

ANEXO

1.8

Informe final del grupo del agua



Proyecto:

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL Y PROPUESTA DE REMEDIACIÓN-REPARACIÓN-
COMPENSACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO SONORA AFECTADA POR EL
DERRAME DEL REPRESO "TINAJAS 1" DE LA MINA BUENAVISTA DEL COBRE,
CANANEA, SONORA.**

INFORME FINAL DEL GRUPO DEL AGUA

Miembros del grupo:

Dra. Blanca Prado – UNAM

Dr. Lizeth Caballero – UNAM

Dr. Lucy Mora – UNAM

Dr. Eric Morales – UNAM

Dr. Luis Méndez – ITSON

Dr. Agustín Robles – ITSON

Abril 15 del 2016

CONTENIDO

I. Resumen Ejecutivo para tomadores de decisión.....	3
Resumen Capítulo II: Actividades de Campo.....	3
Resumen Capítulo III: Migración vertical: evidencias de excavaciones.....	4
Resumen Capítulo IV: Experimentos en columnas.....	4
Resumen Capítulo VI: Distribución, dispersión por efecto de los Huracanes Odile y Norberto.....	5
Resumen Capítulo VII: Modelo conceptual hidrogeológico (tRIBS y HEC-HMS).....	7
Resumen Capítulo VIII: Transporte de sedimentos.....	8
II. Actividades de campo.....	10
Análisis Granulométrico.....	11
Pruebas de Infiltración con el método de doble cilindro.....	13
Muestreo de sedimentos sobre el cauce del río (excavaciones).....	34
Descripción general de las excavaciones.....	35
Instalación de piezómetros.....	36
Instalación de Estaciones Climáticas de alta resolución.....	42
III. Excavaciones y Movimiento Vertical.....	44
Muestreo de sedimentos sobre el cauce del río (excavaciones).....	45
Descripción general de las excavaciones.....	47
Caracterización de los perfiles de excavación.....	56
IV. Experimentos en columnas.....	63
Objetivos.....	68
Selección de los sitios de muestreo y caracterización de muestras.....	69
Caracterización de las muestras:.....	73
Sedimentos arroyo Tinajas.....	80
Evaluación del efecto del DAM en la porosidad y estructura de suelos y sedimentos mediante micro tomografía.....	131
V. Condiciones hidrogeoquímicas del agua subterránea.....	145
Análisis isotópico.....	145
VI. Distribución, dispersión por efecto de los Huracanes Odile y Norberto.....	148
Estimación de la precipitación media durante los eventos.....	149

VII. Modelo conceptual hidrogeológico (tRIBS y HEC-HMS).....	168
Estimación de Escurremientos.....	170
Estimación de Escurremientos mediante el Método Racional.....	170
Justificación de uso de modelos hidrológicos.....	175
Modelo Hidrológico Semi-distribuido HEC-HMS.....	175
Modelo Hidrológico distribuido tRIBS.....	178
Dominios espaciales de HEC-HMS y tRIBS.....	181
Datos de entrada a los modelos HEC-HMS y tRIBS.....	182
Representación de acuífero del Rio Bacanuchi y condiciones iniciales del Modelo tRIBS	184
Datos climáticos de entrada a los modelos.....	187
Experimentos numéricos con HEC-HMS y tRIBS.....	190
Resultados Modelos Hidrológicos (tRIBS y HEC-HMS).....	191
Bibliografía.....	198
VIII. Transporte de sedimentos.	200
Transporte de sedimentos.....	203
Metodología.....	204
Resultados preliminares.....	210
Resultados de las simulaciones en condiciones saturadas del terreno (no hay infiltración)...	214
Resultados de las simulaciones en condiciones no-saturadas (infiltración).....	215
Resultados del transporte de sedimentos.....	215

I. Resumen Ejecutivo para tomadores de decisión.

El día 6 de agosto de 2014 ocurrió un accidente en la mina Buenavista del Cobre y se derramaron 40,000 m³ de solución ácida (pH = 2.2) en el Arroyo Tinajas, Municipio Cananea, Sonora. La solución derramada estaba enriquecida con hierro, aluminio, cobre y otros metales pesados disueltos (solución ácida ferro-cuprífera). A raíz de dicho evento, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) y la Universidad de Sonora (SONORA) elaboraron una propuesta de investigación bajo el nombre de **DIAGNÓSTICO AMBIENTAL Y PROPUESTA DE REMEDIACIÓN-REPARACIÓN-COMPENSACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO SONORA AFECTADA POR EL DERRAME DEL REPRESO TINAJAS 1 DE LA MINA BUENAVISTA DEL COBRE, CANANEA, SONORA**.

La propuesta fue financiada por el FIDEICOMISO del Río Sonora y para su ejecución se formaron grupos de investigación acordes a distintas áreas de especialidad. Uno de los grupos formados fue el Grupo del Agua, el cual propuso llevar a cabo un estudio hidrogeológico e hidrogeológico en la parte alta de la cuenca del Río Sonora para entender la dinámica de las aguas superficiales y subterráneas y su interacción con sedimentos y material acuífero y que permitan evaluar el destino ambiental del derrame. Los objetivos específicos del grupo del agua fueron evaluar la distribución y transporte (vertical y horizontal) de la solución preñada proveniente del represo Tinajas TN-1 de la mina Buena Vista inmediatamente después de derrame a lo largo del cauce de la cuenca del Río Sonora y en particular en el arroyo Tinajas y el Río Bacanuchi (parte alta de la cuenca). También se propuso evaluar la influencia de los eventos meteorológicos extraordinarios (Norberto y Odile) en la re-distribución del derrame desde el represo Tinajas hasta la presa del Molinito. El grupo del agua inició oficialmente los trabajos de investigación en Febrero del 2015 cuando se recibió el apoyo financiero del FIDEICOMISO del Río Sonora. Para cumplir con los objetivos propuestos, el grupo del agua realizó varios estudios y los resultados son resumidos a continuación:

• Resumen Capítulo II: Actividades de Campo.

De Febrero del 2015 a Marzo del 2016, el grupo del agua realizó 15 visitas oficiales al área de estudio. Algunas de estas visitas fueron llevadas a cabo en colaboración/apoyo con actividades realizadas por otros grupos de investigación del proyecto (Línea Base, Análisis Presa Molinito, Impacto Ambiental). Las salidas de campo sirvieron para recolectar muestras de sedimentos, agua superficial y subterránea. También se realizaron múltiples pruebas experimentales en campo y se extrajeron columnas intactas para realizar pruebas de laboratorio. Entre las pruebas de campo destacan los análisis granulométricos, las pruebas de infiltración, los censos de captación de agua subterránea y estudios de caracterización de suelos en las laderas del cauce del río y las áreas de inundación. Además, se instalaron 5 piezómetros para recolección continua de muestras de calidad de agua y monitoreo de niveles de mantos freáticos. También se instalaron dos estaciones

climáticas de alta resolución en la parte alta de la cuenca que miden precipitación, velocidad de viento, temperatura del aire, humedad relativa y humedad de suelo a 10 y 30 cm de profundidad.

- **Resumen Capítulo III: Migración vertical: evidencias de excavaciones**

Para evaluar la migración vertical y buscar evidencias de la extensión del derrame se realizaron seis excavaciones en la parte alta de la cuenca del Río Bacanuchi. Se hicieron dos excavaciones dentro del arroyo Tinajas, una en un arroyo no afectado por el derrame TESTIGO- y tres en puntos sobre el cauce principal del Río Bacanuchi, al sur del arroyo Tinajas.

Los resultados de estas excavaciones sugieren que: (a) el derrame pudo haberse infiltrado en zonas del arroyo Tinajas y alcanzado profundidades de más de 3 m, (b) el derrame pudo haber alcanzado hasta antes del poblado de Bacanuchi y (c) hay evidencias de más de un derrame ya que se encontraron varios paquetes de contaminantes en distintos horizontes del suelo- A raíz de estos resultados el grupo de Impacto Ambiental (liderado por el Dr. Francisco Romero) llevó a cabo excavaciones similares a lo largo de todo el cauce del Río Sonora. Dichos resultados son presentados en el reporte del grupo de Impacto Ambiental. En todo caso es necesario determinar la extensión tanto longitudinal como vertical de la afectación por el derrame, así como investigar si la porción del derrame que se infiltró puede constituir un riesgo para el agua subterránea en la cuenca del arroyo Tinajas y las porciones afectadas del Río Bacanuchi. En caso de ocurrir la removilización del material precipitado, su movimiento sería vertical a través de la zona no saturada.

- **Resumen Capítulo IV: Experimentos en columnas**

Para evaluar la movilidad de los metales contenidos en el Drenaje Acido de Mina (DAM) en suelos/sedimentos, se realizaron experimentos en columnas intactas de suelo y en columnas empacadas con sedimentos. Se colectaron columnas de suelo y sedimentos del río, en cinco sitios localizados en la parte alta de la cuenca del Río Bacanuchi y un sitio en el cauce del Río Sonora a la altura del Pueblo de Sinoquipe (Cerro Colorado). En el experimento se aplicaron uno o varios riegos con el DAM, y uno o varios riegos con una solución de fuerza iónica similar a la del agua del río. Los resultados muestran que el paso del DAM modifica la estructura y la distribución de tamaño de poros del suelo/sedimento, modificando con ello la velocidad de infiltración/tiempo de contacto del DAM con las partículas de suelo/sedimento. En cuanto a la retención, se observaron comportamientos diferentes entre los diferentes metales contenidos en el DAM, así como entre los diferentes suelos/sedimentos estudiados: algunos metales fueron inertes y el resto retenidos, de estos últimos, solo en algunos casos fue reversible el proceso. Además, el paso de la solución del DAM por el suelo/sedimento, desorbe elementos naturales. Fue posible identificar el comportamiento de cada uno de los metales en cada uno de los suelos y sedimentos estudiados. El conjunto de resultados permite concluir que los suelos de la región tiene la capacidad de amortiguar el paso del DAM, dicha capacidad es variable entre suelos y aumenta a medida que nos alejamos

del arroyo Tinajas, en dirección sur. La siguiente tabla presenta el resumen de la capacidad de absorción-desorción en suelos del área que fue mayormente afectada por el derrame:

<i>Tabla resumen:</i>	
<i>Adsorción – desorción de elementos en/desde el suelo/sedimento</i>	
<u>Suelo Parte Alta Arroyo Tinajas</u>	
<i>Elementos que se liberan</i>	<i>Elementos que son retenidos</i>
<i>Sr>Na>Pb>Mn,Ca</i>	<i>Fe>Al>Zn>As,Cu>Li, Cr,Co,Cd,Ni</i>
<u>Sedimento Salida Arroyo Tinajas</u>	
<i>Elementos que se liberan</i>	<i>Elementos que son retenidos</i>
<i>Sr>Na>Pb>Ca>Mn>Mg>Co>Cd</i>	<i>Fe>Al>Zn>Cu>As>Cr>Li>Ni</i>
<u>Sedimento Cauce Río Bacanuchi</u>	
<i>Elementos que se liberan</i>	<i>Elementos que son retenidos</i>
<i>Sr>Na>Pb>Ca</i>	<i>Fe>As>Al>Cu,Ni>Cd>Co,Li>Zn,Mg>Mn</i>
<u>Suelo terraza Río Bacanuchi</u>	
<i>Elementos que se liberan</i>	<i>Elementos que son retenidos</i>
<i>Sr>Na>Ca</i>	<i>Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Zn>>Li, Mg</i>

- **Resumen Capítulo VI: Distribución, dispersión por efecto de los Huracanes Odile y Norberto.**

El derrame ocurrió durante la época de lluvias y tres semanas después, hubo dos eventos climáticos que ocasionaron precipitaciones y escurrimientos en el área de estudio por arriba del promedio. El grupo del agua investigó el impacto de los Huracanes Norberto y Odile durante el mes de Septiembre, 2014 en la cuenca alta del Río Sonora. Para elaborar este análisis, se obtuvieron datos precipitación de 8 estaciones de la Comisión Nacional del Agua / Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA / SMN) y de escurrimientos de la estación hidrométrica del Orégano II. Con los datos de precipitación de CONAGUA, se generaron mapas de precipitación para los dos eventos utilizando el método de interpolación de Thiessen. Sin embargo, a raíz de la falta de estaciones climatológicas en la región, también se utilizaron datos de precipitación de Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte América (North American Land Data Assimilation System, NLDAS por sus siglas en inglés). Dichos datos se utilizaron para generar mapas de variabilidad espacial y temporal de la lluvia en base a las estaciones de CONAGUA. Las estaciones oficiales de CONAGUA (sur a norte) de Sinoquipe, Arizpe, Bacoachi, Bacanuchi y Cananea registraron lluvias que varían de 18 a 63 mm para el Huracán Norberto en el período del 2 al 10 de Septiembre del 2014. En las mismas estaciones de CONAGUA se registraron variaciones de 105 a 213 mm para el Huracán Odile en el período del 11 al 26 de Septiembre del 2014.

Las precipitaciones registradas después del derrame en la región de Cananea (Río Bacanuchi) generaron escurrimientos superficiales significativos. Sin embargo, no existen estaciones de aforo del escurrimiento en la parte alta de la cuenca que permitan relacionar y explorar la relación lluvia-escurrimiento que ocurrió en la región más afectada por el derrame. Para estimar la generación de escurrimientos a raíz de los Huracanes Norberto y Odile se analizaron los datos de la estación hidrométrica del Oregano II. Dicha estación afora el cauce principal del Río Sonora, aguas arriba de la presa del Molinito. En dicha estación, durante el período de influencia del Huracán Norberto, se observa un escurrimiento máximo de $25 \text{ m}^3/\text{seg}$ y un volumen escurrido de 2.5 millones de m^3 . Durante el huracán Odile, en el Oregano II, se observó un escurrimiento máximo de $15 \text{ m}^3/\text{seg}$ y un volumen escurrido de 9.2 millones de m^3 . Los volúmenes escurridos en el Oregano II dan una idea de la magnitud de agua que ocasionó dispersión y dilución de los contaminantes derramados. Sin embargo, no dan una idea clara de lo ocurrido en la parte alta de la cuenca. Debido a esto, el grupo del agua aplicó varios métodos para estimar los escurrimientos asociados a los huracanes y las lluvias posteriores al derrame. Primero, se utilizó un modelo de predicción de escurrimientos basado en el método racional modificado. Para poder representar la variabilidad espacial de la lluvia, se utilizaron los datos de precipitación ajustados de NLDAS, los cuales fueron incorporados junto con mapas de coeficientes de escurrimiento en un Sistema de Información Geográfico (SIG). Los coeficientes de escurrimiento de INEGI se ajustaron (calibración) hasta que se logró empatar los resultados del modelo racional con los escurrimientos observados en la estación hidrométrica del Oregano II. Segundo, se utilizaron dos modelos hidrológicos (HEC-HMS y tRIBS) para simular los escurrimientos de la cuenca alta del Río Bacanuchi. Los modelos hidrológicos se realizaron a partir del punto conocido como La Trampa en el Río Bacanuchi permitieron estimar los escurrimientos en el Arroyo Tinajas y cada uno de los tributarios del Río Bacanuchi hasta ese punto. Dichos modelos arrojaron rangos máximos de escurrimiento de 718 a $1600 \text{ m}^3/\text{seg}$ y de 2.1 a $12.4 \text{ m}^3/\text{seg}$ entre el período del 6 de Agosto al 30 de Septiembre del 2014 en la cuenca alta del Río Bacanuchi (La Trampa) y en el Arroyo Tinajas, respectivamente.

Es importante recalcar que los volúmenes de escurrimiento estimados para el Huracán Odile, tanto en la estación del Oregano II, como en los dos modelos hidrológicos fueron tres veces mayores a los escurrimientos generados por el Huracán Norberto. Sin embargo, de acuerdo a los aforos oficiales registrados en la estación del Oregano II, los escurrimientos durante el período de influencia de Odile aparentan ser más bajos. Esta información no es consistente con las precipitaciones generadas durante el período de influencia por el Huracán Odile, ya que la lluvia durante ese período fue mucho más alta que las precipitaciones generadas por el Huracán Norberto. De los volúmenes estimados, un porcentaje muy alto de los escurrimientos se están perdiendo por infiltración a lo largo de la travesía de las partes altas de la cuenca hasta la estación hidrométrica del Oregano II. En ese sentido, los volúmenes generados por los dos eventos extremos no solo impactan el transporte de contaminantes superficiales por procesos físicos de advección y dispersión, sino que también afectan el volumen de agua que se infiltra y el transporte de contaminantes en las zonas no saturadas y saturadas subterráneas.

- **Resumen Capítulo VII: Modelo conceptual hidrogeológico (tRIBS y HEC-HMS).**

Dos modelos hidrológicos fueron utilizados para estimar escurrimientos en la zona del derrame. El modelo hidrológico semi-distribuido (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System, HEC-HMS) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos fue utilizado para estimar escurrimientos en 57 sub-cuencas en la parte alta de la cuenca alta del Río Bacanuchi. También se realizaron simulaciones utilizando el modelo hidrológico distribuido tRIBS (TIN-based Real time Integrated Basin Simulator) desarrollado en el laboratorio de hidrología superficial del Massachusetts Institute of Technology (MIT). La delimitación de los dominios de los dos modelos hidrológicos se realizó a partir del punto conocido como La Trampa al sur de la comunidad de Bacanuchi a 49 km (sobre el cauce) al sur del punto del derrame. Los dominios de simulación se generaron a partir de un modelo de elevación digital (DEM) de 30 metros de resolución espacial, basado en el producto del sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal, Emission and Reflection). Para el modelo tRIBS se generaron dos dominios, el primero se concentró en la cuenca del arroyo Tinajas, localizado en la extremo norte de la cuenca del Río Bacanuchi y muy cercano a la Mina Buenavista del Cobre (Área cuenca del arroyo Tinajas ~ 30 km²). Paralelamente, se utilizó una cuenca más grande con área de contribución de 997 km² y cuyo punto más bajo coincide con el modelo HEC-HMS en el sitio denominado La Trampa.

Ambos modelos requieren datos de entrada que caracterizan las propiedades físicas de los suelos, vegetación, así como parámetros necesarios para simular el tránsito de avenidas y las pérdidas por infiltración. El modelo HEC-HMS utiliza datos diarios de sus variables de entrada y un modelo de evapotranspiración basado en la temperatura del aire y radiación neta. En cambio el modelo tRIBS utiliza datos cada hora y un modelo de evapotranspiración más complejo basado en datos de temperatura del aire, velocidad del viento, presión atmosférica, cobertura de nubosidad y radiación neta. Para iniciar las simulaciones de tRIBS, se requiere de un mapa de elevación de los niveles freáticos y un mapa de la profundidad de los basamentos. El mapa de niveles freáticos se generó con base en censos de aprovechamiento de aguas subterráneas realizadas por el Grupo del Agua. El mapa de profundidad de basamentos se generó a partir de datos de estudios geofísicos previos en la zona y su valores fluctuaron entre 0.5 centímetros, en las regiones con alta elevación, hasta 30 metros en los valles aluviales. Los dos modelos hidrológicos utilizaron los mismos datos de entrada de precipitación y de climatología (solo hay diferencias en las escalas temporales) tomados a partir de la combinación de las estaciones de CONAGUA / SMN y los datos ajustados del NLDAS (North America Land Data Assimilation System, Mitchell, 2009). La variabilidad espacial de suelos y de vegetación se consideró explícitamente a partir de los mapas oficiales de INEGI. Los parámetros de suelos y de vegetación se consideraron como constantes en el tiempo asumiendo condiciones de alto vigor vegetal, ya que el derrame ocurrió en el mes de agosto.

El periodo de simulaciones comprendió el periodo del 1ro de enero de 2013 a septiembre del 2015. Se utilizó todo el año 2013 para permitir un periodo de secado inicial que ayudó a reducir la humedad del suelo a valores cercanos al nivel residual de humedad del suelo (θ_r) y reproducir las condiciones iniciales antes del inicio del Monzón de Norteamérica.

Los resultados de los dos modelos hidrológicos permitieron generar rangos de escurrimientos con distintas condiciones, por ejemplo con el modelo tRIBS se pudo simular los escurrimientos apagando las infiltraciones que ocurren sobre el cauce del río. HEC-HMS por el contrario, nos permitió evaluar las condiciones hidrológicas asumiendo pérdidas por infiltración sobre el cauce del río. Dichos modelos arrojaron rangos máximos de escurrimiento de 718 a 1600 m³/seg y de 2.1 a 12.4 m³/seg en el período del 6 de Agosto al 30 de Septiembre del 2014 en la cuenca alta del Río Bacanuchi (La Trampa) y en el Arroyo Tinajas, respectivamente.

- **Resumen Capítulo VIII: Transporte de sedimentos.**

En el presente capítulo se presentan los resultados preliminares de la distribución del derrame de la solución de sulfato de cobre y se determina la influencia de la dinámica fluvial en la redistribución de sedimentos contaminados, especialmente durante las lluvias ocasionadas por los huracanes Norberto y Odile, ocurridas un mes después. Para ambos objetivos, se utilizó la herramienta de simulación FLO2D en la cual se hace una aproximación al movimiento de la solución de sulfato de cobre como un flujo de agua no confinado, en un canal abierto.

Las simulaciones, tanto de la distribución del derrame de sulfato de cobre como las de arrastre de sedimentos, se llevaron a cabo bajo condiciones saturadas (no hay infiltración) y no-saturadas (con infiltración) del terreno. Los resultados indican que el derrame inicial, en todos los escenarios, se mantiene dentro de la cuenca del río Tinajas. Los escenarios donde la solución muestra un mayor alcance son aquellos en donde la fuga de material se da en un lapso de 24 y 48 horas, con un alcance máximo de 13 kilómetros a partir del represo poniente. Las simulaciones en suelo no saturado indican que el alcance del derrame es menor que en condiciones saturadas del terreno en, aproximadamente, 1 a 1.5 km. Con respecto al transporte de sedimentos, durante las lluvias ocasionadas por los huracanes Norberto y Odile, los resultados muestran una alternancia de periodos erosión y deposición a lo largo de la cuenca. Las zonas de erosión se centralizaron en 4 zonas ubicadas dentro de la cuenca de La Trampa y se centran en las partes centrales del canal y en las zonas de curvatura. Las corrientes ocasionadas por las lluvias fueron capaces de removilizar, de manera general, 25cm del lecho del cauce, y en zonas muy focalizadas hasta 1m. Por otro lado, las zonas de depósito se encuentran distribuidas a lo largo de toda la cuenca y ocasionaron cambios de elevación en el substrato, generalmente, entre 1 y 40cm.

Finalmente, para determinar con mayor precisión la zona de influencia del derrame de sulfato de cobre y las zonas de removilización y acumulación de sedimentos, se deben de correr simulaciones con una mayor resolución del modelo digital de elevación e incorporar los datos de escurrimiento de todos los cauces tributarios, tanto durante la fecha del derrame, como durante las lluvias ocasionadas por los huracanes Odile y Norberto.

CAPITULOS EN EXTENSO

II. ACTIVIDADES DE CAMPO

ÍNDICE DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Obtención de la granulometría por el método de intersecciones de Rosiwal (1898). a) Máscara construida sobre la imagen calibrada con una serie de líneas paralelas. b) Tabla con los datos asociados a cada una de las partículas ubicadas sobre la máscara. ..	12
Figura 2. Infiltración promedio (mm/h) de cada prueba, la numeración representa la ubicación de los sitios (norte a sur). Se señala cuales pruebas se realizaron en el cauce y cuales en la zona de inundación	26
Figura 3. Infiltración promedio (mm/hr) de cada prueba, la numeración representa la ubicación de los sitios (norte a sur). Se señala cuales pruebas se realizaron en el cauce y cuales en la zona de inundación.	29
Figura 4. Mapa de los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración y las excavaciones.	30
Figura 5. Evolución de los niveles estáticos en los pozos censados en la parte alta del Río Bacanuchi de mayo de 2015 a Enero del 2016.....	33
Figura 6. Evolucion de los niveles estáticos, temperatura del agua, conductividad eléctrica y precipitación en el sitio de la Trampa. Los niveles son de los piezómetros instalados más cercanos al cauce del río Bacanuchi.	37
Figura 7. Instalación de la estación climática al norte del represo TN-1 dentro de la minera Buenavista del Cobre. La estación mide temperatura del aire, humedad relativa, humedad de suelo a 5 y 15 centímetros de profundidad y precipitación (cada 5 minutos).	43
Figura 8. Histograma de las estaciones climáticas instalada en el represo TN-1 dentro de la mina Buenavista del Cobre (norte) y en el rancho “El Alamo” en el sur de la micro-cuenca del arroyo Tinajas.	44

ÍNDICE DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Bitácora con detalles de los sitios donde se realizaron pruebas y donde se tomaron muestras	15
Tabla 2. Descripción, localización e infiltración promedio de los sitios.....	27
Tabla 3. Datos característicos de los pozos muestreados en la parte alta del Río Bacanuchi.	32
Tabla 4. Datos de localización de los puntos excavados sobre el lecho del río.	35
Tabla 5. Ubicación y características de los piezómetros.	38
Tabla 6. Coordenadas de los piezómetros y la descripción de los sitios	39

Descripción de las actividades de campo

De Febrero del 2015 a Marzo del 2016 el grupo del agua realizó 15 visitas oficiales al área de estudio. Las salidas de campo sirvieron para recolectar muestras de sedimentos, agua superficial y subterránea. También se realizaron múltiples pruebas experimentales en campo y se extrajeron columnas intactas para realizar pruebas de laboratorio. Entre las pruebas de campo destacan los análisis granulométricos, las pruebas de infiltración, los censos de captación de agua subterránea y estudios de caracterización de suelos en las laderas del cauce del río y lomeríos de las áreas de inundación. Además, se instalaron 5 piezómetros para recolección continua de muestras de calidad de agua y monitoreo de niveles de mantos freáticos. También se instalaron dos estaciones climáticas de alta resolución en la parte alta de la cuenca que miden precipitación, velocidad de viento, temperatura del aire, humedad relativa y humedad de suelo a 10 y 30 cm de profundidad.

Análisis Granulométrico

Para calibrar el modelo de transporte de sedimentos se requiere conocer la granulometría en el cauce activo, por lo tanto, se seleccionaron diversos 10 sitios a lo largo del cauce para conocer la granulometría y sus cambios con la distancia. Adicionalmente, se tomaron muestras a lo ancho del cauce, para ver las variaciones longitudinales en las características granulométricas. En las zonas donde se observó una preponderancia del material grueso (>-4 o 16mm) se completó el análisis granulométrico por medio del análisis de imágenes ópticas.

Para realizar los análisis granulométricos, las fracciones con diámetro igual o mayor a 3 (16mm), se midieron a través de fotografías digitales por medio del método de intersecciones de Rosiwal (Rosiwal, 1898; Sarocchi, 2007). En este método, se crea una máscara sobre la imagen, constituida por una serie de líneas paralelas, separadas a intervalo regular, en función del diámetro promedio de las partículas (Figura 1a). A continuación, se mide la longitud total de las líneas de referencia y la longitud de las intersecciones sobresalientes de los rasgos o longitud de los clastos (Figura 1b) y mediante la relación:

$L/L_t = A_a/A_t = V_a/V_t$	Donde: Ll= longitud de las intersecciones de los rasgos L _t = longitud total de la línea analizada A _a = área ocupada por los rasgos de las partículas A _t = área total analizada V _a = volumen ocupado por la partículas V _t = volumen total analizado
-----------------------------	--

A partir de esta relación se obtiene el volumen de los clastos de los clastos y volumen de matriz. Las fracciones entre 3 y 4 ϕ (8 μ m a 63 μ m) fueron tamizadas en seco a intervalos de 1 ϕ por medio de agitación manual. Debido a que en todas las muestras los valores de la fracción menor a 63 μ m (4 ϕ) no superó el 1wt% no se consideró necesario analizar la fracción fina.

