



Procesos erosivos en jales de la Presa I de Nacozari de García, Sonora y su efecto en la dispersión de contaminantes

Margarita de la O-Villanueva¹, Diana Meza-Figueroa^{1,*}, Raina M. Maier², Denise Moreno³, Agustín Gómez-Alvarez⁴, Rafael Del Río-Salas⁵, Héctor Mendivil⁵, Alejandra Montijo¹

¹ Departamento de Geología, División de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Sonora. Rosales y Encinas, C.P. 83000 Hermosillo, Sonora, México.

² Department of Soil, Water and Environmental Science, University of Arizona, Tucson, Arizona, 85721-0038, United States.

³ Dean Carter Binational Center for Environmental Health Sciences. University of Arizona 1703 East Mabel Street, 85721-0207, Tucson, Arizona, United States.

⁴ Departamento de Ingeniería Química, División de Ingeniería, Universidad de Sonora. Rosales y Encinas, C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

⁵ Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste, Universidad Nacional Autónoma de México.

* dmeza@ciencias.uson.mx

Resumen

La operación y explotación del yacimiento de cobre tipo “brecha pipe” de la antigua mina Pilares y su posterior cese de actividades en 1945 generó aproximadamente 20 millones de toneladas en jales y terreros, actualmente en Nacozari de García, Sonora. Este pasivo ambiental representa 19 hectáreas de superficie cubierta por tres millones de toneladas de jales en la zona urbanizada. Los jales no están confinados, tienen pendientes de 50°, carecen de vegetación y en parte de su superficie se forman sales eflorescentes estacionales. Tales características generan una alta erosión hídrica, eólica y el posible colapso de material. Los datos obtenidos para la erosión hídrica de jales y suelos indican una clasificación de severa a muy severa. La diferencia en granulometría de los jales marca diferencias significativas en la intensidad de la erosión hídrica. La caracterización física de los jales muestra dos zonas de granulometrías significativamente distintas que influyen en la oxidación de sulfuros y liberación de metales: una zona de jales gruesos y otra de jales finos producto del proceso de flotación. Se estimaron índices climáticos para un período de 1960 a 2011. El índice de aridez de Martonne indica un rango de 47 a 66, variando de zona húmeda en los 60’s y 70’s a perhúmeda en los 80’s y siendo actualmente zona húmeda. Se obtuvo un rango de 15.2 a 22.8 para el índice de Lang indicando una clasificación de estepario. Los valores de cobre en suelos residenciales y polvo suspendido a dos metros de altura excede el valor geoquímico de fondo.

Palabras clave: sales eflorescentes, jales, metales, polvos, México.

Abstract

The operation and exploitation of the Pilares breccia-pipe copper ore deposit and its subsequent cessation of activities in 1945 generated approximately 20 million tons in mine tailings and waste, currently covering a 19 hectares surface located within the urbanized area of Nacozari de Garcia, Sonora. The studied mine tailings are unconfined, with unstable slopes of 50°, lack of vegetation and seasonal efflorescent salts have formed on the surface. Such characteristics generate high eolian and water erosion and the possible collapse of material. In this work, calculated erosion is classified as severe to very severe. Granulometric characteristics of the tailings mark significant differences in the intensity of water erosion. The physical characterization of the tailings shows two areas of different granulometry that influence in the oxidation of sulfides and metal release: an area of large particle size, and another of fine particle size produced by the flotation process. Climate indexes were estimated for a time period from 1960 to 2011. The aridity index of Martonne

shows a rank from 47 to 66, varying from humid in the '60s and '70s to perhumid in the '80s, and humid at present. The Lang index shows values from 15.2 to 22.8, which classifies as a steppe. Copper contents in residential soils and airborne dust collected at two meters height exceed the geochemical background.

Keywords: efflorescent salts, mine tailings, metals, dust, Mexico.

1. Introducción

La actividad minera realizada durante siglos en México ha dejado como herencia grandes cantidades de residuos de mina no confinados. Entre estos residuos, los más importantes son los jales debido a su bajo pH, elevado contenido en elementos potencialmente tóxicos, nula vegetación y alta erosión. A la fecha, no existe un inventario en México de la cantidad de presas de jales inactivas abandonadas (Romero y Gutiérrez-Ruiz, 2010). Este tipo de residuos representan pasivos ambientales que requieren propuestas de estabilización de bajo costo para reducir su dispersión al ambiente. Existen pocos estudios en la literatura enfocados a evaluar la peligrosidad de jales en función de variaciones climáticas (Dold y Fontboté, 2001, 2002; Romero *et al.*, 2008; Romero y Gutiérrez-Ruiz, 2010). En climas húmedos y templados, el principal problema ambiental asociado a los jales es la generación de drenaje ácido de mina (DAM) y su dispersión al ambiente a partir de sus lixiviados. El DAM se forma a partir de la oxidación de sulfuros metálicos reactivos cuando entran en contacto con agua y aire, formando lixiviados que se caracterizan por pH bajos y concentraciones elevadas de elementos potencialmente tóxicos (Romero y Gutiérrez-Ruiz, 2010; Moncur *et al.*, 2005). En estos climas, la afectación principal sucede en cuerpos de agua superficiales o subterráneos, así como suelos y sedimentos (Jung, 2001). Por el contrario, en climas áridos y semi-áridos las reacciones de oxidación de sulfuros están limitadas a ocurrir principalmente en horizontes arcillosos en los jales, que pueden retener mayor humedad; estas condiciones promueven una migración de metales vía capilar hacia superficie depositando sales solubles ó eflorescencias en la superficie y laderas de los jales (Dold y Fontboté, 2001, 2002; Meza-Figueroa *et al.*, 2009). En zonas áridas y semi-áridas la afectación principal es a la atmósfera y dependiendo de la precipitación, a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Particularmente, en las zonas áridas y semi-áridas los intensos procesos de erosión en jales representan dos principales riesgos: i) la estabilidad de los taludes de las presas inactivas de jales se afecta seriamente por erosión hídrica que puede resultar en el colapso de las estructuras y ii) el polvo derivado de la erosión eólica de los jales puede contener niveles importantes de metales (Mendez y Maier, 2008).

El antiguo distrito minero de Nacozari, en el norte de Sonora, contiene algunos de los yacimientos de cobre más

importantes de México. Los yacimientos minerales del distrito varían de pórfidos de cobre, chimeneas brechoideas y vetas con valores económicos de Cu, Mo, Au, Ag y Zn. Los más importantes son: La Caridad, Brecha Pilares, El Batamote, Los Alisos, La Gloria y San Nicolás. Los registros históricos indican que la actividad minera relacionada a la explotación de cobre se remonta a 1880. La Moctezuma Copper Company explotó la mina Pilares que se localizaba a 10 kilómetros al este de lo que hoy es la Ciudad de Nacozari de García. Los valores de cobre de la mina Pilares eran de 0.7 a 1.2%, caracterizándose el depósito por tener bajo contenidos de sulfuros metálicos, incluyendo piritita, galena y esfalerita. La mina Pilares producía 3000 toneladas de cobre diarias y generó cerca de 40 millones de toneladas de cobre durante su operación desde 1895 a 1949 (Alvarado y Volke, 2004). Esta actividad generó residuos que se depositaron en tres presas de jales sobre rocas volcánicas del Terciario (andesitas, ignimbritas y riolitas) y sobre la Formación Baúcarit (conglomerado intercalado con tobas y areniscas). Las tres presas de jales cubren actualmente un total de 52 hectáreas con un volumen total de 20 millones de toneladas de jales. Con el tiempo, la ciudad de Nacozari se estableció y creció alrededor de las tres presas inactivas de jales. Una de estas presas (Presa I) está dentro de la zona urbana de Nacozari y actualmente está rodeada de viviendas (Figura 1). En este depósito de jales se han creado canales por esporádicas pero fuertes corrientes de agua superficiales que han erosionado a los jales de su lugar original transportándolos y depositándolos corriente abajo de las áreas residenciales. Adicionalmente, las superficies planas superiores del material restante son susceptibles a la erosión eólica del viento.

