*, 24: 265-268.
- BLAMEY, F. P. C.; EDWARDS, D. G., y ASHER, C. J., 1983: «Effects of aluminum OH: Al and P: Al molar ratios, and ionic strength on soybean root elongation in solution culture». *Soil Sci.*, 136: 197-207.
- «BOE», 1984: *Reglamento del Dominio Público Hidráulico que desarrolla la Ley de Aguas*. «BOE», núm. 209: 26421-26425.
- BOURRIE, G., 1981: «Geochemistry of springs waters seasonal variations and aluminium control». En: *Proc. 7th. Int. Clay Conf. 1981*. VAN OLPHEN y VENIALE (eds.). AIPEA. Bologne, Pavie. Dev in Sedimentology, 35 Elsevier, pp. 459-473.
- CALVO, R.; FERNÁNDEZ-MARCOS, L., y VEIGA, A., 1987: «Composición de la solución del suelo en medios naturales de Galicia». *An. de Edafología y Agrob.*, 46: 621-641.
- CAMERON, R. S.; RITCHIE, G. S. P., y ROBSON, A. D., 1986: «Relative toxicities of inorganic aluminium complexes to barley». *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 1231-1234.
- CEE, 1975: *Directiva del Consejo (75/440/CEE) relativa a la calidad de aguas sugerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable en los Estados miembros*. «Diario Oficial». Com. Europea, pp. 123-128.
- CEE, 1975: *Directiva del Consejo (76/160/CEE) relativa a la calidad de aguas de baño*. «Diario Oficial». Com. Europea, pp. 123-139.
- CEE, 1978: *Directiva del Consejo (78/659/CEE) relativa a la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces*. «Diario Oficial». Com. Europea, pp. 111-120.
- DUGAN, W. K., y WILSON, A. L., 1974: «The absorptiometric determination of Al in water. A comparison of some chromatogenic reagents and the development of and improved method». *Analyst.*, 99: 413-431.

- MOPU, 1984: «Normas USA de Calidad de Aguas». En: *Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenidos y metodología*. Serie Manuales, núm. 3. Madrid.
- PAVAN, M. A., y BINGHAM, F. T., 1982: «Toxicity of aluminum to coffee seedlings grown in nutrient solution». *Soil Sci. Am. J.*, 46: 993-997.
- ROBERSON, C. E., y HEM, J. D., 1969: *Solubility of aluminium in presence of hydroxide, fluoride and sulfate*. U.S. Geol. Water Supply Pap. 1827-C. Washington D.C.
- URRUTIA, M.; GRAÑA, J.; ROMERO, R.; GARCÍA, C., y MACÍAS, F., 1987: «Procesos de oxidación de pirita en medios superficiales: potencial acidificante e interés para la recuperación de suelos de mina». *Revista de Xeoloxía Galega e do Hercínico Peninsular. Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 11: 126-134.

APENDICE 1
DATOS ANALITICOS DE AGUAS SUPERFICIALES (<: MENOS DE 0,01 ppm)