Los valores obtenidos por los dos métodos de análisis granulométrico, se normalizaron y juntaron, con el fin de representar la distribución granulométrica total. Una vez realizados los análisis granulométricos, se obtuvieron los parámetros estadísticos con el software DECOLOG 5.1. (Borselli & Sarocchi, 2004, 2015), el cual utiliza el método Montecarlo para obtener los parámetros sedimentológicos clásicos (Folk, 1980) que son la media (Mz), la desviación estándar (s), la asimetría (Sk) y la curtosis (k) y permite individualizar y caracterizar de forma automática hasta tres de las modas que constituyen las mezclas aproximándolas con curvas lognormales.

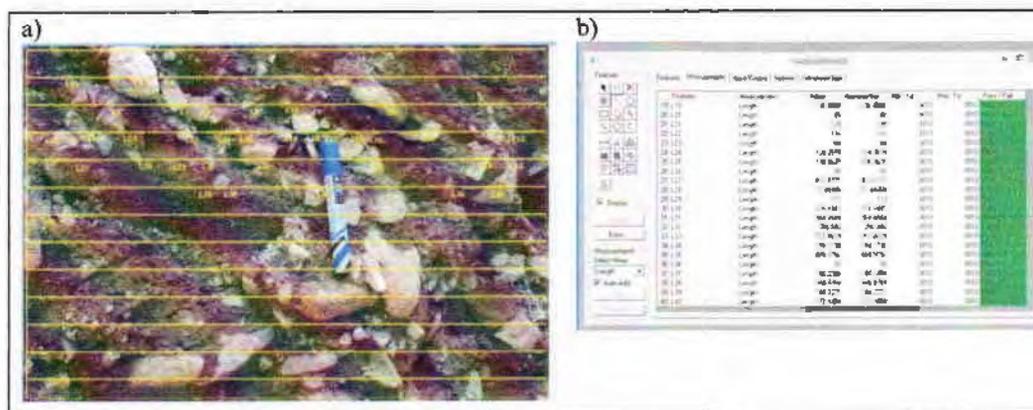


Figura 1. Obtención de la granulometría por el método de intersecciones de Rosiwal (1898). a) Máscara construida sobre la imagen calibrada con una serie de líneas paralelas. b) Tabla con los datos asociados a cada una de las partículas ubicadas sobre la máscara.

Pruebas de Infiltración con el método de doble cilindro.

Las pruebas de infiltración mediante el infiltrómetro de doble anillo consisten en instalar un juego de dos cilindros de acero huecos cuyas dimensiones son de 40 cm de alto y de 30 y 45 cm de diámetro respectivamente, en donde el segundo funciona como un anillo de protección para amortiguar el movimiento o desplazamiento lateral excesivo de agua y contabilizar solamente la infiltración vertical. Se requiere de una plancha circular con vástago (o tabla de madera) que servirá de guía para golpear con un mazo a los cilindros para enterrarlos en el suelo (aproximadamente 10 cm), para que posteriormente se aplique el agua en la cavidad interior para iniciar las lecturas de infiltración, utilizando para ello un tornillo micrométrico o regla que se apoya en el cilindro interno.

Pasos para realizar las pruebas de infiltración:

- a) **Instalación de los cilindros.** El sitio de prueba se localiza en un lugar que sea representativo, procurando eliminar los hormigueros, toperas, áreas compactadas o sitios con abundancia de roca. Se sitúa el cilindro más pequeño sobre el suelo y se empuja con firmeza para introducirlo levemente, colocando encima la tabla y se mantiene a nivel para golpearla con el mazo hasta que el cilindro profundice alrededor de 10-15 cm. El golpe para hincar ambos cilindros concéntricos debe ser uniforme y manteniendo los bordes a nivel, pues el golpe desigual afloja el suelo y modifica sus propiedades físicas. Se utilizó un nivel para asegurarse que los anillos fueron colocados al nivel de la superficie del terreno.

- b) **Aplicación del agua para la prueba.** Se coloca una hoja de plástico delgada en la cavidad del cilindro menor para impedir la penetración del agua hasta que se llene el cilindro y se pueda comenzar la prueba. Se aplica después agua en la cavidad de ambos cilindros de tal manera que se alcance el mismo nivel. La lámina de agua más conveniente es alrededor de 10 cm y no deberá permitirse que baje durante la prueba más de 3 cm.

El agua aplicada al cilindro interior servirá para asegurar los valores de las lecturas de infiltración en los intervalos convenientes. A medida que el nivel de agua disminuye en el cilindro interior por penetración, deberá reponerse para no bajar más de 3 cm. Cada reposición de agua puede significar una pérdida de tiempo que no permita hacer la lectura instantánea correspondiente, por lo cual en el registro de anotación de datos se prevé un tiempo muerto para realizar esta operación. El agua entre los dos cilindros es para amortiguar la infiltración horizontal, razón por la cual es necesario mantener los dos niveles de agua a la misma altura.

- c) **Primera lectura.** En suelos de alta permeabilidad es necesario hacer la lectura inicial retirando el plástico con la menor pérdida de agua posible. Al momento de

retirar el plástico protector se inicia el conteo del tiempo con un cronómetro y tiempo de la hora de inicio de la prueba. La lectura de volumen de agua infiltrada se realiza por medio de un tornillo micrométrico o regla.

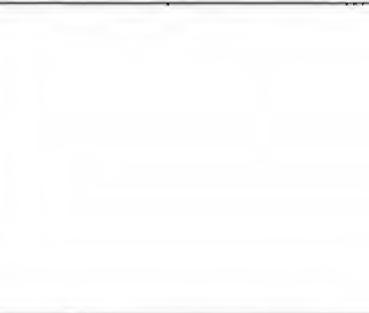
- d) Lectura siguiente. El control del tiempo de cada intervalo se efectúa con cronómetro en lapsos de 10 minutos o menores. El tiempo acumulado durante el principio de la prueba se hace con un reloj ordinario.
- e) Registro de datos necesarios para el cálculo de la velocidad de infiltración. Una vez iniciada la prueba, conviene formar un cuadro como el siguiente para ordenar los datos y realizar el cálculo:

En la tabla 1 se presenta la bitácora con los detalles de los sitios donde se realizaron pruebas y donde se tomó muestra, así como fotos de los mismos para su identificación y descripción.

Tabla 1. Bitácora con detalles de los sitios donde se realizaron pruebas y donde se tomaron muestras

Bitácora de sitios visitados con toma de muestra y pruebas de infiltración

SITIO (Descripción)	Lat	Lon	PUNTO	Muestras y pruebas	Observaciones	Imágenes
8:15 Entrada a la mina al sitio del derrame en el represo Tinajas poniente 27 min de ruta, REPRESO PONIENTE DENTRO DE LA MINA ARROYO TINAJAS	30.9285	-110.346487	111	El grupo tomo muestras de agua y sedimentos	La mina aguas debajo de este represo no tiene ningún tipo de medición, construyeron 4 pozos después del derrame, es muy cercano al punto 110. El Ing. Manuel Rodríguez proporciono información útil	
Pozo aguas abajo del represo Tinajas (dentro de la mina). desde la puerta No 5 hasta el sitio del pozo son 44 min aprox. (2 de mayo, antes de mediodía)	30.8854	-110.333434	115	Se realizaron 4 pruebas de infiltración, en el suelo y en el cauce del arroyo con los puntos 113 y 114 respectivamente, se dejó instalado un TDR.	El pozo tenía bomba. Se midió la profundidad del nivel medio dinámico en 29.36 metros del brocal.	

<p>Aguas abajo del arroyo Tinajas, represo de emergencia. En el sitio se observó un lugar de reposo (2 de mayo en la, hora de la comida)</p>	<p>30.8741</p>	<p>-110.331138</p>	<p>118</p>	<p>Se realizaron 4 pruebas de infiltración, en la zona de inundación y en el cauce del arroyo. Se coloco un TDR</p>	<p>La prueba de infiltración tomo aproximadamente 2 horas 20 minutos, no se llegó a saturación, esto probablemente se deba a que el suelo se encontraba muy seco.</p>	
<p>Sitio que se consideró de exploración a un lado de la carretera, se consideró porque se observó un tributario (2 de mayo en la tarde)</p>	<p>30.8649</p>	<p>-110.325245</p>	<p>119</p>	<p>no se realizaron pruebas</p>	<p>Se consideró este sitio de exploración a un lado de la carretera, se consideró porque se observó un tributario (2 de mayo en la tarde)</p>	
<p>Sitio extra en un arroyo cercano a un tributario, llamado tinajas 2 (2 de mayo en la tarde, ultimo sitio de muestreo)</p>	<p>30.8603</p>	<p>-110.32974</p>	<p>122</p>	<p>Se realizaron 2 una pruebas en el cauce.</p>	<p>Se continua explorando, se llegó a un sitio cerca de un tributario, sin embargo al verificar en un DEM se llegó a la conclusión que el sitio donde se</p>	

					muestreo en realidad es el tributario y más adelante se encuentra el verdadero arroyo Tinajas	
Llamado Tributario Tinajas, sin embargo este punto es el verdadero arroyo Tinajas metros adelante del punto 122	30.86081	-110.33106	124	Se marcó para ubicación/ Sin pruebas		
Sitio que se consideró la "Y" un poco al Norte (3 de mayo a las 7:12 AM), lo consideraron como sitio testigo, ya que no encontraron contaminación por metales (Pistola para determinar metales)	30.8064	-110.32748	132	Se realizaron 2 pruebas de infiltración en el cauce del arroyo y en la zona de inundación	Este sitio inicialmente se consideraba la "Y", o cercano a la "Y" según UNAM, hasta que se les pregunto a algunos rancheros que pasaron por el sitio, y aclararon que este, en el que se tomaron muestras y se realizaron pruebas, era solo un tributario y que	

					el arroyo Tinajas se encuentra unos metros adelante. Nombre de un ranchero: Héctor Salomón .	
Arroyo considerado el Tinajas verdadero, se terminó a las 11:33 A.M.	30.8069	-110.333447	134	Prueba de infiltración en el cauce del arroyo, y perfil de suelo y toma de muestra Prueba de infiltración zona de inundación punto 135	Se tomaron fotos del perfil del suelo	

Arroyo considerado el Tinajas verdadero	30.806859	-110.333448	135	Prueba de infiltración, en zona de inundación	Se tomaron fotos del perfil del suelo	
Sitio de exploración, después de muestrear el real Tinajas	30.8055	-110.339694	137	se marcó para ubicación/ Sin pruebas	A partir de este punto se marcó el camino hacia el rancho que tiene el molino de viento o papalote	
Sitio de exploración, después de muestrear el real Tinajas	30.8108	-110.356084	138	se marcó para ubicación/ Sin pruebas	Camino al rancho que tiene un molino de viento, la mina se ve de frente	
Entrada a un racho	30.8197	-110.365413	139	se marcó para ubicación/ Sin pruebas	Primera entrada para llegar al rancho con el molino	

Segunda entrada al rancho	30.8369	-110.367578	140	se marcó para ubicación/ Sin pruebas	Segunda entrada al predio donde está el molino, un pozo y donde también había ganado (se pensó que ese momento que era el rancho de Salomón)	
Arroyo aledaño al lindero de la mina	30.8452	-110.364932	142	se marcó para ubicación/ Sin pruebas	Arroyo aledaño al lindero de la mina, a este punto se llegó después de subir un cerro y haber caminado a través del rancho aprox. 30 min	
Pozo del molinito con letrero en ingles	30.8374	-110.368744	143	se marcó para ubicación/ Sin pruebas	Ubicación del pozo, donde está el molino, con una profundidad de 18.41 m, con aproximadamente 40 cm de altura del brocal	

Búsqueda de la "Y"	30.7998	-110.333831	146	se marcó para ubicación/ Sin pruebas	Arroyo desconocido en ruta de exploración	
Búsqueda de la "y"	30.7999	-110.333681	147	se marcó para ubicación/ Sin pruebas	Arroyo en busca de la "y"	
Búsqueda de la "y"	30.8058	-110.333736	148	se marcó para ubicación/ Sin pruebas	Se encontró una puerta, donde se dejó estacionado el tonelada y se bajó al cauce del arroyo (camioneta roja) a buscar la "y"	
Sitio que se consideró el falso Tinajas (Real Tinajas), esta después de una bifurcación y de una "isla", para llegar a este sitio se caminó por el cauce del arroyo	30.7996	-110.337186	149	Se realizaron 2 pruebas de infiltración y muestras de suelo	En este lugar se realizaron pruebas de infiltración, se observó que rasparon el cauce del arroyo. En algunos lugares se observó evidencia de daño al ecosistema, a partir de aquí el Dr. Agustín recorrió aguas abajo	

					marcando puntos hasta el 161.	
Cauce del Tinajas para comprobar si es el verdadero	30.8032	-110.335539	161	se marcó para ubicación/ Sin pruebas	Nos trasladamos sobre el cauce del arroyo, para tratar de llegar al verdadero Tinajas, el camino se marcó con los puntos 134, 135 y 136	
Cauce del arroyo Tinajas para comprobar si es el verdadero Arroyo	30.8059	-110.334271	162	se marcó para ubicación/ Sin pruebas	Se decidió movernos sobre el cauce del arroyo para tratar de llegar al verdadero arroyo Tinajas marcado con los puntos 134, 135 y 136. Se encontró con un cerco que bloqueaba el traslado por el cauce del arroyo	
Pozo 1 dentro del rancho el Álamo	30.8119	-110.331226	163	Pozo del rancho el Álamo	Se continuo con la exploración, tratando de encontrar más sitios hacia el norte	

					del arroyo Tinajas, se llegó al Rancho el Álamo donde tenían dos pozos	
Pozo 2 dentro del rancho el Álamo	30.812	-110.331201	166	Pozo del rancho el Álamo	Se continuó con la exploración, tratando de encontrar más sitios hacia el norte de arroyo. Los empleados del rancho nos llevaron al cauce del arroyo	
ultimo sitio de muestreo del 3 de mayo, adelante del rancho del Álamo	30.8265	-110.336599	167	Prueba de infiltración en el cauce del arroyo	Este sitio es pasando el rancho el álamo, es donde se observó el arcoiris, los empleados del rancho el Álamo no llevaron hasta ahí	

ultimo sitio de muestreo del 3 de mayo, adelante del rancho del Álamo	30.8265	-110.336607	168	Prueba de infiltración en la zona de inundación	Este sitio es pasando el rancho el álamo, es donde se observó el arcoiris. Se señala con una flecha blanca el área de la prueba de infiltración en la zona de inundación
---	---------	-------------	-----	---	--



Resultados Pruebas de Infiltración

Se realizaron 17 pruebas de infiltración en 8 sitios, procurando que estas estuvieran sobre el cauce y en la zona de inundación del arroyo Tinajas. Las pruebas se realizaron con el método de infiltrómetro de doble anillo.

En la Tabla 2 se presenta la identificación y localización de los sitios, la infiltración promedio de cada prueba, y observaciones descriptivas. Para la identificación, los sitios se enumeraron del uno al ocho, donde los de menor valor son los puntos más al norte de la cuenca del Río Bacanuchi y los de mayor valor son los puntos más al sur (aguas abajo del Arroyo Tinajas).

Para la interpretación de los datos, en la Figura 2 y 3 se presentan gráficos con los resultados de la infiltración promedio para cada prueba, donde se señala las pruebas que fueron en la zona de inundación y aquellas que fueron sobre el cauce del arroyo. Con color negro se identifican las pruebas con infiltrómetro pequeño y con color azul las que se realizaron con infiltrómetro grande.

La infiltración promedio sobre el cauce del arroyo fue mayor que en la zona de inundación a excepción del punto 5. En los sitios más norteños y cercanos al represo poniente del arroyo Tinajas dentro de la mina, la infiltración promedio fue mayor y disminuyó conforme los sitios se localizaban aguas abajo del arroyo, a excepción del sitio en la estación climática de Bacanuchi, donde la infiltración promedio en el cauce del río fue cercana a la del sitio "Tinajas 2". La infiltración promedio en la zona de infiltración de cada sitio, no presentó alguna tendencia en general.

La Tabla 2, se presentan gráficos con la infiltración promedio de los sitios realizados con el infiltrómetro grande y los realizados con el infiltrómetro pequeño.

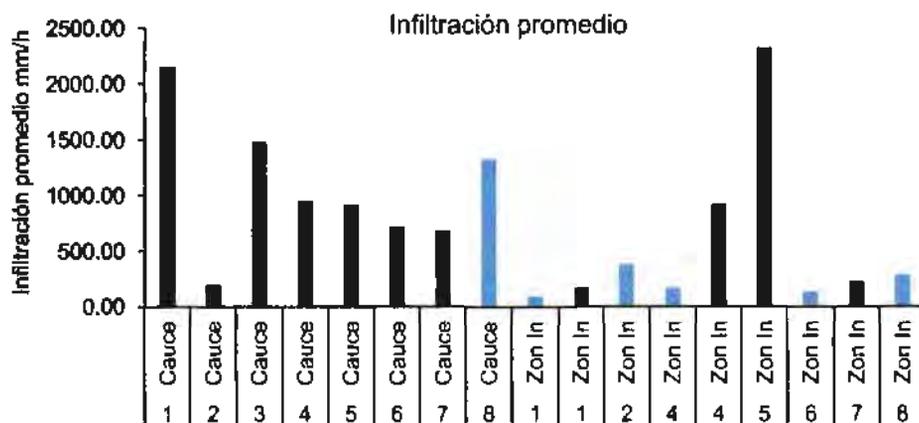


Figura 2. Infiltración promedio (mm/h) de cada prueba, la numeración representa la ubicación de los sitios (norte a sur). Se señala cuales pruebas se realizaron en el cauce y cuales en la zona de inundación

Tabla 2. Descripción, localización e infiltración promedio de los sitios

Sitio	ID	Coordenadas		Clave GPS	Infiltrómetro	Infiltración promedio mm/h	Duración de la prueba (min)	Observaciones
		x	y					
Cauce del río Tinajas frente al pozo	1	30.88528	-110.33319	114	Pequeño	2143.20	21	Sitio del pozo / cauce del río
Área de inundación Tinajas	1	30.88509	-110.33324	113	Grande	90.69	80	Área de inundación. (Pozo) Suelo compactado con alto contenido de M.O. Para iniciar la prueba se humedeció el suelo.
Área de inundación Tinajas	1	30.88509	-110.33324	113	Pequeño	174.26	70	Sitio del pozo / área de inundación
Aguas abajo del represo emergencia cauce del arroyo Tinajas	2	30.87408	-110.331138	118	Pequeño	195.65	75	Cauce del arroyo
Aguas abajo represo de emergencia del arroyo Tinajas	2	30.87408	-110.33114	117	Grande	376.86	133	Área de inundación.
Tinajas 2	3	30.86028 4	-110.32974	122	Pequeño	1481.33	47	Cauce del arroyo, pedregoso y arenoso.
Inf Rancho El Álamo	4	30.82867	-110.3360	170	Grande	162.58	60	Área de inundación / Llovizna
Inf Rancho El Álamo	4	30.82646	-110.336607	168	Pequeño	944.35	23	Cauce del arroyo
Rancho El Álamo	4	30.82646	-110.33652	167	Pequeño	913.55	32	Planicie de inundación / infiltrómetro pequeño
Real Tinajas aguas arriba de la Y	5	30.80686	-110.33345	134	Pequeño	914.55	34	Cauce del río cerca de la y (al norte de la y); presencia de paleosuelo, capa impermeables a 20 cm, barra no entra.

Área de inundación Real Tinajas	5	30.80686	-110.333448	135	Pequeño	2321.95	62	Arriba de la Y. Se humedeció al inicio de la prueba; suelo pedregoso, mezquital.
Cerca de la Y arroyo fake Tinajas	6	30.80638	-110.32748	132	Grande	127.86	100	Área de inundación (sitio testigo) Tito Loya
Fake Tinajas cerca de la Y	6	30.80634	-110.3275	133	Pequeño	712.83	47	Cauce del río (testigo)
Arroyo Tinajas cerca de la y	7	30.79956	-110.33719	149	Pequeño	684.71	41	Cauce del río, cerca de la isla
Fake Tinajas cauce del arroyo	7	30.79956	-110.33719	149	Pequeño	221.00	60	Banco a la orilla sobre el cauce del arroyo
Estación CONAGUA Bacanuchi	8	30.58384	-110.22839	106	Grande	281.91	127	Área de inundación, nos atascamos.
Estación CONAGUA Bacanuchi	8	30.58347	-110.22868	105	Grande	1315.38	26	Cauce del arroyo, se saturó el suelo a los 26 minutos.

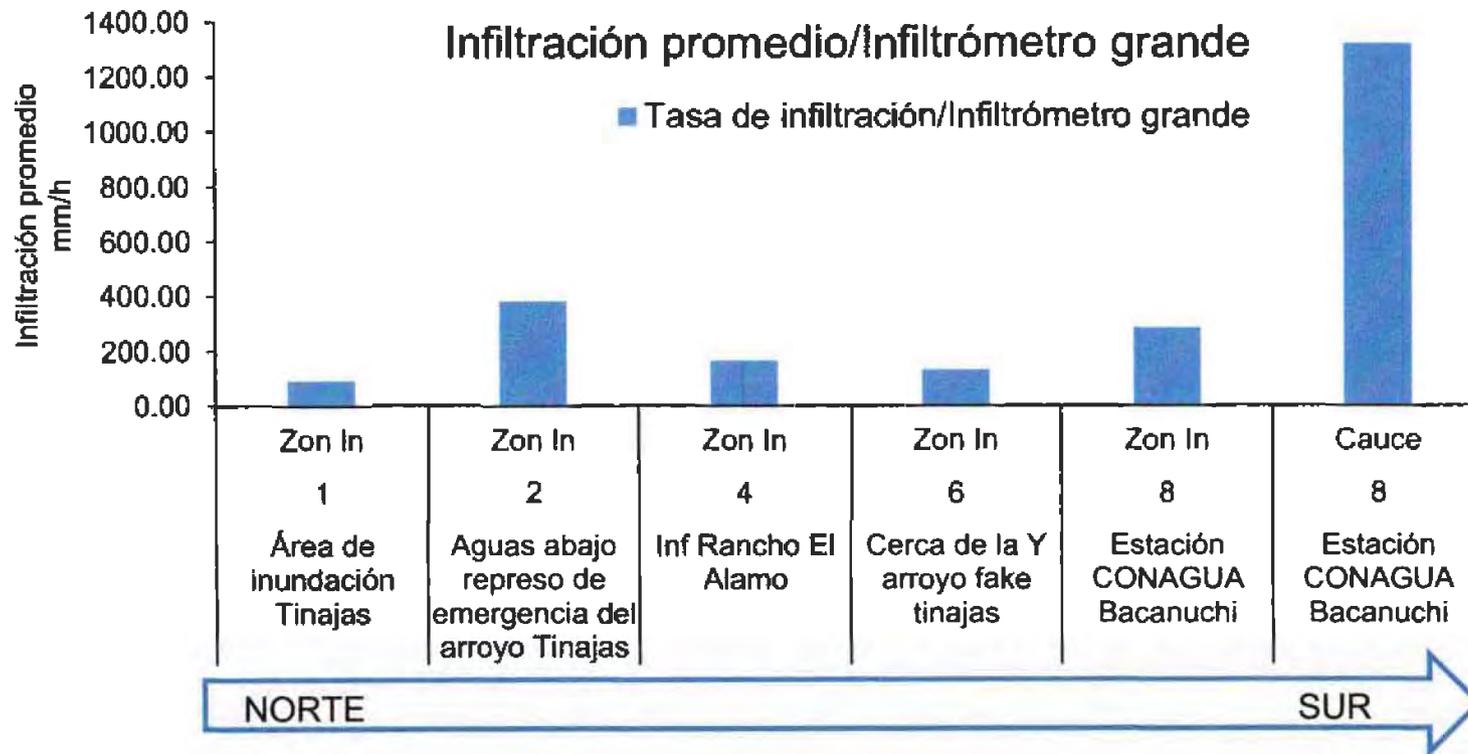


Figura 3. Infiltración promedio (mm/hr) de cada prueba, la numeración representa la ubicación de los sitios (norte a sur). Se señala cuales pruebas se realizaron en el cauce y cuales en la zona de inundación.

SITIOS RETROEXCAVADORA

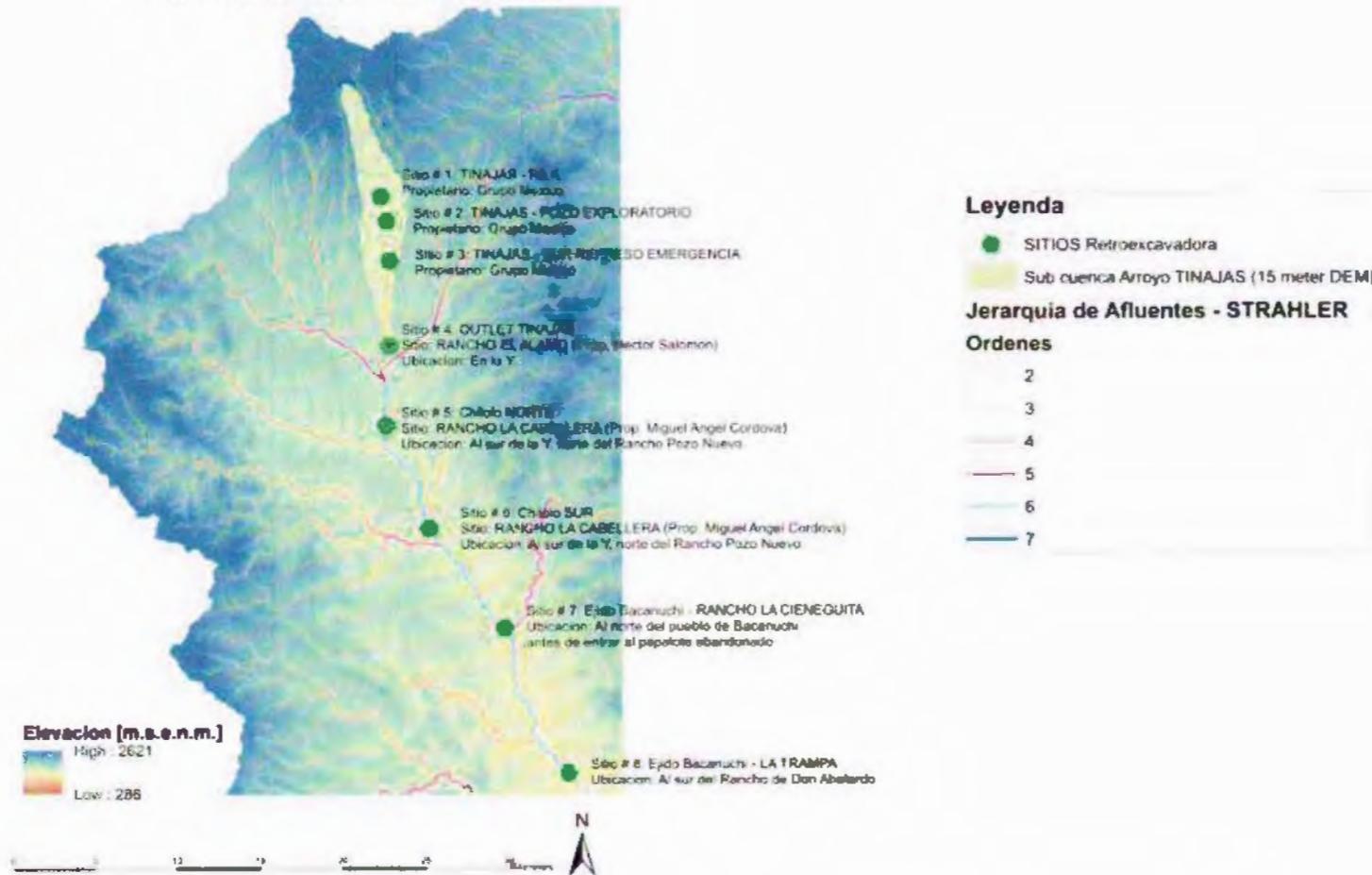


Figura 4. Mapa de los sitios donde se realizaron las pruebas de infiltración y las excavaciones.

