Nota técnica

Dispersión hídrica de arsénico en el distrito minero de San Antonio-El Triunfo, Baja California Sur, México

• Berenice Hernández-Cruz* • Faustino de Luna-Cruz • José A. Sánchez-Cruz •
• Francisco Martín Romero •
Universidad Nacional Autónoma de México
*Autor de correspondencia

Resumen

Hernández-Cruz, B., De Luna-Cruz, F., Sánchez-Cruz, J. A., & Romero, F. M. (septiembre-octubre, 2015). Dispersión hídrica de arsénico en el distrito minero de San Antonio-El Triunfo, Baja California Sur, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *6*(5), 113-122.

Se efectuó un estudio de las características granulométricas en el distrito minero de San Antonio-El Triunfo, Baja California Sur, México, con el fin de relacionar la distribución del arsénico (As) y el tamaño de partículas que contienen As y son movilizadas por escurrimiento. Las características de la precipitación se analizan mediante cinco estaciones meteorológicas. Se obtiene la lámina de lluvia efectiva, que se utiliza para la simulación del escurrimiento. El resultado de la simulación es la velocidad del escurrimiento en m^3/s, este valor se relaciona con el diagrama de Hjulström, para conocer el tamaño de partículas que se transportan o sedimentan. Los resultados muestran la existencia de velocidades superiores a 3.0 m/s, que movilizan partículas de 0.001 hasta 100 mm, y velocidades inferiores a 2.0 m/s que no movilizan partículas. Dicha alternancia entre las velocidades va depositando los materiales. Los depósitos de materiales mayores a 2.0 mm de diámetro se asocian con altas concentraciones de As (500-1 000 mg/kg), medidas en el área de estudio e interpoladas con un sistema de información geográfica. Dada la configuración que se tiene de la distribución del As en suelos superficiales, se puede concluir que el agente hídrico es el principal responsable del movimiento de As y que son las partículas de diámetro de 2.0 mm las que concentran la mayor cantidad de As. Los estudios de caracterización física, como el presente trabajo, son poco frecuentes; sin embargo, su aporte científico es fundamental, principalmente en temas ambientales. Conjuntar la caracterización física con los datos geoquímicos y los estudios de remediación permite tener una visión integral en la gestión de sitios impactados con residuos mineros.

Palabras clave: distribución y dispersión de arsénico, velocidad de escurrimiento, tamaño de partícula, cauce principal.

Abstract

Hernández-Cruz, B., De Luna-Cruz, F., Sánchez-Cruz, J. A., & Romero, F. M. (September-October, 2015). Hydric Dispersion of Arsenic in the San Antonio-El Triunfo Mining District, Baja California Sur, Mexico. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 6(5), 113-122.*

The granulometric characteristics of the San Antonio-El Triunfo mining district, Baja California Sur, Mexico were studied in order to determine the relationship between the distribution of arsenic (As) and the size of particles containing As that are transported by runoff. The characteristics of rainfall at five weather stations were analyzed. Effective rainfall was obtained and used to simulate runoff. The simulation resulted in the determination of runoff velocity in m3/s, a value related to the Hjulstrom diagram, to identify the size of particles that were transported or deposited. The results show velocities over 3.0 m/s which transported particles between 0.001 and 100 mm, and velocities under 2.0 m/s which did not transport particles. Materials are deposited from this alternation between velocities. Deposits of materials over 2.0 mm in diameter are associated with high concentrations of As (500 – 1 000 mg/kg) measured in the study area, which were interpolated with a geographic information system. Given the configuration of the distribution of As in surface soil, it can be concluded that water is the primary cause of the movement of As. In addition, diameters of 2.0 mm contain the highest amount of As. Although few studies have performed a physical characterization such as the one herein, their scientific contributions are crucial, especially for environmental issues. By combining the physical characterization with geochemical data and remediation studies, a comprehensive perspective can be obtained for the management of sites affected by mining waste.

Keywords*: Distribution of Arsenic, dispersion of Arsenic, runoff speeds, sizes of particles, riverbed.*

Recibido: 16/07/2014
Aceptado: 28/05/2015

Introducción

Las altas concentraciones de arsénico (As) que se encuentran en la cuenca hidrográfica que incluye el distrito minero de San Antonio-El Triunfo, en Baja California Sur, México, se asocian principalmente con la actividad minera que se ha desarrollado desde hace más de dos siglos, y que en la actualidad ha experimentado una reactivación con la exploración de menas metálicas como oro y plata (Carrillo & Drever, 1997; COREMI, 1999; SGM, 2014).

El distrito minero está localizado a 45 km al SE de la ciudad de La Paz. Las coordenadas geográficas que lo delimitan son 23° 55′ norte, 110° 02′ oeste y 23° 49′ norte, 110° 00′ oeste (figura 1).

Entre 1878 y 1911 se conformó la actividad minera con la presencia de varias compañías, dando origen a la mayoría de las zonas con residuos mineros. Entre los años de 1784 y 1983 se extrajeron unas 3.6 toneladas de oro, 700 toneladas de plata, y 2 500 toneladas de plomo. Asociadas con dicha extracción, se calculan alrededor de 800 000 toneladas de residuos mineros (Carrillo & Drever, 1997). Esos residuos mineros se caracterizan por ser material disgregado, fácilmente erosionado, transportado y depositado en otro sitio por la ocurrencia de corrientes superficiales.

