

Evidencias estratigráficas y geoquímicas de la variación temporal de sedimentos naturales y antropogénicos en la planicie aluvial del río Guanajuato

Raúl Miranda-Avilés*, María Jesús Puy-Alquiza y Martín Caudillo-González

*Universidad de Guanajuato, Departamento de Minas, Metalurgia y Geología,
Ex Hacienda de San Javier, C.P. 36020, Guanajuato, Gto., México.*

* *rmiranda@quijote.ugto.mx*

RESUMEN

En el presente trabajo analizamos la estratigrafía fluvial de sedimentos de planicie de inundación del río Guanajuato, basándonos en la sedimentología, edades ^{14}C y la geoquímica de elementos traza de sucesiones antropogénicas y naturales. Los sedimentos de planicie de inundación naturales o "prístinos" se depositaron en un ambiente de planicie de inundación entre 7460 ± 40 a. C. (parte inferior) y 500 ± 50 a. C. (parte media). Sobreyaciendo a los depósitos de planicie de inundación naturales se depositaron los sedimentos de planicie de inundación antropogénicos, relacionados con la actividad minera del distrito minero de Guanajuato durante épocas históricas, al menos desde el año 1660 ± 40 d. C. La interpretación estratigráfica es sustentada con los resultados del análisis de elementos traza, los cuales revelan que los sedimentos antropogénicos contienen valores elevados de Pb, Zn y Cu, así como valores relativamente bajos de Cr y Ni, mientras que los sedimentos naturales tienen un comportamiento inverso, con valores bajos de Pb, Zn, Cu y valores altos de Cr y Ni. La combinación de la estratigrafía y la geoquímica demuestra ser útil en la identificación y la discriminación de sedimentos naturales y antropogénicos relacionados con la actividad minera histórica, en el distrito minero de Guanajuato.

Palabras clave: estratigrafía, geoquímica, fechamiento ^{14}C , planicie de inundación, sedimentos antropogénicos, sedimentos naturales, río Guanajuato, distrito minero de Guanajuato, México.

ABSTRACT

In this paper we analyze the stratigraphy of floodplain sediments from the Guanajuato river, based on sedimentology, ^{14}C ages and geochemistry of trace elements of anthropogenic and natural sequences. The natural sediments were deposited in a floodplain environment between 7460 ± 40 BC (bottom) and 500 ± 50 BC (middle). Anthropogenic floodplain sediments, related to mining activities in the Guanajuato mining district, were deposited at least since 1660 ± 40 AD over the natural floodplain sediments. The stratigraphic interpretation is supported by trace elements analysis, which reveal that the anthropogenic floodplain sediments contain high levels of Pb, Zn and Cu as well as relatively low values of Cr and Ni, while the natural floodplain sediments, contain low values of Pb, Zn, Cu and high values of Cr and Ni. The combination of stratigraphy and geochemistry proves a useful tool in the detection and discrimination of natural and anthropogenic sediments related to the historic mining activity in the Guanajuato mining district.

Key words: stratigraphy, geochemistry, ^{14}C age, river floodplain, anthropogenic sediments, natural sediments, Guanajuato river, Guanajuato mining district, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Los sedimentos depositados en las zonas adyacentes al canal principal de un río son conocidos como depósitos de planicie de inundación (DPI) (Leopold *et al.*, 1964). El análisis de la estratigrafía de los DPI es útil para comprender la historia sedimentológica y ambiental de un sistema fluvial en diversas escalas de tiempo y espacio. La información geológica contenida en los DPI del Holoceno no sólo permite interpretar los procesos fluviales naturales que los formaron, sino también muestra ejemplos de la respuesta fluvial de la alteración humana al medio ambiente. A lo largo de la historia, la actividad minera extractiva y los procesos metalúrgicos han generado desechos en forma de sedimentos (terreros, jales) que han sido depositados en los ríos, o eventualmente integrados al ambiente fluvial, por medio de procesos geomórficos naturales (Brown *et al.*, 2003).

Los sedimentos mineros depositados en planicies de inundación son frecuentemente ricos en metales y pueden ser usados como marcadores estratigráficos locales o identificados como posibles fuentes de elementos con potencial tóxico hacia el ambiente. Existen estudios geoquímicos de DPI que han sido orientados a discriminar sedimentos industriales y mineros con altos contenidos de metales de los sedimentos naturales o prístinos (Reece *et al.*, 1978; Macklin 1985; Leenaers *et al.*, 1988; Brown *et al.*, 2003; Ridgway *et al.*, 1995; Eden y Bjorklund, 1996; Pulkkinen y Rissanen., 1997; Ridgway *et al.*, 2003). Uno de los problemas de interpretación de resultados de los métodos geoquímicos para discriminar sedimentos antropogénicos es la naturaleza compleja del mismo sistema fluvial. Por lo que Pulkkinen y Rissanen (1997) así como Ridgway *et al.* (1995) sugieren que para poder interpretar adecuadamente los DPI mineros es necesario, además del muestreo geoquímico sistemático, realizar estudios detallados sobre la estratigrafía, edad de sucesiones y la geomorfología fluvial. En una búsqueda bibliográfica realizada durante esta investigación no hemos encontrado trabajos que analicen la estratigrafía como base para un estudio geoquímico de discriminación de sedimentos de DPI mineros de DPI naturales. En el presente trabajo analizamos la estratigrafía fluvial y realizamos dataciones isotópicas de sedimentos de planicie de inundación (DPI) del río Guanajuato con el objeto de identificar sucesiones antropogénicas y naturales. Este estudio compara también la geoquímica de algunos elementos con potencial de afectar al medio ambiente, que pueden ser utilizados como guía en la discriminación de los sedimentos DPI de la cuenca del río Guanajuato.

En los últimos años, el estudio de sedimentos mineros (jales) en México y particularmente en el distrito minero de Guanajuato se ha enfocado a documentar su distribución, contenido de metales y el potencial de generar aguas ácidas (Ramos-Ramírez., 1991; Carrillo-Chávez *et al.*, 2003; Mendoza-Amézquita *et al.*, 2006; Ramos-Arroyo *et al.*, 2006). En relación con estudios sobre la geoquímica de sedimentos de DPI en México, sólo existe un estudio regional

en el centro de México realizado por Ridgway *et al.* (1995), donde estudia el perfil de los DPI de algunas localidades de Guanajuato y Michoacán (río Lajas, río Guanajuato, río Puerco y río Salitres). El trabajo de Ridgway *et al.* (1995) aporta información valiosa en cuanto a la distribución vertical y lateral de algunos metales, sin embargo debido a la misma complejidad de los sistemas fluviales, no discriminan con certeza los sedimentos DPI pre-industriales, recomendando estudios detallados sobre la estratigrafía, edad de sucesiones y la geomorfología fluvial en conjunto con el muestreo geoquímico.

ÁREA DE ESTUDIO

El área en estudio, localizada en la Mesa Central, 2 km al sur de la ciudad de Guanajuato, forma parte de la cuenca del río Guanajuato y se ubica en el valle fluvial de Santa Teresa (Figura 1).

