

# Impacto del drenaje ácido de explotaciones mineras en la cuenca del Río Margajita y Embalse de Hatillo (República Dominicana)

F. Grandia<sup>(1)</sup>, J. Salas<sup>(1)</sup>, D. Arcos<sup>(1)</sup>, A. Archambault<sup>(2)</sup> y F. Cottard<sup>(2)</sup>

(1) AMPHOS XXI Consulting S.L., Passeig Garcia i Faria 49-51, 08019, Barcelona, España  
*fidel.grandia@amphos21.com*

(2) BRGM, 3 Avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orleans Cedex 2, Francia  
*f.cottard@brgm.fr*

## RESUMEN

La explotación minera del yacimiento epitermal de alta sulfidación de Pueblo Viejo, en la República Dominicana, conlleva importantes afecciones en el medio ambiente debido principalmente a la generación de drenajes ácidos asociados al lavado meteórico de los yacimientos y las escombreras. Estas aguas ácidas se forman por la disolución oxidativa de los sulfuros y sulfosales. El riesgo ambiental de estas aguas no sólo está ligado a su acidez sino que, bajo estas condiciones, muchos elementos se solubilizan fácilmente pudiendo ser transportados fuera del entorno minero. En este trabajo se describe el estudio geoquímico de los sedimentos depositados en el embalse de Hatillo, que recibe las aguas de los ríos Margajita y Yuna, los cuales transportan lixiviados procedentes de Pueblo Viejo y Falcondo-Bonao (Cr-Ni), respectivamente. Los resultados muestran que los sedimentos en el fondo del embalse de Hatillo tienen concentraciones muy elevadas de metales y metaloides, principalmente Fe, Al y sulfato, además de concentraciones especialmente significativas desde el punto ambiental de As, Zn y Te. El principal contribuyente a la contaminación del embalse es, al menos actualmente, la cuenca del río Margajita. El río Yuna no transporta concentraciones significativas de metales y metaloides en solución debido a su pH neutro, aunque es posible que transporte partículas sólidas con contenidos significativos de Mn, Cr, Ni y Co procedentes de la zona minera de Falcondo.

Palabras clave: distrito de Pueblo Viejo, drenaje ácido de mina, embalse de Hatillo, río Margajita, río Yuna

## ***Impact of acid mine drainage from mining exploitations on the Margajita River basin and the Hatillo reservoir (Dominican Republic)***

### ABSTRACT

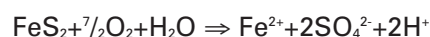
*Mining of the Pueblo Viejo high-sulphidation epithermal deposit (Dominican Republic) leads to environmental impact due to the formation of acid mine drainage associated with the oxidative dissolution of sulphides and sulphosalts. In addition to the very low pH, the acid waters are capable of transporting away from the mining areas high concentrations of metals and metalloids in solution. In the present work, a geochemical study of sediments deposited in the Hatillo reservoir is carried out. This reservoir is fed by the Margajita and Yuna streams which transport leachates from the Pueblo Viejo and Falcondo-Bonao (Cr-Ni) mining areas, respectively. The results show that these sediments have very high concentrations of Fe, Al and sulphate, along with significant amounts of As, Zn and Te, which are of especial environmental concern. The main contributor to this metal discharge into the reservoir is the Margajita stream, whereas the Yuna stream does not transport significant amounts of metals in solution due to its neutral pH, although it is likely that metals such as Mn, Cr, Ni and Co can be mobilised as a particulate.*

*Key words: acid mine drainage, Hatillo reservoir, Margajita river, Pueblo Viejo district, Yuna river*

## Introducción

Las actividades mineras del distrito de Pueblo Viejo, en la República Dominicana, conllevan importantes afecciones en el medio ambiente debido principalmente a la generación de drenajes ácidos asociados al lavado meteórico de los yacimientos y las escombreras. Estas aguas ácidas se forman por la disolu-

ción oxidativa de los sulfuros y sulfosales, tales como pirita, siguiendo la reacción:



El riesgo ambiental de estas aguas no sólo está ligado a su acidez sino que, bajo estas condiciones, muchos elementos se solubilizan fácilmente pudien-

do ser transportados fuera del entorno minero y ser depositados en zonas de interés ambiental causando graves perjuicios. En especial, en el caso del distrito de Pueblo Viejo existe un gran interés en determinar la interacción de las aguas ácidas con los sedimentos actuales y con las aguas superficiales y subterráneas.

En este trabajo se describe el estudio geoquímico de los sedimentos depositados en el embalse de Hatillo, situado en las proximidades del distrito de Pueblo Viejo, y en la confluencia entre los ríos Margajita y Yuna (Fig. 1) con el objetivo de caracteri-

zar el comportamiento geoquímico de los distintos elementos, sus vías de entrada al embalse y qué fases minerales pueden ejercer de huésped de los elementos que constituyen mayor riesgo ambiental. Este embalse recibe las aguas tanto del río Margajita y sus tributarios, los cuales drenan el área minera de Pueblo Viejo, como del río Yuna, el cual se ve afectado por la minería y metalurgia de la planta de Falconbridge en Falcondo-Bonao (Ni-Cr). La caracterización de las fases minerales presentes en los sedimentos puede permitir determinar la estabilidad de