La hidrografía del sitio está representada por corrientes intermitentes y cauces de ríos secos. Geomorfológicamente, estos últimos presentan cauces anchos, con sustratos superficiales heterogéneos, además de no presentar patrones espaciales y temporales (Suárez, Vidal, Navarro, Gómez, & López, 2010). Las precipitaciones se presentan en eventos episódicos, que suelen ser de corta duración y gran intensidad, originadas principalmente por la formación de depresiones tropicales, tormentas y huracanes (Marmolejo, Sánchez, Romero, Sánchez, & Magallanes, 2011).

Los valores de As que se reportan en los sedimentos de los ríos son relativamente bajos (inferiores a 0.8 mg/kg), aunque los factores como la precipitación, el drenaje y la actividad minera, junto con los componentes climatológicos y geológicos, pueden elevar las concentraciones de As en los ecosistemas (Cullen & Reimer, 1989). Las corrientes fluviales localizadas en zonas mineras o en sitios con mineralizaciones metálicas pueden contener sedimentos con concentraciones de As de alrededor de 200 a 400 mg/kg (Appleton, Williams, Orbea, & Carrasco, 2001).

En el arroyo Hondo-Gallinas-El Carrizal, localizado en la cuenca contigua al área de estudio, se han registrado valores de As de 8 890 a 505 000 mg/kg (Marmolejo *et al*., 2011).

Las partículas con altas concentraciones de As en algunos residuos mineros (como las del presente trabajo) son susceptibles de ser lixiviadas y arrastradas por los escurrimientos hacia porciones más bajas de la cuenca.

Por lo tanto, es importante conocer la dinámica que tiene el contaminante y la relación que guarda con las partículas transportadas por el flujo, suponiendo que al tener un transporte heterogéneo del material, las concentraciones de

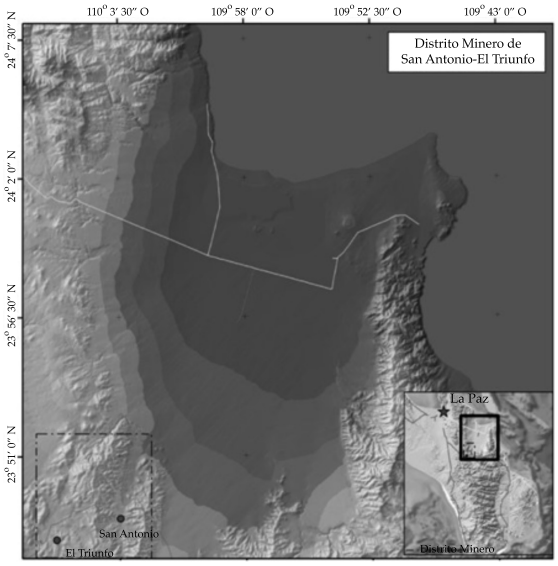

Figura 1. Localización de la zona del distrito minero de San Antonio-El Triunfo. Las mayores elevaciones están entre los 700 y 800 metros. El recuadro punteado muestra el área aproximada de la localización de los residuos mineros. El mapa inferior derecho muestra un recuadro con línea sólida, que indica el área de la cuenca de San Juan de Los Planes.

• ISSN 0187-8336

As también serán heterogéneas y se encontrarán en cualquier tamaño de partícula y no sólo en los materiales finos, como típicamente sucede.

Materiales y métodos

Construcción de los valores de las precipitaciones

Se utilizaron los registros de precipitación diaria de la base de datos del Clima Computarizado del Servicio Meteorológico Nacional (CLICOM). Los registros del CLICOM en la zona representan un área de 756 km^2 (figura 2).

Para conocer la distribución temporal de la lluvia se construyeron hietogramas. La construcción de los hietogramas se realizó en tres pasos. El primer paso consistió en obtener un conjunto de láminas de lluvia diaria. En el segundo paso se asignó un número de orden a cada lámina de lluvia de acuerdo con su magnitud. En el tercer paso se realizó el acomodo de las láminas de lluvia de los hietogramas, tomando en cuenta el orden definido por el tren de lluvias máximo identificado.

Simulación de las precipitaciones

Dada la naturaleza de los hietogramas construidos, que toman en cuenta la variación espacial y temporal de la lluvia, el comportamiento del escurrimiento superficial se trabajó con el modelo "Flubidi" del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), utilizado en reportes técnicos de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y en tesis de maestría del área de hidráulica de la UNAM.

El modelo trabaja con parámetros concentrados, útiles para cuencas pequeñas (menores a 1 000 km^2). La simulación se realiza considerando las ecuaciones de aguas someras de Saint-Venant, que representan el flujo en superficie (Fuentes, Domínguez, & Franco, 1981). Asimismo, se emplea el método de volúmenes finitos rectangulares en una malla descentrada,