Muestra		pH	CE µS/cm	SO ²⁻	Al	Mn	Zn	Ni	Cu	Fe	Na	K	Ca	Mg
		ppm												
1	XII-88	6,4	0,477	4,4	<	—	<	<	<	0,11	8,6	1,2	2,5	1,2
	II-89	5,5	0,317	8,5	0,21	<	<	<	<	0,30	7,9	1,5	2,5	1,4
2	IX-88	5,0	0,311	104,0	0,94	—	0,46	0,20	0,32	0,18	10,3	0,7	13,1	7,1
	XII-88	4,8	0,799	132,4	2,87	—	0,55	0,20	0,55	0,11	9,5	1,4	27,3	21,6
	II-89	4,9	0,550	134,3	4,85	0,22	0,03	0,03	0,05	0,54	9,1	1,0	24,7	8,7
3	IX-88	5,8	0,309	72,5	<	—	0,22	<	<	0,49	14,3	0,9	10,7	7,1
	XII-88	6,8	0,740	110,4	0,35	—	0,06	0,10	0,02	0,25	12,8	1,3	19,8	19,9
	II-89	5,1	—	—	—	—	0,02	0,02	<	1,60	—	—	—	—
4	IX-88	6,0	0,111	29,0	0,23	—	<	<	<	1,92	7,4	0,3	3,1	3,0
	XII-88	6,6	0,504	15,4	1,66	—	0,03	0,10	0,02	0,43	6,7	0,5	3,7	3,7
	II-89	4,3	0,488	109,4	6,36	—	0,02	0,02	0,08	1,11	—	—	—	—
5	IX-88	3,0	1,849	538,0	32,44	—	1,22	0,90	1,20	4,82	17,4	2,9	101,0	7,8
	XII-88	3,0	2,078	775,9	43,40	—	1,19	1,00	1,51	5,80	15,6	3,9	110,2	53,0
6	IX-88	3,2	2,195	540,5	33,92	—	1,42	1,20	1,28	3,14	17,4	2,3	95,2	7,9
	XII-88	3,5	1,906	815,0	30,50	—	1,07	0,70	0,98	2,12	16,9	4,2	124,4	52,7
	II-89	3,5	1,084	642,3	26,90	1,46	0,07	0,07	0,08	4,13	15,3	2,5	46,7	10,5
7	IX-88	4,6	0,475	128,8	4,18	—	0,61	0,03	0,34	0,13	12,2	1,1	24,6	7,4
	XII-88	4,8	0,808	132,4	2,89	—	0,51	0,30	0,52	0,11	9,5	1,1	25,4	21,2
	II-89	5,2	0,463	34,7	0,25	0,24	0,01	0,01	0,02	0,02	9,0	0,9	1,7	8,1
8	IX-88	4,4	0,680	208,5	5,37	—	0,98	0,50	0,86	0,22	11,1	0,8	28,8	7,5
	XII-88	3,5	1,847	746,0	38,30	—	1,01	0,60	0,90	0,46	16,7	4,0	124,4	52,0
	II-89	3,7	1,025	145,5	19,50	0,15	0,05	0,05	0,07	0,72	15,2	2,5	96,7	11,4
9	IX-88	4,5	0,504	192,6	4,43	—	0,50	0,20	0,36	0,24	12,1	1,3	24,8	7,4
	XII-88	4,2	1,228	434,7	25,86	—	0,75	0,40	0,66	0,67	11,8	2,3	20,0	43,5
	II-89	4,9	0,536	92,2	1,74	1,16	0,02	0,02	0,03	0,10	9,5	1,0	20,1	8,5
10	IX-88	6,6	0,362	67,9	<	—	0,20	<	<	0,10	13,0	0,9	20,2	7,1
	XII-88	6,3	0,614	43,7	1,00	—	0,03	<	0,01	0,07	10,4	1,6	9,1	7,4
	II-89	6,3	0,421	51,1	0,34	<	<	<	<	0,08	11,0	5,3	7,9	5,7
11	IX-88	4,7	0,409	76,5	0,57	—	0,22	<	0,02	0,37	14,0	1,5	22,3	7,1
	XII-88	4,0	1,215	357,2	4,11	—	0,18	0,20	0,36	0,38	25,2	2,3	61,5	41,3
	II-89	3,8	1,356	1.051,9	41,18	2,78	0,39	0,06	0,01	4,01	31,7	5,1	144,4	12,2
12	IX-88	6,0	0,062	6,5	0,06	—	0,20	<	<	0,26	5,4	0,4	0,9	1,4
	XII-88	6,0	0,463	2,0	<	—	<	<	0,01	0,10	6,4	0,7	2,5	1,9
	II-89	6,1	0,304	4,9	0,34	<	0,01	<	<	0,08	6,2	2,1	3,3	1,7
13	IX-88	4,6	0,412	69,8	4,20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II-89	4,7	0,523	126,9	3,35	25,00	0,22	0,02	0,04	0,24	9,8	1,0	23,5	8,7
14	II-89	5,2	0,424	147,4	1,95	0,16	0,21	0,01	0,05	0,34	8,9	0,7	20,4	8,5
15	II-89	4,4	0,812	313,5	2,90	1,07	0,04	0,01	0,03	6,62	26,8	2,4	58,0	9,8
16	II-89	6,2	0,417	100,9	0,65	0,07	<	0,01	<	0,03	14,4	1,5	19,3	8,4
17	II-89	6,8	0,152	10,2	0,53	<	<	<	<	<	7,4	0,5	3,1	1,9