A la fecha se desconocen los procesos erosivos dominantes en los jales de este estudio y su magnitud. La erosión en el área es causada por factores tales como taludes muy pronunciados, la falta de una cubierta protectora (vegetación) y falta de canales para colectar el agua y así reducir los flujos a través de las áreas con pendientes altas.

Con el principal objetivo de colaborar en la solución de los problemas ambientales que representa la Presa I de jales en Nacozari de García, este trabajo pretende evaluar los procesos erosivos dominantes y su influencia en la dispersión de cobre. Debido a que no se tienen registros de los métodos de beneficio y las características topográficas previas al depósito de los jales de la Presa I se pretende lo siguiente: i) determinar la granulometría de jales para proporcionar información de los tipos de depósito, hídrico o

mecánico; ii) evaluar la erosión hídrica y eólica de los jales y hacer una comparación con la erosión en los tipos de suelos del área; iii) realizar estudios de altimetría y densidad de jales para cuantificar escorrentía y calcular el tonelaje; iv) determinar los contenidos de cobre en suelos residenciales en dos períodos del año para evaluar la influencia de los procesos erosivos en la dispersión de estos metales.

2. Área de estudio

Nacozari de García se ubica al norte de la República Mexicana en el noreste del estado de Sonora, paralelo 30° 22' 31.23" de latitud Norte y 109° 41' 15.14" de longitud Oeste, a una altura de 1 040 metros sobre el nivel del mar (Figura 1). El área cuenta con 11961 habitantes (Compendio Estadístico del Estado de Sonora, 2010), de los cuales, 2700 viven en los alrededores de la presa de jales de este estudio. Los suelos en el área están poco desarrollados y sobresalen los litosoles, los cuales son altamente susceptibles a la erosión hídrica. Nacozari pertenece a la Región Hidrológica RH-9 denominada Sonora Sur que comprende las cuencas de los ríos Mayo, Yaqui, Matape, Sonora y Bacoachi. Destacan los ríos Bavispe que fluye de norte a sur por la parte oriental del municipio de Nacozari y el río Moctezuma que fluye de norte a sur en la parte occidental del mismo municipio. En el río Nacozari fluyen corrientes intermitentes que bajan de las sierras, así como descargas de aguas residuales procedentes de Nacozari de García.

Los depósitos minerales explotados en el área son del tipo pórfido cuprífero, chimeneas brechoides y estructuras vetiformes. Los principales metales explotados en la región son: el Cu, Mo, Au, Ag y Zn. Las rocas encajonantes son principalmente lutitas, andesitas y dioritas (Romero *et al.*, 2008). El yacimiento de la mina Pilares contiene una variedad de minerales incluyendo: malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), calcopirita (FeCuS_2), molibdenita (MoS_2), esfalerita (ZnS), calcosita (CuS), azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$), y cubanita (CuFe_2S_3).

2.1. Jales

Las tres presas inactivas de jales presentan características diferentes en la molienda derivada de los cambios en los procesos de beneficio de la planta concentradora. En este estudio se trabajó en la Presa de Jales I, localizada dentro de la zona urbana de Nacozari de García, la cual cubre un área de 19 hectáreas (Figura 1). La mineralogía de los jales estudiados es principalmente cuarzo (SiO_2), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), lepidocrocita (YFeOOH) y sulfato de cobre (CuSO_4), la presencia de estos dos últimos minerales indica la abundancia relativa de Fe y Cu en los jales (Romero *et al.*, 2008). Los jales de la zona de estudio están intensamente oxidados, sin embargo, se ha documentado que presentan un nivel bajo de peligrosidad (Romero y Gutiérrez-Ruiz, 2010), ya que el pH en la solución acuosa de los jales

oxidados es medianamente ácido ($\text{pH} = 3.6\text{-}4.8$) lo que impide la liberación de elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Pb) con la excepción de una liberación de Cu, Fe y Mn (Romero y Gutiérrez-Ruiz, 2010). Sin embargo, se ha reportado la formación estacional de sales eflorescentes en la superficie de los jales (Figura 2) con una significativa acumulación de metales (Meza-Figueroa *et al.*, 2009). En el caso de la presa de jales de este estudio, los metales que presentan una acumulación importante en las sales son Zn, Mn y Cu. Esta costra de sales solubles es susceptible a erosión hídrica y eólica, por lo que su dispersión al ambiente depende de factores climáticos.

3. Metodología

3.1. Volumen y tonelaje

Para determinar la escorrentía se requirió conocer la topografía de la presa de jales. Se realizó un levantamiento topográfico con una estación total marca *Trimble*, controladora *TSCe*, Antenas *ZEPHYR* (fija y móvil), radio modem *Trimmark*, Estación base *Trimble 5700* y software *Trimble Survey Controller*. La configuración se realizó para registrar puntos a distancia fija de cada cinco metros durante todo el recorrido de la zona. La altimetría se estimó localizando un punto georeferenciado con sistema de posicionamiento global, sirviendo como banco de referencia para toda la altimetría. Los puntos obtenidos se descargaron en formato *AutoCAD* para la cubicación de los jales. Para calcular el tonelaje se estimó la densidad promedio de los jales. Se tomaron cuatro muestras en cada una de las 5 laderas de los jales, los sitios fueron elegidos a una distancia equitativa a partir del primer punto de muestreo considerando el perímetro total. La distancia entre los 4 puntos de cada ladera es equidistante, desde la pata a la cresta del talud. Se utilizó el siguiente procedimiento: Cada una de las 20 muestras de laderas se tamizó a las mallas 10, 18, 35, 60, 120 y 230, se pesaron en seco todas las cantidades y se utilizó un densímetro marca *Alfa Mirage* Modelo EW-300SG, con una resolución de 0.01 g/cm³ y capacidad de 300 g.

3.2. Granulometría de jales y medición de cárcavas

Se tomaron cuatro muestras de cada una de las cinco laderas de la presa de Jales I, a una distancia equitativa en el perímetro de la zona de la presa, colectando un total de 20 muestras. Se realizó un estudio de medición de cárcavas producto de erosión hídrica. Esto permite la delimitación de las áreas de circulación de agua meteórica y por lo tanto de las zonas de mayor acarreo superficial de sedimentos. La metodología para evaluar las zonas de mayor erosión por cárcavas se basa en Pando-Moreno *et al.*, (2003) donde se evalúa la densidad de cárcava a partir de una cuadrícula de área determinada, esto dependiendo de la escala a la que