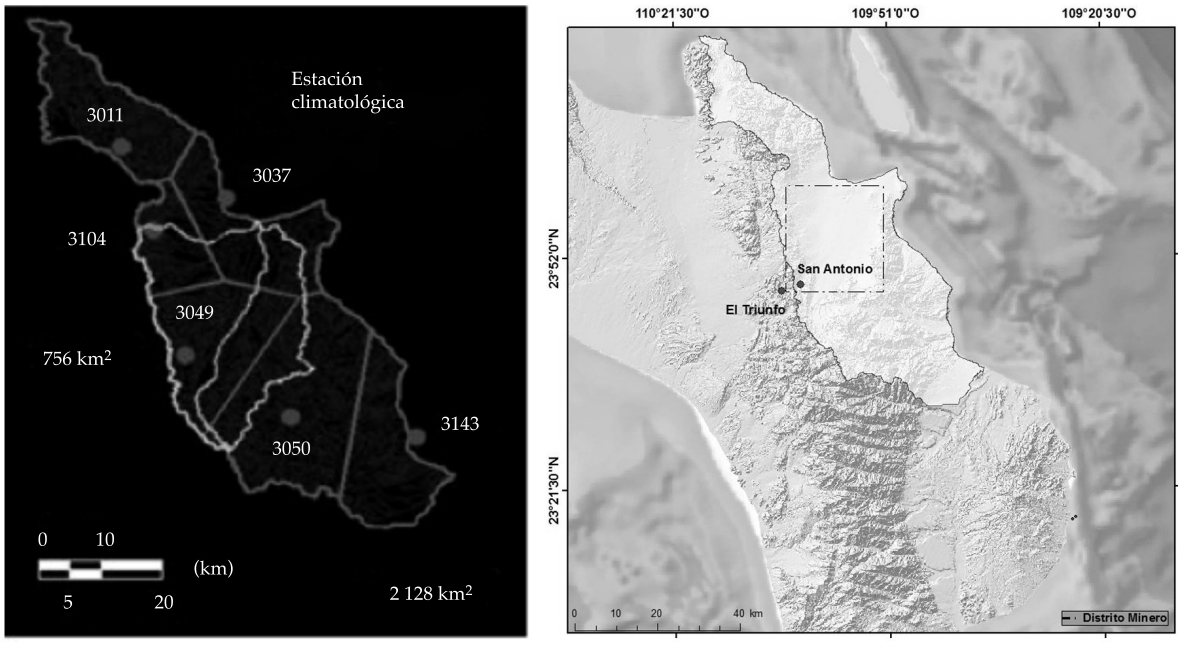

Figura 2. Localización de la cuenca hidrológica en la que se encuentra el distrito minero, así como el área de la subcuenca correspondiente a los registros del CLICOM (contorno blanco) con los que se generaron los hietogramas.

ISSN 0187-8336

utilizando diferencias finitas de primer orden.

El modelo, además, emplea el principio de conservación de masa en dos dimensiones: tiempo y área, para obtener la velocidad del flujo en superficie. Finalmente, la variable del volumen de lluvia efectiva que ingresa a la cuenca es calculada mediante la ecuación de continuidad e impulso (Fuentes, De Luna, Sánchez, & Lorenzo, 2012).

Construcción de la pluma de distribución del As

Se utilizaron los valores de As en suelos y sedimentos superficiales previamente reportados en informes técnicos de la zona de estudio (Grupo de Biogeoquímica Ambiental, Facultad de Química, Instituto de Geología, 2012). En particular, al norte y noreste de San Antonio existen datos con un espaciamiento regular que cubren una superficie aproximada de 63 km^2.

La campaña de muestreo que realizó el grupo de trabajo fue sistemática y se obtuvo una gran cantidad de muestras, por lo que se puede establecer como un muestreo representativo del lugar; sin embargo, aunado a los datos reportados, se hizo un muestreo aleatorio en campo para comprobar las concentraciones de As. Ambos resultados son consistentes.

Con los datos obtenidos de As se realizó una interpolación, utilizando el método Kriging (con el uso del *software IDRISI Taiga*), para generar un mapa de la distribución superficial del contenido de As del área de estudio.

La pluma de distribución de As obtenida se sobrepuso con la red de drenaje para relacionar la dispersión de As y el agente hídrico.

Relación de los valores de precipitación y tamaño de partículas

Las velocidades del escurrimiento se relacionan con el comportamiento de los diferentes tamaños de partículas que pueden depositarse, transportarse o erosionarse, dependiendo de la velocidad del flujo. Mediante el diagrama de Hjulström, se puede reconocer el umbral de cada tamaño de partícula, dada la velocidad del flujo (figura 3) (Boggs, 2006).

Se elaboró un mapa para representar las velocidades obtenidas en los modelos de simulación matemática, y tomando como referencia la información del diagrama de Hjulström se identifican los sitios de depósito de partículas, dependiendo del tamaño de éstas. Con la información obtenida se puede establecer si existe un tamaño preferencial de partículas depositadas que genere el aumento en la concentración de As.

Resultados y discusión

En el cálculo de la acumulación de lluvia se observó que la tendencia principal de las precipitaciones es la ocurrencia de lluvias muy intensas, con un periodo de duración menor a 24 horas (figura 4). En la figura 4 se tienen dos gráficas: en la primera se tienen todos los periodos de retorno separados en diferentes tonos de gris; la segunda representa de forma detallada el día con mayor acumulación de lluvia (día 3).

Los datos registraron una intensidad máxima de lluvia de 92.7 mm/h. Dicho resultado representa 64.3% de la lluvia de 24 horas, en tanto que 88.8% de la lluvia de 24 horas se precipitó aproximadamente después de ocho horas de iniciado el evento y 100% (144.16 mm) se acumuló en 20 horas (figura 5).