La geología de la región consiste de rocas Mesozoicas volcano-sedimentarias deformadas, denominadas Complejo Basal (Aranda-Gómez *et al.*, 2003; Ortiz-Hernández *et al.*, 1992). El Complejo Basal incluye rocas volcano-sedimentaria metamorfozadas marinas del Jurásico-Cretácico, rocas ultramáficas y félsicas. Este conjunto litológico está cubierto en el distrito minero de Guanajuato por el Conglomerado Guanajuato del Eoceno (Edwards 1955; Aranda-Gómez and McDowell, 1998). Tanto las rocas del Complejo Basal como el Conglomerado Guanajuato, fueron parcialmente cubiertos por rocas volcánicas del Eoceno y Oligoceno, genéticamente relacionadas con la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental. La mineralización en el distrito minero de Guanajuato es de tipo epitermal, alojada en vetas y *stockwork* (Mango, 1991). La mineralogía de ganga está constituida por cuarzo, feldespatos, piritita, calcita, y arcillas como caolinita, esmectita y clorita. La mena son sulfuros y sulfosales diseminados en la ganga, tales como piritita (FeS_2), galena (PbS), calcopiritita (CuFeS_2), esfalerita (ZnS), polibasita [$(\text{Ag}, \text{Sb}, \text{Cu}, \text{Se}, \text{As})\text{S}_2$], una solución sólida de acantita-aguilanita-neumanita ($\text{AgS}_2\text{-SeAgS}_2\text{-SeS}_2$), además de plata nativa y electrum (Vassallo, 1988).

En el distrito minero de Guanajuato existen reportes de asolvamiento periódico del río Guanajuato por jales mineros en los años 1828, 1830, 1867, 1873 y 1883 (Antúnez-Echegaray, 1964; Reza, 2001, Miranda-Avilés *et al.*, 2008). En los siglos XVIII, XIX y principios del XX la ciudad de Guanajuato sufrió varias inundaciones que algunos autores relacionan con lluvias extraordinarias y al asolvamiento del río Guanajuato como consecuencia del vaciado de residuos mineros a su cauce (Humboldt, 1822; Butzer y Butzer, 1997; Marmolejo, 1967; Reza *et al.*, 2001). Muchos de los residuos mineros (jales y terreros) se depositaron en la rivera del río Guanajuato como DPI, los cuales por la actividad fluvial han conformado terrazas fluviales (Miranda-Avilés *et al.*, 2007).

Este trabajo se realizó en los alrededores del poblado

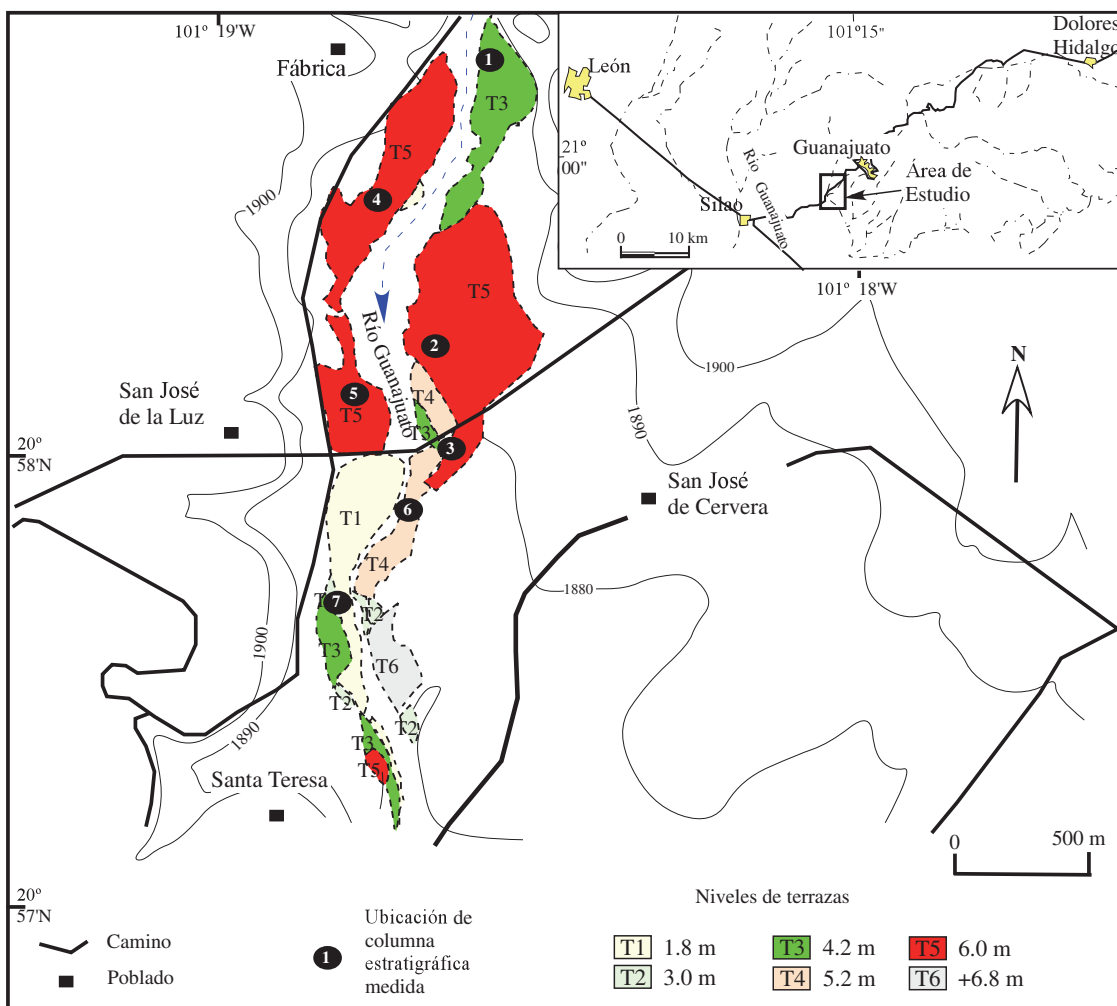


Figura 1. Localización del área de estudio y columnas estratigráficas medidas. Los niveles de las terrazas fluviales se muestran con diferentes colores e indicando elevación en relación al canal actual del río Guanajuato.

Santa Teresa tomando en cuenta la relación histórica conocida entre la generación de sedimentos mineros en la cuenca del río Guanajuato y la existencia de depósitos DPI bien expuestos en los alrededores del mismo poblado.

METODOLOGÍA

Durante la etapa de trabajo de campo, se midieron siete columnas estratigráficas en taludes de erosión y en canteras de agregados ubicados en ambas riveras del río Guanajuato. La descripción de las columnas estratigráficas fue basada en las características sedimentológicas, tomando como referencia el análisis de facies de Miall (1996). En las columnas estratigráficas se tomaron muestras de restos de carbón en los niveles donde se detectó su existencia. Dichas muestras de carbón fueron datadas isotópicamente por el método convencional de ¹⁴C en los laboratorios Beta Analytic de Miami Florida. Las edades obtenidas son referidas como unidades “AP” (antes del presente) y consideran como

referencia al “presente” el año de 1950. La interpretación estratigráfica se basó en la información sedimentológica de las columnas estratigráficas, edades isotópicas de ¹⁴C y la configuración morfológica de las terrazas fluviales. El estudio estratigráfico fue complementado con el análisis geoquímico de elementos traza (Cr, Ni, Be, Co, Cu, Zn, Mo, Sb, Pb) de muestras obtenidas en las cuatro columnas estratigráficas mejor expuestas y más representativas del área estudiada. Los análisis químicos de las muestras se realizaron en el laboratorio de Espectrometría de Masas del Centro de Geociencias de la UNAM, donde la fracción de 63 micrones fue analizada por elementos traza por medio de espectrómetro de masas con plasma acoplado por inducción (ICP-MS) empleando digestión con HNO₃ y HF.