Censos pozos agua subterránea y estimación de líneas equipotenciales

Se localizaron 6 pozos aledaños al arroyo Tinajas (tabla 3), en los cuales se midió el nivel estático y el nivel medio dinámico (solo uno). Dichos pozos junto con los datos obtenidos de la Comisión Nacional del Agua sirvieron para generar mapas de líneas equipotenciales (Ver capítulo de modelación hidrológica).

Niveles y datos de pozos muestreados en Arroyo Tinajas				Mayo				Junio				Julio				Agosto			
Pozo	Coordenadas			Temp		Nivel		Temp		Nivel		Temp		Nivel		Temp		Nivel	
	X	Y	Altura Brocal (m)	°C	CE (µs)	(m)	brocal (m)	°C	CE (µs)	(m)	brocal (m)	°C	CE (µs)	(m)	brocal (m)	°C	CE (µs)	(m)	brocal (m)
Piezometro 1	574588	3382816	0.6							2.6	2	22.1	1197	2.52	1.92	22.4	746	2.49	1.89
Piezometro 1-2	574581	3382847	0.65									21.9	672	2.84	2.19	21.9	642	2.8	2.15
Don Aberlardo	574150	3383843	0.46									21.6	858	5.26	4.8	21.6	730	5.5	5.04
Pozo Norte de Bacanuchi (pozo meones)	571479	3390978	0.4			11.12	10.72			11.12	10.72	21.9	390	11.38	10.98	21.6	502	11.27	10.87
Pozo "La cieneguilla" (Chebeto)	570877	3391945	0.43			3.84	3.41			3.41	2.98	23	809	3	2.57	22	745	2.64	2.21
Pozo Chilolo Norte	564639	3401694	0.4			15.87	15.47			15.87	15.47	21.9	411	15.9	15.5	21.6	400	16.16	15.76
Pozo Chilolo Sur	565990	3400208	0.56			20.6	20.04			20.6	20.04	22.2	885	20.27	19.71	22	772	20.1	19.54
Pozo el Alamo	563973	3408960	0.3			23.44	23.14			23.14	22.84	22.3	1280	24	23.7	22.5	1150	23.96	23.66
Pozo Tinajas Oeste (Cisterna color Negro)	563046	3414490	0.5			3.55	3.05			3.55	3.05					27.4	370	3.75	3.25
Pozo Tinajas Norte Rancho el Alamo (Way point 191, Abajo represo Tinajas)	564010	3414112	0.75			13.77	13.02			13.77	13.02					23.4	628	14.1	13.35
Pozo aguas abajo del represo Tinajas	563711	3417089				29.36				29.36	29.36								
Datos de La Trampa Superficial	574588	3382816	Superficial													21.9	560	3	Superficial

Niveles y datos de pozos muestreados en Arroyo Tinajas				Septiembre				3 de Octubre				20 de Noviembre				29 de Enero			
Pozo	Coordenadas			Temp		Nivel		Temp		Nivel		Temp		Nivel		Temp		Nivel	
	X	Y	Altura Brocal (m)	°C	CE (µs)	(m)	brocal (m)	°C	CE (µs)	(m)	brocal (m)	°C	CE (µs)	(m)	brocal (m)	°C	CE (µs)	(m)	brocal (m)
Piezometro 1	574588	3382816	0.6	23.1	1141	2.49	1.89	21.7	809	2.48	1.88	17.7	523	2.43	1.83	16.2	524	2.45	1.87
Piezometro 1-2	574581	3382847	0.65					21.2	674	2.73	2.08	19.5	629	2.79	2.14	17.2	634	2.68	2.19
Don Aberlardo	574150	3383843	0.46	22	565	5.43	4.97	21.1	663	5.15	4.69	19.4	730	5.13	4.67	19.4	888	4.2	3.78
Pozo Norte de Bacanuchi (pozo meones)	571479	3390978	0.4	21.7	406	10.97	10.57	21.6	464	10.35	9.95	20.7	745	9.76	9.36	20.7	926	8.6	8.12
Pozo "La cieneguilla" (Chebeto)	570877	3391945	0.43					22.5	674	1.54	1.11	21	689	1.37	0.94	20.9	727	1.21	0.87
Pozo Chilolo Norte	564639	3401694	0.4					22.2	337	16.63	16.23	21.7	890	20.37	19.97	21.7	967	20.68	20.23
Pozo Chilolo Sur	565990	3400208	0.56	21.9	777	20	19.44	23.6	747	20.26	19.7	21.5	420	17.23	16.67	21.3	386	16.89	16.27
Pozo el Alamo	563973	3408960	0.3	22	1069	23.94	23.64	23.2	1097	23.89	23.59	21.9	1048	23.62	23.32	21.7	1108	23.1	22.81
Pozo Tinajas Oeste (Cisterna color Negro)	563046	3414490	0.5																
Pozo Tinajas Norte Rancho el Alamo (Way point 191, Abajo represo Tinajas)	564010	3414112	0.75																
Pozo aguas abajo del represo Tinajas	563711	3417089																	
Datos de La Trampa Superficial	574588	3382816	Superficial									16.5	559	sup	sup				

Nota: Los caminos estaban en muy mal estado por las lluvias, por lo cual se tomaron pocas muestras

Nota: La muestra del pozo de Norte de Bacanuchi mostro un color gris oscuro, muy turbio y con olor a materia organica en descomposicion. Tanto el pozo de Norte de Bacanuchi como el de Chilolo Sur y el Alamo presentaron presencia de arañas en sus copas

Nota: La muestra del pozo de Norte de Bacanuchi, presento anidación de arañas y olor desagradable, en el resto del muestreo no se presento ningún inconveniente. Los pozos que estan dentro del territorio de la mina, ya se encuentran con

Tabla 3. Datos característicos de los pozos muestreados en la parte alta del Río Bacanuchi.

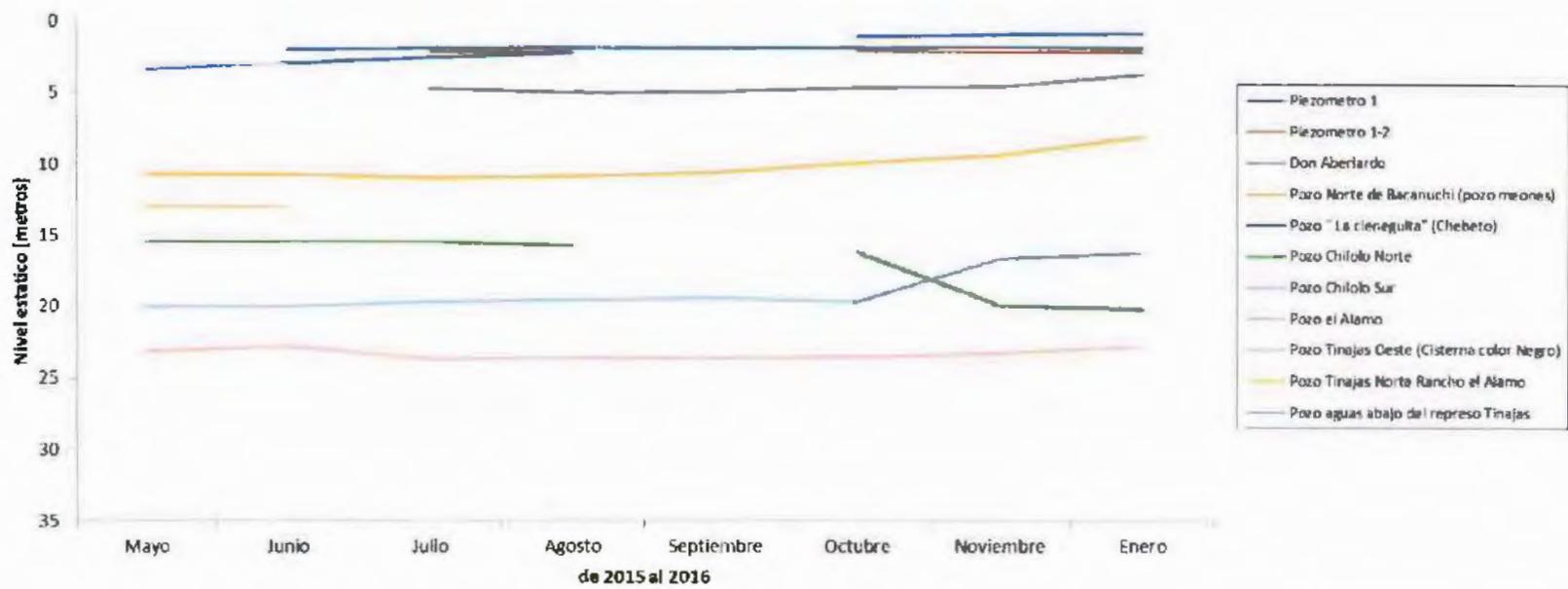


Figura 5. Evolución de los niveles estáticos en los pozos censados en la parte alta del Rio Bacanuchi de mayo de 2015 a Enero del 2016.

Muestreo de sedimentos sobre el cauce del río (excavaciones)

Se llevaron a cabo seis excavaciones sobre el lecho de los cauces del arroyo Tinajas y del río Bacanuchi con los objetivos de:

Conocer la estratigrafía bajo el lecho del cauce.

Explorar la extensión vertical del volumen infiltrado del DAM

Aportar elementos para entender la dinámica vertical y lateral de los flujos a lo largo del lecho del arroyo Tinajas y río Bacanuchi.

Metodología:

Utilizando una retroexcavadora se llevaron a cabo excavaciones sobre el cauce en sitios donde, de acuerdo a indicios de la vegetación y morfología del cauce, existiera la posibilidad de que el derrame de solución preñada hubiese pasado. Los datos para la ubicación de las excavaciones se detallan en el capítulo III. Las excavaciones consistieron en una zanja transversal al cauce, de aproximadamente 1 m de ancho, longitud variable (depende del ancho del cauce, típicamente entre 3 y 6 m) y entre 2 y 3 m de profundidad.

En cada excavación se definieron dos perfiles: uno cercano al centro del cauce y otro en el borde. En campo, en cada perfil y aproximadamente a cada 10 cm de profundidad, se registró contenido de humedad (θ %) y Conductividad Eléctrica (CE, mS/m) utilizando una sonda TDR marca Delta Device HR2. En cada uno de estos perfiles se colectaron muestras de sedimento a cada 10 cm de profundidad para su análisis en laboratorio para determinar granulometría, pH, CE, y concentración total de elementos mayores por FRX.

Adicionalmente, en algunas excavaciones se extrajeron columnas inalteradas para experimentos en laboratorio de transporte de metales.

Tabla 4. Datos de localización de los puntos excavados sobre el lecho del río.

Punto	Ubicación		Localidad	Distancia (km)
	X	Y		
Punto 4c	563845.0 15	3416386. 98	Excavación al Norte del represo de Emergencia (P-6)	6.7 (5.4)
Punto 8c	563788.1 5	3409369. 11	Excavación Rancho el Alamo (P-5)	14.0 (12.3)
Punto 9b	564357	3408553	Excavación en cauce en Arroyo TESTIGO al ESTE del Tinajas (P-4)	**
Punto 14b	565693	3400666	Excavación Rancho la Cabellera, Chilolo (P-3)	24.5 (21.2)
Punto 16c	570871.6 3	3391521. 65	Excavación Rancho la Cieneguita (P-2)	36.2 (31.2)
Punto 18b	571543.7 7	3388291. 24	Excavación Rio Bacanuchi al Sur de vado Seco (P-1)	40.3 (34.5)

NOTA: La distancia es referida al represo donde ocurrió el derrame de solución preñada (entre paréntesis la distancia en línea recta calculada de las coordenadas). ** Esta zanja se ubica en un arroyo al este del arroyo Tinajas.

Descripción general de las excavaciones

Ver capítulo III para el detalle acerca de las excavaciones realizadas por el grupo del agua.

Instalación de piezómetros

Objetivo: Instalar piezómetros en la parte sur del arroyo Tinajas, y realizar excavaciones con retroexcavadora en los sitios del grupo del agua.

Resultados

Se instalaron 5 piezómetros, dos en el sitio de “La trampa”, al sur del pueblo de Bacanuchi. Otro más en el rancho “La Cieneguita”, y otros dos al sur y norte del rancho “La Cabellera”. La tabla 5 presenta las características de los pozos de observación y en la tabla 6 se presentan características y fotografías de los sitios para su localización.

El método para la construcción de los pozos de observación, se encuentra en el anexo A, es un método estandarizado por el laboratorio de edafología ambiental de la UNAM, por Lucero Hernández con visto bueno de la Dra. Lucy Mora.

Todos los pozos tienen una longitud ranurada de 60 cm, la altura del brocal varia y sólo en un piezómetro no se instaló sensor debido a que no se logró llegar al manto freático.

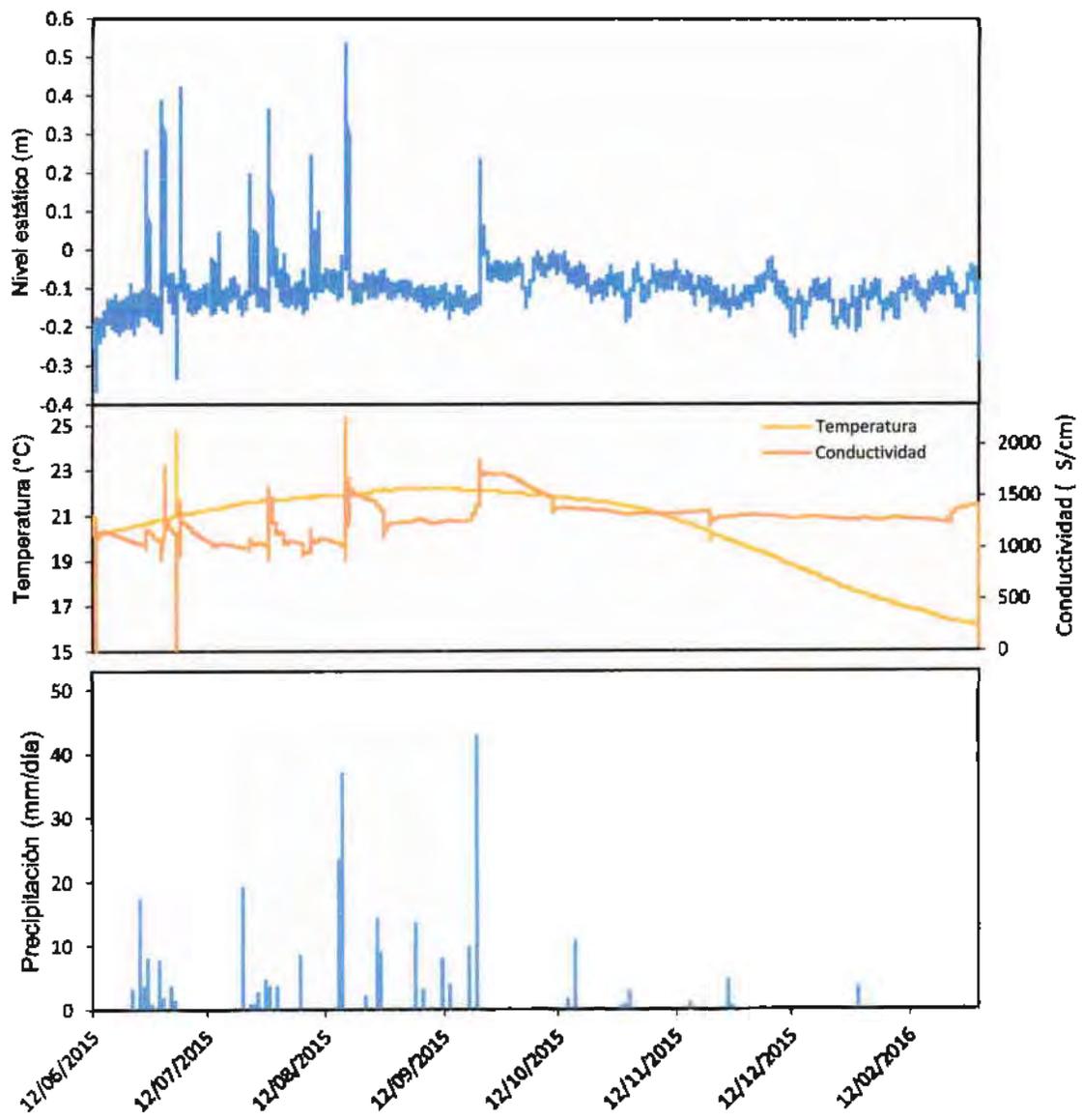


Figura 6. Evolucion de los niveles estáticos, temperatura del agua, conductividad eléctrica y precipitación en el sitio de la Trampa. Los niveles son de los piezómetros instalados más cercanos al cauce del río Bacanuchi.

Tabla 5. Ubicación y características de los piezómetros.

ID	Sitio	X	Y	Prof. Pozo (m)	Long. Ranurada (m)	Altura brocal (cm)	Long. Level logger (m)	Long. Bara logger (m)
P1	Trampa	574588	3382816	2	0.6	0.6	2	N/I
P1-2	Trampa	574581	3382847	2.2	0.6	0.65	2.2	0.94
P2	Rancho "La Cieneguita	570840	3391712	2.65	0.6	0.59	2.3	N/I
P3	Cabellera Sur	566066	3398573	3.8	0.6	0.55	N/I	N/I
P4	Cabellera Norte	564768	3401690	3.1	0.6	0.57	2.7	N/I

Tabla 6. Coordenadas de los piezómetros y la descripción de los sitios

Sitio	Descripción	Foto
Piezómetro I "La trampa"	<p>El sitio es al sur de Bacanuchi, muy cercano a la trampa. Se perforo a una profundidad de 2.60 m, al finalizar el pozo fue de 2.0 m de profundidad.</p> <p>Se tomó muestra de 2 estratos: de 0-150 cm con presencia de arena muy suelta y 150-260 cm con presencia de arcilla muy húmeda</p> <p>Se dejó un level logger instalado, el piezómetro se encuentra atrás de un cerco con púas para evitar que el ganado lo derribe y quede mayormente protegido.</p> <p>La flecha color negro en la foto, indica el lugar en donde se encuentra el piezómetro 1.</p>	

Piezómetro 1-2
“La trampa”

Se propuso instala un piezómetro a distancia del cauce del cauce.

Este sitio se encuentra a 18 m del piezómetro 1, pasando el cerco de púas.

Profundidad 2.2 m, se tomó muestra de 2 estratos: de 0-120 cm con presencia de arena y de 120-220 con presencia de arcilla muy humera.

El suelo se encontró saturado a los 180 cm de profundidad

Se instaló el level logger, con registro de cada media hora



Piezómetro 2
“La cieneguita”

Este sitio es frete al predio del señor Chebeto, profundidad de 2.65 m, no se encontró el nivel freático. Se tomó muestra de un solo estrado 0-260 m, muestra arcillo-limosa con humedad a partir de los 180 cm

Se instaló el level logger, con registro de cada media hora.

El acceso a este sitio fue sobre el cauce del arroyo, después del vado seco, para futuros monitorios el acceso deberá ser por la entrada del predio del señor Chebeto, mismo que estuvo de acuerdo con esto.



Piezómetro 3
"Cabellera Sur"

Para llegar a este sitio, se requiere entrar al rancho "La Cabellera" para lo que se solicitó permiso al propietario. El sitio se encuentra al llegar a la casa dirigiéndose hacia el sur y pasando por el pozo. Hay que pasar por una puerta con candado. Una vez que se llega al cauce del río el equipo se trasladó sobre el cauce hasta llegar a los límites con el rancho "Pozo Nuevo".

No se encontró el nivel freático. Se excavo a una profundidad de 3.40 m, con presencia de 2 estratos: de 0-350 cm con presencia de limo y arena, sin grava y otro de 350-380 cm con presencia de grava y limo.



Piezómetro 4
"Cabellera Norte"

Este sitio se encuentra al norte del rancho "La Cabellera". El sitio no hay necesidad de pasar por el cerco o puertas. Se tomó muestra de suelo de dos estratos: 0 a 270 con textura limo-arenosa de color café y de 270 a 310 cm donde empieza el horizonte con grava, con una profundidad de 3.10 m



Instalación de Estaciones Climáticas de alta resolución

Debido a la falta de estaciones climáticas en el área del derrame se instalaron dos estaciones que se utilizaron para realizar comparaciones con las estaciones oficiales de CONAGUA y contra los datos de sistema de asimilación de datos terrestres de norteamérica (NLDAS por sus siglas en inglés). Las estaciones se instalaron dentro del arroyo Tinajas en la parte norte cerca del represo TN-1 y la segunda en la parte sur en el rancho "El Alamo" justo antes de que el arroyo se conecte con el cauce principal del Rio Cuchujaqui. La figura 7 muestra las fotografías de la instalación de en el represo TN-1 y en el rancho "el Alamo". La figura 8 muestra las series de tiempo de precipitación en ambas estaciones.



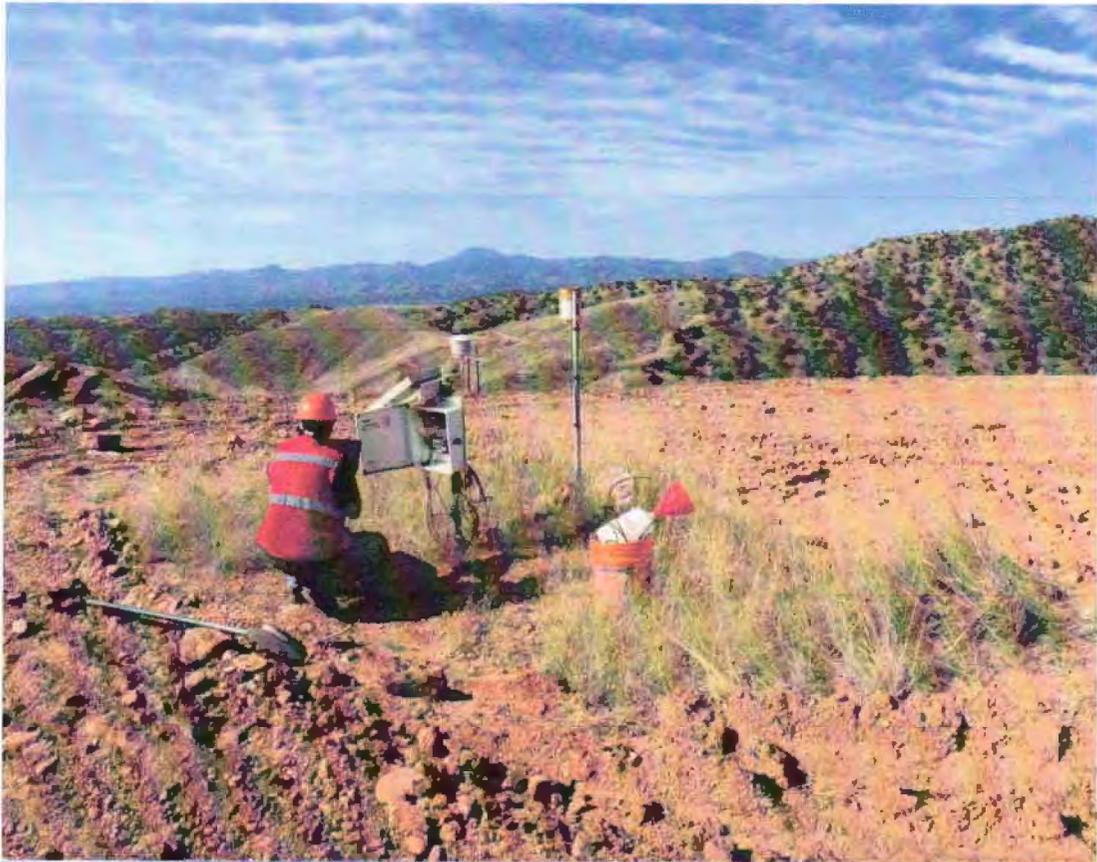


Figura 7. Instalación de la estación climática al norte del represo TN-1 dentro de la minera Buenavista del Cobre. La estación mide temperatura del aire, humedad relativa, humedad de suelo a 5 y 15 centímetros de profundidad y precipitación (cada 5 minutos).

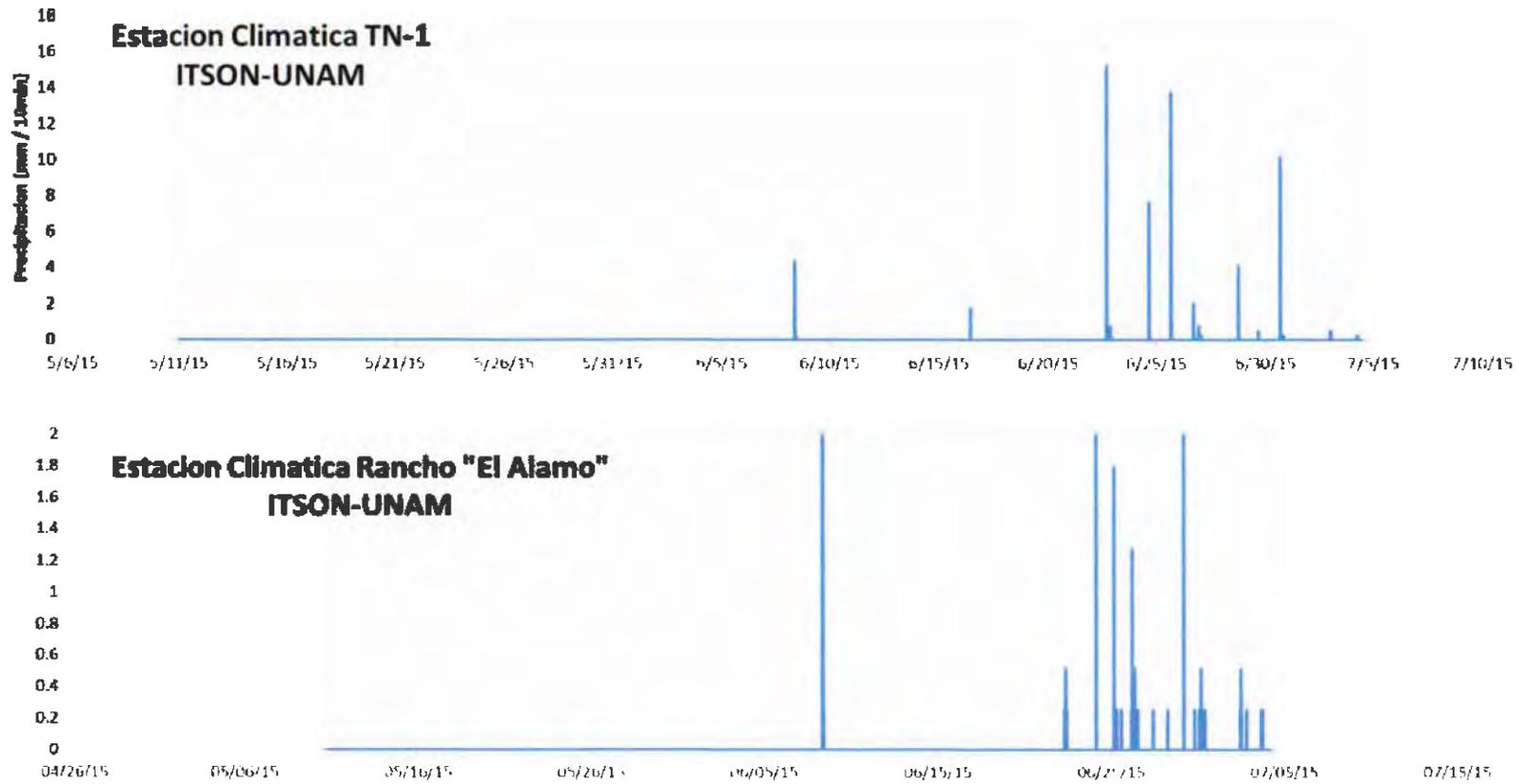


Figura 8. Histograma de las estaciones climáticas instalada en el represo TN-1 dentro de la mina Buenavista del Cobre (norte) y en el rancho "El Alamo" en el sur de la micro-cuenca del arroyo Tinajas.