El resultado de la simulación de los flujos reporta la relación que existe entre las lluvias y los escurrimientos. La velocidad del flujo se presenta en m/s (figura 6). La figura 6 muestra un mapa con siete puntos de control que fueron utilizados para distinguir la porción alta, media y baja de la cuenca. La máxima velocidad del escurrimiento se encuentra en la porción media de la cuenca (números 7 y 8); las velocidades menores están en la porción baja (números 12, 14 y 15).

De acuerdo con el diagrama de Hjulström, las velocidades presentan una velocidad suficiente para la erosión de material consolidado de partículas de diámetro de 0.001 hasta 10 mm,

• ISSN 0187-8336

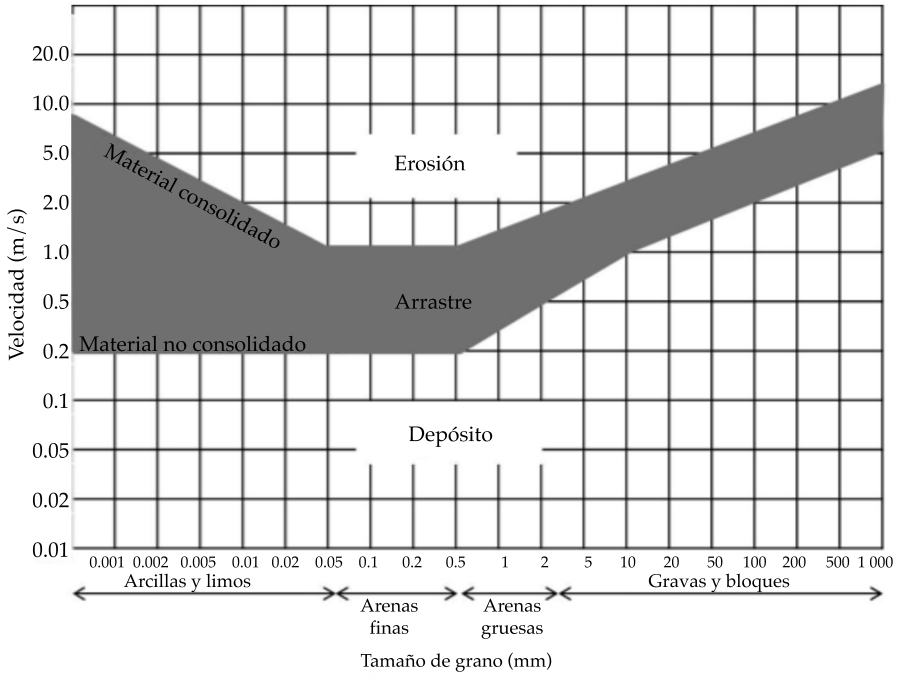

Figura 3. Diagrama experimental de Hjulström. La línea gris muestra la frontera entre la erosión y el depósito de las partículas. El límite superior de la línea gris es el umbral del arrastre de partículas consolidadas, mientras que el límite inferior es el umbral cuando las partículas no están consolidadas (Boggs, 2006).

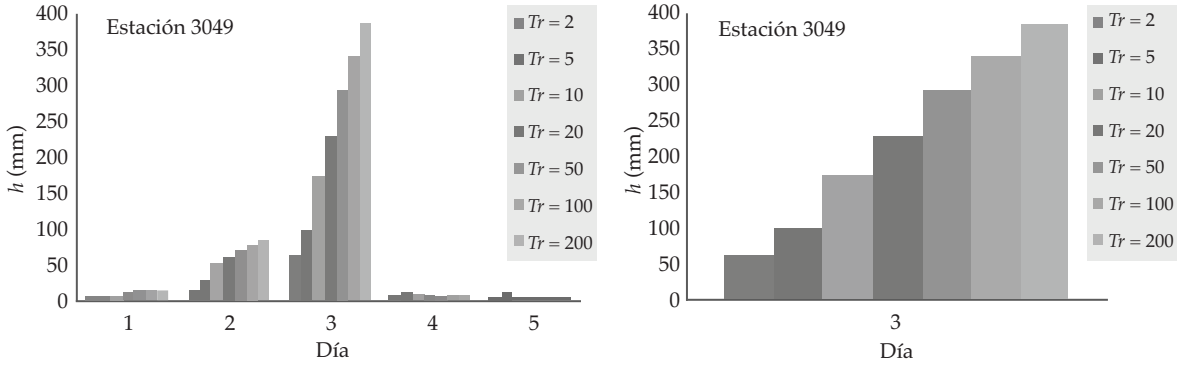

Figura 4. Láminas de acumulación de lluvia. La gráfica A presenta los resultados en la estación climatológica 3049. El eje horizontal hace referencia a la cantidad de días y el eje vertical a la lámina de lluvia en milímetros. La gráfica B presenta los datos con el día de máxima acumulación de lluvia.

y el arrastre de material no consolidado desde partículas finas hasta del tamaño de gravas y bloques (10-200 mm).

A lo largo de al menos 12 kilómetros del cauce se presenta heterogeneidad de los materiales, con presencia de granulometrías del tamaño de gravas y bloques entre 2.0 y 100 mm de diámetro.