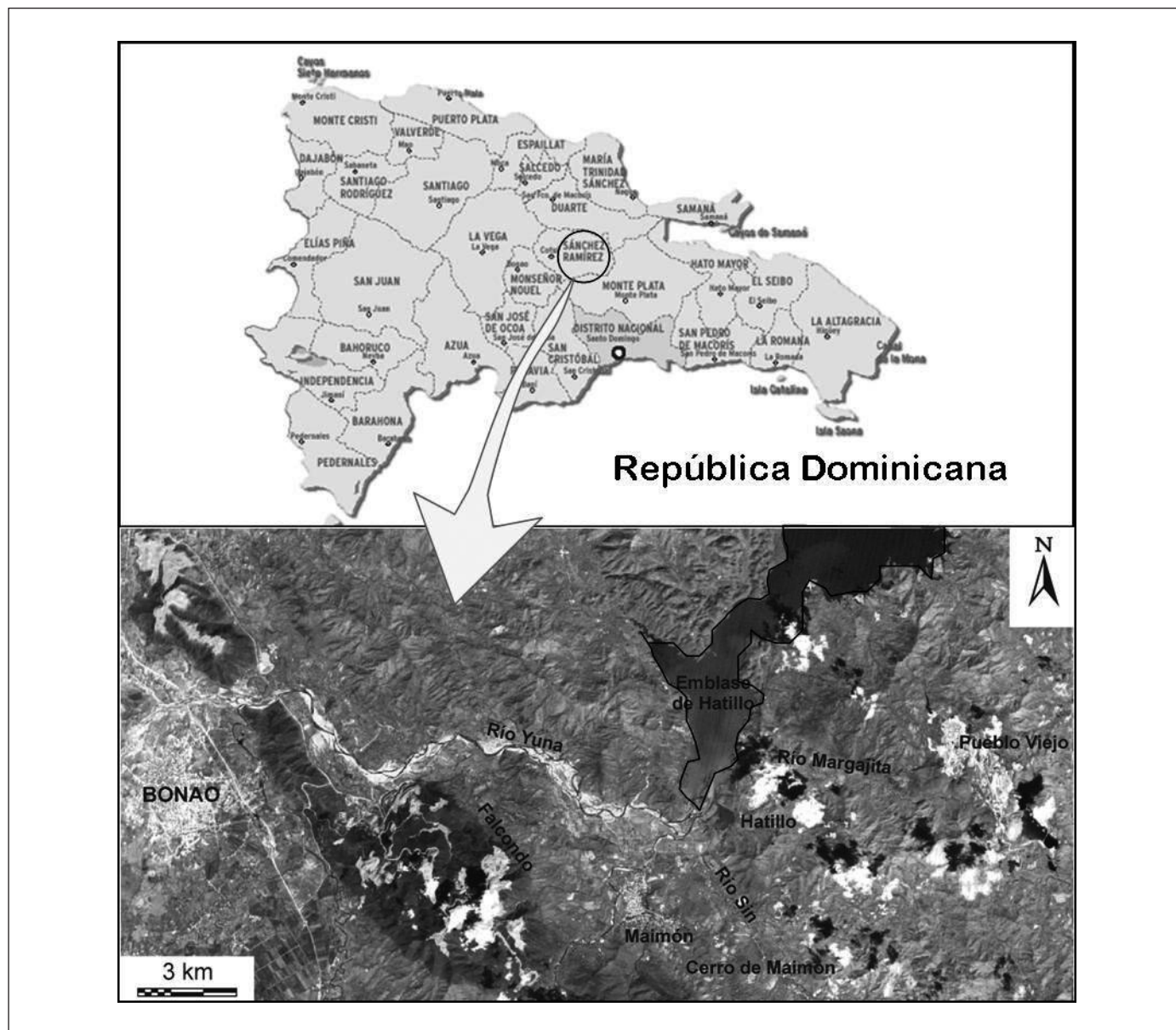


Figura 1. Localización del embalse de Hatillo y los distritos mineros de Pueblo Viejo y Falcondo-Bonao en la República Dominicana  
Figure 1. Location of the Hatillo reservoir and the Pueblo Viejo and Falcondo-Bonao mining districts in the Dominican Republic

los elementos de interés y su posible movilización a causa de cambios ambientales en el sistema. Para esta evaluación, se han establecido correlaciones entre elementos a partir de los datos analíticos proporcionados en las campañas de muestreo de julio y octubre de 2007 y marzo y mayo de 2008. Algunos de estos datos se han comparado con los obtenidos por la compañía minera Placer Dome Dominicana Corp. en 2002 y 2003. Además, se han llevado a cabo ensayos de lixiviación secuencial de metales en un conjunto seleccionado de muestras para establecer la capacidad de movilización de dichos metales en los sedimentos estudiados.

### Geoquímica de la mineralización del distrito de Pueblo Viejo y de las aguas de la cuenca del Río Margajita

El río Margajita drena los principales yacimientos del distrito de Pueblo Viejo, principalmente Moore y Montenegro. Estos depósitos son considerados de tipo epitermal de alta sulfidación (Sillitoe *et al.*, 2006) y contienen unas 100 Mt de sulfuros con leyes de 3 g·t<sup>-1</sup> Au, 23 g·t<sup>-1</sup> Ag, 0.8% Zn y 0.2% Cu. Es remarcable que las leyes de Au-Ag (y de otros elementos como el Te) se hallan notablemente enriquecidas en la zona de oxidación, que es la que mayoritariamente se ha explotado. La mineralogía de la zona no oxidada consiste principalmente de pirita (FeS<sub>2</sub>), esfalerita (ZnS) y enargita (Cu<sub>3</sub>AsS<sub>4</sub>), con cantidades menores de otras sulfosales como las del grupo tetrahedrita-tennantita (Cu<sub>12</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub> - Cu<sub>12</sub>As<sub>4</sub>S<sub>13</sub>). Estos minerales proporcionan la mayor parte de elementos de interés encontrados en los sedimentos de los ríos y del embalse de Hatillo. En particular, de éstos, cabe destacar aquellos con elevada toxicidad como el arsénico o el mercurio. Por otro lado, los metales preciosos como el oro y la plata se encuentran en estado nativo o como sulfuros (Ag<sub>2</sub>S) y telururos (AuTe<sub>2</sub>, AgTe<sub>2</sub>) paragenéticamente asociados a la pirita.

Durante el proyecto "O" SYSMIN I se llevó a cabo un muestreo exhaustivo de los cauces fluviales para determinar el grado de afección del drenaje ácido de mina (Blanchard y Gutiérrez, 2003; Cottard, 2003; Cottard y Cazaux, 2003). Globalmente, los resultados mostraron importantes afecciones (en pH y metales) en el río Margajita y menor contaminación en las cuencas fluviales situadas al este de las explotaciones de Pueblo Viejo. También cabe destacar que en periodos de aguas bajas, cuando el río Margajita se une con el Yuna antes que este último desembogue en el embalse de Hatillo, las aguas del Margajita mantienen un pH ácido (con valores alrededor de 2.5) hasta

la propia confluencia con el río Yuna. En este caso, el mayor caudal del río Yuna (alrededor de 10 veces superior) diluye y neutraliza las aguas ácidas del Margajita justo en la confluencia de los dos ríos. Por otra parte, en periodos de aguas altas, como consecuencia de grandes crecidas del río Yuna después de fuertes tormentas (Noel y Olga), el nivel de las aguas del embalse crece y penetran aguas arriba del río Margajita, neutralizando la acidez de este río aguas arriba de su desembocadura en el embalse de Hatillo (Fig. 2).

Los datos obtenidos en el proyecto "O" SYSMIN I permitieron determinar la existencia de claras correlaciones entre, por ejemplo, el pH y metales como arsénico y hierro en las aguas superficiales. La solubilidad de estos metales refleja equilibrios químicos con distintas fases minerales, principalmente jarosita (KFe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>) y schwertmannita (Fe<sub>8</sub>O<sub>8</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>1.5</sub>(OH)<sub>5</sub>). Es interesante mencionar que dichas correlaciones también han sido observadas en los sedimentos estudiados en el presente proyecto en el embalse de Hatillo que confirman la relación entre el distrito minero y la deposición de metales en el embalse.

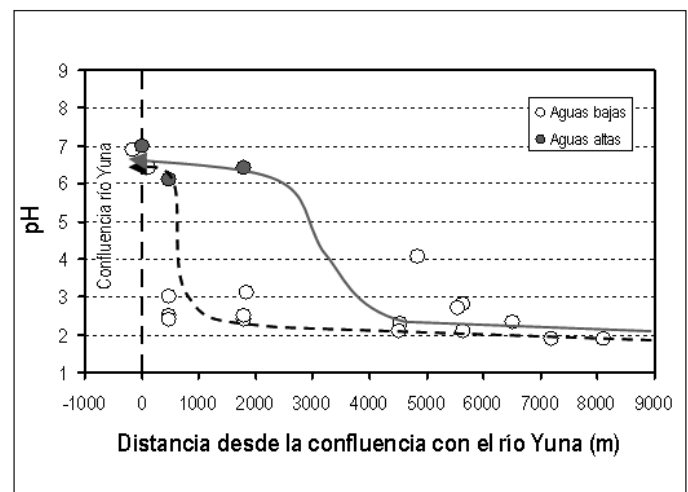


Figura 2. Variación del pH de las aguas superficiales en función del nivel de las aguas en el embalse de Hatillo. En periodos de aguas bajas, el pH del río Margajita se mantiene en valores inferiores a 3 hasta la misma confluencia con el río Yuna (línea discontinua en el gráfico). En cambio, en periodos de aguas altas, las aguas del embalse penetran en el río Margajita neutralizando el pH aguas arriba de su desembocadura en el embalse de Hatillo (línea continua en el gráfico)