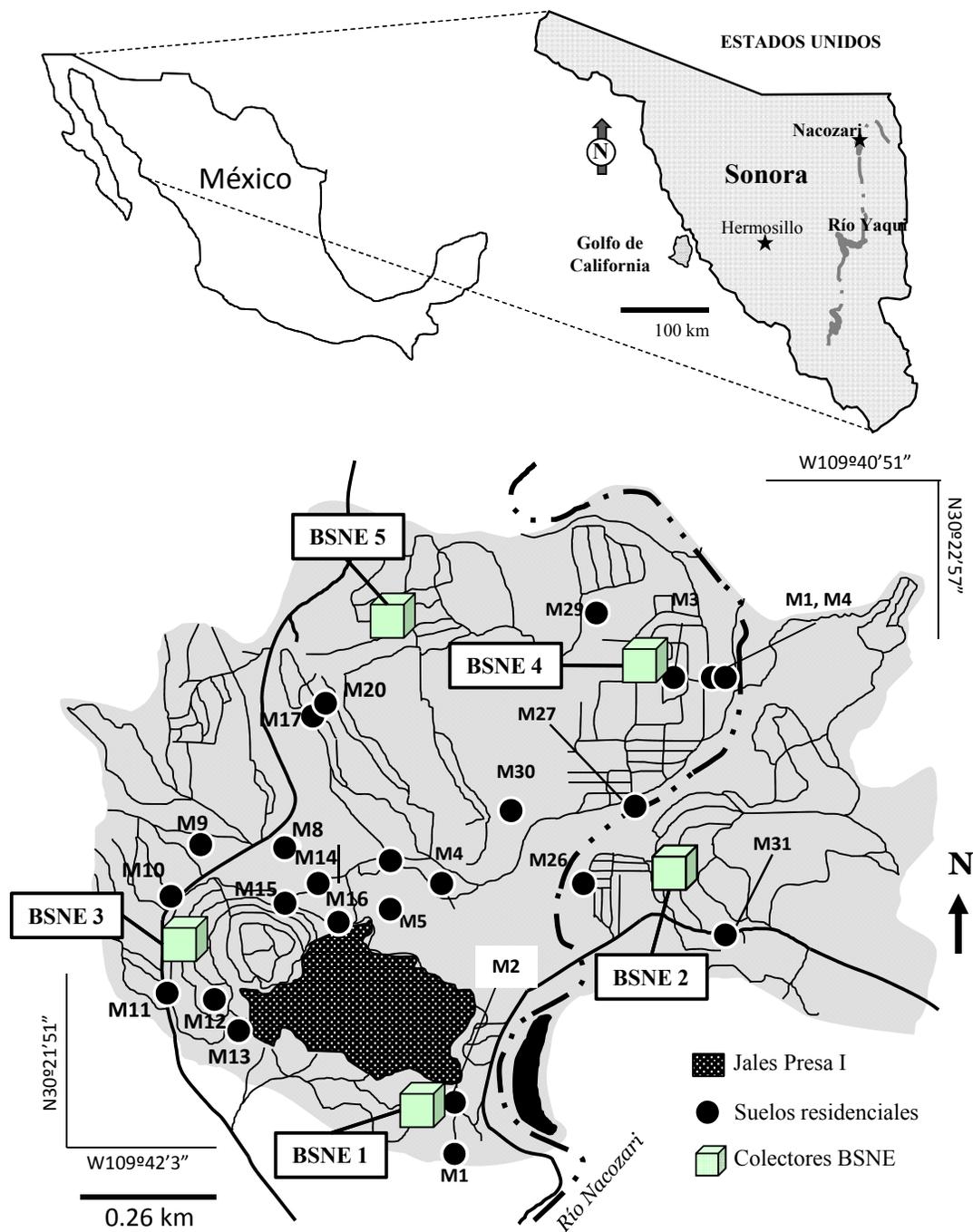


Figura 1. Área de estudio incluyendo presa de jales I y plano de localización de muestras de suelos residenciales y colectores BSNE.

se maneje la imagen de satélite. En el caso de este trabajo, se utilizó una imagen con escala de 1 cm equivalente a 36.32 m. Los datos fueron corroborados con medición de cárcavas en campo utilizando cinta y estacas.

3.3. Datos climáticos

Con el objetivo de conocer las condiciones de clima locales, se instaló una estación meteorológica marca Davis *Vantage Pro2* dentro de la zona urbana de Nacoziari, entre las

coordenadas 30° 22' 35.19" Norte y 109° 41' 07.06" Oeste, a una altitud de 1104 m.s.n.m. Se colectó información durante dos años respecto a los siguientes parámetros: velocidad de viento, dirección de viento, temperatura, humedad, presión, precipitación, así como sus variaciones durante los cuatro periodos estacionales. La instalación y operación de esta estación permitió conocer las características locales del clima, ya que la estación más cercana está a 100 km de distancia.

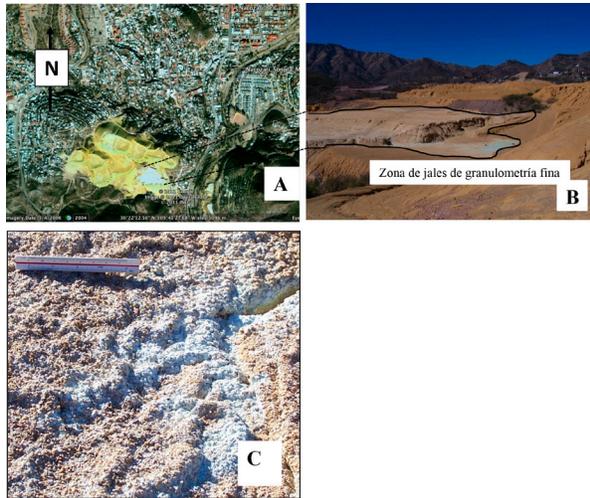


Figura 2. Imágenes A y B) indican la zona de jales de flotación caracterizado por granulometrías finas y C) sales eflorescentes.

3.4. Índices climáticos

La aridez de la zona de estudio fue estimada mediante la aplicación de los modelos de De Martonne (1926) y de Lang (1915). Estos índices se estimaron considerando datos de precipitación y temperatura del período de 1960 al 2006. El índice de Lang se define con la expresión

$$P_f = P / tm \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde: P = precipitación media anual en mm, tm : temperatura media anual en °C, las zonas que define el índice de aridez de Lang se expresan en la Tabla 3. El índice de aridez de Martonne se representa con la fórmula:

$$I_a = P / [tm + 10] \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde: P = precipitación media anual en mm, tm = temperatura media anual en °C. La clasificación de zonas según estos índices climáticos se muestra en la Tabla 1.

3.5. Cálculo de erosión hídrica

La determinación de un índice que describa los efectos erosivos de la precipitación ha sido tema de estudio de varios autores (Wischmeier, 1959; Fournier, 1960; Gabriels, 2000). La erosión hídrica de los jales y suelos se estimó en base a la ecuación de predicción de erosión (EUPS), modificada de Wischmeier y Smith (1978), de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$A = RxKxLSxCxP \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde: A = pérdida de suelo anual en toneladas/hectárea/año, R = factor de erosividad por precipitación pluvial, K = factor de erodabilidad del suelo, LS = factor de longitud y gradiente de pendiente, C = factor de cobertura de suelo y P = factor del método de control de erosión. Para el cálculo de R , se utilizaron las precipitaciones de los últimos diez años con base en datos de la red pluviográfica de la Comisión Nacional del Agua. Esta ecuación tiene su base en la estimación del factor R (Wischmeier, 1959), el cual

Tabla 1. Clasificación de zonas según índice de aridez de Lang y Martonne.