En la porción alta de la cuenca, representada con los números 4 y 2 del mapa de la figura 6,

ISSN 0187-8336

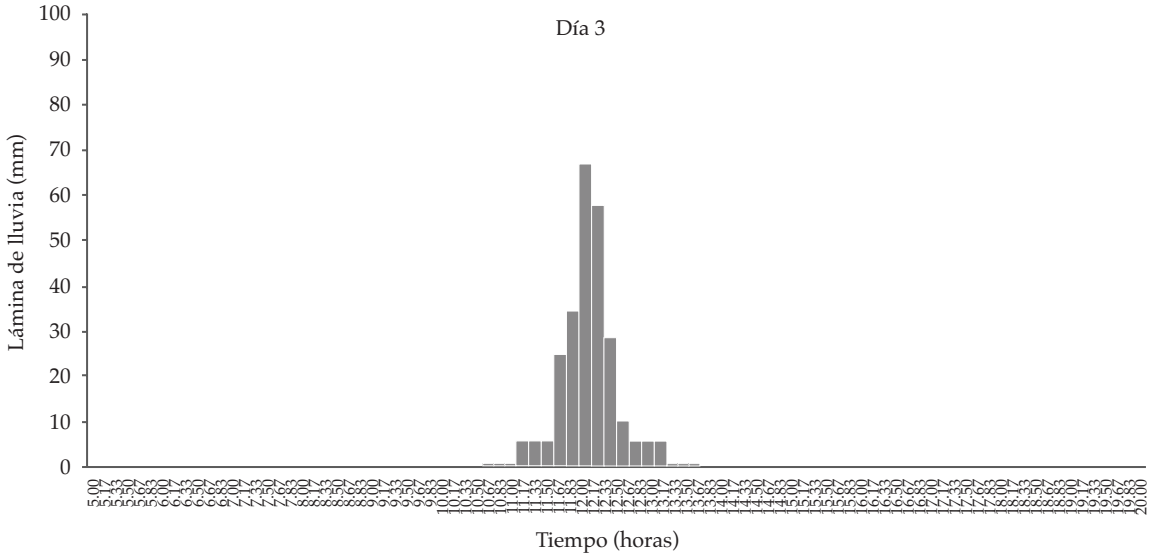

Figura 5. Distribución de la lluvia de 24 horas en intervalos de 10 minutos. El gasto máximo de lluvia se alcanza cuando comienza la hora 12 de lluvia; el tirante máximo de lluvia es de unos 70 mm.

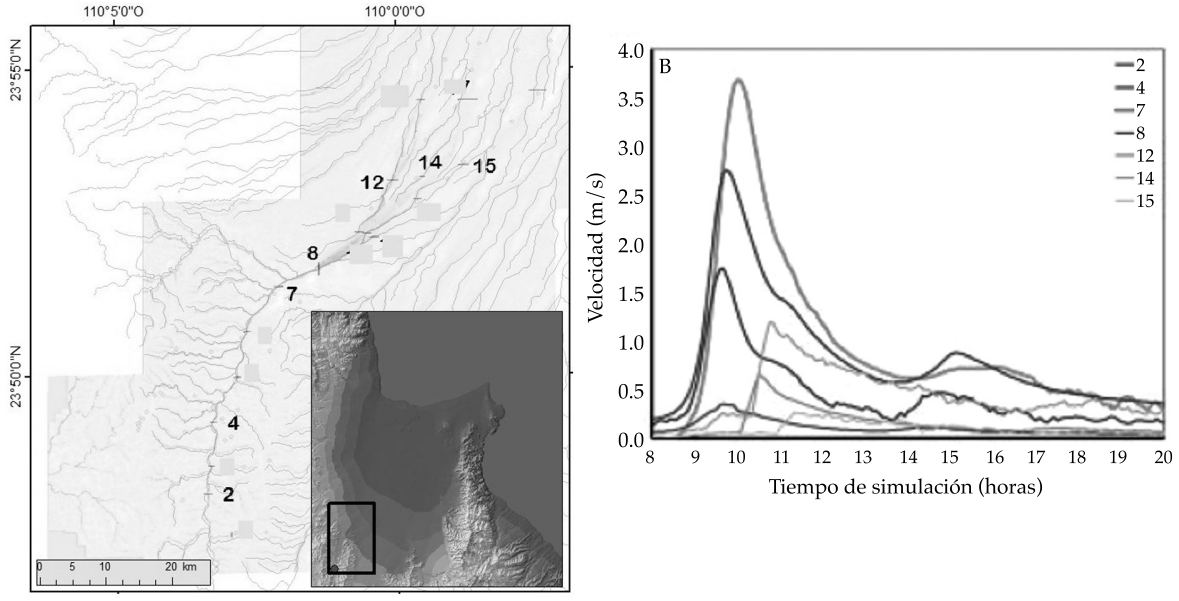

Figura 6. Resultados de la simulación de los escurrimientos: a) mapa que representa los puntos de control graficados en la figura b y su localización en la cuenca (recuadro negro del mapa); b) tendencia de las velocidades del flujo. El eje vertical indica el tirante de lluvia en mm y el eje horizontal representa el tiempo de simulación de la lluvia.

se localizan los residuos mineros, que presentan diferentes granulometrías. Las partículas del cauce principal tienen una tendencia de partículas de arenas gruesas (0.5-2.0 mm) a gravas y bloques (2.0- > 1 000 mm). Las velocidades que se desarrollan dentro de esta área son superiores a 2.5 m/s (figura 6).