RESULTADOS

El valle fluvial de Santa Teresa se caracteriza por presentar una morfología de lomeríos suaves con terrazas

fluviales escalonadas, descendentes en elevación, hacia el canal actual del río Guanajuato. Estas terrazas fluviales fueron labradas sobre los sedimentos de DPI objeto del presente estudio. Existen seis diferentes niveles de terrazas que varían en altura de 1.8 m a 6.8 m con respecto al canal actual del río Guanajuato. Las terrazas de menor a mayor altura, corresponden a T1 (1.8 m), T2 (3.0 m), T3 (4.2 m), T4 (5.2 m), T5 (6.0 m), T6 (+ 6.8 m) (Figura 1).

Las terrazas fluviales pueden observarse en ambas riveras del río Guanajuato (terrazas pares) o sólo en una de las riveras del río (terrazas no par). Las terrazas T1, T2, T3, T4 y T6 son terrazas no pares, con un eje este-oeste de entre 10 y 100 m de ancho y un eje norte-sur entre 100 y 500 m de largo (Figura 1). El proceso erosivo del río Guanajuato formó las terrazas fluviales sobre sedimentos de DPI, que quedaron expuestos en cortes verticales donde se midieron siete columnas estratigráficas.

Análisis estratigráfico

Litofacies

Las columnas estratigráficas medidas tienen un espesor de entre 1.0 y 6.0 m. Las columnas 1 a 5 se localizan en la parte norte y centro del área estudiada (Figura 2) y se distribuyen en ambas riveras del río Guanajuato. La columna 6 a 7 se localiza en el sur del área estudiada y al mismo tiempo son las columnas que permitieron medir y describir los sedimentos de DPI más antiguos.

Las columnas medidas están constituidas por litofacies Gm, Sg, Sgt, Ss, Sh, Sft, Fm según la clasificación de Miall (1996) descrita en la Tabla 1.

Las litofacies de grano grueso, Gm, son depósitos de grava gruesa con clastos subangulares de composición volcánica y metamórfica. La litofacies Gm presenta fragmentos de vasijas en sucesiones más jóvenes, mientras que en las sucesiones antiguas no se encontraron. La litofacies Gm corresponde a canales con base erosiva y continuidad lateral de 2.0 a 10.0 m, el espesor es variable de 0.10 a 2.0 m, generada por flujos de alta energía.

Las litofacies Sg, Sgt, Ss y Sh son interpretadas como depósitos de barras con continuidad lateral de decenas de metros. Están constituidas por arena de grano grueso a fino con clastos angulares de composición volcánica y metamórfica. La arena se compone de granos de cuarzo y en menor proporción de anfíboles y óxidos de hierro como hematita y magnetita. Estas litofacies muestran restos de envases y bolsas de plástico en las columnas estratigráficas que corresponden a sucesiones más jóvenes, mientras que en las sucesiones antiguas no se encontraron ese tipo de materiales. Algunos niveles de las litofacies de arena (Sg, Sgt, Ss, Sh) se intercalan con litofacies Fm y presentan estructuras sedimentarias como estratificación paralela y cruzada, grietas de desecación, así como restos de plantas, raíces, restos de carbón y un desarrollo incipiente de paleosuelos bioturbados.

La litofacies Sft está constituida por arena muy fina y limo de color gris claro a beige, con clastos líticos sub-redondeados de 1.0 cm compuestos por rocas volcánicas. La arena contiene plagioclasa, cuarzo y menor proporción de micas y óxidos de hierro. La litofacies Sft muestra laminación cruzada y paralela, indicando condiciones de moderada energía, depositada en la parte superior de barras o en la planicie de inundación. La litofacies Sft está cubierta por sedimentos Fm limo-arcilloso con restos de carbón y raíces, depositados en un ambiente de planicie de inundación. Tanto las litofacies Sft como Fm, tienen espesores de 0.5 a 1.10 m, muy continuas lateralmente y presentan localmente un incipiente desarrollo de paleosuelos enterrados, poco desarrollados, bioturbados y con escasas grietas de desecación, que nos indican exposición subaérea de la planicie de inundación.

Edad

La edad relativa y absoluta de las sucesiones de depósito se determinó con base en la sobreposición, geometría, continuidad lateral de litofacies, contenido de material correlacionable con épocas históricas (envases y bolsas de plástico, restos de cerámica, objetos de hierro) y cuatro dataciones isotópicas ^{14}C . Los resultados de datación isotópica (^{14}C) de las cuatro muestras de restos de carbón son consistentes con su posición estratigráfica (Figura 2) y con el contenido de material histórico (envases y bolsas de plástico, restos de cerámica, objetos de hierro) (Tabla 2): para la columna 6 se obtuvo una edad de 9410 ± 50 años (AP) para la base y de 2450 ± 40 años (AP) para la parte superior de la columna, mientras que para la columna 2 se obtuvo una edad de 290 ± 40 años AP para la base y de 120 ± 50 años AP en la parte media de la columna. Las edades de los depósitos estudiados permiten diferenciar una sucesión de sedimentos antiguos anteriores a épocas históricas (prístinos) y un paquete más joven (290 ± 40 a 120 ± 50 años AP), correlacionable con épocas industriales de gran actividad minera en el distrito minero de Guanajuato.

Geoquímica

El análisis de elementos traza de 26 muestras (Tabla 3) de cuatro columnas estratigráficas representativas de los depósitos DPI se realizó con el objeto de sustentar la interpretación de las sucesiones sedimentarias antropogénicas y naturales interpretadas con la estratigrafía. Los elementos que presentaron concentraciones más elevadas y contrastantes son Pb, Zn y Cu (Figura 3).

Depósitos DPI antropogénicos 290 ± 40 AP (año 1660 ± 40 d. C.) a 120 ± 50 AP (año 1830 ± 50 d. C.). Estos sedimentos se depositaron en épocas históricas en un periodo de actividad minera alrededor de los años 1660 ± 40 d. C. (parte inferior) y 1830 ± 50 d. C. (parte media) de acuerdo con la datación ^{14}C . El contenido de Cu oscila entre 41.5 mg/kg y 1782.3 mg/kg, el Zn entre 151 mg/kg y 432.5 mg/kg, y el Pb entre 125 mg/kg y 511.2 mg/kg. Las concentraciones de Cr, Ni, Co, Be, Mo y Sb son relativamente bajas (Figura 3a).