III. EXCAVACIONES Y MOVIMIENTO VERTICAL

ÍNDICE DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Localización de las excavaciones sobre los cauces del arroyo Tinajas y río Bacanuchi.	47
Figura 2. Excavación en el punto 4c, 6.7 km aguas abajo del represo Tinajas y aguas arriba del represo de emergencia.....	48
Figura 3. Esquema de la estratigrafía encontrada en la excavación del punto 4c.....	48
Figura 4. Aspecto general de la excavación en el punto 4c.	49
Figura 5. Presencia de precipitados, punto 4c.....	49
Figura 6. Excavación en el punto 8c, sobre el arroyo Tinajas.	50
Figura 7. Esquema de la estratigrafía encontrada en la excavación del punto 8c.....	50
Figura 8. Detalle de la excavación punto 8c. Se observa una zona con precipitados de coloración amarilla entre 17 y 60 cm de profundidad y que se extiende a todo lo ancho del cauce.	51
Figura 9. Localización del Punto 9b, en un arroyo al Este del arroyo Tinajas y aguas arriba de la confluencia de otro arroyo posiblemente afectado por otros represos con solución preñada de la Mina Buenavista del Cobre.....	52
Figura 10. Vista de la excavación Punto 9b. Nótese la cinta métrica como escala.	52
Figura 11. Excavación B del Punto 8b: (a) vista hacia el borde del cauce y (b) vista hacia el centro del cauce.....	53
Figura 12. Excavación A, vista del extremo Este.....	54
Figura 13. Excavación A, vista del extremo Oeste.....	55
Figura 14. Esquema de la estratigrafía encontrada en la excavación del punto 8c.....	56
Figura 15. Variación del contenido de humedad volumétrico ($\theta\%$) y CE (mS/m) a profundidad en los perfiles de excavación sobre el lecho del río. La secuencia de perfiles de humedad y CE se presenta desde el punto más cercano al sitio del derrame, alejándose hasta 40 km aprox. a lo largo del río Tinajas.	57
Figura 16. Comportamiento del pH y Conductividad eléctrica (CE) a profundidad en las excavaciones a lo largo del transecto del río Tinajas.....	59
Figura 17. Comportamiento de Elementos mayores (Fe, K y Ca) en los perfiles de las excavaciones a lo largo del río Tinajas.....	60
Figura 18. Comportamiento de metales traza (Cu, Mn, V y Zn) en los perfiles de las excavaciones a lo largo del río Tinajas.....	61
Figura 19. Comportamiento de metales traza (As, Cr y Pb) en los perfiles de las excavaciones a lo largo del río Tinajas.....	62

Muestreo de sedimentos sobre el cauce del río (excavaciones)

Objetivos:

Conocer la estratigrafía bajo el lecho del cauce.

Explorar la extensión vertical del volumen infiltrado del DAM

Aportar elementos para entender la dinámica vertical y lateral de los flujos a lo largo del lecho del arroyo Tinajas y río Bacanuchi.

Metodología:

Utilizando una retroexcavadora se llevaron a cabo excavaciones sobre el cauce del río en sitios donde, de acuerdo a indicios de la vegetación y morfología del cauce, existiera la posibilidad de que el derrame de solución preñada hubiese pasado. Los datos para la ubicación de las excavaciones se muestran en la Tabla 4 y su ubicación se ilustra en la Figura 1. Localización de las excavaciones sobre los cauces del arroyo Tinajas y río Bacanuchi.

. Una de las excavaciones (Punto 9b, Tabla 4 y Figura 1. Localización de las excavaciones sobre los cauces del arroyo Tinajas y río Bacanuchi.

) se ubica sobre un arroyo donde no circuló el derrame y sirve como testigo no afectado. Las excavaciones consistieron en una zanja transversal al cauce, de aproximadamente 1m de ancho, longitud variable (depende del ancho del cauce, típicamente entre 3 y 6 m) y entre 2 y 3 m de profundidad.

En cada excavación se definieron dos perfiles: uno cercano al centro del cauce y otro en el borde. En campo, en cada perfil y aproximadamente a cada 10 cm de profundidad, se registró contenido de humedad (θ %) y Conductividad Eléctrica (CE, mS/m) utilizando una sonda TDR marca Delta Device HR2. En cada uno de estos perfiles se colectaron muestras de sedimento a cada 10 cm de profundidad para su análisis en laboratorio para determinar granulometría, pH, CE, y concentración total de elementos mayores por FRX.

Adicionalmente, en algunas excavaciones se extrajeron columnas inalteradas para experimentos en laboratorio de transporte de metales.

Tabla 1. Datos de localización de los puntos excavados sobre el lecho del río.

Punto	Ubicación		Localidad	Distancia (km)
	X	Y		
Punto 4c	563845.015	3416386.98	Excavación al Norte del represo de Emergencia (P-6)	6.7 (5.4)
Punto 8c	563788.15	3409369.11	Excavación Rancho el Alamo (P-5)	14.0 (12.3)
Punto 9b	564357	3408553	Excavación en cauce en Arroyo TESTIGO al ESTE del Tinajas (P-4)	**
Punto 14b	565693	3400666	Excavación Rancho la Cabellera, Chilolo (P-3)	24.5 (21.2)
Punto 16c	570871.63	3391521.65	Excavación Rancho la Cieneguita (P-2)	36.2 (31.2)
Punto 18b	571543.77	3388291.24	Excavación Río Bacanuchi al Sur de vado Seco (P-1)	40.3 (34.5)

NOTA: La distancia es referida al represo donde ocurrió el derrame de solución preñada (entre paréntesis la distancia en línea recta calculada de las coordenadas). ** Esta zanja se ubica en un arroyo al este del arroyo Tinajas.

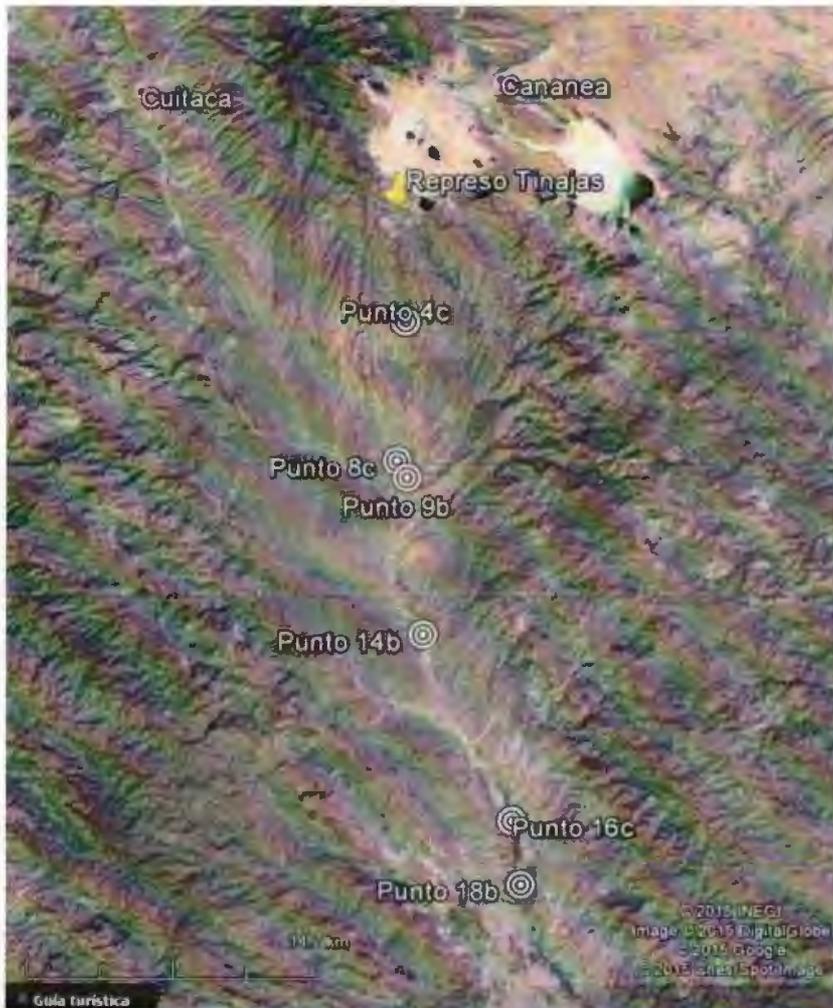


Figura 1. Localización de las excavaciones sobre los cauces del arroyo Tinajas y río Bacanuchi.

Descripción general de las excavaciones

Excavación Punto 4c

Esta excavación se ubica sobre el arroyo Tinajas, aguas arriba del represo de emergencia y aproximadamente a 6.7 km aguas abajo del represo Tinajas donde ocurrió el derrame (Figura 1). En este sitio los sedimentos bajo el cauce son gruesos (Figura 2) hasta la profundidad total de la excavación de casi 3 m (Figura 3 y Figura 4). En toda la profundidad de la excavación se observaron precipitados amarillo-anaranjados, tanto en las arenas como en los clastos grandes (Figura 5) y un fuerte olor a ácido sulfúrico.



Figura 2. Excavación en el punto 4c, 6.7 km aguas abajo del represo Tinajas y aguas arriba del represo de emergencia.

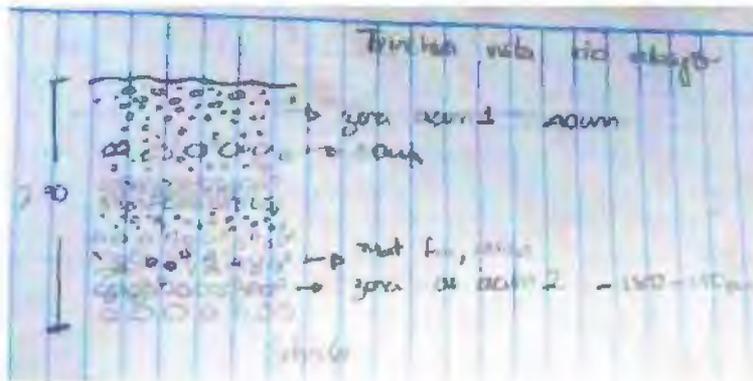


Figura 3. Esquema de la estratigrafía encontrada en la excavación del punto 4c.



Figura 4. Aspecto general de la excavación en el punto 4c.



Figura 5. Presencia de precipitados, punto 4c.

Excavación Punto 8c

Esta excavación se ubica sobre el arroyo Tinajas, en el Rancho El Álamo, 14 km aguas abajo del represo Tinajas donde ocurrió el derrame (Figura 1). En este sitio los sedimentos bajo el cauce también son muy gruesos (Figura 2), sin embargo, a diferencia de la excavación anterior, se encontró un estrato de textura media a fina a los 2.1 m de profundidad (Figura 7). También se observó un estrato continuo de precipitados amarillentos a lo ancho del cauce entre 0.17 y 0.6 m de profundidad (Figura 8).



Figura 6. Excavación en el punto 8c, sobre el arroyo Tinajas.

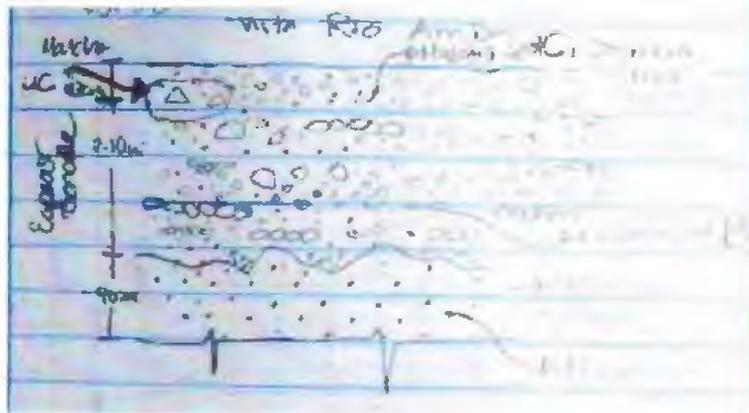


Figura 7. Esquema de la estratigrafía encontrada en la excavación del punto 8c.

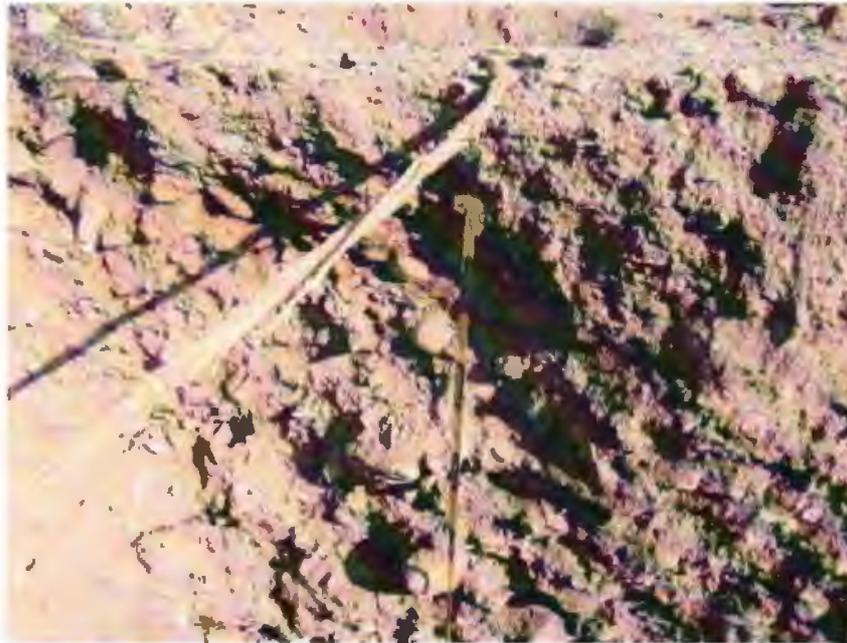


Figura 8. Detalle de la excavación punto 8c. Se observa una zona con precipitados de coloración amarilla entre 17 y 60 cm de profundidad y que se extiende a todo lo ancho del cauce.

Excavación Punto 9b

El sitio para la excavación en el Punto 9b fue seleccionado con el criterio de proporcionar un punto fuera de la influencia del derrame y también fuera de la influencia de posibles aportes de otros repesos con solución preñada al este del arroyo Tinajas.

En este sitio la textura superficial, aproximadamente en los primeros 30 cm, es gruesa. A profundidades mayores se encontró una textura fina y al fondo material arcilloso.

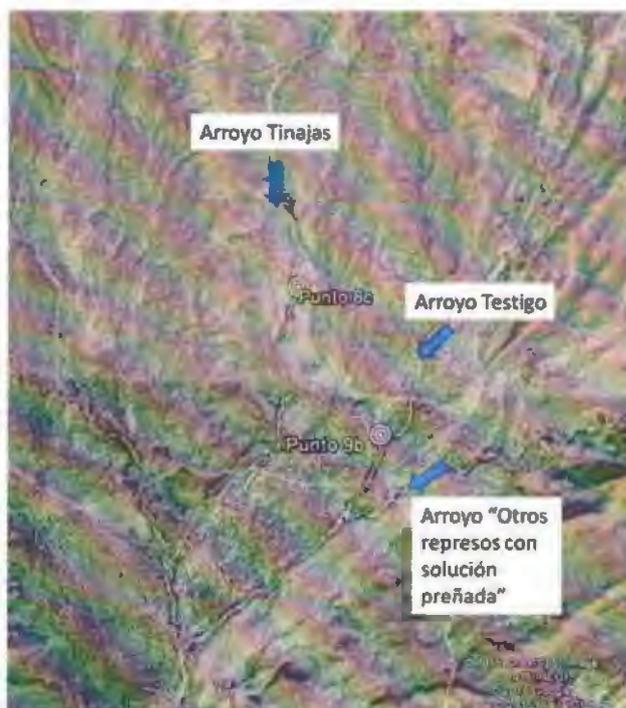


Figura 9. Localización del Punto 9b, en un arroyo al Este del arroyo Tinajas y aguas arriba de la confluencia de otro arroyo posiblemente afectado por otros repesos con solución preñada de la Mina Buenavista del Cobre.



Figura 10. Vista de la excavación Punto 9b. Nótese la cinta métrica como escala.

Excavación Punto 14b

Esta excavación se ubica sobre el río Bacanuchi, aproximadamente a 24.5 km aguas abajo del represo Tinajas donde ocurrió el derrame (Figura 1) y YY km aguas abajo de la confluencia del arroyo Tinajas con el río Bacanuchi.

En este sitio se excavaron dos zanjas en el mismo cauce (A y B) a una distancia de aproximadamente 50 m entre ellas. En la excavación B se encontraron precipitados en la pared del cauce pero no en los sedimentos bajo el cauce (Figura 11 y Figura 12). En general la litología en la pared del cauce es arcillosa, mientras que en el cauce es predominantemente arena y grava.

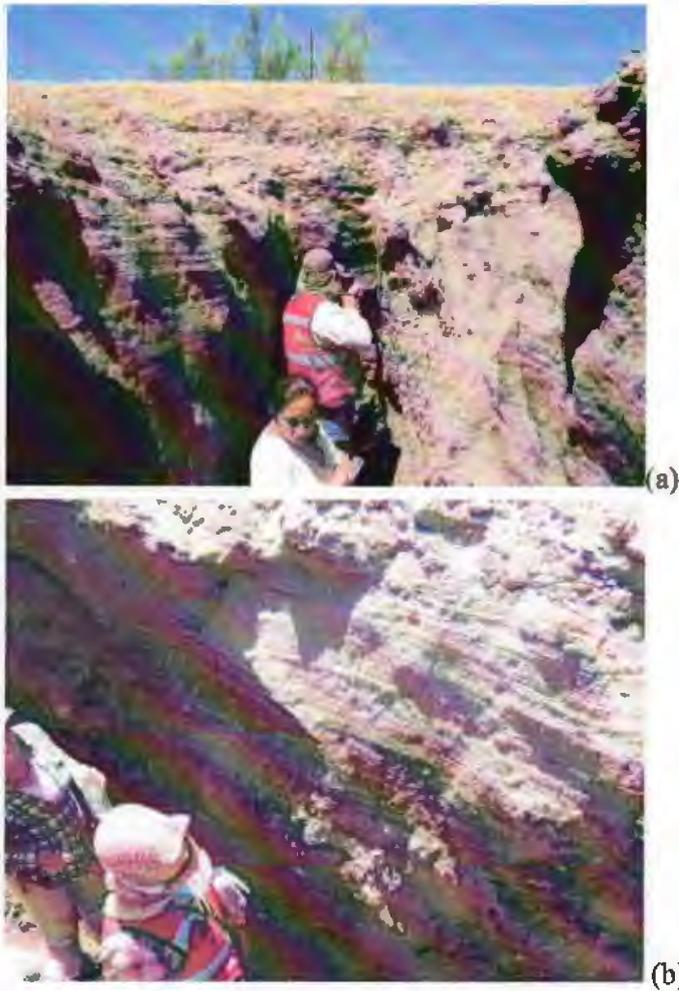


Figura 11. Excavación B del Punto 8b: (a) vista hacia el borde del cauce y (b) vista hacia el centro del cauce.

La zanja B del Punto 8b presentó una historia diferente a la zanja A, en el sentido de que se observó una zona con precipitados al centro del cauce (Figura 12). Esta zona con precipitados fue erosionada después de que ocurrió el evento que originó los precipitados, tal como es evidente por

el contacto inclinado con los sedimentos más recientes (Figura 13); el espesor de sedimentos recientes sin precipitados es de unos 0.2 m en el extremo Oeste del cauce (Figura 13) y se incrementa hasta 1.3 m en el extremo Este (Figura 12). Adicionalmente, los estratos afectados por precipitados son subyacidos por un estrato arcilloso (Figura 13). Un esquema de la estratigrafía se muestra en la Figura 14.

Adicionalmente, en esta excavación se observó el control que la litología y las propiedades hidrogeológicas de cada estrato ejercen sobre la migración del agua y el transporte de solutos. Cuando los estratos tienen granulometría gruesa (presumiblemente alta conductividad hidráulica) el flujo tiende a ser vertical, tal como lo evidencia la presencia de precipitados. Al encontrar estratos de textura más fina, el movimiento de la solución es restringido en la vertical y tiende a ser lateral sobre los estratos de mayor conductividad hidráulica; todo esto inferido por la distribución de precipitados observada en esta excavación.



Figura 12. Excavación A, vista del extremo Este



Figura 13. Excavación A, vista del extremo Oeste

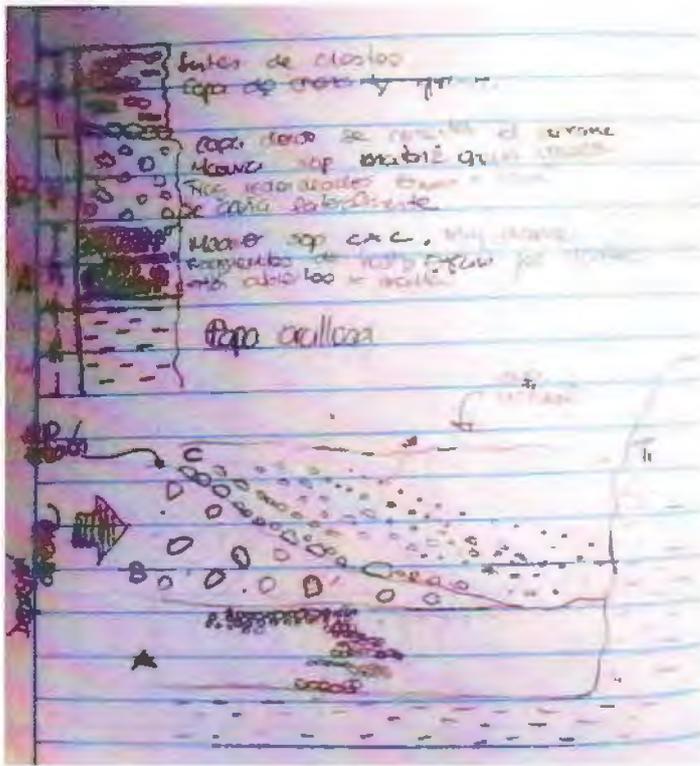


Figura 14. Esquema de la estratigrafía encontrada en la excavación del punto 8c.

Caracterización de los perfiles de excavación

La descripción de los perfiles a lo largo del lecho del río muestra un cambio de granulometría fuerte espacialmente, es decir, a poco metros de distancia se pueden observar diferentes patrones de acumulación de material, en donde en sitios de mayor energía del río se acumulan cantos más gruesos, mientras que en los de menor energía, hay acumulación de cantos más finos. Por otro lado, es los sitios de menor energía es común encontrar a profundidad capas de sedimentos fino, en paquetes mayores a un metro. Estos sedimentos finos (normalmente acumulaciones de arcilla y limo, de colores muy rojizos) favorecen el almacenamiento de humedad, además de fungir como una barrera que promueve la acumulación de sales, lo que se corrobora con las mediciones de CE realizadas en campo (Figura 15).

Por otro lado, la comparación de los valores de CE en los perfiles excavados a lo largo del transecto, permite definir que los sitios más cercanos al punto del derrame, tienen valores más altos de CE en comparación con los sitios que se encuentran a mayor distancia, aun en superficie. El punto definido como Falso Tinajas (9b), que como se señaló anteriormente se encuentra fuera de la influencia del derrame y funge como punto control, muestra el mismo comportamiento. En este

sentido las zonas cercanas al derrame, incrementan su conductividad y es probable que el punto Falso Tinajas haya recibido aportes del mismo derrame o bien que haya tenido aportes similares desde otras fuentes.

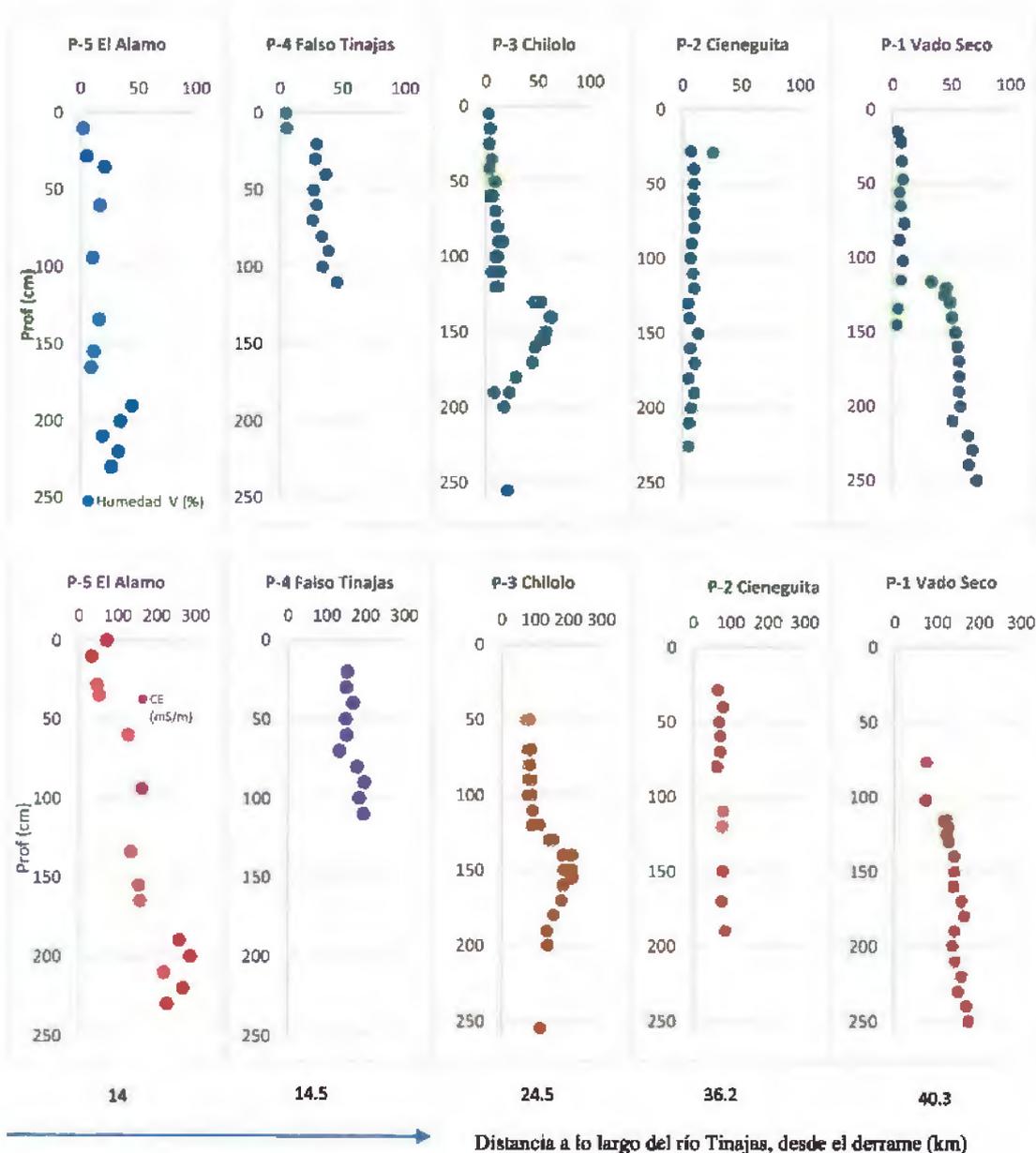


Figura 15. Variación del contenido de humedad volumétrico ($\theta\%$) y CE (mS/m) a profundidad en los perfiles de excavación sobre el lecho del río. La secuencia de perfiles de humedad y CE se presenta desde el punto más cercano al sitio del derrame, alejándose hasta 40 km aprox. a lo largo del río Tinajas.