Si el arroyo San Antonio presentara velocidades inferiores a 2.5 m/s, las granulometrías gruesas, que tienen altas concentraciones de As, no podrían ser movilizadas hacia las porciones medias de la cuenca, y con ello se descartaría la posibilidad de que partículas gruesas puedan ser el posible movilizador de As hacia porciones bajas de la cuenca.

Cuando las velocidades se encuentran por debajo de los 2.5 m/s, observado con el número 8 en la gráfica de la figura 6, se comienzan a depositar algunos tamaños de partículas (figura 7). En la figura 7 se puede observar la heterogeneidad del material presente, dado un cambio de la velocidad del flujo.

En la porción media de la cuenca (definida con los números 8-11 del mapa de la figura 6) se presenta una mayor heterogeneidad de las partículas, habiendo depósitos de material de todos los tamaños; no obstante, predomina una característica: los tamaños de bloques y gravas se quedan en las márgenes del cauce y entre la vegetación, y los materiales finos se concentran en el cauce (figura 8).

Finalmente, cuando la velocidad del flujo fluctúa entre 0.3 y 1.0 m/s (dentro de la gráfica de la figura 6 se pueden observar con los números 12, 14 y 15), las partículas van tendiendo a ser homogéneas; aún existen puntos donde se encuentran materiales gruesos; sin embargo, éstos se localizan de forma escasa si existe vegetación circundante, la cual tiende a desaparecer en toda esta porción baja de la cuenca, y predominan los materiales finos tanto en el cauce como en las márgenes del mismo (figura 9).

Las concentraciones de As mayores que 300 y hasta 1 000 mg/kg que se presentan hacia el noreste se asocian con el depósito de partículas mayores que 100 mm, pues la velocidad sigue siendo suficiente para movilizar las partículas finas, y depositar gravas y bloques (figura 10). En el arroyo de las Higuerillas (localizado al oeste, figura 10), las velocidades van de 3.0 a 5.0 m/s durante todo el cauce hasta el encuentro con el arroyo San Antonio, en donde se unen.

La velocidad es capaz de transportar por todo el cauce las partículas gruesas; por ende, los valores de As son bajos. En el arroyo San Antonio no sucede lo mismo, y hay alternancia entre velocidades de 2.0-3.0 m/s y velocidades mayores a 3.0 m/s; esta alternancia también

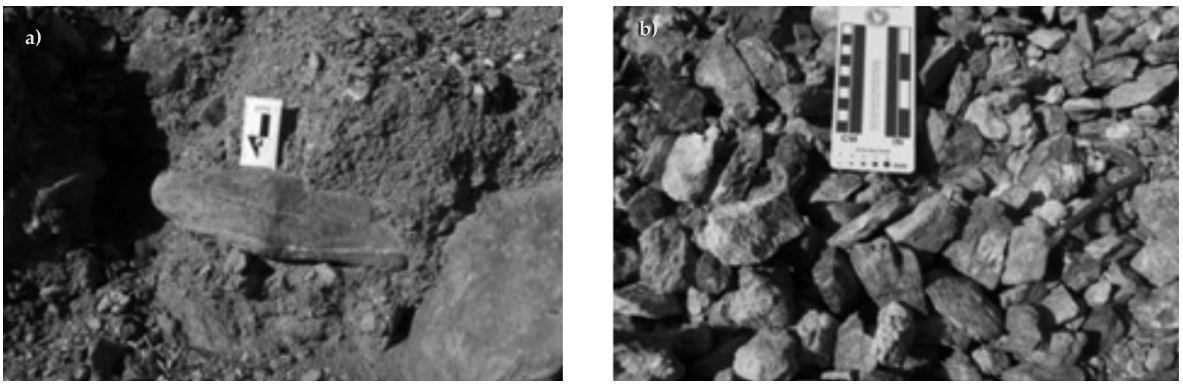

Figura 7. Granulometrías de la porción alta de la cuenca: a) material consolidado en los residuos mineros; b) material no consolidado en superficie.

ISSN 0187-8336

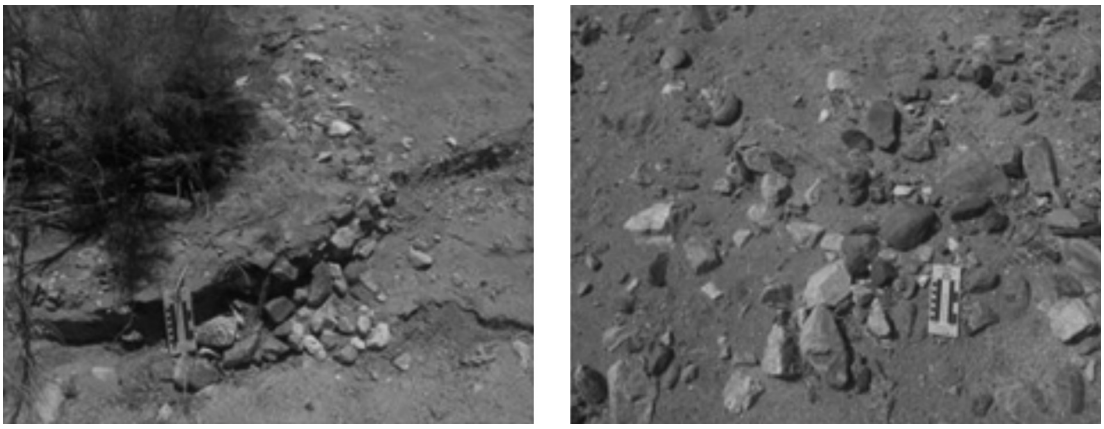

Figura 8. Porción media de la cuenca. Las partículas del tamaño de bloques son angulosas, lo que señala poco arrastre del material. El material fino se encuentra sobre el cauce y entre las partículas gruesas que están en las márgenes del mismo.