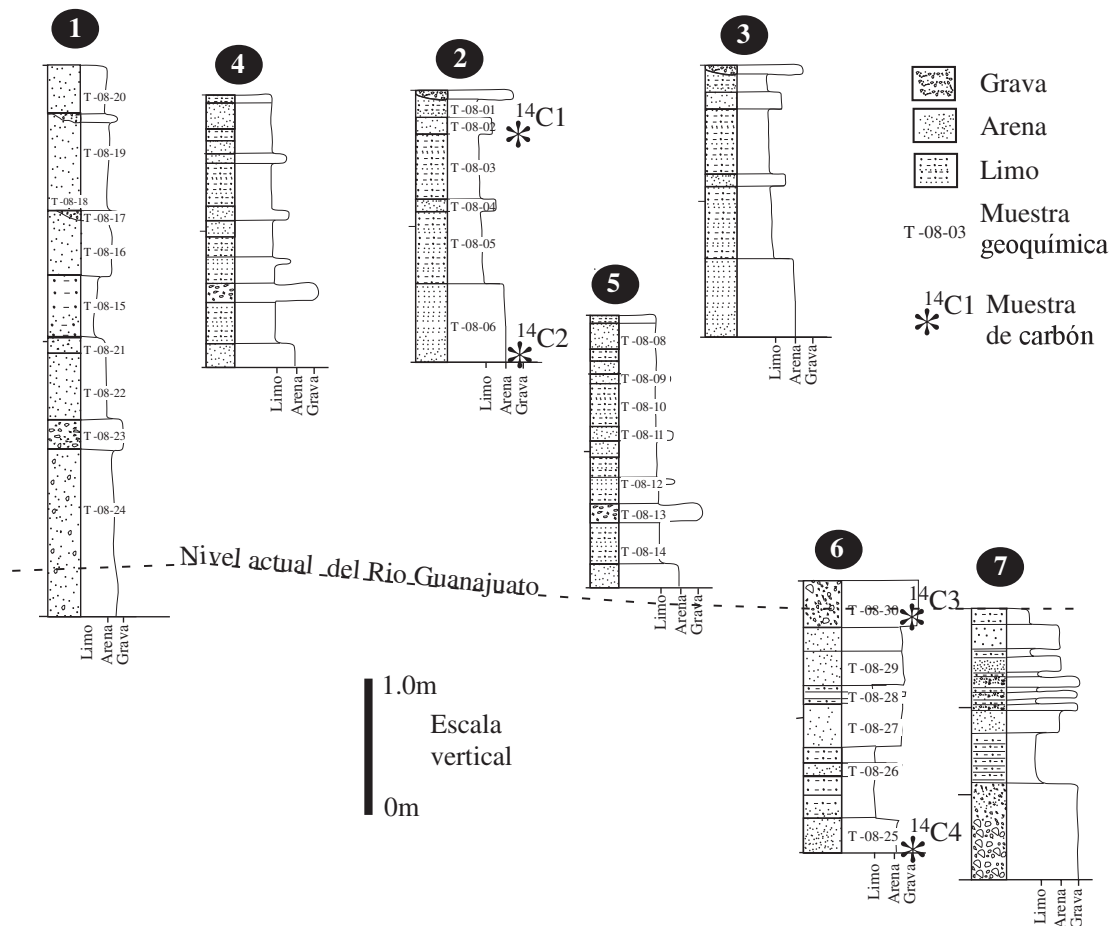
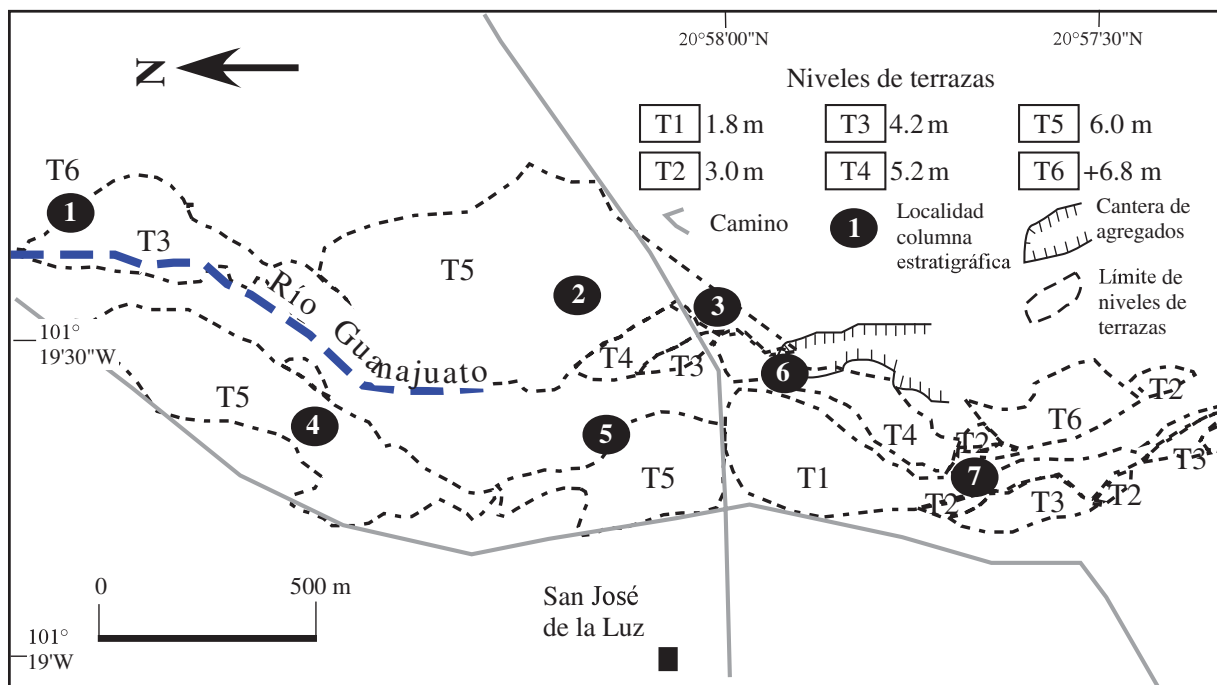


Figura 2. Columnas estratigráficas medidas. Las columnas 1, 2, 5 y 6 presentan la ubicación de muestras geoquímicas y muestras de carbón datados por ¹⁴C.

Tabla 1. Tabla de litofacies de los sedimentos de planicie de inundación del área de estudio según la clasificación de Miall (1996).

Facies	Descripción	Espesor (cm)	Minerales principales	Estructuras sedimentarias	Ambiente de depósito	Observaciones
Gm	Canal de grava, constituidos por clastos de 1 a 4 cm de diámetro, de composición principalmente volcánica.	15–200	Líticos volcánicos, cuarzo	Gradación normal imbricación	Barras y canales	Fragmentos de vasijas, huesos de equinos en sedimentos jóvenes
Sg	Arena de grano medio a grueso, constituida por líticos angulares de 0.5 a 3 cm de diámetro, de composición volcánica y carbón.	15–150	Cuarzo, líticos volcánicos, carbón	Gradación normal imbricación	Planicie de inundación	Restos de plantas, bioturbación. Lateralmente intercalada por canales y lentes limo-arcillosos
Sgt	Arena de grano medio a grueso de color rojo, presenta clastos líticos de composición volcánica y carbón. Los minerales se encuentran oxidados.	25–40	Líticos volcánicos, carbón, cuarzo, anfíboles, magnetita, hematita	Estratificación cruzada	Barras	Granos oxidados, restos de troncos
Ss	Arena de grano medio, presenta clastos líticos de composición volcánica y carbón	35–55	Cuarzo, carbón, líticos volcánicos, magnetita	Gradación normal imbricación	Barras	Raíces
Sh	Arena de grano medio, con clastos líticos de carbón y de composición volcánica	10–20	Líticos volcánicos, carbón, magnetita	Estratificación paralela	Barras	Muy bioturbada
Sft	Arena muy fina y limo de color blanco, presenta horizontes de color amarillo y clastos líticos subredondeados de lutita (jales) y carbón	5–10	Líticos volcánicos, cuarzo, magnetita, carbón	Laminación paralela	Planicie de inundación	Restos de madera, raíces, bioturbada
Fm	Limo-arcilla con clastos de carbón, lutita (jales) y volcánicos de 1 a 3 cm de diámetro.	10–110	Líticos volcánicos, carbón, cuarzo	Laminación paralela	Planicie de inundación	Bioturbación