Por otro lado, la Figura 16 muestra el comportamiento del pH y CE en la fracción fina de las muestras colectadas en las excavaciones. Ambos parámetros fueron determinados en laboratorio.

Los perfiles de pH evidencian un impacto ácido sobre el lecho del río, el cual mantiene el pH alrededor de 3 desde los 0 hasta los 2.5 m de profundidad en el sitio ubicado a 6.7 km del derrame. Este comportamiento ácido se mantiene hasta el sitio del P3 Chilolo a 24 km de distancia del derrame, en donde aún se identifican un pH ligeramente ácido. A 32 Km de distancia del sitio del derrame, el pH disminuye sólo en los primeros centímetros de profundidad.

Llaman la atención los valores de pH tan bajos que se presentan en el sitio 6, cerca al derrame. Estos valores se relacionan con condiciones muy ácidas, que indican el agotamiento de los mecanismos de amortiguamiento. Por lo anterior cabría suponer que en este sitio los aportes de lixiviado minero son constantes lo que sugiere la evidencia de otros derrames.

Las mediciones de la CE en los perfiles de las excavaciones, indican la existencia de bajas concentraciones de sales en el sitio más cercano al derrame, mientras que en los puntos 3 y 2 se registran altas concentraciones de sales. El comportamiento anterior se puede explicar a partir de la granulometría de los sitios; en el sitio más cercano al derrame se observa una granulometría gruesa, conformada por cantos grandes, que favorecen la infiltración rápida del agua y con ello la lixiviación de sales; Contrariamente, en los demás sitios se presentan capas de sedimento fino a profundidad, que fungen como barreras de flujo, y por lo tanto, restringen la infiltración del agua y favorecen la acumulación de sales.

El comportamiento de los metales mayores en los sedimentos es muy homogéneo (Figura 17). Se observa un gran contenido de Fe en todos los perfiles y su acumulación a profundidad en las excavaciones de Represo (P-6) y Chilolo (P-3). En el perfil de Vado seco la concentración de este elemento disminuye a profundidad

El siguiente elemento en orden de abundancia es el Mn (en algunos sitios alcanza hasta 4000 mg/kg). Es el metal más abundante en los perfiles localizados cerca del derrame (Represo y Chilolo) y parece acumularse a profundidad (Figura 22).

Finalmente se encuentran los metales cuya concentración oscila entre 0 y 300 mg/kg, de éstos el más abundante es el Pb, que del mismo modo que el Mn, se encuentra más concentrado en el perfil cercano al derrame (Figura 24).

En resumen, se observa que los perfiles excavados en la proximidad del sitio del derrame muestran un pH más ácido, mayor contenido de Fe, Mn y Pb y baja CE.

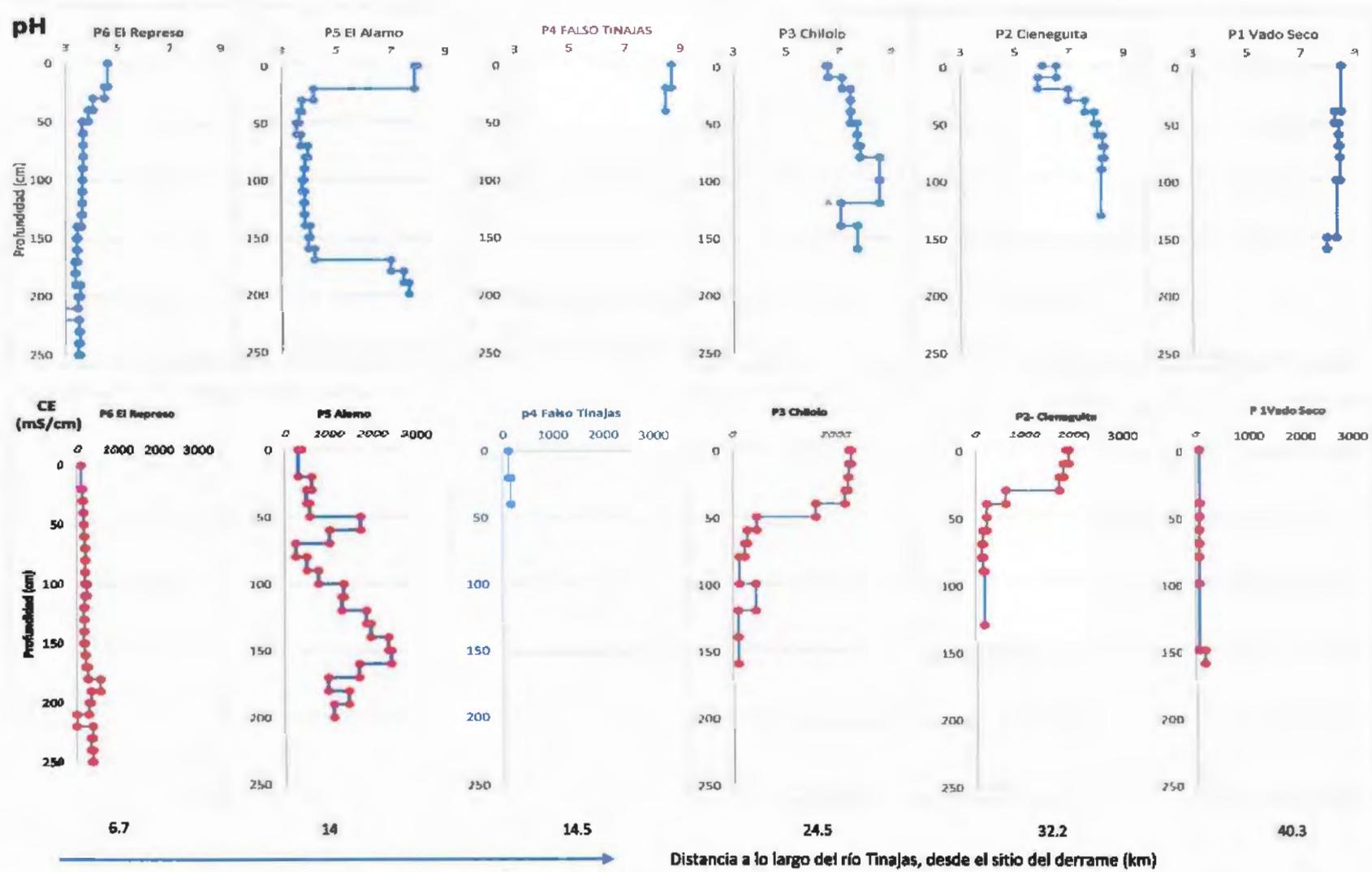


Figura 16. Comportamiento del pH y Conductividad eléctrica profundidad en las excavaciones a lo largo del transecto del río Tinajas

(CE) a

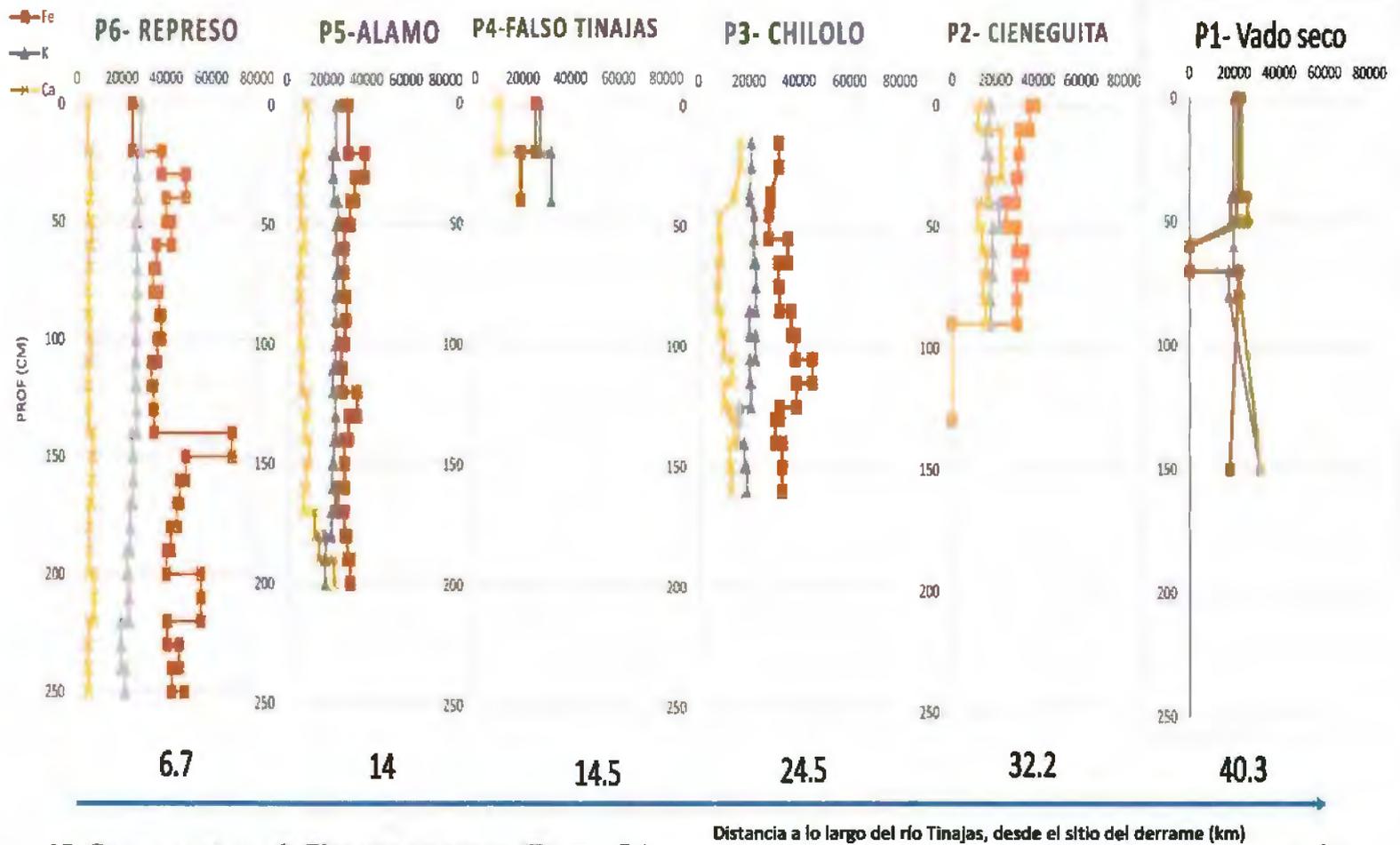


Figura 17. Comportamiento de Elementos mayores (Fe, K y Ca) en los perfiles de las excavaciones a lo largo del río Tinajas.

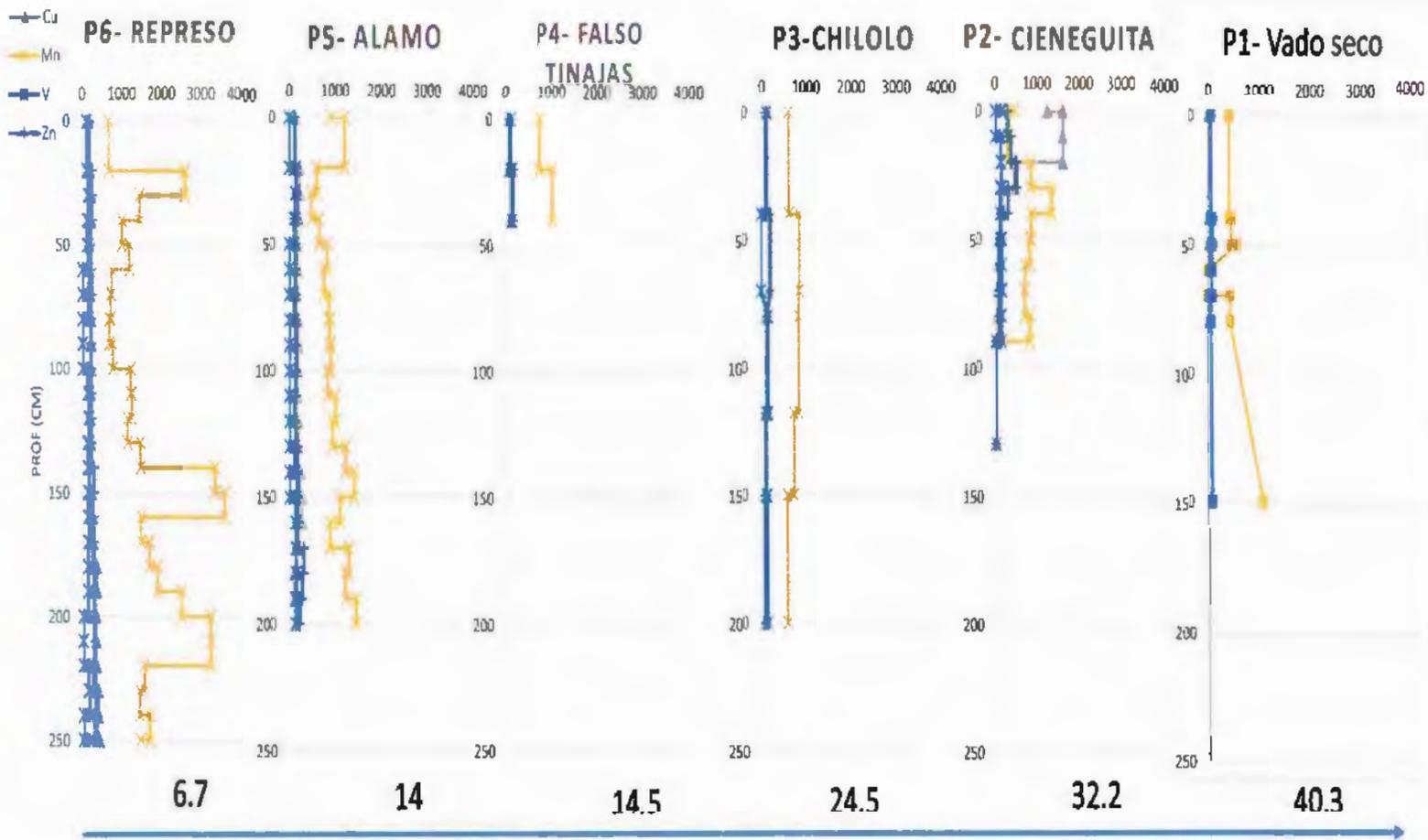


Figura 18. Comportamiento de metales traza (Cu, Mn, V y Zn) en los perfiles de las excavaciones a lo largo del río Tinajas

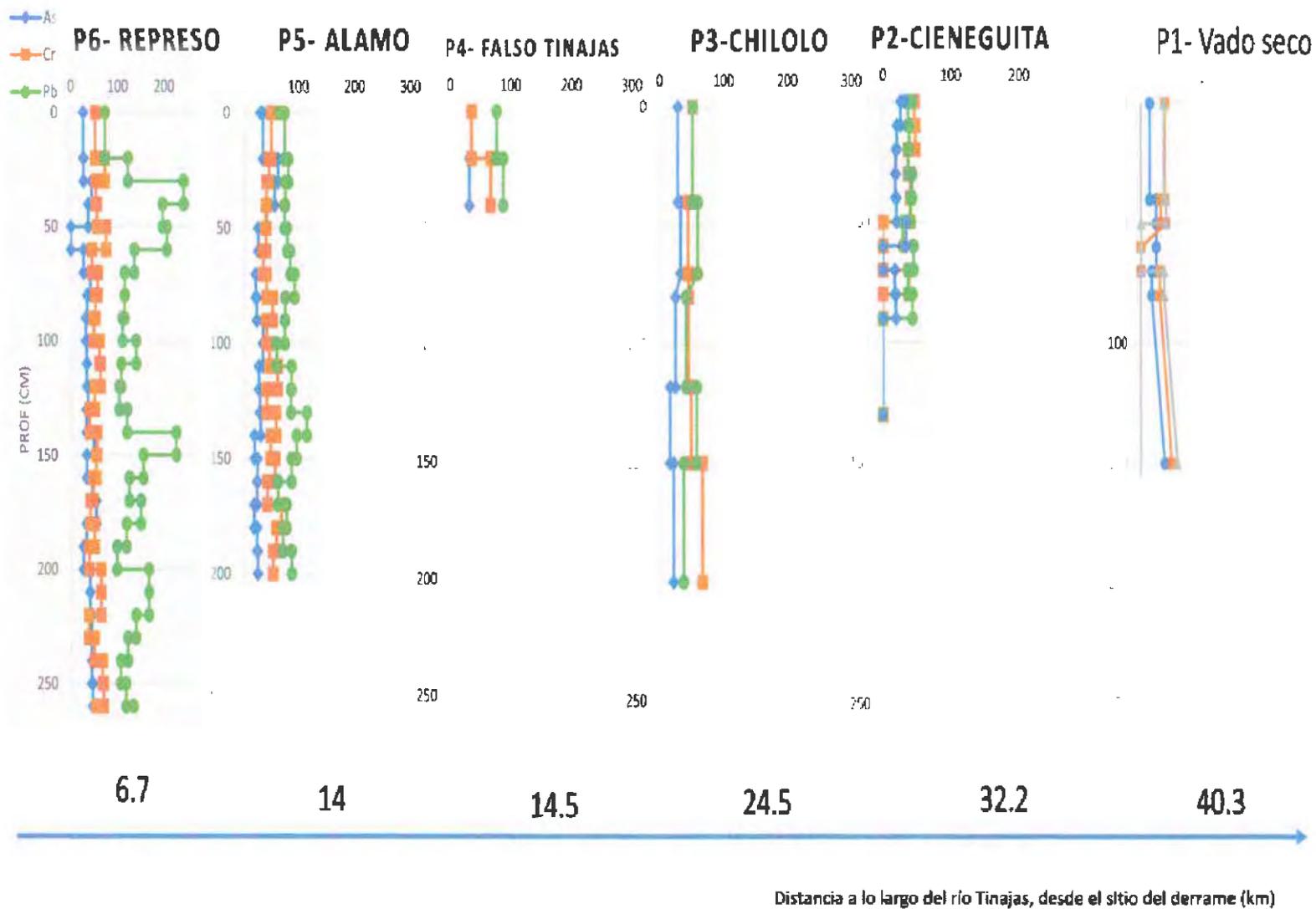


Figura 19. Comportamiento de metales traza (As, Cr y Pb) en los perfiles de las excavaciones a lo largo del río Tinajas.

IV. EXPERIMENTOS EN COLUMNAS

ÍNDICE DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Localización de los sitios donde se colectaron muestras de columna y sedimentos utilizados en los experimentos en el laboratorio. En el lado izquierdo se representan las columnas inalteradas que fueron tomados en los sitios mencionados, estableciendo el número y la disposición en que fueron tomadas. En el lado derecho se identifican los sitios en donde se tomó muestra para empacar columnas.....	72
Figura 2. Comparación de los porcentajes de arcilla y CaCO_3 en las muestras de los sedimentos del lecho del río vs los suelos de las Terrazas. Los sedimentos del río tienen menor contenido de arcilla y de CaCO_3 , características que le confieren a las muestras menor capacidad de amortiguamiento ácido.	75
Figura 3. Porcentajes de arcilla y CaCO_3 en las muestras de los sedimentos del lecho del río vs las muestras de los suelos de las Terrazas.	76
Figura 4. Comportamiento del pH y CE en muestras de sedimentos del lecho del río Vs. Muestras de suelos de las Terrazas a diferentes profundidades.	76
Figura 5. Distribución de metales trazas y elementos mayores en los sedimentos a lo largo del río y los suelos de las terrazas muestreadas a lo largo de la cuenca del río tinajas y el río Sonora.	78
Figura 6. Concentración adimensional de los metales al equilibrio durante el experimento de cinética de adsorción en el suelo de Cerro Colorado. a) Elementos adsorbidos en el suelo y b) elementos liberados desde el suelo de Cerro Colorado. C_e : concentración del element al equilibrio; C_o : concentración del elemento en el DAM.....	80
Figura 7. Concentración adimensional de los metales al equilibrio durante el experimento de cinética de adsorción en el sedimento del Río Tinajas. (a) Elementos adsorbidos en el sedimento, b) elementos liberados desde el sedimento. C_e : concentración del elemento al equilibrio; C_o : concentración del elemento en el DAM.....	81
Figura 8. Se muestran los porcentajes de adsorción de Al en cada uno de los 5 sistemas suelo:solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.	83
Figura 9. Se muestran los porcentajes de adsorción de As en cada uno de los 5 sistemas suelo:solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.	85
Figura 10. Se muestran los porcentajes de adsorción de Cd en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.	87

Figura 11. Se muestran los porcentajes de adsorción de Cr en cada uno de los 5 sistemas suelo:solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.	89
Figura 12. Se muestran los porcentajes de adsorción de Cu en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del río Tinajas.	91
Figura 13. Se muestran los porcentajes de adsorción de Fe en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.	92
Figura 14. Se muestran los porcentajes de adsorción de Mn en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.	94
Figura 15. Se muestran los porcentajes de adsorción de V en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.	95
Figura 16. Se muestran los porcentajes de adsorción de Zn en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.	96
Figura 17. Se muestran los porcentajes de adsorción del K, Pb, Mg, Na, Sr, Ba y Ca en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.	99
Figura 18. Se muestran los porcentajes de adsorción de Ni, Co y Li en cada uno de los 5 sistemas suelo:solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.	100
Figura 19. Dispositivo utilizado en los experimentos de columnas empacadas.	102
Figura 20. Dispositivo utilizado en los experimentos de columnas intactas.	103
Figura 21. Variación del pH y la CE de los lixiviados antes y después de aplicarse el DAM en la columna ST1 (a) y en la columna ST2 (b).	105
Figura 22. Curvas de elución de las columnas empacadas con sedimentos del cauce del arroyo Tinajas, elementos que se adsorben, en el experimento ST1 (a) y en el experimento ST2 (b).	106

Figura 23. Curvas de elución de las columnas empacada con sedimentos del cauce del arroyo Tinajas, elementos que se liberaron, en el experimento ST1 (a) y en el experimento ST2 (b).	108
Figura 24. Infiltración en columna de suelo de la terraza arroyo Tinajas.	109
Figura 25. Flujo de lixiviados en la base de la columna de suelo de la terraza arroyo Tinajas.	110
Figura 26. pH y CE en lixiviados de la columna de suelo de la terraza arroyo Tinajas.	110
Figura 27. Curvas de elución de los elementos liberados del suelo (a) cuya concentración adimensional fue superior a la unidad ($C/C_0 > 1$) y de los elementos adsorbidos (b) cuya concentración adimensional fue inferior a la unidad ($C/C_0 < 1$), en el suelo de la terraza del arroyo Tinajas.	111
Figura 28. Concentración de elementos en las muestras de solución de suelo colectadas a diferente profundidad de la columna de suelo de la terraza arroyo Tinajas, durante el experimento.	112
Figura 29. Flujo de lixiviados en la base de la columna de sedimentos Álamo.	113
Figura 30. Variación del pH y CE en los lixiviados de la columna de sedimentos Álamo.	113
Figura 31. Curvas de elución de los elementos liberados del sedimento Álamo, (a) en mayor proporción y (b) en menor proporción	114
Figura 32. Curvas de elución de los elementos adsorbidos en el sedimento del Álamo.	115
Figura 33. Concentración de elementos en las muestras de agua de poro colectadas a diferente profundidad de la columna de sedimento Álamo. Se muestran los elementos adsorbidos (a) y liberados (b) del sedimento.	115
Figura 34. Velocidad de infiltración en la superficie (a) y flujo de lixiviados en la base de la columna de sedimento rancho Chilolo (b).	116
Figura 35. Curvas de elución de los elementos adsorbidos (a) y liberados (b) del primer riego de la columna de sedimento rancho Chilolo.	117
Figura 36. Curvas de elución de los elementos adsorbidos (a) y liberados (b) del segundo riego de la columna de sedimento rancho Chilolo.	118
Figura 37. Concentración de elementos en las muestras de agua de poro colectadas a diferente profundidad de la columna de sedimento de Rancho Chilolo, en el primer riego. Se muestran los elementos adsorbidos (a) y liberados (b) del sedimento.	119
Figura 38. Concentración de elementos en las muestras de agua de poro colectadas a diferente profundidad de la columna de sedimento de Rancho Chilolo, en el segundo riego. Se muestran los elementos adsorbidos (a) y liberados (b) del sedimento.	120
Figura 39. Velocidad de infiltración en la superficie de la columna del suelo de la terraza de río Bacanuchi.	121
Figura 40. Variación del pH y CE en los lixiviados de la columna de sedimentos Álamo.	121

Figura 41. Se muestran las curvas de elución de los elementos que fueron (a) liberados al paso del DAM: Sr>Na>Ca y (b) adsorbidos, en la columna de suelo procedente de la terraza de río Bacanuchi.	122
Figura 42. Concentración de elementos en las muestras de solución de suelo colectadas a diferente profundidad de la columna de suelo de la terraza del Río Bacanuchi. Se muestran los elementos retenidos (a) y liberados (b) de la columna.	123
Figura 43. Esquema de la secuencia termodinámica de reducción de sustancias inorgánicas a pH 7 y 25°C (a) y rangos y orden en donde se presentan las reacciones de aceptores de electrones (b).	124
Figura 44. Variación del potencial redox durante el experimento, en la columna de suelo de la terraza arroyo Tinajas.	125
Figura 45. Variación del potencial redox durante el experimento, en la columna de sedimento procedente de la localidad de El Álamo.	125
Figura 46. Variación del potencial redox durante el experimento, en la columna de suelo de la terraza del Río Bacanuchi.	126
Figura 47. Rango del Potencial redox en suelos y sedimentos, se muestra los procesos de metabolismo microbiano y aceptores de electrones. Enciclopedia of soil in the Environment. 2005	127
Figura 48. Comparación de los diagramas de Eh vs pH elaborados para las columnas de represo Tinajas (a), El Álamo (b) y Bacanuchi (c), con los diagramas de PROUBARIX de los elementos Fe (d) y Al (e).	129
Figura 49. Muestra de una sección de la columna de suelo colectada en el punto 1 (represo Tinajas). Arriba) Representación de los poros en 3D en gris. Abajo) Tres puntos de vista de cortes bidimensionales de los ejemplos de suelos.	132
Figura 50. Imágenes de muestra de los cortes que forman el volumen de suelo (Columna represo Tinajas, Punto 1).	132
Figura 51. Fracción de porosidad por corte (2100 imágenes), Columna Punto 1 (represo Tinajas).	133
Figura 52. Izquierda) Imagen de muestra de la porosidad de la columna Punto 1 antes del riego. Derecha) Imagen de muestra de la porosidad de la columna Punto 1 después del riego.	134
Figura 53. Se muestra el volumen total de poros por cada una de las sub-columnas.	136
Figura 54. Si evaluamos el número total de poros se puede observar que el riego causa la creación de nuevos poros.	137
Figura 55. Volumen promedio de poro por sub-columna disminuye después del regado. .	138

ÍNDICE DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Sitios visitados para la selección de muestras a utilizar en los experimentos de movilidad del DAM.....	70
Tabla 2. Muestras seleccionadas para realizar experimentos de movilidad del DAM.....	72
Tabla 3. Características generales de muestras colectadas en campo.	74
Tabla 4. Contenido de metales en el DAM.	78
Tabla 5. Condiciones experimentales de los sistemas suelo/sedimento solución.	82
Tabla 6. Resumen del comportamiento de adsorción de metales en el suelo de Cerro Colorado y el Sedimento del río Tinajas.	100
Tabla 7. Potencial Eb normales en reacciones de elementos metálicos. http://rt000uud.eresmas.net/redox.htm	128
Tabla 8. Resumen: adsorción – desorción de elementos en/desde el suelo/sedimento.	130
Tabla 9. Dimensiones de las 19 secciones en que se dividió la columna de represo Tinajas.	134

Objetivos

General

Evaluar la dinámica de los metales contenidos en el DAM en suelo y sedimentos de la cuenca del Río Sonora

Específicos

Identificar sitios de interés para el estudio de la capacidad de adsorción-desorción y movilidad, de los metales contenidos en el DAM, a lo largo de la cuenca del Río Sonora.