Índice de Lang		Índice de Martonne	
Valor de P_f	Zona	Valor de I_a	Zona
0-20	Desiertos	0-5	Desierto (Hiperárido)
20-40	Árida	05-oct	Semidesierto (Árido)
40-60	Húmeda de estepa y sabana	oct-20	Semiárido de tipo mediterráneo
60-100	Húmeda de bosques claros	20-30	Subhúmeda
100-160	Húmeda de grandes bosques	30-60	Húmeda
>160	Perhúmeda con prados y tundras	>60	Perhúmeda

se deduce a partir del producto de la energía liberada por la lluvia (E) y la máxima intensidad de precipitación durante un intervalo de 30 minutos de la tormenta (I_{30}). El cálculo de R es a partir de la ecuación

$$R = (ExI_{30}) / 173.6 \quad (\text{Ecuación 4})$$

El factor R constituye uno de los índices de erosividad de la lluvia cuya aplicación está más extendida. Sin embargo, este dato depende de la calidad de la base pluviográfica existente en el país. Diversos autores han señalado la dificultad en la extrapolación de los valores registrados debido a la alta variabilidad espacial y temporal de la agresividad pluvial (Simanton y Renard, 1982; Morgan, 1983). Debido entonces a la dificultad del cálculo del factor R (debe calcularse la energía cinética y la intensidad de las tormentas de forma aislada y durante un largo período de años), Fournier (1960) estableció un índice de agresividad climática o Índice de Fournier (IF), que muestra una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía. Este índice ha sido considerado un buen indicador del riesgo de erosión en cárcavas (Morgan, 1997). El cálculo del IF se realiza a partir de los datos pluviométricos de estaciones meteorológicas representativas, en este trabajo se consideran los datos de las estaciones de Douglas (Arizona), Nacozari de García y San Pedro (Sonora) de la compañía clima bajo tierra (*Weather Underground Inc.*), según la siguiente ecuación

$$IF = (pmax^2) / P \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde $pmax$ = precipitación media correspondiente al mes más lluvioso (mm), y P = precipitación media anual (mm).

3.6. Cálculo de la erosión eólica

Para conocer la erosión eólica en el área de estudio, se instalaron cinco equipos colectores tipo *Big Spring Number Eight* (BSNE) durante un año y así poder incluir los cuatro períodos estacionales (primavera, verano, otoño e invierno). Cada equipo BSNE consta de un tripie con dos cajas recolectoras ajustadas a uno y dos metros, cada una empotrada en una base giratoria con una veleta. Los colectores BSNE, desarrollados por Fryrear (1986, 1995) y Fryrear y Saleh (1993) permiten la entrada del 86 % del material que pasa por la abertura de la caja colectora

y retienen el 96 % del material una vez que entra a la caja (Breshears *et al.*, 2003). Después de doce meses, se retiraron las muestras de polvo colectadas en las cajas de los equipos BSNE. Las muestras se pesaron y en función del tamaño de la caja y del peso de la muestra se hizo el cálculo obteniéndose los resultados en tonelada por hectárea por año.

3.7. Análisis geoquímico

Se colectaron y analizaron 22 muestras de suelos residenciales y 5 muestras de polvo suspendido a dos metros de altura acumulado durante un año en colectores BSNE. Las muestras de suelos residenciales corresponden con los periodos de primavera y otoño. Las muestras de suelos residenciales se tamizaron a tamaño menor a malla 200, realizándose el procedimiento de acuerdo a la *American Society for Testing and Materials Methods* (ASTM) bajo los métodos C-136 y D-2216. Los valores de cobre para muestras de suelos residenciales fueron obtenidos por espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) en Laboratorios *ALS-CHEMEX* (Ontario, Canadá) por el método MS-41.

4. Resultados y Discusión

4.1. Clima

Los datos obtenidos por la estación meteorológica indican registros de temperatura media anual de 19.65 °C, con temperatura media en primavera de 23.72 °C, verano 24.22 °C, otoño 17.1 °C e invierno 13.59 °C. La humedad media anual es del 45.46 %, siendo el verano la estación con mayor humedad (68.97 %) y primavera la estación con menor humedad (26.64 %). La presión barométrica media anual es de 758.5 mm, manteniéndose similar en todas las estaciones del año, siendo la más baja en primavera con 755.1 mm y la más alta en invierno con 762.3 mm. La precipitación media anual obtenida en este trabajo es de 0.19 mm, las estaciones de verano y otoño registran los mayores valores, de 4.57 mm y 0.25 mm respectivamente. En el periodo de primavera no se reportaron lluvias para los años 2008 y 2009. La velocidad de viento promedio anual fue de 0.723 km/hr, registrándose los mayores valores en la primavera con 1.3 km/hr, y en menor intensidad los valores registrados para invierno con 0.75 km/hr, otoño con 0.54 km/hr y verano con 0.3 km/hr. La dirección preferencial del viento es al NE con un 39 % de los datos registrados, correspondiendo para los meses de verano las mayores velocidades en dicha dirección (48 %), mientras que para el otoño existe una dirección SW casi con la misma magnitud que la NE. Existe un tercer vector de dirección SE que se presenta a lo largo de todo el año, que se puede considerar casi constante, aumentando levemente en primavera.

4.2. Características de los jales

El volumen de jales estimado es de 1505633.08 m³. Las densidades obtenidas de las muestras de las cinco laderas varían de 1.9 a 2.4 g/cm³, con una densidad promedio de 2.2 g/cm³ (Tabla 2) de tal forma que el tonelaje total estimado es de 3312392.8 toneladas.

Los jales de la Presa I están principalmente compuestos de cuarzo, ortoclasa, y muscovita. Los análisis granulométricos muestran que > 80% de los jales tienen granulometrías gruesas a medias (Tabla 3). La mayoría de los jales se caracterizan por una textura arenosa, con poca capacidad de retención de agua. Sin embargo, un área de cerca de tres hectáreas localizada en la parte sur de los jales se compone de residuos de procesos de flotación, los cuales se caracterizan por tener granulometrías finas, texturas arcillosas y constituye una zona en la que se acumula agua durante la temporada de lluvias. Los análisis geoquímicos de los jales muestran pH promedio de 3.87 y conductividad eléctrica de 340.1 μS/cm y contenidos de metales relativamente bajos en comparación con otros sitios mineros (Meza-Figueroa *et al.*, 2009; Romero *et al.*, 2008). La formación de estas sales de granulometrías muy finas, es dependiente del clima y no siempre ocurren en superficie ya que son fácilmente erosionadas por el viento y por el agua debido a su alta solubilidad. Debido a que la Presa I de jales está rodeada de viviendas, los suelos residenciales están visiblemente impactados por el transporte de material de los jales, son suelos principalmente arenosos y sin vegetación. Debido a que los procesos erosivos controlan el transporte del material de jales a la zona urbana, se evaluó la erosión hídrica tanto en suelos como en jales.

La distribución de cárcavas en los jales, así como su topografía y escorrentía principal se muestran en la Figura 3. La zona con mayor densidad de cárcavas corresponde con la Z11 y Z13, la topografía de los montículos y sus pendientes favorecen las condiciones necesarias para que la mayor cantidad de flujo de escorrentía producto de las precipitaciones en el área norte de los jales, fluya por esas zonas, afectando su superficie y produciendo mayor acarreo de partículas. La Tabla 4 muestra la densidad de cárcavas para cada zona de la Figura 3.

4.3. Erosión hídrica

Para estimar la erosión hídrica en los jales, las principales diferencias en los parámetros se dieron en el contenido de materia orgánica y cubierta vegetal, que son inexistentes en los jales. La Figura 4 muestra las mayores tasas de erosión durante los meses de julio y agosto, principalmente para los jales de granulometrías gruesas (277.9 Ton/ha/mes) y un poco menor para los jales de granulometrías finas (97.8 Ton/ha/mes). La suma de estas dos tasas de erosión representa el 68 % del total del material erosionado durante el año.

Los parámetros evaluados para el cálculo de la erosión hídrica de acuerdo a la Ecuación 3, se consideraron para

Tabla 2. Densidades obtenidas por muestra y densidad promedio de los jales de la presa I.