Depósitos DPI naturales o “prístinos” (9410 ± 50 AP (año 7460 ± 40 a. C.) a 2450 ± 40 AP (año 500 ± 50 a. C.)). Los sedimentos interpretados como naturales se depositaron alrededor del año 7460 ± 40 a. C. (parte inferior) y el año 500 ± 50 a. C. (parte media) de acuerdo con la datación ^{14}C . Las concentraciones de los metales analizados son bajas en comparación con los sedimentos interpretados como antropogénicos. El Cu oscila entre 46.5 mg/kg y 79.9 mg/kg, el entre Zn 62.8 mg/kg y 97.4 mg/kg, el Pb entre 8.8 mg/kg y 32.1 mg/kg. Las concentraciones de Co, Be, Mo y Sb son relativamente bajas. Por otra parte, el Cr oscila entre 106.9 mg/kg y 135.1 mg/kg y el Ni entre 39.0 mg/kg y 51.7 mg/kg, que resultan concentraciones más elevadas a las encontradas en los sedimentos antropogénicos (Figura 3b).

DISCUSIÓN

Evolución de la sedimentación natural o “prístina” y antropogénica

Con base en el análisis de litofacies y las cuatro dataciones isotópicas ^{14}C , interpretamos que la evolución del valle fluvial de Santa Teresa ha sufrido procesos de acumulación y erosión en épocas prehistóricas e históricas. El proceso de depósito o acumulación de los DPI naturales o “prístinos” a los 7460 ± 40 años a. C. (parte inferior) y 500 ± 50 a. C. (parte media) se desarrolló en un ambiente de planicie de inundación, fuera del canal principal del río Guanajuato (avulsión) debido probablemente a episodios de

inundación efímeros, siendo el ambiente de baja energía. Sobreyaciendo a los DPI naturales, se encuentran los DPI antropogénicos (1660 ± 40 d. C. a 1830 ± 50 d. C.) (Figura 4). El proceso de depósito de los sedimentos antropogénicos fue antecedido por un periodo de erosión o descenso del nivel base, que generó el espacio disponible para su acumulación. La extensión lateral de los sedimentos se limita de 100 a 400 m, que corresponde a una zona proximal de la cuenca en un valle fluvial parcialmente confinado. Estos sedimentos antropogénicos fueron depositados en un ambiente de planicie de inundación durante épocas históricas y tienen un espesor de entre 2 y 10 m. En el campo, las litofacies de sedimentos antropogénicos y naturales son similares sedimentológicamente, sin embargo la diferencia remarcable entre ambas es el contenido de material de épocas industriales como restos de cerámica, objetos de hierro, envases y bolsas de plástico en las litofacies de sedimentos antropogénicos. En relación con las litofacies de sedimentos naturales, sobresale una mayor presencia de bioturbación, raíces y restos de carbón en sus sedimentos.

Un cálculo estimativo de la tasa de sedimentación (Tabla 4) pone de manifiesto el incremento del aporte de sedimentos a la planicie aluvial durante épocas históricas hasta 89 mm/año, que resulta alta si se le compara con la sedimentación natural estimada o la reportada en planicies de inundación del Holoceno, las cuales tienen rangos de 0.7 a 9.0 mm/año (Constantine *et al.*, 2003).

La generación de gran cantidad de sedimentos antropogénicos (terreros, jales) se remonta al año 1548 cuando se descubren yacimientos de oro y plata en Guanajuato

Tabla 2. Edades ^{14}C de restos de carbón. La ubicación de muestras se indica en la Figura 2. Los análisis se realizaron en los laboratorios Beta Analytic, Inc. AP: antes del Presente; a. C.: antes de Cristo; d. C.: después de Cristo.

Columna	Muestra	Profundidad (m)	Edad ^{14}C convencional (AP)	Edad ^{14}C calibrada 2σ (95% confianza)	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ‰	Edad calendario Gregoriano
2	$^{14}\text{C}1$	0.30	120 ± 50 AP	0 – 290	-24.8	Año 1830 ± 50 d. C.
2	$^{14}\text{C}2$	2.10	290 ± 40 AP	290 – 460	-25.0	Año 1660 ± 40 d. C.
6	$^{14}\text{C}3$	0.20	2450 ± 40 AP	2730 – 2350	-24.7	Año 500 ± 40 a. C.
6	$^{14}\text{C}4$	3.00	9410 ± 40 AP	10730 – 10520	-25.3	Año 7460 ± 40 a. C.

Nota: Edad calibrada con base en Stuiver y Reimer (1993).

(Antúnez-Echegaray, 1964). A lo largo de la historia extractiva y debido a la utilización de diversos procesos metalúrgicos, una gran cantidad de sedimentos (terreros, jales) eran depositados en la cuenca del río Guanajuato modificando el contenido y la tasa de sedimentación natural del sistema fluvial.

Los procesos metalúrgicos fueron modificados a lo largo del tiempo y de 1905 a 1946 se utilizó principalmente el proceso de cianuración. A partir de 1934, los jales dejaron de ser vaciados al cauce del río (Ramos-Arroyo, 2004), por lo que después de 1934, el aporte de sedimentos a la cuenca disminuyó sustancialmente, generando una erosión

gradual de los DPI estudiados. La erosión gradual y por pulsos repetitivos provocó el descenso del nivel del río Guanajuato, conformando una morfología de terrazas en la rivera actual del mismo.

Evidencia geoquímica del aporte de sedimentos antropogénicos

La interpretación estratigráfica de los sedimentos considerados como antropogénicos y naturales es sustentada con la geoquímica. Los elementos que presentaron concentra-

Tabla 3. Concentración de elementos traza en muestras de las columnas 1, 2, 5 y 6, determinada por ICP-MS en el Laboratorio de Espectrometría de Masas del Centro de Geociencias de la UNAM. Las concentraciones están en mg/kg.