Evaluar la capacidad de suelos/sedimentos seleccionados de la cuenca del Río Sonora, de adsorber los metales contenidos en el DAM

Evaluar la movilidad de los metales contenidos en el DAM mediante experimentos de transporte en columnas de suelo y sedimentos.

Introducción

El drenaje ácido de minas (DAM), es un líquido de color amarillo, con pH alrededor de 2, y un alto contenido de metales. Conocer el efecto que el derrame del DAM tiene sobre la calidad del agua subterránea, requiere de la comprensión de los procesos que ocurren en la zona vadosa. En este sentido fueron seleccionados los sitios de mayor interés para evaluar el destino ambiental de los metales contenidos en el DAM en su paso por la zona vadosa. Desde el punto de vista del cuidado al medio ambiente, resulta interesante conocer la capacidad amortiguadora de suelos y sedimentos a todo lo largo de la cuenca del Río Sonora, sin embargo, para dar una respuesta pronta y expedita al proyecto, la selección de sitios se realizó con base en dos criterios: 1) sitios en los cuales definitivamente llegó el DAM durante el derrame, con base en su localización geográfica respecto al punto del derrame, 2) sitios localizados aguas debajo de la ocurrencia del derrame en los cuales se encontraron evidencias de la presencia de DAM al realizar recorridos en la zona (pH bajo, coloración amarillenta), sin embargo, no es posible asegurar que en estos últimos el DAM observado haya sido el DAM derramado objeto del proyecto.

La adsorción, la desorción y la movilidad de metales en suelos y sedimentos, son los principales procesos que gobiernan el destino ambiental de estos elementos en la zona no saturada. El estudio de tales procesos requiere del análisis del efecto que las propiedades químicas (pH, CIC, etc) y físicas (estructura, porosidad, etc) de la matriz de los suelos y sedimentos, producen en la adsorción de los contaminantes, así como del conocimiento de las condiciones ambientales existentes (potencial redox, fuerza iónica, etc) que definen la movilidad de los metales durante el paso del DAM a través de la red porosa de suelos y sedimentos. De este modo, para lograr los objetivos planteados, fue necesario realizar dos tipos de experimentos: experimentos de adsorción-desorción en lote en los cuales las condiciones de pH, potencial redox, fuerza iónica y concentración de metales, estuvieron

bajo control; y experimentos de transporte del DAM en columnas de suelos y sedimentos seleccionados.

La estructura del suelo se refiere al tamaño, forma y arreglo de las partículas sólidas y poros del suelo; juega un rol determinante en el movimiento y retención del agua. La estructura del suelo puede ser afectada por actividades antrópicas, por ejemplo manejo agrícola y como en este caso, por la actividad minera. El paso de la solución de DAM a través del suelo y sedimentos, puede alterar la estructura del medio poroso. Lo anterior por dos vías, la solución ácida de DAM puede provocar la pérdida de iones del suelo por disolución de los mismos. Este proceso ocurre debido a que el pH ácido del DAM favorece la protonación de los sitios de intercambio en la superficie de las partículas de arcilla (reduciendo así su carga neta negativa) y con ello el desplazamiento de cationes divalentes como el Ca^{2+} que juegan un papel importante en la agregación y preservación de la estructura del suelo. Una segunda vía se refiere a la “erosión” que provoca la solución ácida en las paredes de los macroporos, provocando la pérdida de partículas de partes altas hacia partes bajas del perfil de suelo. Estas alteraciones en la estructura del suelo afectan también la velocidad de infiltración del agua.

En el presente capítulo se pretende aportar conocimiento para mejorar la comprensión de los procesos de adsorción/desorción y movilidad de los elementos contenidos en el DAM cuando se ponen en contacto con el suelo/sedimento de la zona, lo anterior es importante al evaluar la calidad del agua de la zona.

Selección de los sitios de muestreo y caracterización de muestras

Estrategia de muestreo:

La recolección de muestras de la localidad se llevó a cabo de acuerdo a los siguientes criterios:

Ubicación de sitios de muestreo a diferentes distancias desde la zona más cercana del derrame, localizadas dentro de la cuenca del río Tinajas y de la cuenca del río Sonora.

En cada localidad se tomaron muestras sobre las terrazas aledañas al río, esperando encontrar suelo fluvial formado a partir de material enriquecido en material proveniente de los suelos de zonas más altas que contengan propiedades amortiguadoras (arcillas, carbonatos o materia orgánica).

También se tomaron muestras sobre el lecho del río, compuesto de material arrastrado en la base del río (material grueso) y sedimento de las zonas aledañas al río, en este sentido se esperan propiedades menos amortiguadoras de material ácido.

Durante el tiempo de trabajo se realizaron 3 visitas a la zona en donde se ubicaron diferentes propuestas. Los puntos presentados en la tabla 1 describen los sitios en donde se tomaron las

muestras de columnas inalteradas o muestras de sedimento para los experimentos. En cada punto se especifica su ubicación geográfica, el tipo de muestra colectada, la localidad en la que se encuentra y la distancia que guarda respecto a la fuente del derrame.

Tabla 1. Sitios visitados para la selección de muestras a utilizar en los experimentos de movilidad del DAM.

Punto	Ubicación X	Y	Tipo de muestra	Localidad	Distancia (km)	Fecha
Punto 4a	563975	3416154	Columna inalterada suelo	Al norte del Represo de emergencia	6.7	3/21/15
Punto 4b	563782.3	3416242.9	Sedimento para columnas empacadas	Al norte del Represo de emergencia	6.7	
Punto 6	564080	3414310	Sedimento para columnas empacadas	Testigo 1 tributario dentro del Tinajas	8.9	05/01/15
Punto 8c	563788.15	3409369.11	Columna inalterada de sedimento lecho del río	Excavación Rancho el Alamo (P5)	14	12/30/15
Punto 9a	564331	3408333	Sedimento para columnas empacadas	Testigo 2 Rancho Tito Loja	15.2	05/02/15
Punto 10	563408	3407576	Sedimento para columnas empacadas y muestras de suelo	NA	16	05/03/15
Punto 11	563772	3404058	Sedimento para columnas empacadas y muestras de suelo	Rancho la cabellera al norte	19.9	5/19/15
Punto 14b	565693	3400666	Columna inalterada de sedimento lecho del río	Excavación Rancho la Cabellera (Chilolo) P3	24.5	12/30/15
Punto 15	566507.59	3397834.58	Sedimento para columnas empacadas y muestras de suelo	Rancho cabellera sur (frontera sur)	27.91	5/19/15
Punto 16a	570831	3391701	Sedimento para columnas empacadas y muestras de suelo	Rancho la cieneguita	36.2	5/19/15
Punto 18a	571530.37	3387955.77	Columnas inalteradas, Sedimento para columnas empacadas	Bacanuchi norte	40.3	5/19/15
Punto 19a	574696	3382816	Sedimento para columnas empacadas	Bacanuchi sur, Rancho	47.5	5/19/15

Punto 20	580547	3359498	Sedimento para columnas empacadas	Don Abelardo, La Trampa Outlet Bacanuchi	79.7	3/22/15
Punto 22	573961.3 6	3340579. 79	Sedimento para columnas empacadas	Cerro Colorado	111.7	3/22/15
Punto 24	583841.7	3277048. 37	Sedimento para columnas empacadas terraza alta y baja	Baviacora	192.0	3/22/15
Punto 25	570932	3260822	Sedimento para columnas empacadas terraza alta y baja	Puerta del sol- Este de Ures	220.1	3/22/15

A partir de los sitios de la lista anterior se seleccionó un grupo de muestras en las que se llevaron cabo los experimentos en el laboratorio su ubicación se muestra en la Tabla 2 y Figura 1. Estos sitios se concentraron principalmente en la cuenca del río Tinajas, a excepción de la muestra colectada en el punto 22, que se ubicó sobre el río Sonora (Cerro Colorado).

Tabla 2. Muestras seleccionadas para realizar experimentos de movilidad del DAM.

Punto	Ubicación		Tipo de muestra	Localidad	Distancia (km)
	X	Y			
Punto 4a	563975.0	3416154.0	Columna inalterada de suelo	Al norte del Represo de emergencia	6.7
Punto 4b	563782.4	3416242.9	Sedimento en columna empacada	Al norte del Represo de emergencia	6.7
Punto 8c	563788.2	3409369.1	Columna inalterada de sedimento sobre el lecho del río	Excavación grupo de Agua Rancho el Alamo Exc-P5	14.0
Punto 14b	565693.0	3400666.0	Columna inalterada de sedimento sobre el lecho del río	Excavación Rancho la Cabellera (Chilolo) Exc-P3	24.5
Punto 18a	571530.4	3387955.8	Columnas inalteradas y Sedimento para columna empacada.	Bacanuchi norte	40.3
Punto 22	573961.4	3340579.8	Columnas de inalterada de suelo	Cerro Colorado	111.7

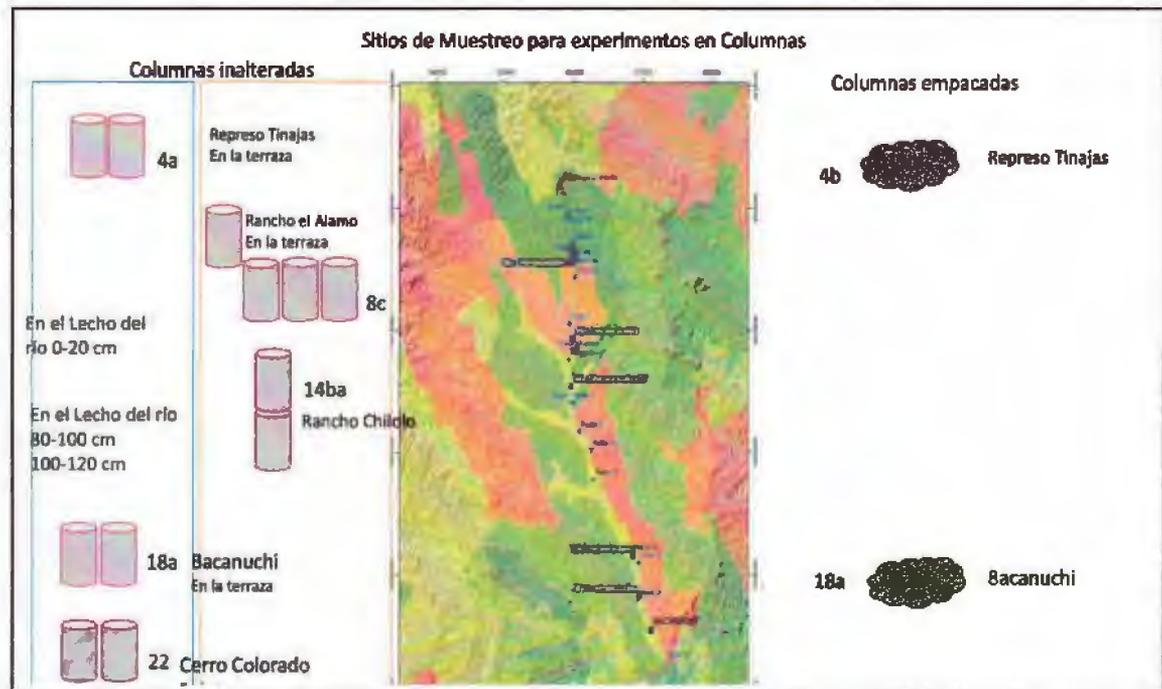


Figura 1. Localización de los sitios donde se colectaron muestras de columna y sedimentos utilizados en los experimentos en el laboratorio. En el lado izquierdo se representan las columnas inalteradas que fueron tomados en los sitios mencionados, estableciendo el número

y la disposición en que fueron tomadas. En el lado derecho se identifican los sitios en donde se tomó muestra para empacar columnas.

Caracterización de las muestras:

Con base en los criterios generales de amortiguamiento, se caracterizaron los siguientes parámetros en las muestras:

-pH y CE: Se determinaron en una suspensión suelo: solución (1:2,5), utilizando como solución agua y CaCl_2 (0.01M). Las suspensiones se agitaron durante 18 h y posteriormente el pH se determinó con un potenciómetro marca Bekman y la CE con un conductímetro marca Lamotte.

- Contenido de CaCO_3 : se estimó cuantitativamente a partir de la reacción de las muestras con HCl al 10%.

- Contenido de arcilla: se determinó a partir del análisis de la distribución de partículas, mediante el método de la pipeta.

- Contenido total de elementos mayores y elementos traza: se determinó en muestras secas al aire y homogenizada con molino de ágata, mediante fluorescencia de rayos X.

Las características de las muestras colectadas se presentan en la 9.

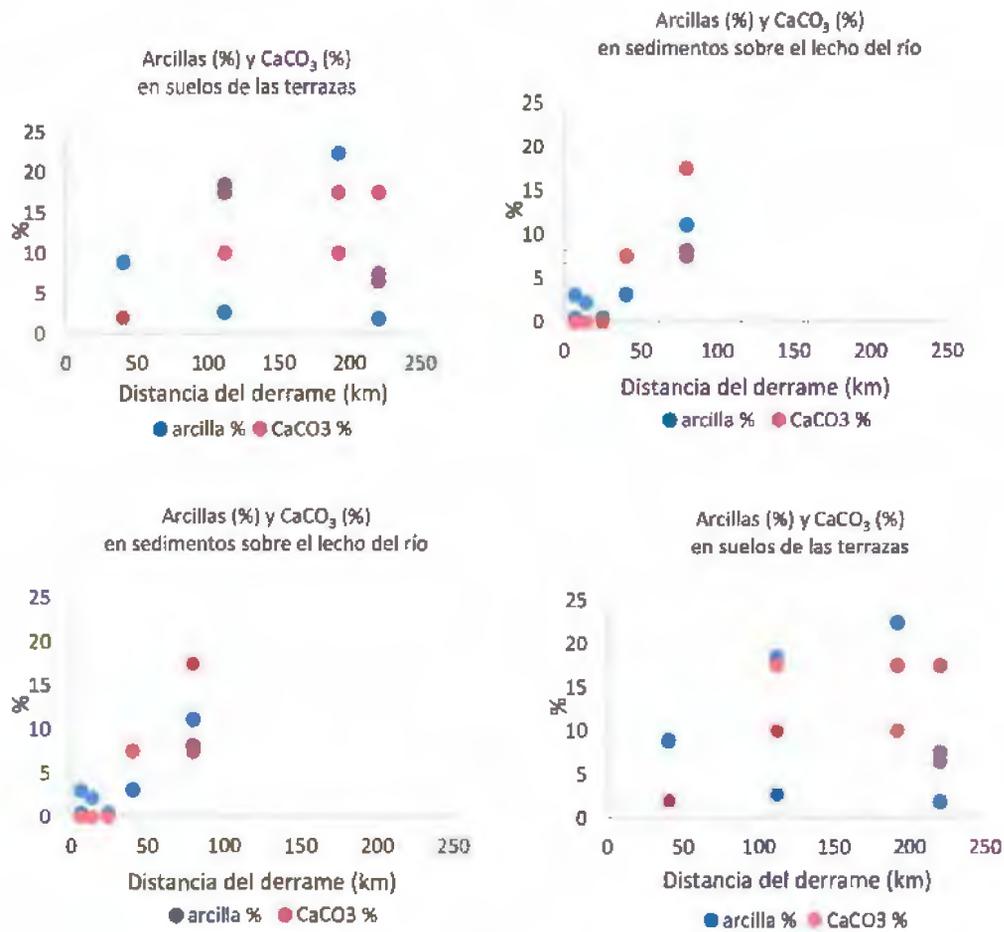
Tabla 3. Características generales de muestras colectadas en campo.

* CONABIO: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/2012>

Punto	Tipo de muestra y Localidad	Tipo de suelo asociado*	Textura			pH (1:2,5)		CE μS/cm	Contenido de Carbonatos Evaluación	CaCO ₃ %	Densidad aparente g/cm ³
			Arena	Limo	Arcilla	CaCl ₂	H ₂ O				
			%	%	%						
Punto 4a	Sedimento sobre el cauce, Represo Tinajas	Luvisol Ortico	89.0	8.0	3.0	4.7	4.9	5.1	Libre de carbonatos (K0)	0	1.41
Punto 4a	Sedimento antes del represo Tinajas	Luvisol Ortico	96.4	3.1	0.5	6.2	6.3	6.5	Libre de carbonatos (K0)	0	0.99
Punto 14a	Sedimento sobre el cauce, río Tinajas	Fluvisol Calcareo	98.7	0.8	0.5		8.4	104.4	Libre de carbonatos (K0)		
Punto 18a	MC suelo 0-40 cm, Vado seco Bacanuchi	Fluvisol Calcareo	67.3	23.8	8.9	7.4	7.6	7.9	Bajo a Medio (K2-K3)	2	
Punto 18a	Sedimento, Vado seco Bacanuchi	Fluvisol Calcareo	87.5	9.3	3.1	7.5	7.8	8.2	Medio (K3)	2-10	1.489
Punto 20	Sedimento, Bacanuchi Outlet- Nueva capa	Fluvisol Calcareo	63.3	28.6	8.1	7.4	7.7	7.9	Medio (K3)	2-10	1.29
Punto 20	Sedimento anterior, Bacanuchi-Outlet	Fluvisol Calcareo	63.4	25.4	11.1	7.6	7.7	7.9	Alto (K4)	10-25	1.34
Punto 22	Suelo Cerro Colorado 3-16 cm	Yermosol Calcáreo	39.6	57.7	2.7	8.0	7.8	7.6	Medio a Alto (K3-K4)	10	
Punto 23	Suelo Cerro Colorado 27-44cm cm	Yermosol Calcáreo	22.3	59.2	18.5	7.7	7.8	7.8	Alto (K4)	10-25	1.29
Punto 24	Suelo Terraza Baja, Baviacora	Fluvisol Eutrico	46.2	31.4	22.4	7.5	7.7	7.9	Alto (K4)	10-25	1.32
Punto 24	Suelo Terraza alta, Baviacora	Fluvisol Eutrico				7.6	7.8	8.0	Medio a Alto (K3-K4)	10	
Punto 25	Suelo Puerta del sol 0-10 cm	Regosol Eutrico	90.6	7.5	1.9	7.5	7.9	8.2	Medio (K3)	2-10	1.54
Punto 25	Suelo Puerta del sol 20-40 cm	Regosol Eutrico	63.3	30.3	6.5	7.2	7.4	7.6	Alto (K4)	10-25	1.28

En los suelos, el amortiguamiento ácido en tiempos cortos, se llevan a cabo mediante mecanismos de disolución de carbonatos y bicarbonatos, así como debido al intercambio catiónico y aniónico que ocurre en la superficie de los coloides del suelo, principalmente arcillas y materia orgánica (Ulrich, 1980, 1983). En este sentido una valoración de la capacidad de amortiguamiento de los suelos, puede llevarse a cabo a partir de la comparación de propiedades como el contenido de CaCO₃ y el contenido de arcilla, ya que este último establece la capacidad de intercambio catiónico.

Figura 2. Comparación de los porcentajes de arcilla y CaCO₃ en las muestras de los sedimentos del lecho del río vs los suelos de las Terrazas. Los sedimentos del río tienen menor contenido de arcilla y de CaCO₃, características que le confieren a las muestras menor capacidad de amortiguamiento ácido.



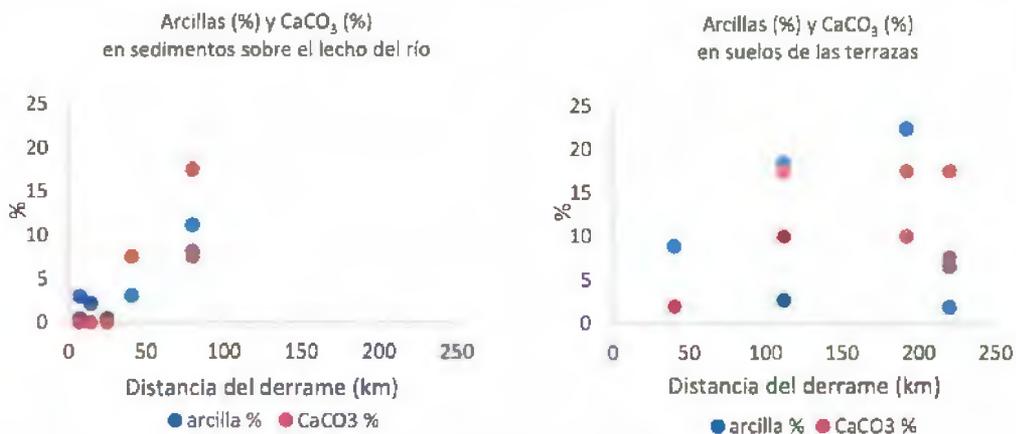


Figura 3. Porcentajes de arcilla y CaCO₃ en las muestras de los sedimentos del lecho del río vs las muestras de los suelos de las Terrazas.

Por otro lado, el pH es una variable respuesta de la interacción de los procesos de intemperismo y reacción ácida, mientras que la CE representa la concentración de sales acumuladas en el sistema producto de las mismas reacciones.

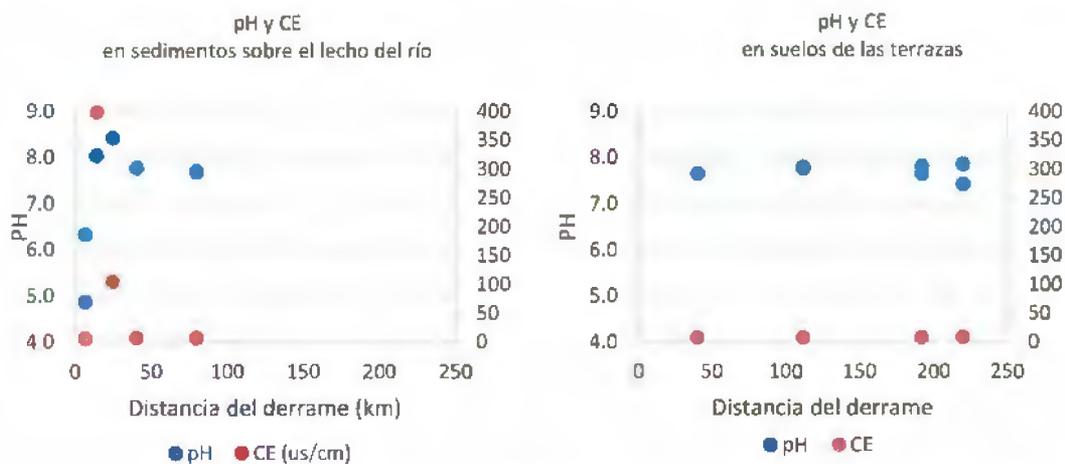


Figura 4. Comportamiento del pH y CE en muestras de sedimentos del lecho del río Vs. Muestras de suelos de las Terrazas a diferentes profundidades.

Comparando el comportamiento del pH y CE en los sedimentos respecto a los suelos de las terrazas, se observa que el pH de los sedimentos tiende a ser menor en los sitios próximos al derrame, probablemente porque los sedimentos tienen menor contenido de CaCO₃, elemento que favorece pH neutros o como evidencia de derrames ácidos anteriores. Esto último se relaciona con el aumento en la CE de estas muestras a pesar el contenido de CaCO₃ a esta distancia (Figura 4).

Las anteriores características permiten entender el comportamiento de los metales provenientes de la muestra "preñada" de la mina, que se cree se movilizó principalmente sobre la base del lecho del río.

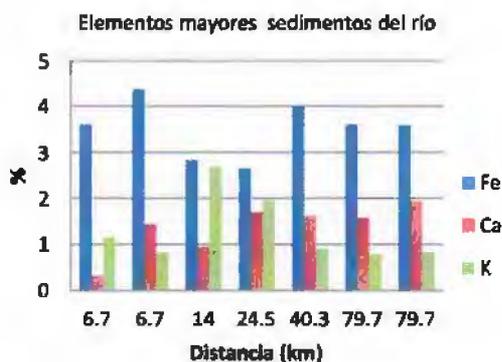
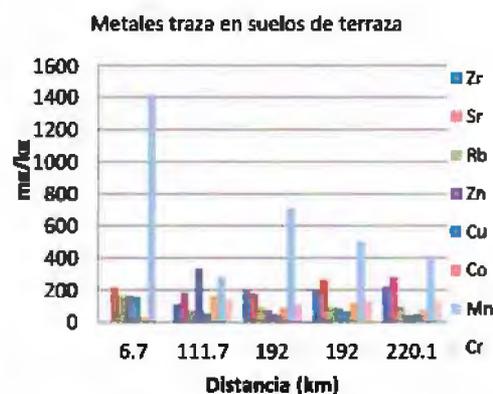
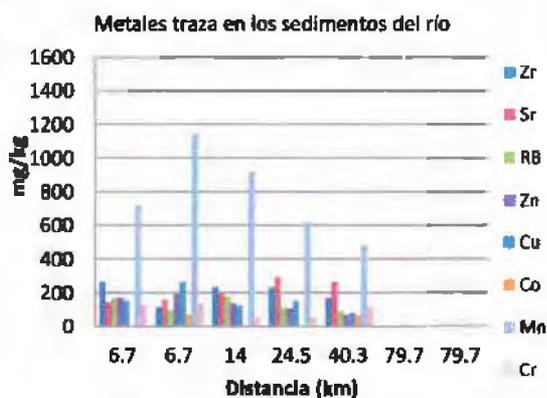
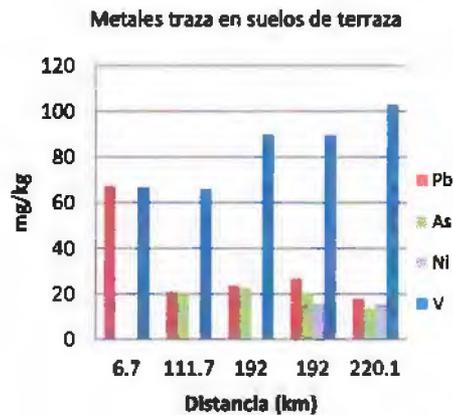
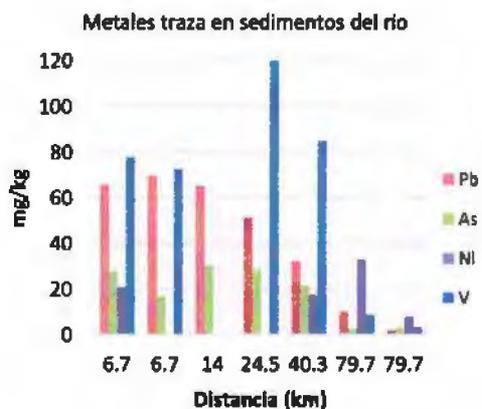


Figura 5. Distribución de metales trazas y elementos mayores en los sedimentos a lo largo del río y los suelos de las terrazas muestreadas a lo largo de la cuenca del río tinajas y el río Sonora.