*Figure 2. pH changes in surface waters as a function of reservoir water level. In a low reservoir water level, pH in the Margajita river is around 3 as far as the discharge point in the Yuna river (dashed line). In contrast, in high water level periods, the reservoir water neutralizes the pH in the lower part of the Margajita river (solid line)*

### Geoquímica de los sedimentos del embalse de Hatillo y de sedimentos de superficie de los cauces de los ríos Margajita y Yuna

Las muestras analizadas a partir de las cuales se ha llevado a cabo el presente estudio en el embalse de Hatillo proceden principalmente de 4 campañas de muestreo realizadas entre julio 2007 y mayo 2008 en el embalse de Hatillo (Fig. 3). Estas muestras consisten en sedimentos del fondo del embalse (muestreadas mediante inmersión por un buzo; 36 muestras de 30 puntos de muestreo), y sedimento de sondeos en la desembocadura del río Margajita (8 muestras de dos puntos de muestreo). A pesar de que la mayoría

de puntos de muestreo se localizan en el sector sur del embalse, próximos a la desembocadura de los ríos Yuna y Margajita, existen suficientes puntos en el resto del embalse. La muestra más alejada de la fuente de los metales se encuentra a pocos metros de la presa del embalse (Fig. 3). El sedimento del embalse fue muestreado mediante testigos de 0.10x0.50 m. En general, estos testigos presentan un sedimento de tamaño limo, poco consolidado en su parte superior y con coloraciones ocreas asociadas a la presencia de óxidos de hierro, mientras que la parte inferior se caracteriza por niveles más oscuros compactados (considerados como más anóxicos) con frecuentes restos vegetales. En algunos testigos se aprecia una

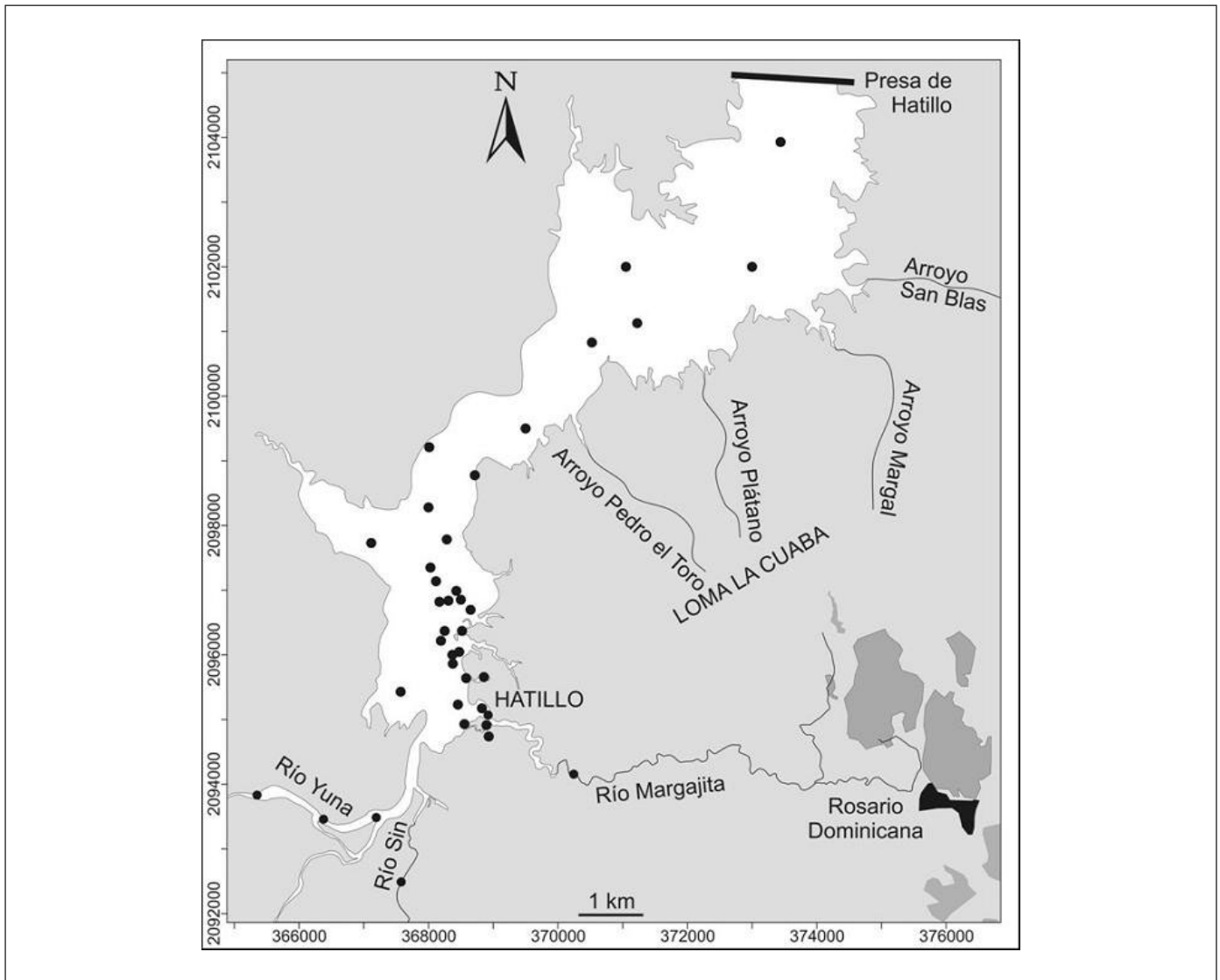


Figura 3. Mapa del embalse de Hatillo y situación de los puntos de muestreo del sedimento  
Figure 3. Map of the Hatillo reservoir showing the location of the sampling points



estructura varvada indicando que los procesos de sedimentación varían estacionalmente. El análisis de las muestras proporcionaron datos de concentración elemental de Cl, S, Al, Sb, As, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Ag, Pb, K, Se, Te, Zn y compuestos orgánicos. También se han estudiado sedimentos de superficie en los cauces de los ríos Margajita y Yuna (4 muestras). En principio, estas muestras proporcionan la composición química de fondo de las aguas antes de entrar en el embalse de Hatillo. Además de las muestras recogidas en el presente proyecto, también se han incluido datos de muestras de sedimentos recogidas en 2002 y 2003 en 2 puntos del embalse por Placer Dome Dominicana Corp.