No. Columna	Muestra	Profundidad (cm)	Be	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Sb	Pb
1	T-08-20	0–52	13.91	48.20	7.41	25.41	1782.34	393.08	1.81	70.80	325.30
1	T-08-19	52–112	13.69	41.73	6.61	19.84	1006.79	391.42	1.92	65.45	293.55
1	T-08-18	112–177	14.14	38.57	6.17	16.84	1191.40	404.54	1.80	78.99	331.96
1	T-08-17	177–194	7.43	82.15	16.16	32.54	1125.28	404.58	2.14	41.41	511.23
1	T-08-16	194–264	10.45	46.63	6.38	21.91	1388.72	381.32	2.32	90.79	274.14
1	T-08-15	264–334	4.80	65.71	11.21	28.94	981.39	349.48	0.86	45.05	262.04
1	T-08-21	334–351	5.94	64.04	10.58	27.88	867.18	278.49	0.86	41.87	291.15
1	T-08-22	351–421	8.47	49.81	7.83	19.72	749.01	326.87	1.44	54.36	246.78
1	T-08-23	421–456	5.31	79.37	13.24	36.65	1307.29	356.40	1.45	49.43	502.56
1	T-08-24	456–600	5.25	79.82	14.42	33.13	401.50	303.42	1.05	13.81	470.23
2	T-08-01	0–20	8.21	46.08	8.90	18.94	62.74	408.68	0.55	26.60	125.13
2	T-08-02	20–37	4.29	29.66	5.96	12.53	41.49	432.56	0.41	33.43	150.69
2	T-08-03	37–107	5.85	67.85	12.43	26.95	172.36	231.55	0.79	31.96	145.66
2	T-08-04	107–124	5.09	83.33	14.87	32.66	138.83	150.99	0.87	23.14	144.57
2	T-08-05	124–208	4.87	73.98	13.96	30.56	263.36	247.24	0.98	23.37	216.52
2	T-08-06	208–300	8.00	59.97	12.16	24.65	378.37	208.36	1.47	16.27	452.06
5	T-08-08	0–70	1.46	125.94	23.67	49.93	55.64	92.24	0.53	3.09	11.82
5	T-08-09	70–105	1.41	115.36	21.51	44.54	49.74	83.36	0.66	2.82	10.32
5	T-08-10	105–140	1.25	114.85	21.91	46.34	50.63	79.11	0.44	2.65	8.97
5	T-08-11	140–175	1.43	106.90	19.61	46.98	52.97	92.41	0.58	2.80	9.97
5	T-08-12	175–210	1.41	105.73	16.78	42.02	79.94	97.40	0.48	2.67	32.19
5	T-08-13	210–300	1.38	110.00	13.80	39.06	54.64	90.39	0.65	3.00	8.88
6	T-08-30	0–70	1.20	123.69	17.79	47.06	48.17	64.29	0.48	4.54	8.95
6	T-08-28	70–140	1.42	115.83	18.46	45.16	46.46	62.81	0.83	4.09	11.58
6	T-08-27	140–210	1.22	135.16	25.01	51.76	52.25	64.70	0.66	5.50	10.04
6	T-08-26	210–300	1.47	118.98	18.93	49.31	53.12	67.38	0.51	4.35	10.78

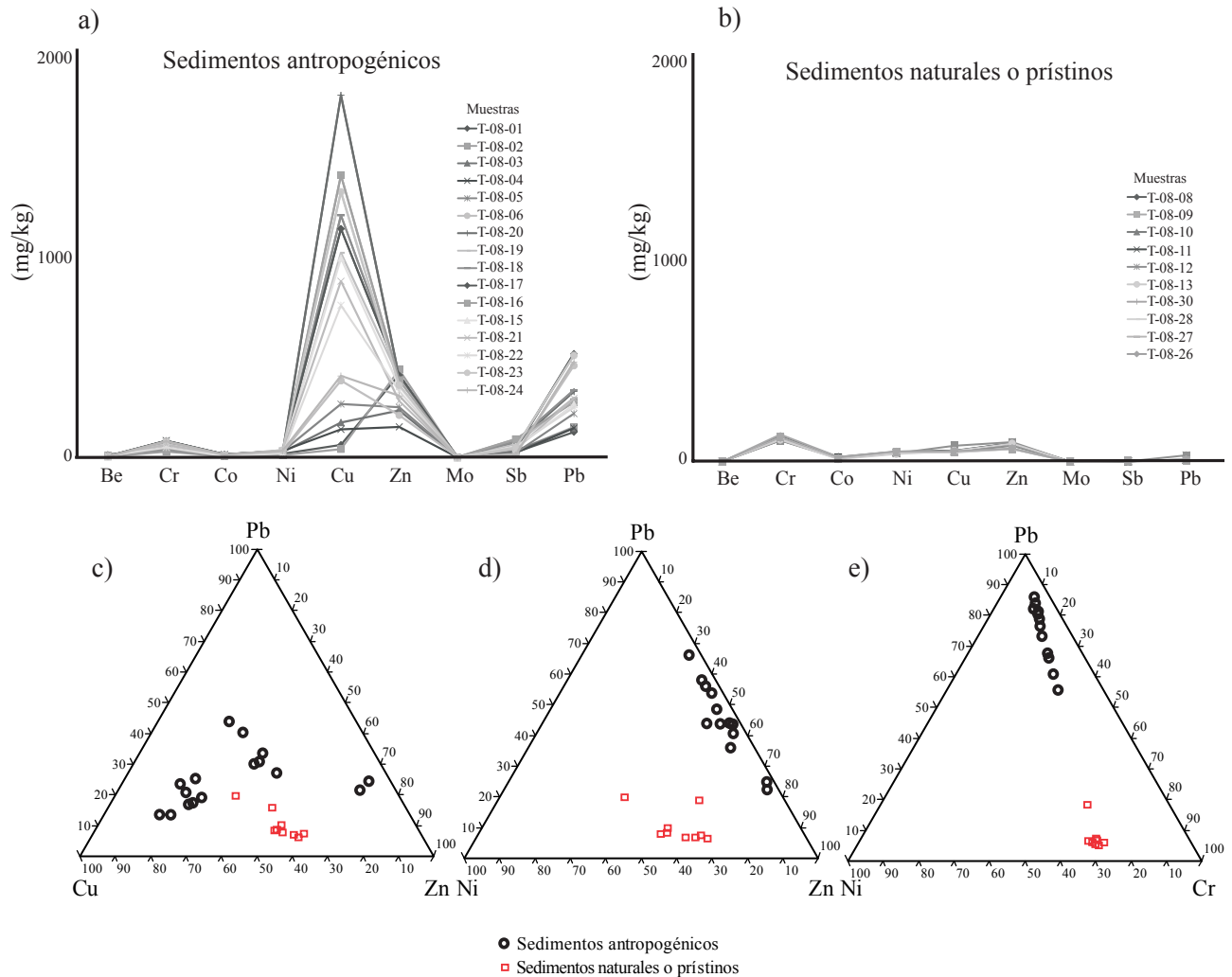


Figura 3. a y b: Contenido de elementos traza en sedimentos antropogénicos y naturales. c, d y e: diagramas triangulares de la concentración de Cu-Pb-Zn, Ni-Pb-Zn y Ni-Pb-Cr, respectivamente.

ciones más elevadas y contrastantes en los sedimentos de DPI estudiados son el Pb, Zn, Cu (Figuras 3a y 3b). Los sedimentos antropogénicos exhiben concentraciones elevadas de Pb (125–511.2 mg/kg), Zn (151–432.5 mg/kg), Cu (41.5–1782.3 mg/kg) y relativamente bajas en Ni (12.5–36 mg/kg) y Cr (39.5–79.8 mg/kg), mientras que los sedimentos naturales tienen concentraciones bajas en Pb (8.8–32.1 mg/kg), Zn (62.8–97.4 mg/kg), Cu (46.5–79.9 mg/kg) y relativamente altas en Ni (39.0–51.7 mg/kg) y Cr (106.9–135.1 mg/kg). La concentración elevada de Pb, Zn, Cu en los sedimentos antropogénicos se explica por la naturaleza misma de los jales mineros y la mineralización del distrito minero de Guanajuato. De acuerdo con Mendoza-Amézquita *et al.* (2006), los jales de Guanajuato pueden contener hasta el 2% en sulfuros y sulfosales, por lo que el Pb pudo derivar de la galena (PbS), el Zn de la esfalerita [(Zn,Fe)S] y el Cu de calcopirita (CuFeS₂). Además, el alto contenido de Cu también fue influenciado por el aporte de Cu durante el proceso metalúrgico de amalgamación, que

de acuerdo con Antúñez-Echegaray (1964), era agregado en forma de sulfato de cobre CuSO₄ en proporción de 2.51 kg por tonelada de mineral procesado.