La Figura 5 representa la distribución de metales en los sedimentos a lo largo del transecto muestreado. Se observa que el Pb se acumulan preferentemente hacia los sitios localizados cerca del derrame y en mayor proporción en los sedimentos que en los suelos de la terraza. Esto puede interpretarse como aporte del derrame principalmente ya que en las muestras de las terrazas el Pb se encuentra en menor proporción y está de manera constante. El Mn y Zrse comportan igual que el Pb, pero en este caso se encuentran tanto en los sedimentos como en los suelos, por lo que es posible que procedan del material geológico.

Otro elemento que se encuentra abundantemente es el V, el cual se incrementa a lo largo del transecto y su presencia se puede asociar al tipo de sedimento. Mientras que el Ca muestra una comportamiento decreciente a lo largo del transecto, muy semejante al contenido de CaCO_3 en los sedimentos y los suelos.

En general los sedimentos se caracterizan porque dominan los siguiente elementos: Fe, Ca, K, Mn V y Pb. Es probable que estos elementos se movilicen en los experimentos de movilidad en las columnas.

Caracterización del Drenaje Ácido de Mina (DAM):

Para realizar los experimentos de adsorción y desorción de los metales contenidos en el DAM, en el suelo y sedimentos de la zona de estudio, se preparó una muestra compuesta del material colectado en varias visitas al sitio. La muestra se analizó por ICP-óptico, la Tabla 10 muestra los resultados obtenidos:

Tabla 4. Contenido de metales en el DAM.

Elemento	Concentración (mg/L)
Al	4264.84
As	1.08
Ba	<LD*
Ca	642.20
Cd	4.05
Co	18.78
Cr	1.21
Cu	787.13
Fe	3430.09
K	<LD
Li	0.76

Mg	778.12
Mn	643.92
Mo	<LD
Na	4.35
Ni	8.27
Pb	0.18
Sb	<LD
Se	<LD
Sn	<LD
Sr	0.15
Ti	<LD
Tl	<LD
V	2.84
Zn	377.29

*LD límite de detección del equipo

Cinéticas de adsorción:

Previo a los experimentos de adsorción y desorción fue necesario determinar el tiempo de equilibrio. La metodología seguida se explica a detalle en el Anexos

Anexo 1.

Se evaluaron 5 tiempos de equilibrio entre 0 y 24 horas. En la mayoría de los metales el equilibrio se alcanzó antes de 19 horas de contacto, se tomó entonces el tiempo de 24 horas para realizar los experimentos. Las Figura 6 y Figura 7 muestran los resultados obtenidos.

Suelo Cerro Colorado

En el caso del suelo del Cerro Colorado (Figura 6), la concentración adimensional al equilibrio varió entre 0.2 y 1, lo que representa que la adsorción de algunos metales en el suelo fue de hasta el 80%, siendo el As el elemento menos adsorbido y el Cu el más adsorbido. Los metales adsorbidos en el suelo evaluado fueron Al, Cr, Ca, K, V, Fe, As, Cu, Na y Zn (Figura 6a).

El experimento nos permitió además conocer los metales liberados del suelo, es decir, metales en los cuales la concentración al equilibrio fue mayor a la concentración inicial del elemento en el drenaje ácido de mina (concentración adimensional superior a 1). Los metales liberados desde el suelo Cerro Colorado fueron Cd, Co, Li, Mn, Mg, Ni, Pb y Sr. Siendo este último liberado hasta en una proporción 15 veces mayor a su concentración inicial, mientras que el metal menos liberado fue el Mg (Figura 6b).

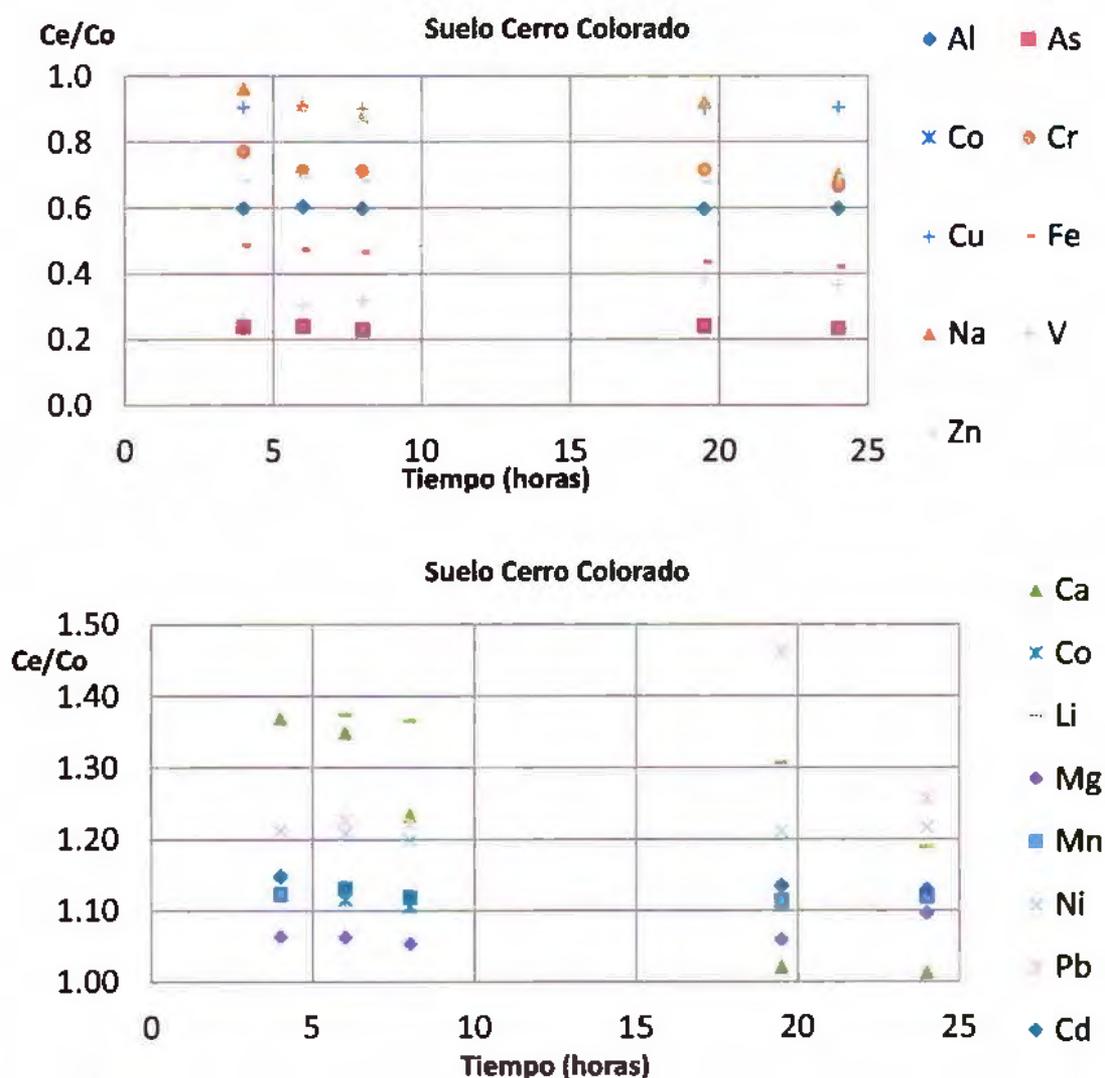


Figura 6. Concentración adimensional de los metales al equilibrio durante el experimento de cinética de adsorción en el suelo de Cerro Colorado. a) Elementos adsorbidos en el suelo y b) elementos liberados desde el suelo de Cerro Colorado. Ce: concentración del elemento al equilibrio; Co: concentración del elemento en el DAM.

Sedimentos arroyo Tinajas

En el caso del sedimento del arroyo Tinajas (Figura 7), la concentración adimensional al equilibrio varió entre 0.4 y 1, lo que representa que la adsorción de algunos metales en el suelo fue de hasta el 60%. Similar a lo observado en el suelo de Cerro Colorado, el As fue el elemento menos adsorbido mientras que el metal más adsorbido fue el Ti. Los metales adsorbidos en el sedimento evaluado fueron Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Ni, Ti, V y Zn (Figura 6a).

Los metales liberados del suelo, es decir, metales en los cuales la concentración al equilibrio fue mayor a la concentración inicial del elemento en el DAM (concentración adimensional superior a 1), fueron Ca, K, Mg, Mn, Na, Pb, Sr. Siendo el K y Sr los liberados en una proporción hasta 9 veces mayor a su concentración inicial, mientras que el metal menos liberado fue el Mg (Figura 7b).

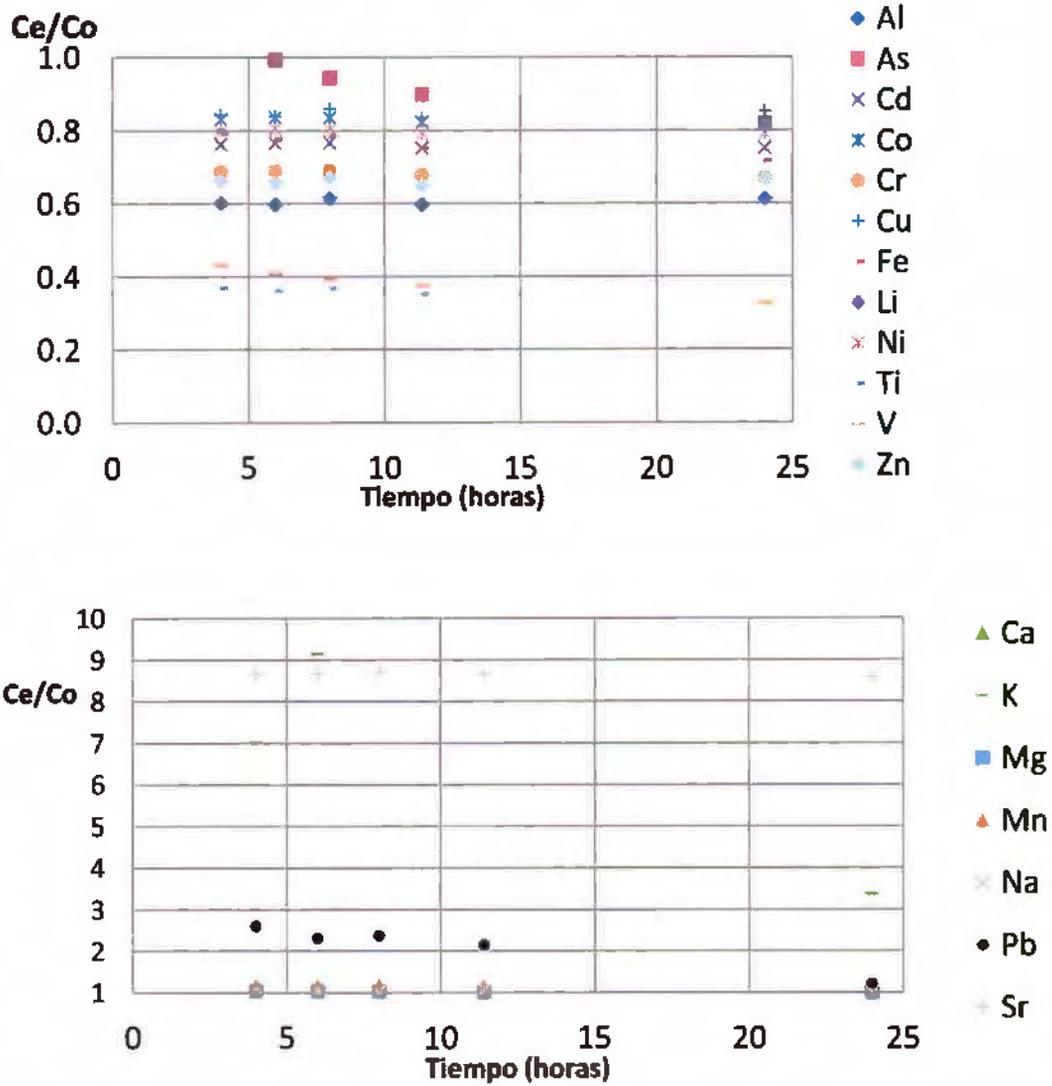


Figura 7. Concentración adimensional de los metales al equilibrio durante el experimento de cinética de adsorción en el sedimento del Río Tinajas. (a) Elementos adsorbidos en el sedimento, b) elementos liberados desde el sedimento. Ce: concentración del elemento al equilibrio; Co: concentración del elemento en el DAM

Experimentos de adsorción y desorción:

La adsorción y desorción de los metales contenidos en el DAM, se evaluó en sistema batch.

La adsorción y movilidad de los metales es afectada por las condiciones ambientales del sistema, principalmente por el pH, el potencial redox y la fuerza iónica. Debido a esto, se evaluaron cinco diferentes sistemas con distinto nivel de concentración del DAM y por lo tanto diferente pH y CE. Las condiciones experimentales de cada sistema se indican en la Figura 7. El procedimiento experimental consistió en poner en contacto al suelo o sedimento a evaluar, con disoluciones del DAM de diferente concentración. La mezcla suelo/sedimento con la solución de DAM, se puso en agitación por 24 horas. Concluido este tiempo se separaron las fases y se determinó la concentración de metales en la fracción líquida mediante ICP óptico. El procedimiento detallado del experimento se presenta en el Anexo 2. La concentración adsorbida de cada metal se estimó mediante la siguiente fórmula:

Donde:

C_{ads} : Concentración total adsorbida al equilibrio

C_0 : Concentración inicial en el DAM (mg/L)

C_{dis} : Concentración del adsorbato en la fase líquida al equilibrio(mg/L)

V : Volumen de la solución (L)

M_s : Masa de suelo/sedimento seco (Kg)

Tabla 5. Condiciones experimentales de los sistemas suelo/sedimento solución.

	Sistema 1 DAM 10%v/v		Sistema 2 DAM 25% v/v		Sistema 3 DAM 50% v/v		Sistema 4 DAM 75% v/v		Sistema 5 DAM 100% v/v	
	suelo	sed	suelo	sed	suelo	sed	suelo	sed	suelo	sed
pH	4.2	2.6	3.7	2.5	2.9	2.4	2.5	2.4	2.5	2.4
CE (mS/cm)	5	4.4	6.2	7	9.8	10.4	13.1	13.3	15.4	15.7

Con los resultados obtenidos se construyeron gráficos indicando el porcentaje del metal adsorbido en el suelo/sedimento, en cada uno de los cinco sistemas evaluados. En algunos casos la concentración en solución al equilibrio fue mayor que la concentración del elemento

en el DAM, indicando que el elemento fue liberado del suelo, en estos casos el valor de la concentración adsorbida es negativo.

A continuación se presenta el gráfico y un análisis preliminar del comportamiento observado para cada uno de los metales contenidos en el DAM.

Aluminio

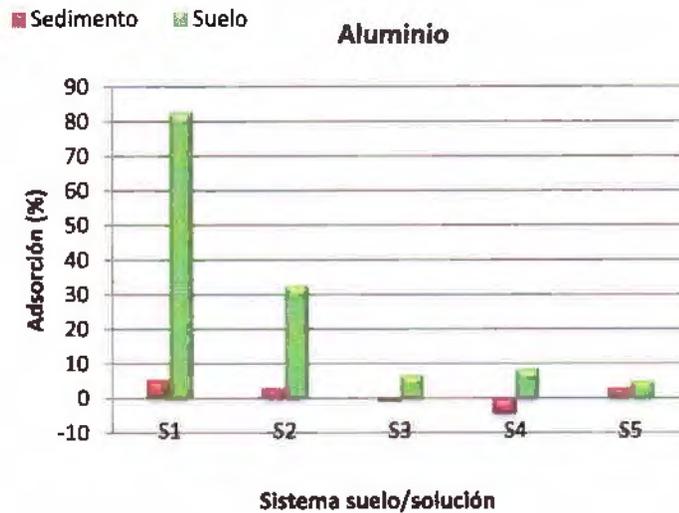


Figura 8. Se muestran los porcentajes de adsorción de Al en cada uno de los 5 sistemas suelo:solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.

Al en el Suelo Cerro Colorado

Especies dominantes de Al: De acuerdo con el diagrama de especiación del Al, a pH mayores a 4, cerca del 100% del elemento se encuentra como $\text{Al}(\text{OH})_3$, es decir como un mineral cristalino. A pH 3.7 el 50% del Al se encuentra como Al^{3+} y el 50% restante como $\text{Al}(\text{OH})_3$. A pH menores a 3 el Al se encuentra como Al^{3+} , es decir como un ion monoatómico en solución.

Análisis y descripción de la gráfica: La Figura 8 muestra que en los dos primeros sistemas (DAM más diluido), la adsorción del Al es mayor respecto a los siguientes 3, esto puede deberse a que a los pH prevaecientes en los sistemas 1 y 2 se favorece la formación de

hidróxido de aluminio, una especie cristalina, insoluble que queda retenida en los poros del suelo restringiendo la liberación del aluminio a la solución. Por el contrario, a los pH más ácidos (prevalcientes en los sistemas 3, 4 y 5) se favorece la protonación de los sitios de intercambio en la fase sólida y la disminución de la carga neta negativa del suelo. Esto a su vez promueve la permanencia del Al^{3+} en solución.

A lo anterior se suma que en los sistemas S3, S4 y S5 hay una mayor presencia de cationes metálicos disueltos que pueden competir con el Al^{3+} por los sitios de adsorción en la fase sólida del suelo.

Al en el sedimento arroyo Tinajas

Especies dominantes de Al: De acuerdo con el diagrama de especiación del aluminio a los pH que se presentan en los 5 diferentes sistemas, el 100% del aluminio debería encontrarse como Al^{3+} , es decir como una especie soluble. La solubilidad del elemento disminuye al incrementarse el pH de la solución.

Análisis y descripción de la gráfica: La Figura 35 muestra que a concentraciones iniciales elevadas del DAM (sistemas S3 y S4), las concentraciones de Al adsorbido resultan negativas, esto se debe a que la concentración inicial de Al en solución es menor a la concentración del elemento en solución después del equilibrio de adsorción, lo que sugiere que el metal es liberado del sedimento.

La disminución de la adsorción del Al a concentraciones elevadas del DAM (S3 y S4) y su liberación del sedimento puede deberse a 2 factores: 1) Que a mayor concentración del DAM el pH se hace ligeramente más ácido, favoreciendo la protonación de la superficie de intercambio y la disminución de la carga neta negativa del suelo. Al ser menos negativa la superficie de intercambio, tiene lugar la repulsión de cationes metálicos polivalentes como el aluminio, de tal forma que la concentración de este elemento en solución se incrementa y 2) Que al incrementarse la concentración del DAM, también aumenta la concentración iones positivos en solución que compiten con el aluminio por los sitios de adsorción en la fase sólida del suelo.

Arsénico

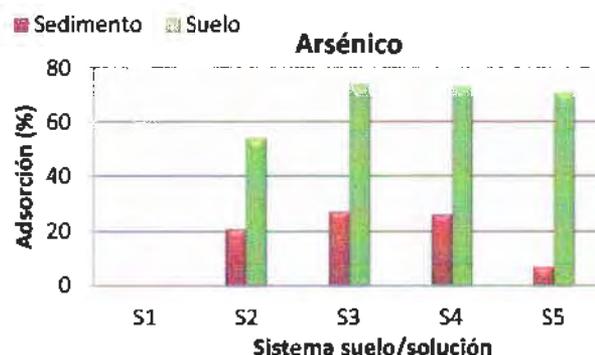


Figura 9. Se muestran los porcentajes de adsorción de As en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.

Antecedentes de la adsorción de As a suelos y sedimentos:

El arsénico inorgánico en el sistema suelo/agua, se puede encontrar presente en dos estados de oxidación, como As(5+) en ambientes oxidantes y como As(3+) en ambientes reductores, ambas formas del arsénico se adsorben fuertemente a los componentes inorgánicos del suelo (arcillas y óxidos de Fe y Al), especialmente poseen una gran afinidad por los óxidos de hierro con los cuales pueden formar complejos de esfera interna mono o bidentados vía un mecanismo de intercambio de ligandos (Feng *et al.*, 2013).

As en el suelo Cerro Colorado

Especies dominantes de As: En condiciones aerobias y pH entre 2 y 3 la especie dominante del arsénico es el ácido arsénico H_3AsO_4 (sistemas 3 a 5), cuando el pH asciende por arriba de 3 hasta 11, el ácido arsénico se disocia formando $H_2AsO_4^-$ y $HAsO_4^{2-}$ (sistemas 1 y 2) (Moreno Jiménez *et al.* 2012).

Descripción y análisis de la gráfica: En la Figura 9 se observa que a medida que se incrementa la proporción de DAM en el sistema, aumenta también la adsorción del As. En los sistemas 1 y 2, la menor adsorción del As puede asociarse a que a los pH prevalecientes en estos (4.2 y 3.7) las formas predominantes del As son aniónicas ($H_2AsO_4^-$ y $HAsO_4^{2-}$) y por lo tanto son repelida de los sitios de adsorción de la fase solida del suelo con carga permanente negativa, así como de los grupos hidroxilo con carga variable en los bordes de las arcillas laminares (que a pH por arriba de 3 se encuentran deprotonados y también presentan carga negativa). A medida que el pH disminuye, la carga neta negativa del suelo

también se reduce y por otra parte se favorece la formación de ácido arsénico. De Acuerdo con Goldberg (2002), la adsorción de arsenatos (compuestos de arsénico en los cuales el metal posee un número de oxidación 5+) se incrementa a pH ácidos. Concordantemente, en la gráfica se observa que a medida que disminuye el pH de los sistemas (es decir que se incrementa la concentración del DAM), la concentración de As adsorbida aumenta. Ha sido bien documentado que a pH cercanos a los pKa ($pK_a^1:2.3$) del ácido arsénico su adsorción es máxima (Feng, 2012).

El As no se desorbe del suelo, las concentraciones en solución para las desorciones 1 y 2 se encuentran por debajo del límite de detección.

As en sedimento del arroyo Tinajas

Especies dominantes de As: A los pH prevalecientes en los 5 sistemas, la especie dominante es el ácido arsénico (H_3AsO_4).

Descripción y análisis de la gráfica: En el sedimento de tinajas se observa la misma tendencia en la adsorción del As que en el suelo de Cerro Colorado (Figura 9): a medida que el pH de la solución disminuye y se acerca más primer al pKa del ácido arsénico (2.3), la adsorción se incrementa. Este comportamiento es concordante con el reportado en la literatura (Feng *et al.*, 2013). El único resultado incongruente con esta tendencia se observa en el último sistema. Aun cuando el pH indica que la adsorción del ácido arsénico debiera ser máxima, la adsorción en este punto disminuye. Este comportamiento podría deberse a que bajo elevadas concentraciones del DAM y por lo tanto mayor contenido de iones en solución, la competencia por los sitios de adsorción en el material adsorbente es mayor lo que resulta en el desplazamiento del arsénico de los sitios de adsorción en la fase sólida. A esto se suma que la superficie de adsorción en el sedimento es mucho menor que la superficie adsorbente del suelo, ya que el primero posee una textura gruesa y un área superficial específica reducida, mientras que el segundo tiene un mayor contenido de arcillas con capacidad adsorbente y mayor superficie específica.

El As no se desorbe del sedimento, las concentraciones en solución para las desorciones 1 y 2 se encuentran por debajo del límite de detección.

Cadmio

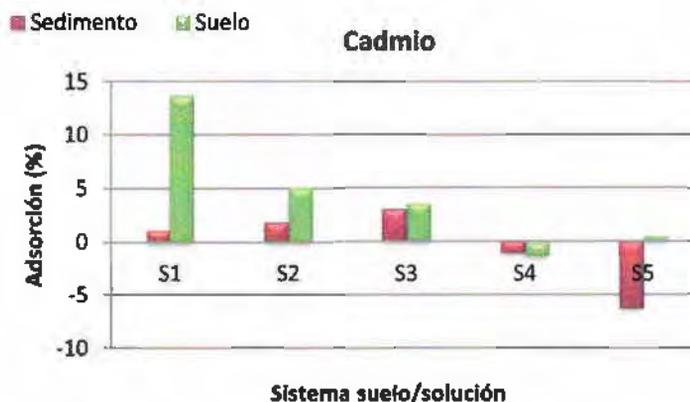


Figura 10. Se muestran los porcentajes de adsorción de Cd en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.

Antecedentes de la adsorción de Cd a suelos y sedimentos: El principal mecanismo de adsorción del Cd^{2+} a bajas concentraciones del elemento es el intercambio catiónico, mientras que a elevadas concentraciones puede quedar retenido por precipitación, sobre todo en suelo calcáreos con pH elevados (Bradl, 2004).

La adsorción de Cd se ve influenciada fuertemente por la presencia de cationes divalentes como el Zn^{2+} y el Ca^{2+} en la solución del suelo. Estos cationes compiten con el Cd^{2+} por los sitios de adsorción en la fase sólida o bien pueden promover el deaplazamiento del Cd^{2+} de la superficie de intercambio (Bradl, 2004). Es importante considerar que hay mucho calcio en el sistema.

Cd en el suelo Cerro Colorado

Especies dominantes de Cd: De acuerdo con el diagrama de especiación del Cd, al pH presente en los 5 sistemas probados, el 100% del Cd debe encontrarse como Cd^{2+} , una especie soluble. El dominio de esta especie se sostiene a pH menores a 7.5, valor por arriba del cual comienza a formarse CdOH^+ .

Descripción y análisis de la gráfica: En la Figura 37 se observa que la adsorción del Cd^{2+} disminuye al incrementarse la concentración del DAM (particularmente en los últimos 2 sistemas), lo cual pudiera deberse a dos razones: 1) la protonación de los sitios de intercambio con carga variable a pH menores a 3 (caso que se presenta en los sistemas 2, 3 y 4), lo que

incrementa la carga neta negativa del suelo favoreciéndose la repulsión de cationes y 2) que al aumentar la concentración del DAM aumenta la competencia entre el cadmio y otros cationes en solución por los sitios de adsorción en el complejo de intercambio.

Cd en el sedimento del arroyo Tinajas

Especies dominantes de Cd: De acuerdo con el diagrama de especiación del Cd, al pH presente en los 5 sistemas, el 100% del Cd debe encontrarse como Cd^{2+} , una especie soluble.

Descripción y análisis de la gráfica: En la Figura 37 se aprecia que la adsorción se incrementa a medida que disminuye el pH en los sistemas 1, 2 y 3 (se esperaba el comportamiento inverso). Por otra parte se observa que en los sistemas 3, 4 y 5, que presentan el mismo pH al equilibrio (posiblemente debido a que a elevadas concentraciones del DAM el sedimento es incapaz de amortiguarlo), la adsorción disminuye a medida que aumenta la CE. Esta última tendencia puede explicarse por el hecho de que al haber una mayor cantidad de cationes en solución se favorece la competencia entre el Cd^{2+} y otros iones por los sitios de adsorción en el sedimento.