Los datos obtenidos a partir del análisis de los sedimentos del embalse indican que en la mayoría de las muestras el elemento mayoritario es el hierro. En general, las muestras procedentes de la cuenca del río Margajita contienen las mayores concentraciones de Fe (hasta 20%wt), con concentraciones muy altas de sulfato (hasta 2%wt) y Al (hasta 6%wt). Respecto a otros elementos de interés, cabe destacar las máximas concentraciones de As (1.5%wt), Te (0.16%wt), Sb (30 ppm), Se (18 ppm), Zn (0.26 %wt) y Pb (160 ppm), que se encuentran en equilibrio con un agua de pH bajo (<3 en condiciones de aguas bajas). Para la mayoría de estos elementos se observa una clara correlación entre el pH del agua intersticial con la concentración en el sedimento (Fig. 4, en el caso del arsénico). El contenido de estos elementos en los

sedimentos disminuye, pues, al aumentar el pH, incluso dentro de la propia cuenca del río Margajita. Ello está en concordancia con el drenaje ácido procedente del distrito de Pueblo Viejo y con un proceso de precipitación química de estos elementos como consecuencia de un aumento de pH (probablemente asociado a la influencia de las aguas del río Yuna o del embalse de Hatillo).

En cuanto a Cr (hasta 420 ppm), Ni (hasta 640 ppm), Co (hasta 49 ppm) y Mn (hasta 0.13%wt), estos elementos presentan una muy buena correlación entre ellos (Fig. 5) encontrándose los mayores contenidos en los sedimentos del río Yuna, con pH neutro. Esto parece indicar claramente que estos elementos tienen su área fuente en las zonas mineras de Falcondo-Bonao y son transportados por el río Yuna y sus afluentes. Tan solo dos de las muestras de sedimentos tomadas en la desembocadura del Margajita presentan también altos contenidos en estos elementos. Sin embargo, estas muestras pueden corresponder total o parcialmente a sedimentos depositados por el río Yuna en periodos de aguas altas (tras las tormentas Noel y Olga).

A partir de las observaciones tomadas, se puede establecer que los principales procesos de acumulación de metales observados en el embalse de Hatillo son, por un lado, la deposición de partículas sólidas transportadas por las aguas (mayoritariamente procedentes del río Yuna) y, por otro, la precipitación de metales en solución, principalmente en la desembo-

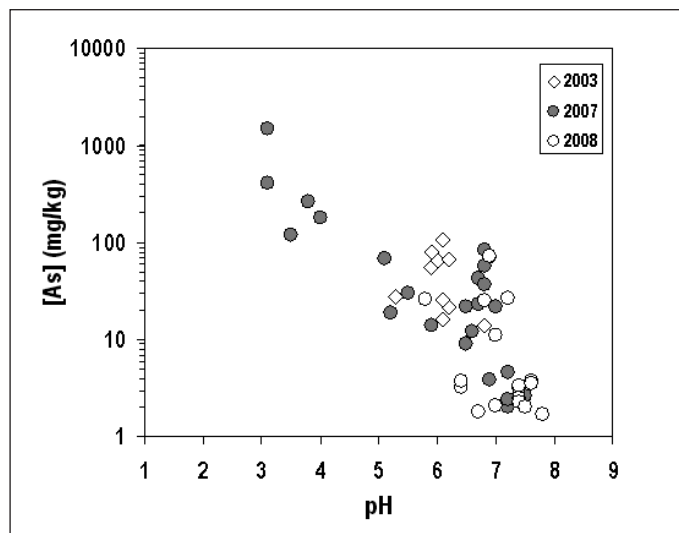


Figura 4. Correlación entre la concentración de arsénico en los sedimentos del embalse de Hatillo y el pH del agua de poro  
 Figure 4. Correlation between the concentration of arsenic and porewater pH in the sediments collected in the Hatillo reservoir

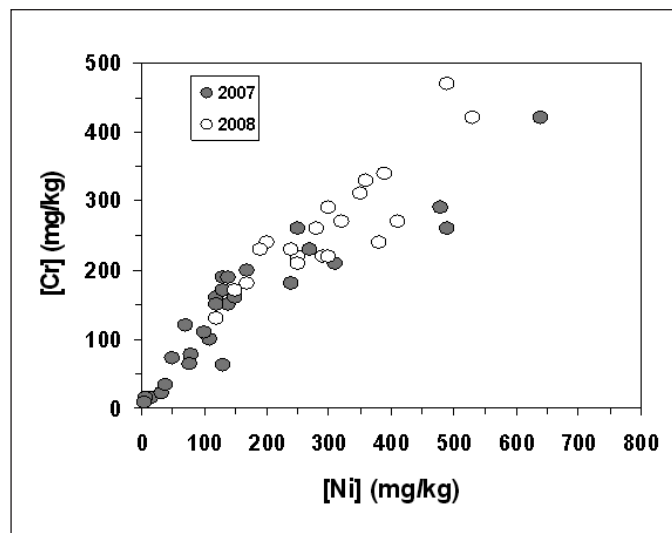


Figura 5. Correlación entre la concentración de cromo y de níquel en los sedimentos del embalse de Hatillo  
 Figure 5. Correlation between the chromium and nickel concentrations in the sediments collected in the Hatillo reservoir

cadura del río Margajita, a causa de la mezcla de aguas.

La distribución del pH intersticial en el embalse de Hatillo se muestra en la Fig. 6. Se observa que los valores de pH más bajos (<3) se encuentran circunscritos a los sedimentos del río Margajita y en sus inmediaciones. A partir de esta zona, los valores de

pH aumentan gradualmente, formando una pluma de acidez que queda perfectamente delimitada por el trazado de la corriente del río Yuna.

Por otra parte, es algo sorprendente la presencia de diversos focos de pH ligeramente ácido (pH entre 5 y 6) a lo largo de todo el margen derecho del embalse. Estos focos de acidez moderada están asociados a