APENDICE 1 (Continuación)

DATOS ANALITICOS DE AGUAS SUPERFICIALES (<: MENOS DE 0,01 ppm)

Muestra		pH	CE μS/cm	SO ₄ ⁻²	Al	Mn	Zn	Ni	Cu	Fe	Na	K	Ca	Mg
									ppm					
18	II-89	7,1	0,153	6,7	0,60	—	—	—	—	—	7,9	0,5	3,5	1,7
19	IX-88	7,2	0,104	14,6	0,04	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II-89	7,5	0,148	6,0	0,70	<	<	<	<	<	7,8	0,5	3,1	1,9
20	IX-88	7,3	0,088	90,3	<	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	II-89	6,8	0,092	0,0	0,40	0,04	0,01	0,03	<	<	10,3	0,8	1,3	1,4
21	II-89	3,1	2,583	1.965,6	34,90	—	—	—	—	—	48,64	—	—	—
22	II-89	3,7	0,772	844,2	26,60	0,48	0,57	0,03	0,22	1,55	7,5	1,7	38,2	9,7

APENDICE 2
ANÁLISIS DE AGUAS SUBSUPERFICIALES (<: MENOS DE 0,01 ppm)

Muestra	pH	CE µS/cm	SO ₄ ⁻²	Cu	Zn	Mn	Co ppm	Ni	Al	FeII	FeIII	
29	VIII-89	4,9	74,1	0,0	<	<	<	<	0,10	0,08	<	<
	XI-89	5,9	65,6	3,8	<	<	<	<	<	<	<	0,01
	II-90	5,8	52,1	0,8					0,10			0,02
30	VIII-89	5,0	128,9	1,7	<	0,08	<	<	0,20	0,40	<	<
	XI-89	6,0	144,3	3,2	<	<	0,10	<	<	<	<	<
	II-90	5,6	85,4	2,0					0,16			
31	VIII-89	4,9	223,9	2,7	<	0,11	0,37	<	<	0,34	0,10	0,01
32	VIII-89	5,4	84,4	0,1	<	<	<	<	<	0,10	<	<
	XI-89	6,0	71,2	3,2	<	<	<	<	<	<	<	<
	II-90	5,7	87,7	8,8					0,56			
33	VIII-89	3,5	3.707,6	2.181,4	6,00	9,45	327,0	7,20	10,90	539,20	<	1,00
	XI-89	3,8	4.788,0	5.463,1	6,20	8,80	242,0	6,00	9,60	371,40	<	<
	II-90	3,8	3.605,2	2.401,4	12,00	11,20	276,0	7,60	15,00	490,36		0,132
34	VIII-89	4,8	1.789,3	195,9	1,50	0,85	4,65	0,40	0,70	1,94	<	<
	XI-89	4,9	1.778,8	141,2	1,20	0,60	4,30	0,40	0,50	2,30	<	<
	II-90	4,8	1.278,4	218,2	1,60	0,90	5,00	0,60	0,80	3,73		0,03
35	VIII-89	6,3	475,5	9,4	0,12	3,68	0,30	<	<	0,19	<	<
	XI-89	6,5	221,6	16,7	<	0,10	0,50	<	<	<	<	<
	II-89	6,0	219,4	13,8		0,10			0,31			0,16
36	VIII-89	5,1	499,4	38,3	0,31	0,17	<	<	<	0,14	<	<
	XI-89	5,6	476,0	48,1	0,20	<	<	<	<	<	<	<