Muestras	Peso total de la muestra	Peso en el densímetro (gr)	Densidad gr/cm ³	Muestras	Peso total de la muestra	Peso en el densímetro (gr)	Densidad gr/cm ³
Malla 10			Malla 18				
LP4-M1	89.2	7.79	2.28	LP4-M1	236.2	1.49	2.3
LP2-M1	63.4	3.08	2.78	LP2-M1	285.4	2.2	2.68
LP4-M2	90.5	2.58	2.32	LP4-M2	236.5	1.34	2.37
LP2-M2	35	2.31	2.02	LP2-M2	312.3	1.13	2.3
LP4-M3	7.8	0.7	2.06	LP4-M3	8.9	0.46	1.45
LP2-M3	126.6	2.62	2.44	LP2-M3	282.5	1.69	2.45
LP4-M4	10.4	1.15	1.85	LP4-M4	6.7	0.66	1.77
LP2-M4	76.8	3.08	2.44	LP2-M4	298.2	1.92	3.12
Malla 35			Malla 60				
LP4-M1	243	2.58	2.35	LP4-M1	178	0.91	1.9
LP2-M1	289.5	1.76	2.3	LP2-M1	184	1.48	1.95
LP4-M2	231.2	1.93	1.98	LP4-M2	174.4	1.4	2.36
LP2-M2	327.3	2.02	2.24	LP2-M2	181.5	1	1.85
LP4-M3	10.6	0.78	1.64	LP4-M3	30.8	1.08	1.71
LP2-M3	203	2.33	2.3	LP2-M3	121.7	1.26	2.32
LP4-M4	13.3	0.85	1.52	LP4-M4	50	0.88	2
LP2-M4	283.4	2.72	1.74	LP2-M4	147	1.27	2.46
Malla 120			Malla 230				
LP4-M1	103.5	0.98	1.84	LP4-M1	33.3	1.97	1.9
LP2-M1	111.4	2.64	2.16	LP2-M1	40.5	1.05	1.93
LP4-M2	107.2	1.81	2.12	LP4-M2	38	1.31	2.18
LP2-M2	90.5	1.24	2.06	LP2-M2	28	1.44	2.2
LP4-M3	296.9	1.81	1.98	LP4-M3	263.5	1.23	2.1
LP2-M3	77.5	1.02	2.04	LP2-M3	28.5	0.85	1.59
LP4-M4	300.2	1.89	2.07	LP4-M4	302.2	1.17	2.14
LP2-M4	54.5	1.32	1.75	LP2-M4	18.8	0.87	1.45
Fondo			Muestras		Densidad promedio de cada muestra	Peso total de cada muestra	
LP4-M1	13	0.77	1.74	LP4-M1	2.156009819	896.2	
LP2-M1	17.5	0.7	1.72	LP2-M1	2.334035495	991.7	
LP4-M2	15.7	0.55	1.62	LP4-M2	2.210814773	893.5	
LP2-M2	9	0.68	2.28	LP2-M2	2.161922529	983.6	
LP4-M3	142	1	1.59	LP4-M3	1.927701512	760.5	
LP2-M3	13	0.88	2.3	LP2-M3	2.325970919	852.8	
LP4-M4	198.5	2.09	2.17	LP4-M4	2.099378191	881.3	
LP2-M4	10.7	0.88	1.52	LP2-M4	2.373972341	889.4	
Densidad promedio total							
2.2045							

los suelos de tipo Xerosol háplico y Feozem háplico, que son predominantes en Nacozari. Las mayores tasas de erosión se obtuvieron para los meses de julio y agosto para ambos suelos, siendo la mayor de 197.2 Ton/ha/mes para el suelo Feozem háplico y en menor proporción el Xerosol háplico con un valor de 73.52 Ton/ha/mes (Figura 5). Las menores tasas de erosión se presentan en los meses de abril y mayo para ambos tipos de suelo (Figura 5). En la estimación de la erosión hídrica anual, los rangos se elevan significativamente a 224.72 Ton/ha/año para el suelo Xerosol háplico, mientras que para el Feozem háplico es de 473.22 Ton/ha/año. Estos rangos entran en una clasificación

de erosión muy severa, es decir mayor a 200 Ton/ha/año (SEMARNAT, 2002, 2007). Los índices de aridez de Lang y Martonne, así como el índice de erosión de Fournier se indican en la Tabla 5.

En promedio, para Nacozari, los jales se erosionan un 10 % más que los suelos bajo las mismas condiciones de clima, lo que favorece el acarreo de material de los jales hacia la zona urbanizada de Nacozari. Las mayores tasas de erosión para jales y suelos coinciden con los meses de mayor precipitación y evaporación (Figura 5).

Tabla 3. Porcentajes promedio en base a clasificación granulométrica.

Muestra	Guijarros	Grava	Arena muy gruesa	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Arena muy fina	Limos
LP1-M1	0.09	7.39	27.27	38.8	17.91	5.64	1.44	0.96
LP1-M2	0.14	7.96	29.65	29.23	20.45	5.67	1.46	0.86
LP1-M3	0.17	10.43	29.59	32.4	18.85	5.3	1.43	1.31
LP1-M4	0.11	12.39	33.12	30.34	15.93	4.71	1.49	1.45
LP2-M1	0	5.74	28.09	29.04	19.29	10.99	4.24	1.95
LP2-M2	0	3.93	36.02	32.6	16.51	7.41	2.15	0.96
LP2-M3	0	3.93	36.02	32.6	15.5	7.5	2.2	0.94
LP2-M4	0	7.11	30.48	32.57	18.77	6.96	2.28	1.52
LP3-M1	0.13	7.18	26.39	30.11	18.44	10.88	4.01	2.47
LP3-M2	0	8.78	28.46	27.07	16.73	11.87	4.66	2.06
LP3-M3	0.09	8.51	25.33	28.7	18.63	11.65	4.44	2.29
LP3-M4	0	8.36	27.11	28.23	18.04	11.42	4.52	2.09
LP4-M1	0	9.84	25.34	28.13	19.71	11.6	3.65	1.4
LP4-M2	0	9.42	25.46	26.29	20.38	11.92	4.21	1.9
LP4-M3	0	1.91	1.35	1.41	5.46	42.77	30.33	16.6
LP4-M4	0	1.24	1.08	1.58	6.94	36.01	31.28	21.15
LP5-M1	0	7.97	29.09	30.47	17.66	9.16	3.5	2.01
LP5-M2	0	7.93	30.06	31.76	17.71	8.47	2.53	1.4
LP5-M3	0	8.07	29.89	28.73	17.66	9.9	3.55	1.72
LP5-M4	0	11.18	31.65	27.64	15.54	8.98	3.29	1.51