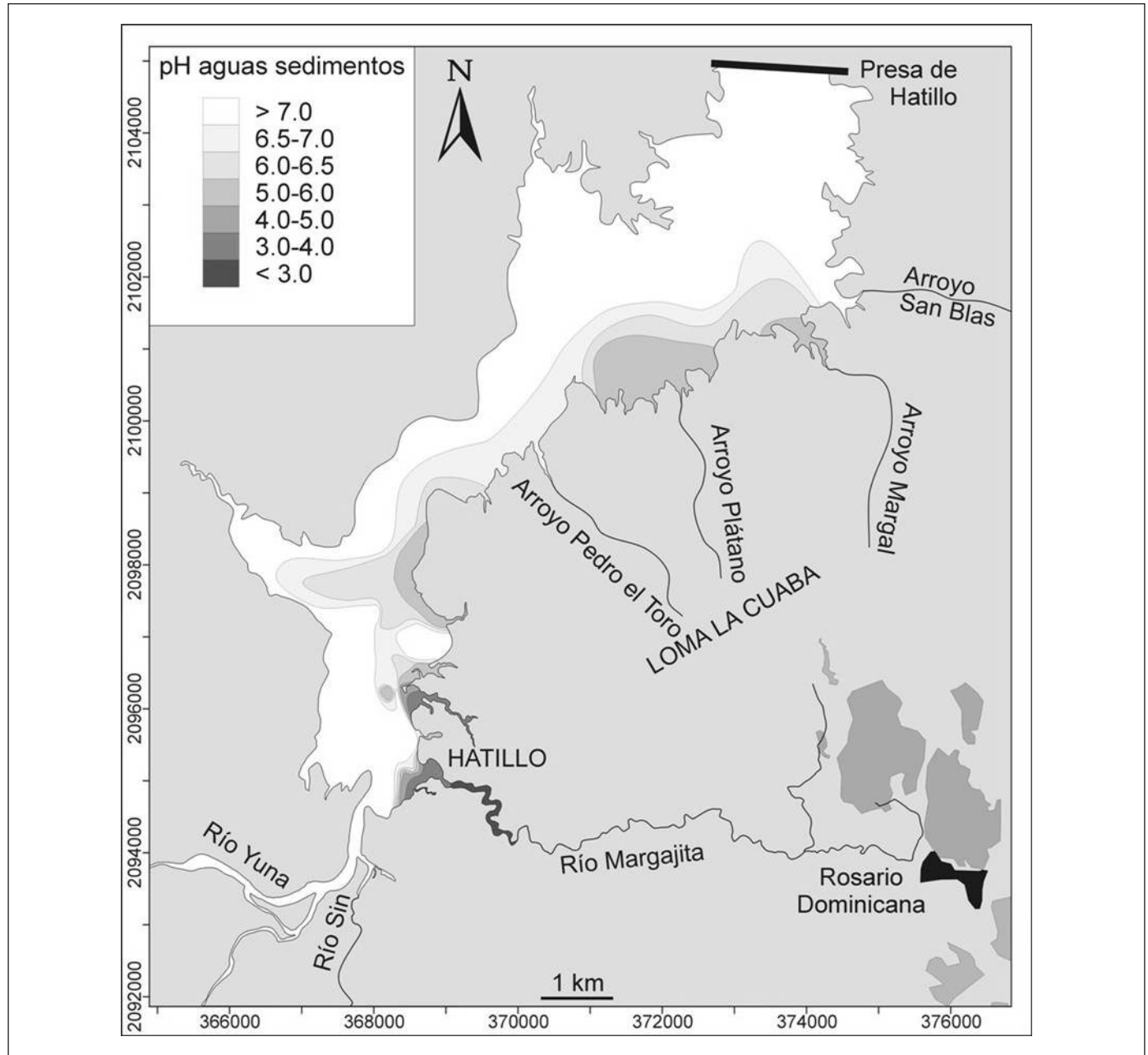


Figura 6. Distribución de los valores de pH de las aguas intersticiales de los sedimentos del fondo del embalse de Hatillo y de los sedimentos de los ríos Margajita y Yuna  
*Figure 6. Spatial distribution of porewater pH in the sediments of the Hatillo reservoir and in the bed sediments of Margajita and Yuna rivers*

la desembocadura de los arroyos que drenan la Loma La Cuaba, en cuya ladera meridional se encuentran las labores mineras de Pueblo Viejo. Esta distribución parece indicar la presencia de otros depósitos de sulfuros que, debido a la menor superficie aflorante y/o la ausencia de labores mineras, producen una acidez menor en comparación con el río Margajita.

En cuanto a la distribución de hierro en los sedimentos, éste sigue una pauta similar a la del pH de las aguas intersticiales (Fig. 7), por lo que parece confirmar la existencia de aportes no identificados anteriormente a lo largo del margen derecho del embalse. Sin embargo, lo que sí se puede observar es que en la desembocadura del río Margajita los contenidos de hierro de los sedimentos están empobrecidos con

respecto a la acumulación de sedimentos que se encuentra entre la confluencia de los ríos Yuna y Margajita. Esto parece indicar que los minerales de hierro que seguramente precipitaban a lo largo del río Margajita deben haber sido redissueltos o arrastrados durante los periodos de aguas altas, cuando las aguas del embalse penetran en el curso del Margajita. En esta situación, el hierro puede volver a precipitar en forma de hidróxido de Fe(III), e incluso llegar a transformarse en goethita con el tiempo, en toda la extensión del embalse, lo cual podría quedar confirmado por un contenido de hierro en los sedimentos de la mayor parte del embalse entre 60 y 80 g/kg, al igual que en el último tramo del río Yuna.

La distribución de arsénico en los sedimentos del

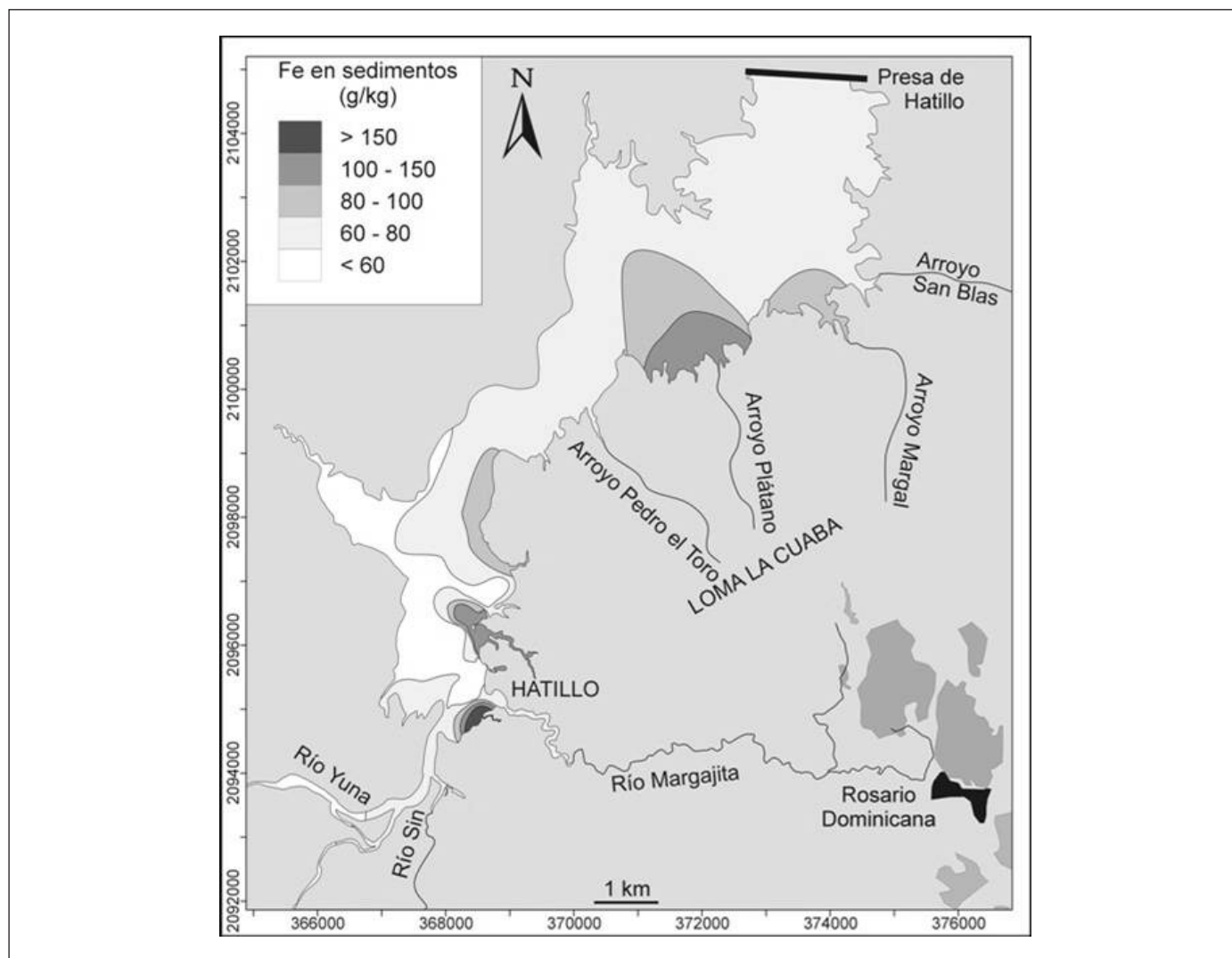


Figura 7. Distribución de hierro en los sedimentos del embalse de Hatillo  
 Figure 7. Spatial distribution of Fe in the sediments of the Hatillo reservoir