	II-90	5,4	355,8	90,1	0,20	0,20			0,13			0,04
37	VIII-89	5,3	1.262,1	187,4	0,02	0,24	0,19	<	0,30	0,10	<	<
	XI-89	5,8	907,8	136,8	<	<	0,20	0,20	<	<	<	0,01
	II-90	5,6	180,3	28,2					0,15			0,04
38	VIII-89	4,7	491,5	39,4	<	<	<	<	<	0,64	<	<
	XI-89	5,4	909,2	49,8	<	<	<	<	<	<	<	<
	II-90	5,2	287,0	58,3					0,14			
39	VIII-89	7,2	203,7	1,2	<	<	0,26	<	0,30	0,14	<	<
	XI-89	7,3	171,5	6,0	<	<	0,20	<	<	<	<	0,01
	II-90	6,6	156,5	7,8		0,10			0,20	0,18		0,23
40	VIII-89	5,8	99,7	0,5	0,54	<	<	<	<	0,08	<	0,20
	XI-89	6,1	91,8	3,8	<	<	<	<	<	0,02	<	<
	II-90	5,2	47,4	1,2					0,10	0,12		0,02
41	VIII-89	5,3	119,4	0,0	<	<	<	<	<	0,05	<	<
	XI-89	4,4	115,5	1,2	<	<	<	<	<	<	<	<
	II-90	5,2	70,0	3,5					0,15			0,02
42	VIII-89	5,5	322,1	7,0	<	<	0,08	<	<	0,05	<	<
	XI-89	5,4	276,8	11,9	<	<	<	<	<	<	<	<
	II-90	5,1	346,0	10,4			0,20		0,15			0,04
43	VIII-89	5,7	109,4	0,3	0,10	<	<	<	<	0,04	<	<
	XI-89	6,1	95,8	3,0	<	0,20	<	<	<	0,06	<	<
	II-90	5,3	81,8	2,5	0,10				0,14			0,06

APENDICE 2 (Continuación)
ANÁLISIS DE AGUAS SUBSUPERFICIALES (< MENOS DE 0,01 ppm)

Muestra		pH	CE μS/cm	SO ₄ ⁻²	Cu	Zn	Mn	Co ppm	Ni	Al	FeII	FeIII
44	VIII-89	5,2	120,5	1,7	<	<	<	<	<	0,05	<	<
	XI-89	5,5	106,2	5,8	<	<	<	<	<	0,03	<	<
	II-90	5,0	118,6	4,7					0,10	0,13		0,02
45	VIII-89	5,7	94,1	0,0	<	<	<	<	<	0,81	<	<
	II-90	5,6	68,8	0,7						0,10		
46	VIII-89	5,4	217,9	0,6	<	0,13	<	<	<	0,05	<	<
	XI-89	5,9	158,7	2,6	<	0,30	<	0,10	<	<	<	<
	II-90	6,0	190,9	4,3	1,00	0,30				0,13		0,03
47	XI-89	5,6	1.633,1	180,0	<	0,10	0,20	<	0,20	<	<	<
	II-90	5,5	743,4	145,7		0,10	0,10		0,30	0,17		0,03
48	XI-89	6,7	76,1	7,8	<	<	<	<	<	<	<	<
	II-90	5,7	59,3	2,8						0,11		0,03
49	XI-89	5,6	468,7	50,7	<	<	<	0,10	<	<	<	<
	II-90	5,3	461,3	94,5	<	<			0,10	0,15		0,03
50	XI-89	6,3	77,4	5,6	0,10	<	<	<	<	<	<	<
	II-90	5,5	62,8	3,7			0,10		0,20	0,11		0,04