Figura 9. Porción baja de la cuenca. Los sedimentos que predominan son sedimentos finos, hay un mayor desarrollo de suelo en las paredes de los cauces donde se encuentra un escasa cubierta vegetal.

se ve reflejada en las concentraciones de As, que van aumentando o disminuyendo según se vayan depositando materiales gruesos en el cauce (figura 11).

Conclusiones

Los datos de los hietogramas marcan una clara tendencia de lluvias intensas y de corta duración. Estas características favorecen el escurrimiento con respecto a la capacidad de infiltración del agua, por lo que es factible que la movilización de partículas se presente toda vez que sucede una precipitación.

Las velocidades del flujo superiores a 2.5 m/s son las que arrastran a las partículas que contienen As y transportan al contaminante hasta la porción baja de la cuenca. Cuando la velocidad se encuentra por debajo de los 2.5 m/s no existen concentraciones de As superiores a 114 mg/kg, registrado como el valor natural.

• ISSN 0187-8336

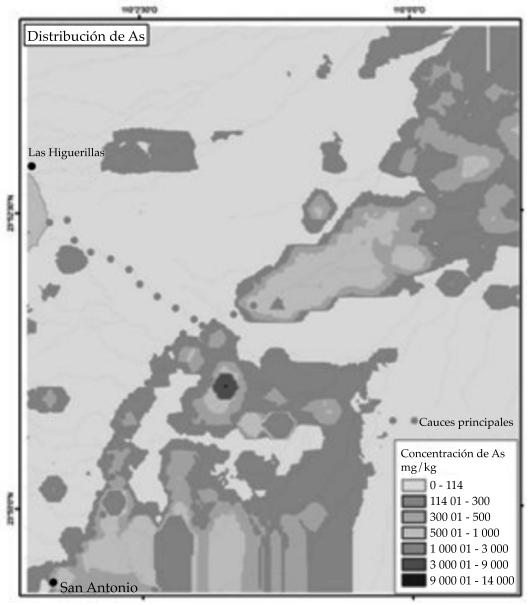

Figura 10. Mapa hidrográfico. Los puntos grises señalan los dos cauces de los arroyos principales. Al norte de San Antonio está el cauce cercano al poblado Las Higuerillas y el otro nace al sur, justo en el poblado de San Antonio. En tonos que van de distinto tono de gris se muestran las concentraciones de As.

Las partículas superiores al tamaño de gravas y bloques (≥ 100 mm) se asocian con el aumento de As debido a que las velocidades no son capaces de mover este tamaño de partícula y lo depositan aguas abajo, es donde se localiza el aumento o presencia de As. En el arroyo cercano al poblado de Texcalama, las velocidades iniciales no pueden movilizar las partículas superiores a 100 mm y por ende se ve que la pluma de distribución no aumenta aguas abajo de dicho arroyo.

Con respecto a la parte baja de la cuenca, los valores de As son bajos (114 mg/kg) debido a que no pueden darse velocidades de escurrimiento suficientemente altas como para erosionar y transportar partículas del tamaño de grava que son movilizadas desde la parte alta de la cuenca donde están los residuos mineros. Lo anterior representa una ventaja para la población, y en general al ecosistema, dado que las concentraciones altas de As sólo se encuentran en el cauce del arroyo San Antonio y algunos cauces secundarios del mismo.