embalse sigue también una distribución parecida al hierro. Sin embargo, en este caso, la mayor concentración de arsénico se encuentra en los sedimentos depositados en la desembocadura del río Margajita. Hay que destacar que a lo largo del río se encuentran dos zonas bien diferenciadas, una zona aguas arriba del río, probablemente correspondiente a la sorción de As en hidroxisulfatos de Fe(III), como la jarosita, y otra zona en la propia desembocadura del río, que

puede estar relacionada con la sorción de As en oxihidróxidos de Fe(III). También en el caso del As se observa la presencia de una zona con contenidos ligeramente elevados (>10 mg/kg) en la zona de desembocadura en el embalse de los arroyos Plátano y Margal que drenan la Loma La Cuaba. Esto parece confirmar la presencia de depósitos de sulfuros en dicha zona que producen una cierta acidificación de las aguas que los drenan.

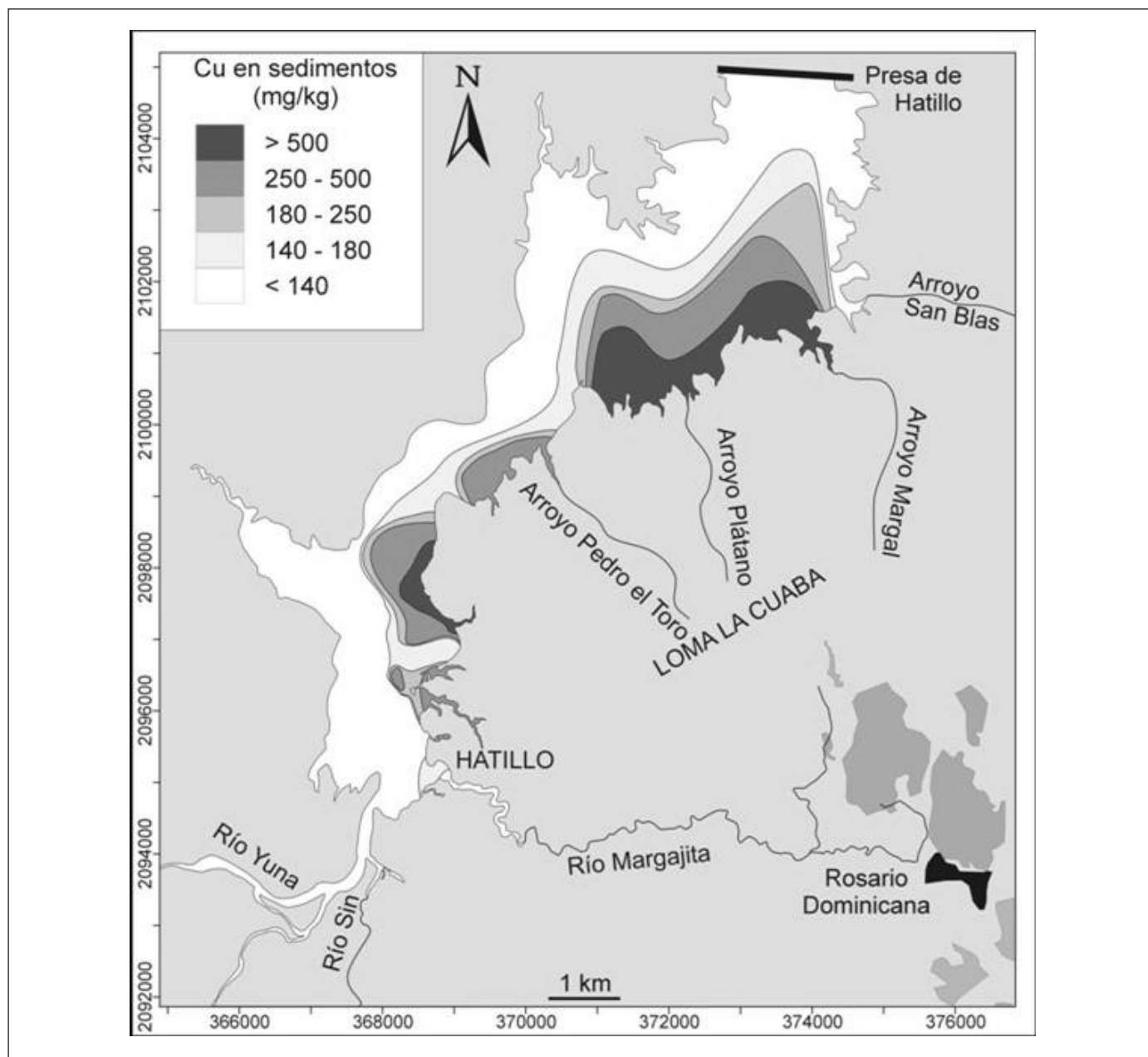


Figura 8. Distribución de cobre en los sedimentos del embalse de Hatillo  
 Figure 8. Spatial distribution of Cu in the sediments of the Hatillo reservoir



Los contenidos de cobre, en cambio parecen seguir una distribución ligeramente distinta del hierro y otros metales (Fig. 8). Los contenidos de cobre en los sedimentos procedentes del Margajita son bastante bajos. Esto es posible que se deba al hecho de que este metal se extraiga en los trabajos mineros, por lo que las concentraciones de cobre en las aguas del Margajita serían menores de lo que le correspondería en el caso en que este metal no se beneficiara. En cambio, los mayores contenidos en cobre corresponden a aquellos sedimentos asociados a la desembocadura de los arroyos que drenan la Loma La Cuaba, lo que confirmaría la presencia de depósitos de sulfuros no explotados en este sector. Respecto al zinc, este metal presenta un comportamiento idéntico al cobre, tal y como se puede deducir de la muy buena correlación existente entre los contenidos de ambos metales en los sedimentos del embalse de Hatillo.

El manganeso muestra una distribución en los sedimentos del embalse de Hatillo muy distinta de la de los otros metales. Tal y como cabía esperar, considerando que la mayor parte de manganeso en los sedimentos del embalse proviene de los aportes de sólidos del río Yuna, los contenidos en manganeso se enriquecen desde la desembocadura del río Yuna y hacia la presa de Hatillo, donde es probable que se encuentren los mayores espesores de sedimentos en el embalse. Tan solo existe una discontinuidad en el enriquecimiento de manganeso en los sedimentos, asociada a la desembocadura del río Margajita.

El cromo sigue una distribución parecida al manganeso (Fig. 9). Aunque en este caso también existe una acumulación en los sedimentos que se encuentran entre la confluencia de los ríos Margajita y Yuna tal y como ocurría con el hierro. Esto puede deberse a la sorción del cromo procedente de las aguas ácidas del río Margajita en hidroxisulfatos de Fe(III).

El níquel por su parte, sigue una distribución exactamente igual que la del cromo, tal y como se deduce de la perfecta correlación entre los contenidos de ambos metales en los sedimentos.