Por otra parte el Ni y Cr tienen mayores concentraciones en los sedimentos naturales que en los antropogénicos (Figura 3c, 3d, 3e). Por lo que el Ni y el Cr pueden ser considerados como parte de la firma geoquímica de los sedimentos naturales. En el límite norte de la cuenca del río Guanajuato, aproximadamente 12 km al norte del área estudiada, Hernández-Silva *et al.* (2005) reportaron concentraciones elevadas de Cr (215.0–346.0 mg/kg) y Ni (117.5–472.40 mg/kg) en sedimentos de arroyo del Monte de San Nicolás y el arroyo que comunica a las presas La Soledad y La Esperanza. Los sedimentos de arroyo antes mencionadas son producto de la erosión de las rocas de la Sierra de Guanajuato, al límite norte de la cuenca del río Guanajuato, que pudieron aportar las concentraciones de Ni y Cr encontradas en los sedimentos naturales de DPI estudiados.

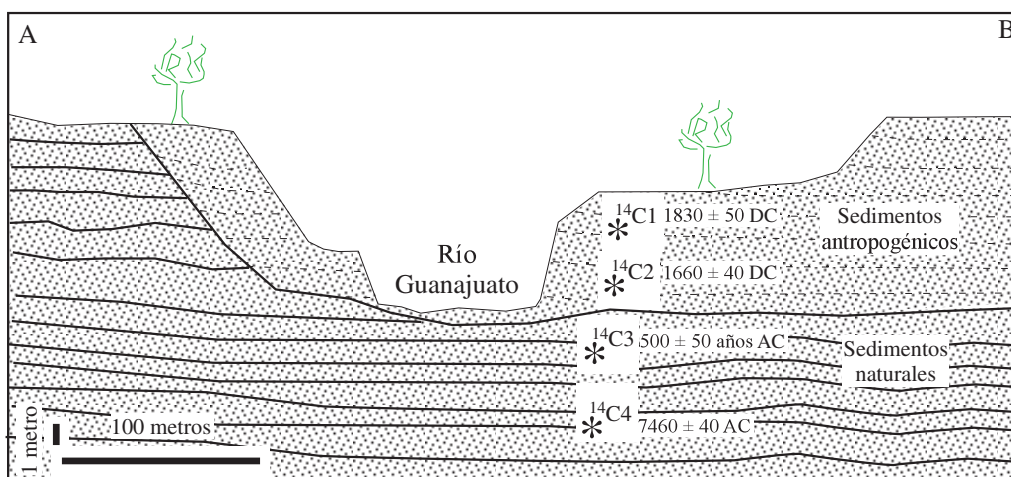
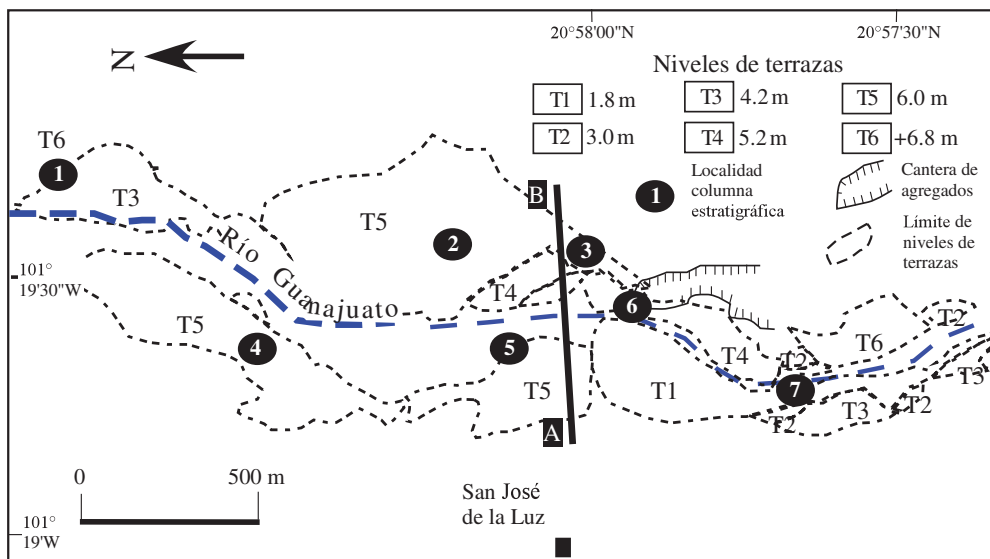


Figura 4. Sección esquemática de la estratigrafía de los depósitos de planicie de inundación (DPI) del río Guanajuato.

CONCLUSIONES

El análisis de la estratigrafía fluvial de sedimentos de planicie de inundación (DPI) del río Guanajuato, permitió identificar unidades sedimentarias antropogénicas y naturales en el valle fluvial de Santa Teresa. Los sedimentos de DPI naturales o “prístinos” se depositaron en un ambiente de planicie de inundación desde 7460 ± 40 a. C. (parte inferior) y 500 ± 50 años a. C. (parte media). Sobreyaciendo a los depósitos DPI naturales, se depositaron los DPI antropogénicos, al menos desde el año 1660 ± 40 AP. Un cálculo estimativo de la tasa de sedimentación pone de manifiesto el incremento del aporte de sedimentos a la planicie aluvial durante épocas históricas hasta 89 mm/año, que resulta alta, comparada con la sedimentación natural. La tasa de sedimentación en exceso se explica por la historia minera extractiva que generó una gran cantidad de sedimentos

(terreros, jales), los cuales fueron depositados en la cuenca del río Guanajuato, modificando el contenido y la tasa de sedimentación natural del ambiente fluvial.

De acuerdo con el análisis estratigráfico realizado, la evolución del valle fluvial de Santa Teresa fue dominado por procesos de acumulación y erosión. La acumulación de sedimentos predominó durante el depósito de los sedimentos de DPI naturales, seguido de un periodo de erosión o descenso del nivel base, que generó el espacio disponible para la acumulación de los sedimentos DPI antropogénicos. Después de 1934, el aporte de sedimentos a la cuenca disminuyó sustancialmente, generando una erosión gradual de los sedimentos DPI estudiados. La erosión gradual y por pulsos repetitivos provocó el descenso del nivel del río Guanajuato, conformando una morfología de terrazas en la rivera actual del mismo.

La interpretación estratigráfica es sustentada con los

Tabla 4. Tasa de sedimentación aproximada basada en las edades convencionales de ¹⁴C.

Sedimentos	Edad ¹⁴ C convencional	Separación entre muestras (m)	Tasa sedimentación aproximada (mm/año)	Actividad minera
Antropogénicos	290 ± 40 AP – 120 ± 50 AP	1.9	89	Si
Naturales	9410 ± 40 AP – 2450 ± 40AP	3.0	<1	No

resultados del análisis de elementos traza, donde los sedimentos antropogénicos contienen valores elevados de Pb, Zn y Cu así como valores relativamente bajos de Cr y Ni, mientras que los sedimentos naturales tienen un comportamiento inverso, con valores bajos de Pb, Zn, Cu y valores altos de Cr y Ni.

La combinación de la estratigrafía y la geoquímica demuestra ser útil en la identificación y la discriminación de sedimentos naturales y antropogénicos relacionados a la actividad minera histórica en el distrito minero de Guanajuato.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se inició con el apoyo de la Universidad de Guanajuato a través del proyecto FO-DIN-05. Un agradecimiento especial a la M. en C. Ofelia Pérez Arvizu del Laboratorio de Espectrometría de Masas del Centro de Geociencias UNAM. Se agradece a los árbitros Ángel Nieto-Samaniego y Tobías Schwennicke, cuyos comentarios y sugerencias fueron de gran utilidad para mejorar este artículo. Gracias a Teresa Orozco y el equipo de edición técnica de la RMCG.