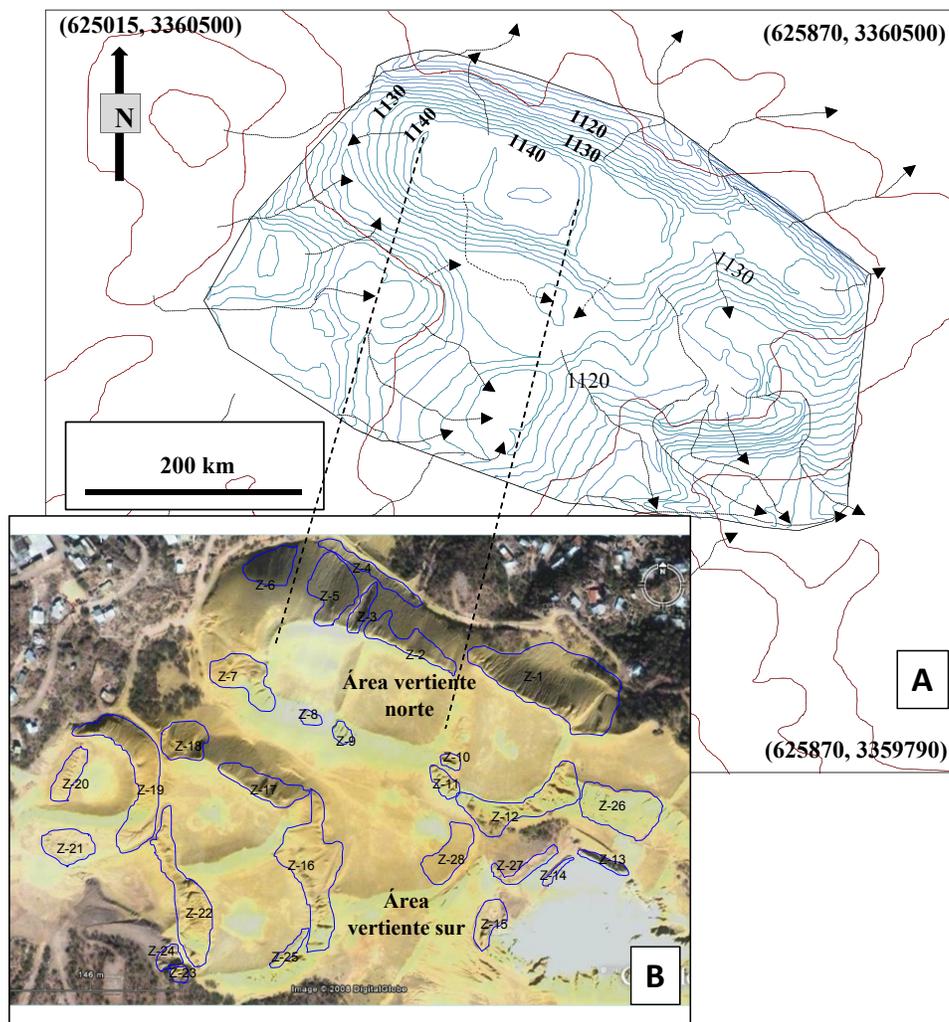


Figura 3. (A) Topografía obtenida para los jales de la presa I, indicando escorrentía principal y (B) zonas de máxima formación de cárcavas.

Tabla 4. Cálculo de densidad de cárcavas en los jales de Nacoziari de García.

Zona	Longitud real en m	Área real en m ²	Densidad de cárcavas en Km/Km ²
1	714.41	18463.76	38
2	301.09	4615.94	65
3	86.44	1648.55	52
4	115.13	3626.81	32
5	279.66	5934.78	47
6	188.86	3560.87	53
7	159.81	3626.81	44
8	21.79	659.42	33
9	72.64	989.13	73
10	25.42	395.65	64
11	107.14	1318.84	81
12	366.83	8044.92	46
13	81.72	989.13	83
14	14.53	329.71	44
15	78.09	2505.8	31
16	437.66	10392.46	42
17	230.63	4127.97	56
18	168.89	3956.52	43
19	381.36	10392.46	37
20	105.33	2110.14	50
21	88.98	2439.85	36
22	323.25	9100	36
23	69.01	989.13	70
24	121.67	2242.03	54
25	58.11	1450.72	40
26	161.62	7477.82	22
27	123.49	3785.07	33
28	110.78	4945.65	22

4.4. Erosión eólica

Nacoziari de García tiene un promedio anual de velocidades de vientos bajo en comparación con otras zonas semiáridas, sin embargo, los vientos presentes en la zona son suficientemente fuertes en invierno y primavera para tener un efecto en la erosión de los jales. La erosión hídrica de los jales también contribuye a la suspensión de polvos. Los datos obtenidos de los colectores BSNE para estimar la erosión eólica indican un rango de 1 a 14.42 Ton/ha/año para una altura de un metro y de 6.08 Ton/ha/año promedio para una altura de dos metros. La Figura 6 muestra los datos obtenidos para la erosión eólica estimada a partir de los colectores BSNE. En la Figura se observa un incremento en el polvo colectado a dos metros de altura en la dirección preferencial de vientos al NE (39 %) a partir de los registros locales de la estación de clima instalada para este estudio. En este mismo estudio se observaron las mayores velocidades de viento en verano, lo que coincide con el período estacional de formación de sales eflorescentes en la superficie de los jales y la mayor erosión hídrica para jales y suelos. Para evaluar el impacto de las sales eflorescentes enriquecidas en metales se consideró como ejemplo los resultados de análisis de cobre en las muestras

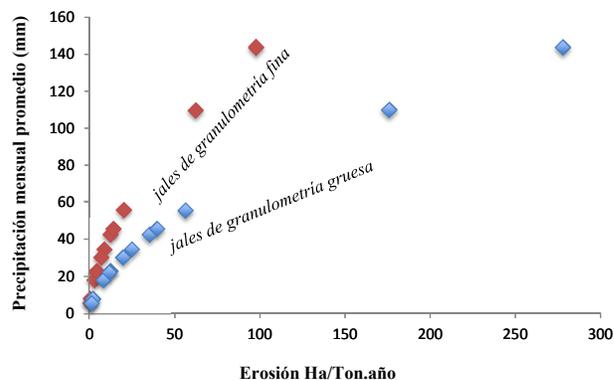


Figura 4. Comportamiento de erosión hídrica estimada en función de la precipitación mensual promedio para jales con granulometría fina y gruesa.

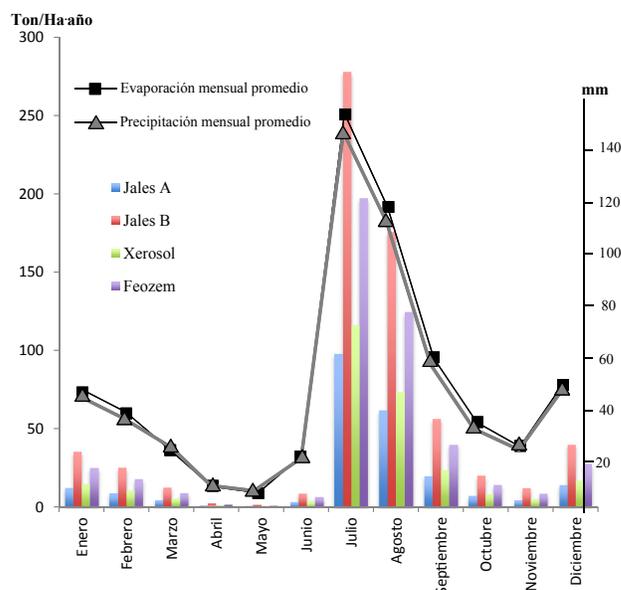


Figura 5. Relación de erosión hídrica (Ton/Ha.año) y precipitación/evaporación mensual promedio para: Jales A (granulometría fina), Jales B (granulometría gruesa), suelo Xerosol y suelo Feozem.

de polvo de los colectores BSNE a uno y dos metros. La Figura 7 muestra la distribución espacial de cobre en polvo suspendido a dos metros de altura y la dirección principal de vientos en Nacoziari. Los valores de Cu en polvos suspendidos se incrementan al doble del valor promedio de los suelos residenciales, y tres veces más que los suelos naturales. Esto indica un claro impacto del material de los jales a la atmósfera y la principal ruta de exposición a metales solubles para los residentes de Nacoziari. La Figura 8 muestra la distribución de cobre en suelos residenciales de Nacoziari correspondientes a primavera y otoño. La mayoría de las muestras analizadas tienen contenidos de cobre superiores al valor del fondo geoquímico para los suelos naturales de Nacoziari (datos tomados de Meza-Figueroa *et al.*, 2009). Los valores además muestran algunas diferencias en el incremento de valores de cobre

de un período a otro, siendo las muestras localizadas en las cercanías a la presa de jales las que presentan la mayor variabilidad.