El sulfato parece seguir una distribución asociada a las aguas ácidas que drenan los depósitos de sulfuros y las labores mineras aguas arriba del Margajita. Aunque los mayores contenidos se encuentran en los sedimentos del tramo bajo del Margajita, también existen concentraciones relativamente altas asociadas a las desembocaduras de los arroyos que drenan la Loma La Cuaba, igual que ocurría con otros metales.

A partir de las correlaciones entre elementos, pH y profundidad se pueden sugerir un conjunto de fases minerales existentes en los sedimentos del embalse de Hatillo y del curso bajo de los ríos Margajita y

Yuna que controlarían las concentraciones de los metales en solución. La precipitación de hidroxisulfatos de Fe(III), como la schwertmannita y la jarosita, parecen controlar las concentraciones de Fe en las aguas y al mismo tiempo ejercen de sustrato para la adsorción de muchos de los elementos más tóxicos procedentes de la lixiviación de los depósitos de sulfuros del distrito de Pueblo Viejo. En concreto, el arsénico, el telurio y el cromo parece que están claramente asociados a los hidroxisulfatos de hierro y no a fases puras de estos elementos.

### Ensayos de lixiviación de sedimentos

En este proyecto se han llevado a cabo experimentos de extracción secuencial de metales en 13 muestras de sedimentos del embalse de Hatillo para evaluar el potencial de emisión de contaminantes hacia las aguas del embalse y subterráneas. La secuencia de extracción está basada en los procedimientos descritos en Tessier *et al.* (1979). En el primer estadio de extracción (paso A en la Fig. 10) se lavan los metales adsorbidos en superficie mineral y cationes intercambiables. Son especialmente sensibles en este paso todo el conjunto de metales y metaloides con gran afinidad en los sitios de adsorción en oxihidróxidos de hierro y manganeso, tales como el arsénico. En el segundo paso (paso B) se liberan los metales que forman parte estructural de óxidos e hidróxidos amorfos de hierro y manganeso. En este caso, se pueden liberar, además de hierro y manganeso, algunos elementos co-precipitados en la red (poco cristalina) de fases tipo ferrihidrita o schwertmannita, como el cadmio. En el último paso (paso C) se lixivian todos los metales asociados a óxidos cristalinos, materia orgánica y sulfuros.

Las muestras estudiadas presentan aguas de poro con pH relativamente alto (entre 5.8 y 6.9). En este rango es posible que algunos elementos puedan estar parcialmente en solución y no adsorbidos en las fases sólidas.

Los resultados indican que tanto el hierro (Fig. 10) como el manganeso y el cadmio se lixivian preferentemente en los 2 primeros pasos (iones adsorbidos e intercambiados y en oxihidróxidos amorfos). Solamente una pequeña proporción de estos elementos procede de fases cristalinas como óxidos de hierro (goethita, hematites) o sulfuros (pirita, esfalerita - este último para el cadmio). Es especialmente relevante apuntar que es en el último estadio de lixiviación donde se liberan los elementos afines con la materia orgánica. Por tanto, se observa una especial dificultad en liberar estos elementos afines en mate-

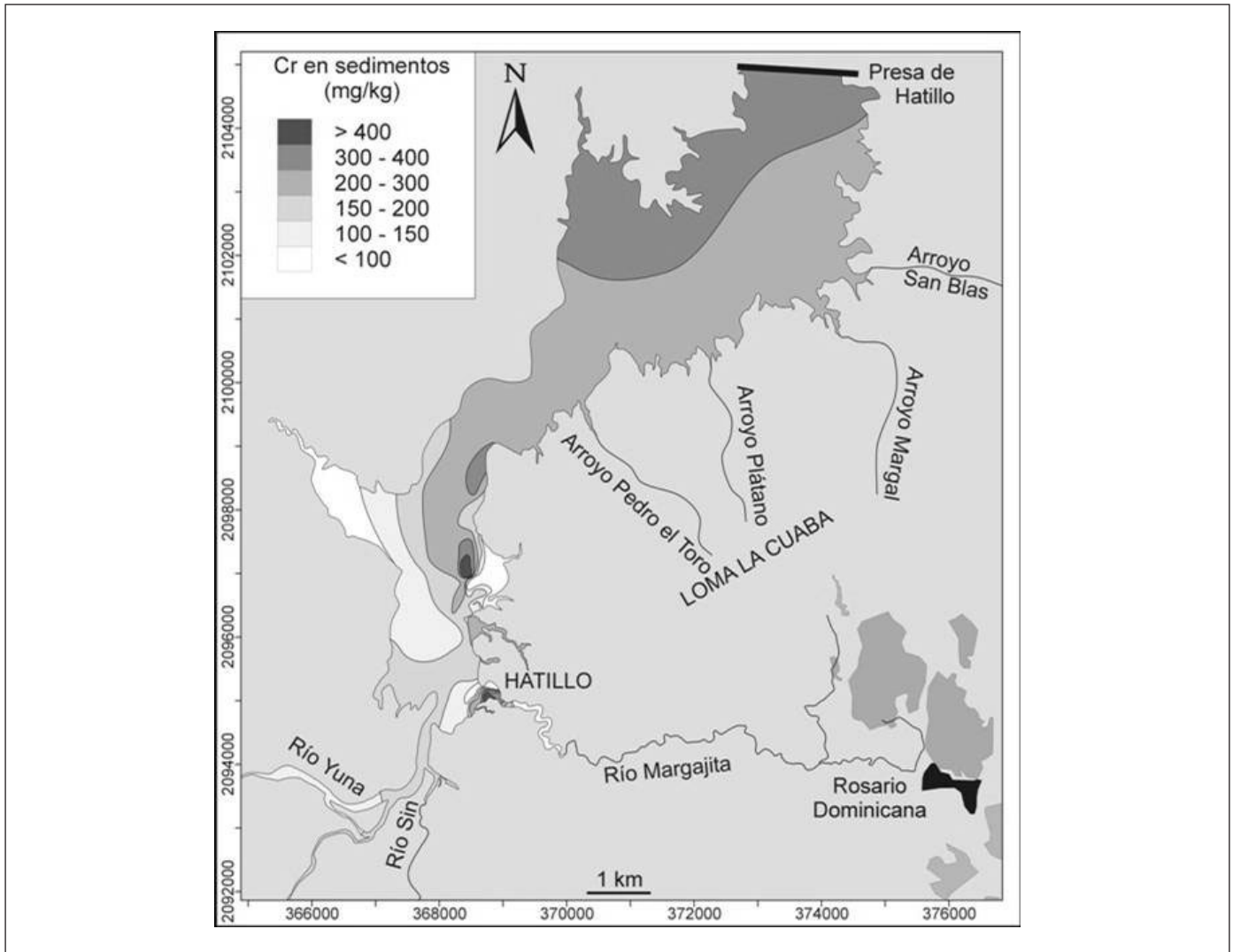


Figura 9. Distribución de cromo en los sedimentos del embalse de Hatillo  
 Figure 9. Spatial distribution of Cr in the sediments of the Hatillo reservoir

ria orgánica en los sedimentos del embalse de Hatillo. Ello está de acuerdo con la ausencia de correlación clara entre concentración de metales y TOC.

Un comportamiento totalmente inverso se observa en el plomo y el cromo, los cuales proceden de fases más resistentes como sulfuros u óxidos cristalinos. Por otro lado, el zinc y el cobre muestran un comportamiento intermedio con proporciones similares en los tres pasos.