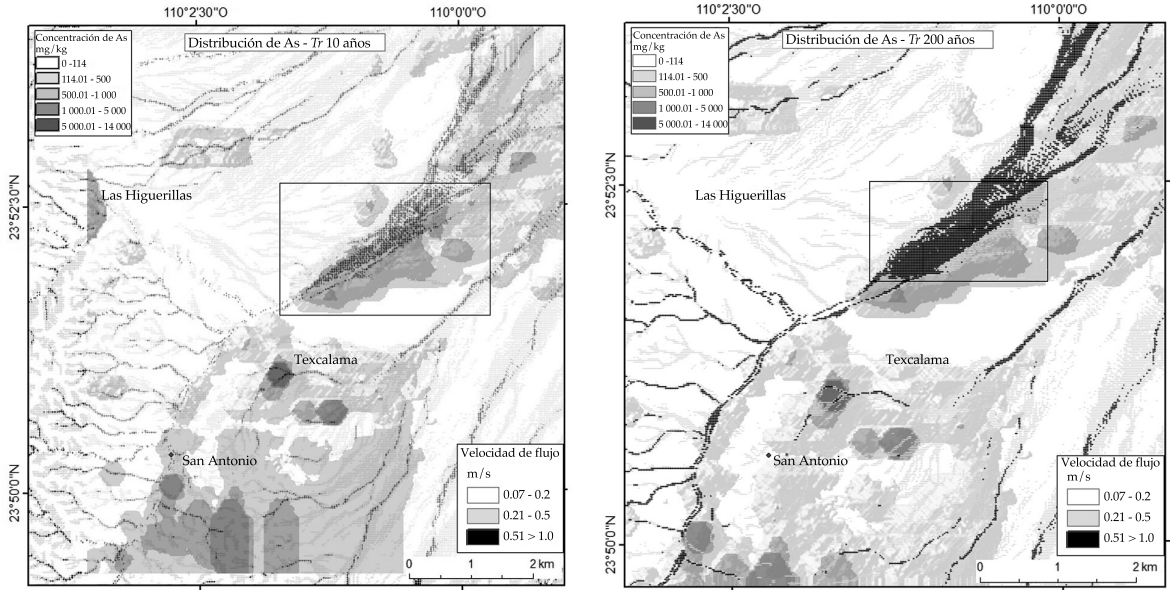

Figura 11. Relación de la velocidad del escurrimiento con dos periodos de retorno de 10 y 200 años, y concentración de As. En el recuadro negro se observa el punto con mayor concentración de As y al mismo tiempo un flujo de entre 0.5 y 1.0 m/s, que no es capaz de movilizar As aguas abajo.

ISSN 0187-8336

Agradecimientos

Se agradece al proyecto "Estudio ambiental del arsénico en el distrito minero de San Antonio-El Triunfo"; a la compañía Minera Pitalla, S. A. de C.V., por la base de datos de arsénico proporcionada, así como por el apoyo otorgado durante los trabajos de campo. Además, un agradecimiento especial para el ingeniero Rodrigo Hernández Ordóñez y el doctor Carles Canet Miquel por los comentarios tan oportunos al presente manuscrito.

Referencias

Appleton, J., Williams, T., & Orbea, H. (2001). Fluvial Contamination Associated Artisanal Gold Mining in the Ponce Enriquez, Portovelo-Zamura and Nambija Areas, Ecuador. *Water, Air and Soil Pollution*, *131*(1-4), 19-39.

Boggs, S. (2006). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy.* Upper Saddle River USA: Pearson Prentice Hall.

Carrillo, A., & Drever, I. (1997). Environmental Assessment of the Potential for Arsenic Leaching into Groundwater from Mine Wastes in Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional*, *37*(1), 1-8

COREMI. (1999). *Monografía geológico minera del estado de Baja California Sur.* México, DF: Consejo de Recursos Minerales, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

Cullen, W., & Reimer, K. (1989). Arsenic Speciation in the Environment. *Chem. Rev.*, *89*(4), 713-764.

Fuentes, O., De Luna, F., Sánchez, J., & Lorenzo, H. (2012). Obtención de hietogramas correspondientes a diferentes periodos de retorno. *Memorias del XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica.* San José, Costa Rica: Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidro-Ambientales (IAHR), 102-115.

Fuentes, O., Dominguez, R., & Franco, V. (1981). Relación entre Precipitación y Escurrimiento (pp. 1-66). En *Manual de Diseño de Obras Civiles, Sección Hidrotecnia.* México, DF: Comisión Federal de Electricidad.

Grupo de Biogeoquímica Ambiental, Facultad de Química, & Instituto de Geología (2012). *Estudio ambiental de arsénico en el distrito minero de San Antonio- El Triunfo.* México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México.

Marmolejo, J., Sánchez, M., Romero, J., Sánchez, A., & Magallanes, V. (2011). Migration of As, Hg and Zn in Arroyo Sediments from Semiarid Coastal System Influenced by the Abandonded Gold Mining District at El Triunfo, Baja California Sur, Mexico. *Environ. Monit.*, *13*(8), 2182-2189.

SGM (2014). *Listado de proyectos mineros. Dirección General de Desarrollo Minero.* México, DF: Servicio Geológico Mexicano, Centro de documentación de la Dirección General de Desarrollo Minero, Secretaría de Economía.

Suárez, M., Vidal, M., Navarro, I., Gómez, R., & López, F. (2010). Los arroyos de Baja California Sur (México): caracterización ambiental y aplicación de un índice de estado de alteración. *(IAR), Rev C. & G.*, *24*(1-2), 63-77.

Dirección institucional de los autores

Dra. Berenice Hernández-Cruz

Facultad de Filosofía y Letras
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, Avenida Universidad 3000,
Delegación Coyoacán
04510 México D.F., México
bere@geofisica.unam.mx

M.I. Faustino de Luna-Cruz

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, Avenida Universidad 3000,
Delegación Coyoacán
04510 México D.F., México
Teléfono: +52 (55) 5623 3600 ext. 14
flunaC@iingen.unam.mx

M.I. José Alberto Sánchez-Cruz

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, Avenida Universidad 3000,
Delegación Coyoacán
04510 México D.F., México
Teléfono: +52 (55) 5623 3600 ext.
JSanchezC@iingen.unam.mx

Dr. Francisco Martín Romero

Instituto de Geología
Universidad Nacional Autónoma de México
Delegación Coyoacán
04510 México D.F., México
Teléfono: +52 (55) 5622 4284 ext.129
fmrch@geologia.unam.mx