REFERENCIAS

- Antúnez-Echegaray, F., 1964, Monografía Histórica y Minera del Distrito Minero de Guanajuato: México, Consejo Nacional de Recursos Naturales no Renovables, Publicación 17-E, 589 pp.
- Aranda-Gómez, J.J., McDowell, F.W., 1998, Paleogene extensión in the southern Basin and Range province of Mexico; syndepositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato Mining distrito: *Internacional Geology Review*, 40(2), 116-134.
- Aranda-Gómez, J.J., Godchaux, M.M., Aguirre-Díaz, G.J., Bonnicksen, B., Martínez-Reyes, J., 2003, Three superimposed volcanic arcs in the southern cordillera—from the Early Cretaceous to the Miocene, Guanajuato, Mexico, in *Geologic Transects across Cordilleran Mexico, Guidebook for field trips*, 99th Annual Meeting of the Cordilleran Section of the Geological Society of America Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico, April 5–8, 2003: Mexico, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Publicación Especial 1, Field trip 6, p. 123–168.
- Brown, A.G., Petit, F., James, A., 2003, Archaeology and human artefacts, in Piegay, H., Kondolf, M. (eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*: Chichester, Wiley, 59-76.
- Butzer, K., Butzer, E., 1997, The natural vegetation on the Mexican Bajío: archival documentation of the 16th Century savanna environment: *Quaternary International*, 43/44, 161-172.
- Carrillo-Chávez, A., Morton-Bermea, O., González-Partida, E., Rivas-Solorzano, H., Oesler, G., García-Meza, V., Hernández, E., Morales, P., Cienfuegos, E., 2003, Environmental geochemistry of the Guanajuato Mining District, México: *Ore Geology Reviews*, 23, 277-297.
- Constantine, J.A., Pasternack, G.B., Johnson, M.L., 2003, Floodplain evolution in a small, tectonically active basin of northern California: *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(8), 869-888.
- Eden, P., Bjorklund, A., 1996, Applicability of overbank sediment for environmental assessment according to wide-spaced sampling in Fennoscandia: *Applied Geochemistry*, 11(1-2), 271-276.
- Edwards, D.J., 1955, Studies of some early Tertiary red conglomerates of central Mexico: United States Geological Survey, Professional Paper 264(H), 153-185.
- Hernández-Silva, G., Solorio-Munguía, J.G., Maples-Vermeersch, M., Vassallo-Morales, L., Flores-Delgado, L., Hernández-Santiago, D., Solís-Valdez, S., Hernández-Anguiano, M.E., Alcalá-Martínez, J.R., 2005, Monitoreo de contaminantes en las cuencas de los ríos Guanajuato, San Juan de Otates y Turbio y su impacto en el río Lerma, Guanajuato, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, 112, 104 pp.
- Humboldt, A., 1822, *Ensayo Político sobre el Reino de la Nueva España*: México, Porrúa, 700 pp.
- Leenaers, H., Schouten, C.J., Rang, M.C., 1988, Variability of the metal content of flood deposits: *Environmental Geology and Water Sciences*, 11(1), 95-106.
- Leopold, L.B., Colman, M.G., Millar, J.P., 1964, *Fluvial Processes in Geomorphology*: San Francisco, W.H. Freeman, 522 pp.
- Macklin, M.G., 1985, Flood-plain sedimentation in the upper Axe Valley: *Transactions of the Institute of British Geographers*, 19, 235-244.
- Mango, H.N., Zantop, H., Oreskes, N., 1991, A fluid inclusion and isotope study of the Rayas Ag-Au-Cu-Pb-Zn mine, Guanajuato, México: *Economic Geology*, 86(7), 1554-156 .
- Marmolejo, L., 1967, Efemérides guanajuatenses o datos para formar la historia de la ciudad de Guanajuato obra escrita con la presencia de los más auténticos e interesantes documentos por el presbítero Lucio Marmolejo: Guanajuato, México, Universidad de Guanajuato, 4 tomos.
- Mendoza-Amézquita, E., Armienta-Hernández, M.A., Ayora, C., Soler, A., Ramos-Ramírez, E., 2006, Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1), 75-83.
- Miall, A.D., 1996, *The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology*: New York, Springer Verlag, 582 pp.
- Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M.J., Ramos-Arroyo, Y.R., Navarro-Barrera, R., 2007, Distribución y evolución histórica de las terrazas fluviales del valle de Santa Teresa Guanajuato: *Investigaciones Geográficas*, 63, 93-104.
- Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M., Martínez-Reyes, J.J., Zavala Ezquivel, A., Quiroga Velásquez, J.L., 2008, Las inundaciones históricas de la ciudad de Guanajuato: *Nuestra Tierra*, 9, 33-36.
- Ortiz-Hernández, L.E., Chiodi, M., Lapierre, H., Monod, O., Calvet, P., 1992, El arco intraoceánico alóctono (Cretácico Inferior) de Guanajuato - Características petrográficas, geoquímicas, estructurales e isotópicas del complejo filoniano y de las lavas basálticas asociadas; implicaciones geodinámicas: Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista del Instituto de Geología*, 9(2), 125-145.

- Pulkkinen, E., Rissanen, K., 1997, A geochemical investigation on overbank sediments in the Inari area, northern Finnish Lapland: *Journal of Geochemical Exploration*, 59(1), 11-26.
- Ramos-Arroyo, Y.R., Siebe-Grabach, C.D., 2006, Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un Distrito Minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1), 54-74.
- Ramos-Arroyo, Y.R., Prol-Ledesma, R.M., Siebe-Grabach, C., 2004, Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(2), 268-284.
- Ramos-Ramírez, R.E., 1991, Reconstrucción mineralógica de los jales de Guanajuato y el estudio sobre el seguimiento de las especies químicas contenidas en sus componentes no metálicos: Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Tesis de maestría, 135 pp.
- Reza, A.L., 2001, Guanajuato y sus Miasmas: higiene urbana y salud pública, 1792-1804: Guanajuato, México, Presidencia Municipal de Guanajuato, Dirección de Cultura y Educación, 124 pp.
- Ridgway, J., Flight, D.M.A., Martiny, B., Gomez-Caballero, A., Macías-Romo, C., Greally, K., 1995, Overbank sediments from central Mexico: an evaluation of their use in regional geochemical mapping and in studies of contamination from modern and historical mining: *Applied Geochemistry* 10(1), 97-109.
- Ridgway, J., Breward, N., Langston, W.J., Lister, R., Rees, J.G., Rowlatt, S.M., 2003, Distinguishing between natural and anthropogenic sources of metals entering the Irish Sea: *Applied Geochemistry* 18(2), 283-309.
- Reece, D.E., Felkey, J.R., Wai, C.M., 1978, Heavy metal pollution in the sediments of the Coeur d'Alene River, Idaho: *Environmental Geology*, 2(5), 289-293.
- Stuiver, M., Reimer P.J., 1993, Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program: *Radiocarbon*, 35(1), 215-230.
- Vassallo, L.F., 1988, Características de la composición mineralógica de las menas de la Veta Madre de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista del Instituto de Geología*, 7, 232-243.

Manuscrito recibido: Enero 29, 2009

Manuscrito corregido recibido: Mayo 18, 2009

Manuscrito aceptado: Mayo 29, 2009