En el caso del arsénico, sólo dos muestras liberan este metaloide en el primer y segundo estadios de lixiviación (Fig. 10). En el resto de las muestras, el arsénico se lixivía en el último estadio, proceso que está de acuerdo con los bajos porcentajes de lixiviación observados en la muestra total. Estos datos son

de algún modo sorprendentes ya que indicarían que este metaloide se encuentra en el sedimento básicamente en fases muy resistentes al ataque de los reactivos utilizados y no adsorbido en oxihidróxidos y sulfatos amorfos de hierro, donde es mucho más móvil. Las muestras estudiadas no presentan un pH especialmente bajo en el agua de poro, por lo que gran parte del arsénico puede adsorberse en superficies cargadas de minerales como la ferrihidrita siempre que estén presentes. En el contexto del embalse de Hatillo, si estas fases de oxihidróxidos de hierro no existiesen en las muestras, la baja lixiviación de As apuntaría a partículas de sulfosales tipo enargita como fase portadora de arsénico en los sedimentos. Esta interpretación está en desacuerdo con las claras

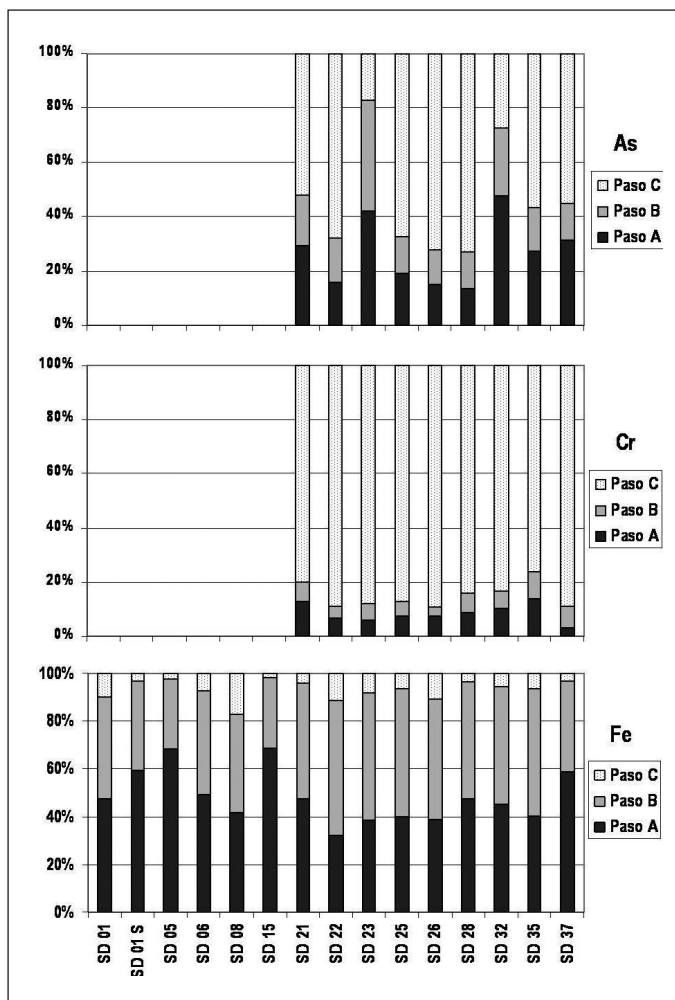


Figura 10. Porcentaje de Fe, Cr y As lixiviado en los experimentos de lixiviación de muestras de sedimentos del embalse de Hatillo  
 Figure 10. Proportion of Fe, Cr and As leached in the sequential leaching experiments in sediment samples from the Hatillo reservoir

correlaciones entre As-Fe y As-sulfato observadas, las cuales apuntan a una estrecha relación entre el arsénico y oxihidróxidos y sulfatos amorfos de hierro. Otra opción es que la fase portadora de arsénico sea la pirita, lo que explicaría la correlación As-Fe, aunque ello está en desacuerdo con las tasas de lixiviación de hierro que oscilan entre el 20 y 30 % en todas las muestras, incluidas aquellas donde aparentemente no se ha lixiviado arsénico.

**Conclusiones**

Los datos obtenidos de los sedimentos de superficie en aluviales y en el fondo del embalse de Hatillo

muestran concentraciones muy elevadas de metales y metaloides. El hierro es el más abundante. Otros elementos en concentraciones muy altas son el arsénico, el zinc, el cromo, el cobre y el manganeso. El principal contribuyente a la contaminación del embalse es, al menos actualmente, la cuenca del río Margajita, que presenta aguas de elevada acidez. El río Yuna no transporta concentraciones significativas de metales y metaloides y presenta un pH neutro; sin embargo, los datos parecen indicar que transporta partículas sólidas con contenidos significativos de Mn, Cr, Ni y Co, ya sea en suspensión o tamaño de grano mayor en periodos de grandes avenidas de agua, procedentes de la zona minera de Falcondo.

La distribución de estos elementos en el embalse de Hatillo no es homogénea ni zonada desde la desembocadura de los ríos Yuna y Margajita, que son los que transportan dichos metales. En muchos casos, se observan sedimentos de alta concentración de metales en sectores cerca de la presa del embalse. En algunos casos, los datos parecen indicar que los arroyos que drenan la Loma La Cuaba han interactuado con depósitos de sulfuros, lo que conlleva cierta acidificación de las aguas y concentraciones altas en ciertos metales, pero en menor medida que en el caso del río Margajita, probablemente debido a la menor superficie aflorante de dichos depósitos y a la ausencia de labores mineras. Por otra parte, aquellos metales que provienen de los sedimentos arrastrados por el río Yuna también se acumulan en la zona cercana a la presa, pero en este caso es debido a la propia dinámica de transporte y sedimentación asociada al embalse.

Los ensayos de lixiviación indican que los elementos más móviles en los sedimentos del embalse son el Fe, Mn y el Cd, mientras que otros como el Pb o el Cr son difícilmente solubilizables. Los resultados para el As no son concluyentes ya que indican que se encuentra principalmente en sulfuros y sulfosales, lo que no está de acuerdo con las correlaciones con hierro y sulfato observadas.

**Referencias**

Blanchard, F. y Gutiérrez, A. 2003. Proyecto O: Estudios Ambientales de Base de las Instalaciones Mineras de Rosario Dominicana, Tarea 5.3 – Afección de las aguas subterráneas. *Informe BRGM – PROINTEC*.  
 Cottard, F. 2003. Proyecto O: Estudios Ambientales de Base de las Instalaciones Mineras de Rosario Dominicana, Tarea 6 – Afección a las aguas superficiales. *Informe BRGM – PROINTEC*.  
 Cottard, F. y Cazaux, D. 2003. Proyecto O: Estudios Ambientales de Base de las Instalaciones Mineras de

- Rosario Dominicana, Tarea 6 – Afección a los aluviales. *Informe BRGM – PROINTEC*.
- Sillitoe, R.H., Hall, D.J., Redwood, S.D. y Waddell, A.H. 2006. Pueblo Viejo high-sulfidation epithermal gold-silver deposit, Dominican Republic: A new model of formation beneath barren limestone cover. *Economic Geology*, 101, 1427–1435.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. y Bisson, M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*. 51, 844–851.

Recibido: junio 2009

Revisado: agosto 2009

Aceptado: agosto 2009

Publicado: diciembre 2009