5. Conclusiones

La definición de la topografía de los jales permitió un conocimiento de las tendencias de los flujos principales de

escorrentía. El análisis de densidad de cárcavas permitió una estimación del índice de Fournier y una adecuada utilización de la RUSLE para concluir que el proceso erosivo dominante en los jales de la Presa I de Nacozari es la erosión hídrica, provocando la dispersión de los jales hacia la zona urbana e impactando a los suelos residenciales y el sistema de drenaje. La erosión hídrica de los jales con respecto a la erosión de los suelos naturales del sitio es diez veces mayor, es decir, por cada tonelada de suelo erosionada, son removidas diez toneladas de jales. Por otra parte, la erosión eólica aunque es un proceso menos dominante, puede causar mayores daños a la salud humana ya que contienen cantidades elevadas de cobre y la dispersión de cobre es hacia la zona urbanizada. Se señala la importancia de contar con datos climatológicos locales (principalmente de dirección e intensidad de vientos) para entender los procesos de dispersión de contaminantes en zonas con climas áridos y semi-áridos.

Tabla 5. Índices de aridez de Lang y Martone, así como índice de erosión de Fournier en base a datos de la estación de clima de Nacozari, considerando datos del período de 1960 al 2006.

Años	Índice de aridez de Martone	Clasificación	Índice de Lang	Clasificación	Índice de erosión de Fournier
60's	51	Húmedo	17.3	Estepario	6.3
70's	47	Húmedo	15.2	Estepario	5.3
80's	66	Per-húmedo	22.8	Estepario	5.8
90's	59	Húmedo	20.8	Estepario	5.5
20's	47	Húmedo	17.4	Estepario	4.1

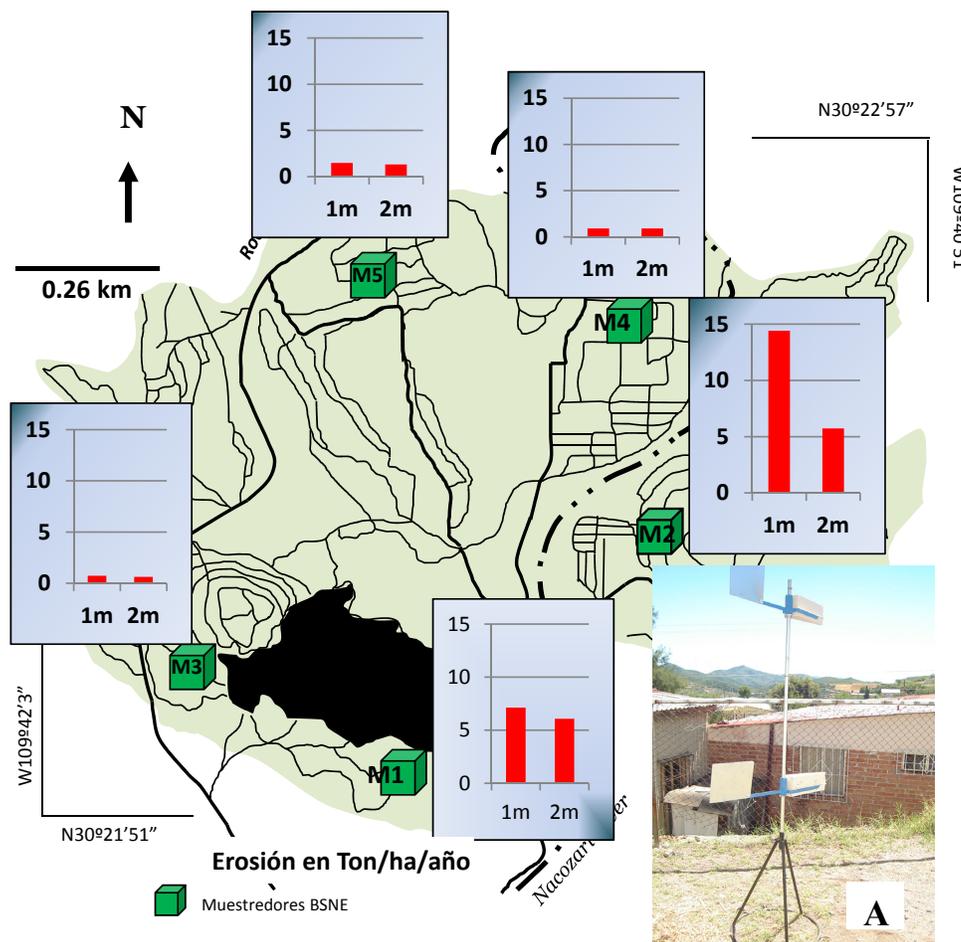


Figura 6. Cantidad promedio anual de erosión eólica expresada en toneladas por hectárea por año y localización de colectores BSNE. La fotografía A muestra un colector con cajas receptoras de polvo suspendido a uno y dos metros de altura.

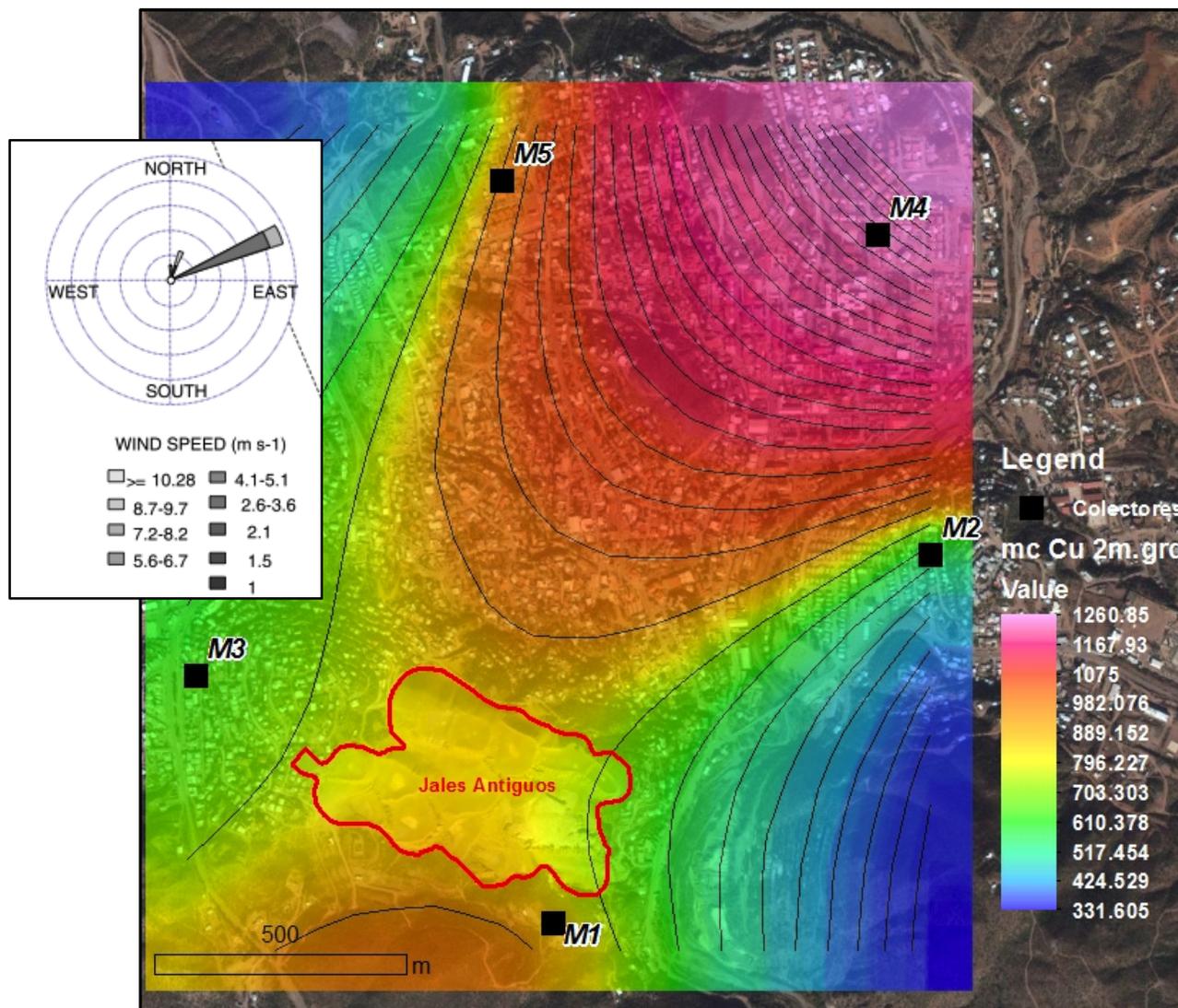


Figura 7. Niveles de cobre en mg/kg para muestras de polvo a dos metros de altura en colectores tipo BSNE. Rosa de vientos tomada de Meza-Figueroa et al. (2009).

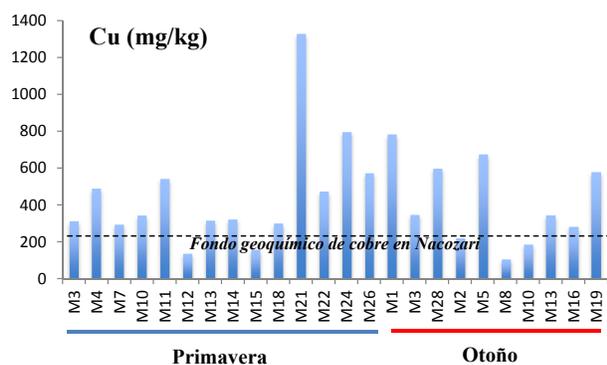


Figura 8. Niveles de cobre en suelos residenciales en Primavera y Otoño. La línea punteada indica el valor de cobre (216 mg/kg) del fondo geoquímico en Nacozari (valor tomado del promedio de 6 muestras de suelo natural reportados en Meza-Figueroa et al., 2009)

Agradecimientos

Esta investigación se realizó con fondos EPA-STAG al Dean Carter Binational Center for Environmental Health Science, The University of Arizona (R. Maier y D. Meza-Figueroa) Grant 2 P42 ES04940-11 National Institute of Environmental Health Sciences, Superfund Basic Research Program, NIH (R. Maier) y con fondos del Contrato de Asistencia Técnica a la Universidad de Sonora por la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF), EPA Región 9 (D. Meza-Figueroa). Los autores agradecen a Emily Pimentel (EPA Region 9) y Víctor del Castillo por sus valiosos comentarios durante el desarrollo del proyecto.

Referencias

- Alvarado, V.J., Volke, T.L., 2004, Informes de Resultado del Proyecto: Método de Análisis y Propuesta para el Manejo de los Residuos Mineros del Sitio de Nacozari: Sonora, Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, SEMARNAT.
- Breshears, D.D., Whicker, M.P., Johansen, M.P., Pinder, J.E., 2003, Wind and water erosion and transport in semiarid shrubland, grassland, and forest ecosystems: Quantifying dominance of horizontal wind-driven transport: *Earth Surf. Processes Landforms*, 28, 1189-1209.
- Compendio Estadístico del Estado de Sonora, 2010, Gobierno del Estado de Sonora: Sonora, México, 119 páginas.
- De Martonne, E., 1926, Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité: *La Meteorologie*, 449-458.
- Dold, B., Fontboté, L., 2001, Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing, Special Issue: Geochemical studies of mining and the environment: *Journal of Geochemical Exploration*, 74, 3-55.
- Dold, B., Fontboté, L., 2002, A mineralogical and geochemical study of element mobility in sulfine mine tailings of Fe oxide Cu-Au deposits from the Punta del Cobre belt, northern Chile: *Chemical Geology*, 189, 135-163.
- Fournier, F., 1960, *Climat et erosion*: París, Francia., Presses Universitaires de France, 204p.
- Fryrear, D.W., 1986, A field dust sampler: *Journal of Soil and Water Conservation*, 41, 117-120.
- Fryrear, D.W., Saleh, A., 1993, Field wind erosion: vertical distribution: *Soil Science*, 155(4), 294-300.
- Fryrear, D.W., 1995, Soil losses by wind erosion: *Soil Science Society of America Journal*, 59, 668-672.
- Gabriels, D., 2000, Rain erosivity in Europe, in Rubio, L., Asins, S., Andreu, V., de Paz, J.M., Gimeno, E., (eds.), *ESSC III International Congress, Key notes, Man and Soil at the Third Millennium*, Valencia, España, 31-43.
- Jung, M.C., 2001, Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea: *Applied Geochemistry*, 16(11-12), 1369-1375.
- Lang, R., 1915, Versuch einer exakten Klassifikation der Boden in klimatischer und geologischer Attempt to an exact classification in climatic and geological regard. *International Mitteil Boden*, 5, 312-346.
- Mendez, M.O., Maier, R.M., 2008, Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments: *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7, 47-59.
- Meza-Figueroa, D., Maier, R.M., De la O-Villanueva, M., Gómez-Alvarez, A., Moreno-Zazueta A., Rivera, J., Campillo, A., Grandlic, C.J., Anaya, R., Palafox-Reyes, J., 2009, The impact of unconfined mine tailings in residential areas from a mining town in a semi-arid environment: Nacozari, Sonora, Mexico: *Chemosphere*, 77, 140-147.
- Moncur, M.C., Ptacek, C.J., Blowes, D.W., Jambor, J.L., 2004, Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment: *Applied Geochemistry*, 20, 639-659.
- Morgan, R.P.C., 1983, The non-dependence of rainfall and soil erodibility: *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, 323-338.
- Morgan, R.P.C., 1997, *Erosión y conservación del suelo*: Madrid, España, Mundi-Prensa Libros, 343 p.
- Pando-Moreno, M., Gutiérrez-Gutiérrez, M., Maldonado-Hernández, A., Palacio-Prieto, J.L., Estrada-Castillón, A.E., 2003, Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica: Investigaciones geográficas, *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 51, 23-36.
- Romero, F.M., Armienta, M.A., Gutiérrez, M.E., Villaseñor, G., 2008, Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros: *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24(2), 43-54.
- Romero, F.M., Gutiérrez-Ruiz, M., 2010, Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 43-53.
- SEMARNAT, 2002, Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana: México, D.F., SEMARNAT.
- SEMARNAT-INE, 2007, Formulación de indicadores para calcular y monitorear la desertificación en México: México, SEMARNAT.
- Simanton, J.R., Renard, K.G., 1982, The USLE rainfall factor for southwestern U.S. rangelands: Department Agriculture, *Agricultural Reviews and Manuals, Western Series*, 26, 50-62.
- Wischmeier, W. H., 1959, A rainfall erosion index for a Universal Soil-Loss Equation: *Soil Science Society Proceedings*, 23, 246-249.
- Wischmeier, W.H., Smith, D., 1978, Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning: Washington DC, USDA-ARS *Agriculture Handbook* 537, 58 p.

Manuscrito recibido: Junio 3, 2011.

Manuscrito corregido recibido: Julio 1, 2012.

Manuscrito aceptado: Agosto 18, 2012.