Cromo

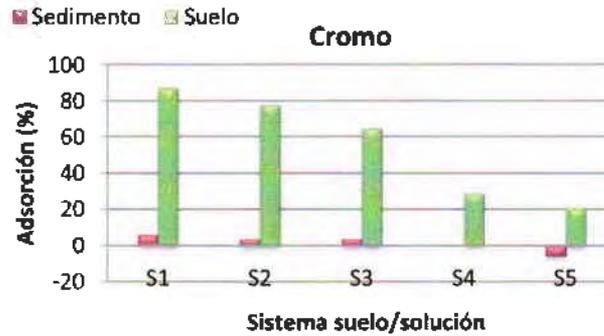


Figura 11. Se muestran los porcentajes de adsorción de Cr en cada uno de los 5 sistemas suelo:solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.

Antecedentes de la adsorción de Cr a suelos y sedimentos: Las especies de Cr hexavalente (aniónicas) se adsorben principalmente a los componentes del suelo que poseen grupos hidroxilo expuestos (óxidos de Fe, Mn y Al y bordes de arcillas laminares como la kaolinita y la montmorillonita). La adsorción (complejación) del Cr(VI) a estos componentes de la fase sólida se incrementa a medida que el pH decrece, debido a la protonación de los grupos hidroxilo. Los componentes de la fase sólida que poseen mayor afinidad por las especies de Cr hexavalente son los óxidos de Fe (Bradl, 2004). Por otra parte las especies de Cr(III) se adsorben rápido y específicamente a los óxidos de Fe y Mn, así como a las arcillas minerales.

La adsorción de estas especies se incrementa al aumentar el pH de la solución del suelo y se reduce en presencia de otros cationes que compiten por el metal por los sitios de adsorción en la fase sólida, así como por la presencia de materia orgánica disuelta (Bradl, 2004). El Cr^{3+} se hidroliza en soluciones ácidas formando especies como $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$ y $\text{Cr}_2(\text{OH})_2^{6+}$. El incremento en la adsorción de Cr^{3+} al aumentar el pH se debe a que estas especies de Cr hidrolizadas se adsorben por un mecanismo de intercambio catiónico que se favorece cuando la carga neta negativa del suelo aumenta.

Cr en el suelo Cerro Colorado

Especies dominantes de Cr:

S1(pH 4.2): El 75 % del Cr se encuentra como CrOH^{2+} , el 24% como Cr^{3+} y el 1% restante como $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$.

S2 (pH 3.7): El 58% del Cr se encuentra como CrOH^{2+} y el 42% restante como Cr^{3+} .

S3 (pH 2.9): El 18 % del Cr se encuentra como CrOH^{2+} y el 82% restante como Cr^{3+} .

S4: (pH 2.5): El 7% del Cr se encuentra como CrOH^{2+} y el 93% restante como Cr^{3+} .

S5 (pH 2.5): El 7% del Cr se encuentra como CrOH^{2+} y el 93% restante como Cr^{3+} .

En todas las especies presentes a los pH que prevalecen en los 5 sistemas, el Cr presenta un número de oxidación +3, Cr (III).

Descripción y análisis de la gráfica. La Figura 11 muestra que, la adsorción de cromo trivalente (que es la especie de Cr que predomina a los pH prevalecientes en estos tres sistemas), disminuye a medida que la concentración del DAM se incrementa probablemente debido a 1) la disminución de la carga neta negativa del suelo producida por el desenso del pH y 2) debido a la presencia de una mayor cantidad de iones en solución que compiten con el Cr por los La gráfica muestra que, la adsorción de cromo trivalente (que es la especie de Cr que predomina a los pH prevalecientes en estos tres sistemas), disminuye a medida que la concentración del DAM se incrementa probablemente debido a 1) la disminución de la carga neta negativa del suelo producida por el desenso del pH y 2) debido a la presencia de una mayor cantidad de iones en solución que compiten con el Cr por los sitios de adsorción en la fase sólida del suelo.

Cromo en sedimento Río Tinajas

Especies dominantes de Cr:

S1(pH 2.6): El 93% del Cr se encuentra como Cr^{3+} y el 7% restante como CrOH^{2+} .

S2 (pH 2.5): El 94% del Cr se encuentra como Cr^{3+} y el 6% restante como CrOH^{2+} .

S3, S4 y S5 (pH 2.4): El 95% del Cr se encuentra como Cr^{3+} y el 5% restante como CrOH^{2+} .

En todas las especies presentes a los pH que prevalecen en los 5 sistemas el Cr presenta un número de oxidación +3, Cr (III).

Descripción y análisis de la gráfica: En la Figura 11 se aprecia que la adsorción del Cr al sedimento disminuye a medida que se incrementa la concentración del DAM, lo que se asocia a la reducción de la carga neta negativa de las partículas adsorbentes en el sedimento (causada a su vez por la protonación de los sitios de adsorción) y a la presencia de una mayor cantidad de iones en solución (cuya concentración se incrementa a razón del aumento en la concentración del DAM) que compiten con el cromo por los sitios de adsorción.

Es importante notar que el cromo se adsorbe muy poco en el sedimento (menos del 7% para la concentración mas baja del DAM y 0% en el sistema 4. En el sistema 5 parece incluso liberarse del sedimento).

Cobre



Figura 12. Se muestran los porcentajes de adsorción de Cu en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del río Tinajas.

Cobre en el suelo de Cerro Colorado

Antecedentes de la adsorción de Cu a suelos y sedimentos: El Cu posee una afinidad especial por la materia orgánica del suelo y los óxidos de Fe y Mn. La adsorción del cobre en función del componente de la fase sólida del suelo al que se adsorbe se ejemplifica en la siguiente serie liotrópica: óxidos de Mn > MO > óxidos de Fe > arcillas minerales. La adsorción específica parece jugar un papel más importante en la adsorción del Cu que la adsorción no específica (intercambio catiónico).

Hamdi (2012) observa que la adsorción de Zn^{2+} y Cu^{2+} en bentonita es máxima a pH 3.5-4 y que por arriba de pH 4 ambos cationes comienzan a hidrolizarse y formar precipitados.

Especies dominantes de Cu: A los pH presente en los 5 sistemas, se espera que el 100% del Cu se encuentre en la forma de un catión divalente (Cu^{2+}).

Descripción y análisis de la gráfica: La gráfica muestra que la adsorción de Cu disminuye a medida que la concentración del DAM se incrementa y al mismo tiempo se reduce el pH de la solución. Como refiere Hamdi (2012) la adsorción de Cu parece ser máxima a pH entre 3.5 y 4 (Sistemas 1 y 2). La disminución de los porcentajes de adsorción de Cu a razón del incremento de la concentración del DAM se pueden asociar a 2 causas: 1) la protonación de los sitios de intercambio en la fase sólida del suelo que reduce los sitios de adsorción cargados negativamente y por lo tanto también la adsorción de cationes y 2) el aumento en la

competencia por los sitios de adsorción debido al incremento de la concentración de cationes en solución.

Cobre en sedimento arroyo Tinajas

Especies dominantes de Cu: A los pH presente en los 5 sistemas, se espera que el 100% del Cu se encuentre en la forma de un catión divalente (Cu^{2+}).

Descripción y análisis de la gráfica: En la gráfica se observa que al aumentar la concentración inicial del DAM la adsorción del Cu disminuye, incluso en los sistemas 3 y 4 parece ocurrir la liberación de Cu del sedimento. Esta tendencia se asocia a las mismas causas que las descritas en el caso del suelo. Solo en el último sistema se aprecia una excepción a esta tendencia: la adsorción de Cu se incrementa respecto a los sistemas 3 y 4.

Hierro

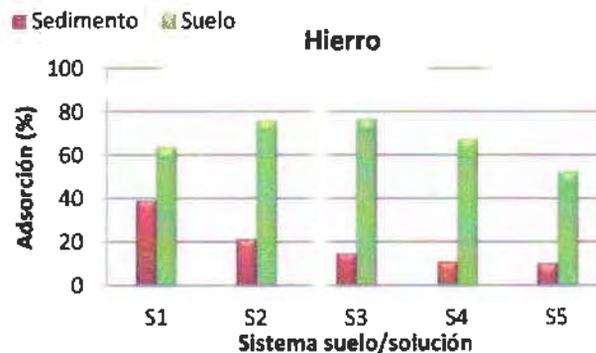


Figura 13. Se muestran los porcentajes de adsorción de Fe en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.

Antecedentes de la adsorción de Fe a suelos y sedimentos: No es posible realizar experimentos de adsorción con Fe a $\text{pH} > 4$ debido a la precipitación del Fe en forma de hidróxido. Bhattacharyya y Sen Gupta (2006) reportan un aumento en adsorción del Fe sobre arcillas activadas al incrementarse gradualmente el pH de la solución en el rango de 1 a 4.

Hierro en el suelo de Cerro Colorado

Especies dominantes de Fe:

Sistema 1 (pH:4.2): 60% del Fe como $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ y 40% como FeOH^{2+}

Sistema 2 (pH:3.7): 25 % como $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, 65% del Fe como FeOH^{2+} y 10% como Fe^{3+}

Sistema 3 (pH:2.9): 3% como $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, 67% del Fe como FeOH^{2+} y 30% como Fe^{3+}

Sistema 4: (pH:2.5): 2% como $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, 49% del Fe como FeOH^{2+} y 49% como Fe^{3+}

Sistema 5 (pH:2.5): 2% como $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, 49% del Fe como FeOH^{2+} y 49% como Fe^{3+}

Descripción y análisis de la gráfica. En la Figura 13 se aprecia que la adsorción de Fe aumenta del sistema 1 al 2 a medida que se incrementa la concentración inicial del elemento. A partir del sistema 3 la adsorción del Fe se reduce a medida que disminuye el pH de la solución y se incrementa la concentración inicial de Fe y otros cationes en solución. La tendencia descendente en la adsorción de Fe desde el sistema 3 hasta el sistema 5, puede explicarse por: 1) la saturación de los sitios de adsorción en la fase sólida (ya que la concentración de Fe en el DAM es muy elevada: mayor a 2000 mg/L) 2) el aumento en la competencia del Fe con otros cationes por los sitios de adsorción y 3) la disminución de la carga neta negativa del suelo debida a la protonación de los grupos funcionales con capacidad adsorbente

Hierro en sedimento arroyo Tinajas

Especies dominantes de Fe:

Sistema 1 (pH:2.6): 10% como $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, 70 del Fe como FeOH^{2+} y 20% como Fe^{3+}

Sistema 2 (pH:2.5): 2% como $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, 49 del Fe como FeOH^{2+} y 49% como Fe^{3+}

Sistemas 3, 4 y 5 (pH:2.4): 1% como $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, 45% del Fe como FeOH^{2+} y 53% como Fe^{3+}

Descripción y análisis de la gráfica: La Figura 13 muestra que la adsorción de Fe disminuye a medida que se incrementa la concentración del DAM. Nuevamente esto puede deberse a la saturación de los sitios de adsorción en el sedimento, al aumento de la presencia de cationes que pueden competir con el Fe por los sitios de adsorción y a la disminución de la carga neta negativa del suelo provocada por la protonación de los grupos funcionales con carga variable dependiente del pH.

Manganeso



Figura 14. Se muestran los porcentajes de adsorción de Mn en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.

Antecedentes de la adsorción de Mn a suelos y sedimentos: El Mn es fácilmente removido del suelo por soluciones acidas. Es decir que la solubilidad del elemento se incrementa a medida que disminuye el pH del suelo (Kabata-Pendias, 2011).

Suelo Cerro Colorado

Especies dominantes de Mn en solución: De acuerdo con el diagrama Eh-pH del Mn, en ambientes oxidantes y a pH ácido la especie predominante del Mn es Mn^{2+} .

Descripción y análisis de la gráfica: La adsorción del Mn es reducida en los 5 sistemas suelo: solución (Figura 14). No se aprecia una tendencia en la adsorción del Mn debida a la disminución del pH o el aumento de la CE a medida que se incrementa la concentración del DAM.

Mn en sedimento arroyo Tinajas

Especies dominantes de Mn en solución: De acuerdo con el diagrama Eh-pH del Mn, en ambientes oxidantes y a pH ácido la especie predominante del Mn es Mn^{2+} .

Descripción y análisis de la gráfica: En todos los sistemas, los porcentajes de adsorción de Mn resultaron negativos, lo que significa que la concentración del elemento en solución al equilibrio es mayor que su concentración inicial en el lixiviado. De lo anterior se puede inferir que el Mn se libera del sedimento al contacto con el lixiviado.

Vanadio

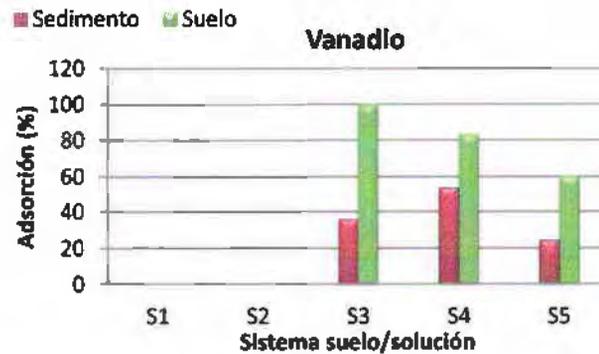


Figura 15. Se muestran los porcentajes de adsorción de V en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas

Especies dominantes

La forma más común del vanadio en suelos ácidos es el ión VO^{2+} , mientras que en suelos con pH neutro a alcalino predominan especies aniónicas como: VO_3^- , VO_4^- , H_2VO_4^- (Kabata-Pendias, 2011).

Vanadio en suelo Cerro Colorado

Análisis y descripción de la gráfica. La concentración inicial de V en los sistemas 1 y 2 se encuentra por debajo del límite de detección, al igual que la concentración del elemento en solución al equilibrio, de ahí que no se pudiesen estimar los porcentajes de adsorción en estos sistemas (Figura 15). Para los sistemas 3 a 5 se aprecia que la adsorción de V al suelo disminuye a medida que se reduce el pH de la solución, probablemente debido a la disminución de la carga neta negativa del suelo y al aumento de la concentración de diversos cationes en solución que compiten con el vanadio por los sitios de adsorción en la fase sólida del suelo

V en sedimento arroyo Tinajas

Análisis y descripción de la gráfica. La concentración inicial de V en los sistemas 1 y 2 se encuentra por debajo del límite de detección, al igual que la concentración del elemento en solución al equilibrio, de ahí que no se pudiesen estimar los porcentajes de adsorción en estos sistemas (Figura 15).

Zinc

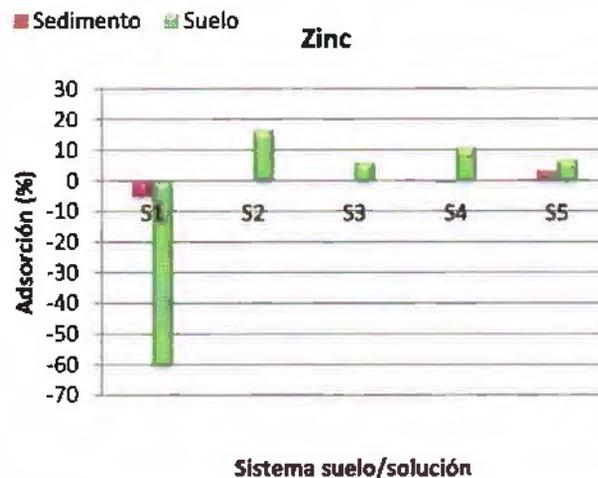


Figura 16. Se muestran los porcentajes de adsorción de Zn en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.

Antecedentes de la adsorción de Mn a suelos y sedimentos: El zinc se adsorbe fuertemente a las arcillas minerales, óxidos y carbonatos presentes en los suelos. Como ocurre para la mayoría de los cationes metálicos, su adsorción se incrementa al aumentar el pH. La mayor adsorción del Zn a medida que se incrementa el pH se debe a la formación de especies hidroxiladas del elemento que son adsorbidas de manera preferencial en relación a las especies catiónicas del elemento

Zn en suelo de Cerro Colorado

Especies dominantes del Zn. De acuerdo con el diagrama de especiación del Zn a los pH que se presentan en los 5 diferentes sistemas, el 100% del Zn debería encontrarse como Zn^{2+} , es decir como una especie soluble. La solubilidad del elemento disminuye al incrementarse el pH de la solución

Descripción y análisis de la gráfica. La Figura 16 muestra que la adsorción del Zn^{2+} (especie mayoritaria al pH presente en los 5 sistemas suelo:solución) se incrementa al aumentar la concentración inicial del DAM

El zinc se adsorbe muy poco en el sedimento, menos del 5% en todos los 5 sistemas.

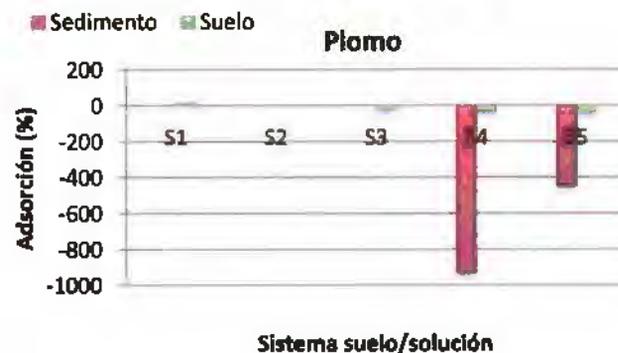
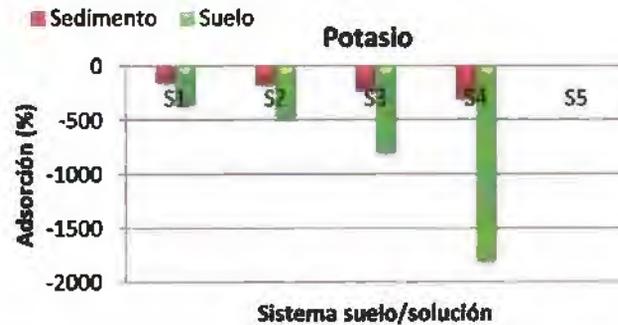
Zn en sedimento del arroyo Tinajas

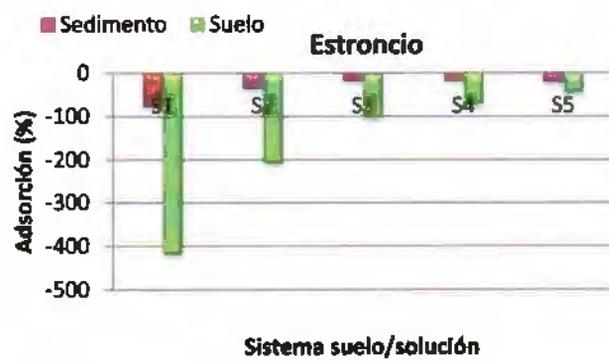
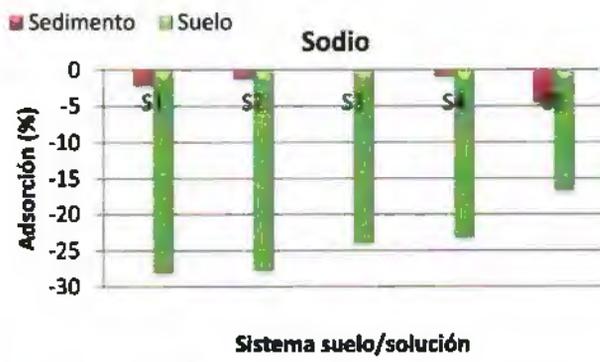
Especies dominantes del Zn. De acuerdo con el diagrama de especiación del Zn a los pH que se presentan en los 5 diferentes sistemas, el 100% del Zn debería encontrarse como Zn^{2+} , es decir como una especie soluble. La solubilidad del elemento disminuye al incrementarse el pH de la solución.

Descripción y análisis de la gráfica. El zinc se adsorbe muy poco en el sedimento, menos del 5% en todos los 5 sistemas (Figura 16).

Elementos que se liberan del suelo/sedimento

La Figura 17 muestra los gráficos de los casos donde la concentración en solución al equilibrio fue mayor que la concentración del elemento en el DAM, indicando que el elemento fue liberado del suelo, en estos casos el valor de la concentración adsorbida es negativo.





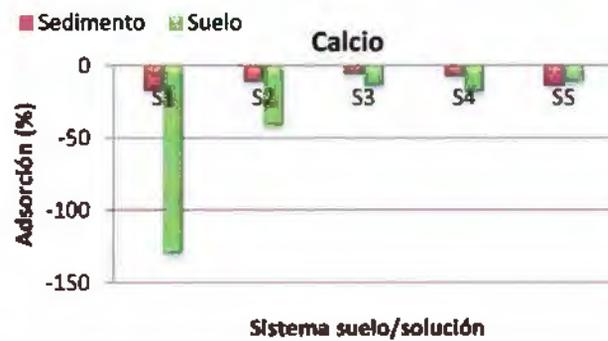
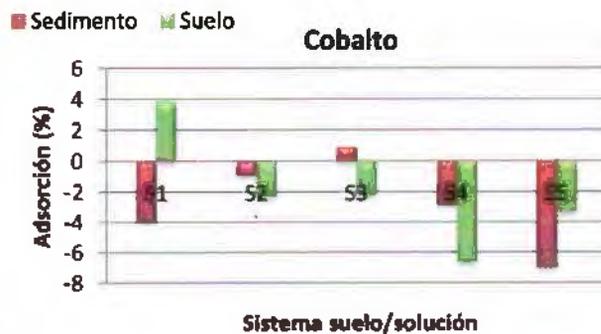


Figura 17. Se muestran los porcentajes de adsorción del K, Pb, Mg, Na, Sr, Ba y Ca en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.

Elementos problemáticos

En algunos casos no fue posible interpretar los gráficos de adsorción-desorción debido a que no se observó una tendencia o comportamiento definido en la adsorción-liberación de los metales, tal fue el caso del níquel, cobalto y litio (Figura 18).



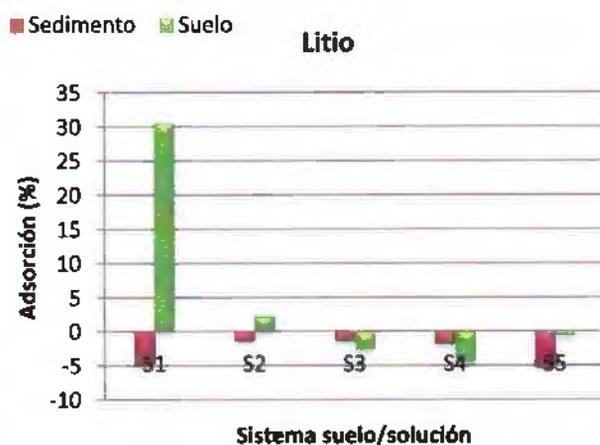


Figura 18. Se muestran los porcentajes de adsorción de Ni, Co y Li en cada uno de los 5 sistemas suelo:solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.

En la Figura 18 se muestran los porcentajes de adsorción de Ni, Co y Li en cada uno de los 5 sistemas suelo: solución. Las barras verdes representan los sistemas preparados con el suelo de Cerro Colorado y las barras rojas los sistemas preparados con el sedimento procedente del cauce del arroyo Tinajas.

A manera de resumen, en la Tabla 6 se enlistan los elementos adsorbidos, los elementos liberados y los elementos con comportamientos no claros, obtenidos en los experimentos de adsorción – desorción en el suelo del Cerro Colorado y en el sedimento del cauce del arroyo Tinajas.

Tabla 6. Resumen del comportamiento de adsorción de metales en el suelo de Cerro Colorado y el Sedimento del río Tinajas.

Elementos que se adsorben	
Suelo Cerro Colorado	Sedimentos Tinajas
Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, V, Zn	Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, V, Zn
Elementos que se liberan	
Suelo Cerro Colorado	Sedimentos Tinajas
K, Pb, Mg, Na, Sr, Ba, Ca	K, Pb, Mg, Na, Sr, Ba, Ca

Elementos que no se adsorben ni se liberan (posibles trazadores)	
Suelo Cerro Colorado	Sedimentos Tinajas
Ni, Co	Ni, Co, Li

Evaluación de la movilidad de metales en suelos y sedimentos de la zona de estudio mediante experimentos en columnas de suelo.

En apartados anteriores se mostraron los resultados obtenidos en los experimentos de adsorción – desorción de los metales en y desde un suelo y un sedimento de la zona de estudio. Dichos experimentos nos permitieron conocer los elementos que son retenidos y los que son desorbidos bajo condiciones de equilibrio químico. Sin embargo, el análisis de los procesos que gobiernan el destino ambiental de los metales requiere de experimentos que pongan en contacto el suelo y sedimento con el DAM en condiciones similares a la realidad, ese fue el objetivo de los experimentos en columnas de suelo.

Se realizaron experimentos en dos tipos de sistemas, en columnas empacadas y en columnas intactas. Las columnas empacadas se utilizaron con sedimentos del cauce del arroyo tinajas, el cual fue homogeneizado en tamaño y empacado a la densidad aparente real (ver procedimiento en Anexo 3); el objetivo fue conocer la movilidad de los metales del DAM cuando pasan a través de la fracción sólida sin el efecto de la estructura del material. En estos experimentos se evaluó la concentración de los metales, el pH y la CE en los lixiviados. El dispositivo experimental de muestra en la Figura 19.

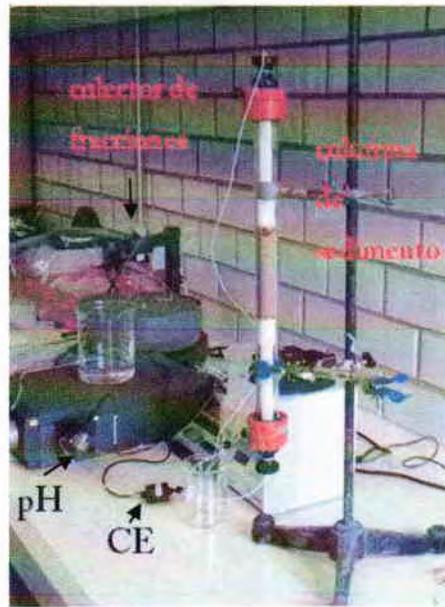


Figura 19. Dispositivo utilizado en los experimentos de columnas empacadas.

Por otro lado, se realizaron experimentos en columnas intactas de suelos y sedimentos a lo largo de la zona de estudio, en las cuales se evaluó el movimiento de los metales contenidos en el DAM, a través de la estructura y porosidad originales. En este tipo de experimentos se monitorearon el pH, la temperatura, el potencial redox y la concentración de metales en la solución de suelo en diferentes puntos de las columnas y en los lixiviados obtenidos en la base de la columna. En el Anexo 4 se presenta el procedimiento detallado.



Figura 20. Dispositivo utilizado en los experimentos de columnas intactas.

En los experimentos de movilidad de los metales en columna, los resultados obtenidos se presentan en forma de curvas de elución. Una curva de elución es el gráfico de la concentración del metal en los lixiviados obtenidos en la base de las columnas (C), versus el tiempo experimental. Con el objeto de comparar los resultados obtenidos entre las diferentes columnas evaluadas, fue necesario adimensionalizar las curvas de elución, para esto la concentración del elemento en el lixiviado (C) fue dividida entre la concentración del elemento en el DAM aplicado (C_0), y el tiempo experimental fue expresado en términos de volumen de poro de la columna. Un volumen de poro se obtiene multiplicando el volumen total de la columna por la porosidad del suelo o sedimento. Además, el obtener curvas de elución adimensionales nos permite identificar a los elementos que fueron adsorbidos durante el paso del DAM a través del suelo/sedimento ($C/C_0 < 1$), a los elementos que fueron desorbidos desde el suelo/sedimento ($C/C_0 > 1$), y a los que pasaron inertes ($C/C_0 = 1$).

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los experimentos de movilidad en columnas.

Columnas empacadas:

Las condiciones experimentales fueron:

Muestra: Sedimento sobre el cauce (Tinajas)

Características de la columna:

Longitud: 12 cm

Diámetro: 2.5 cm

Área transversal: 4.91 cm²

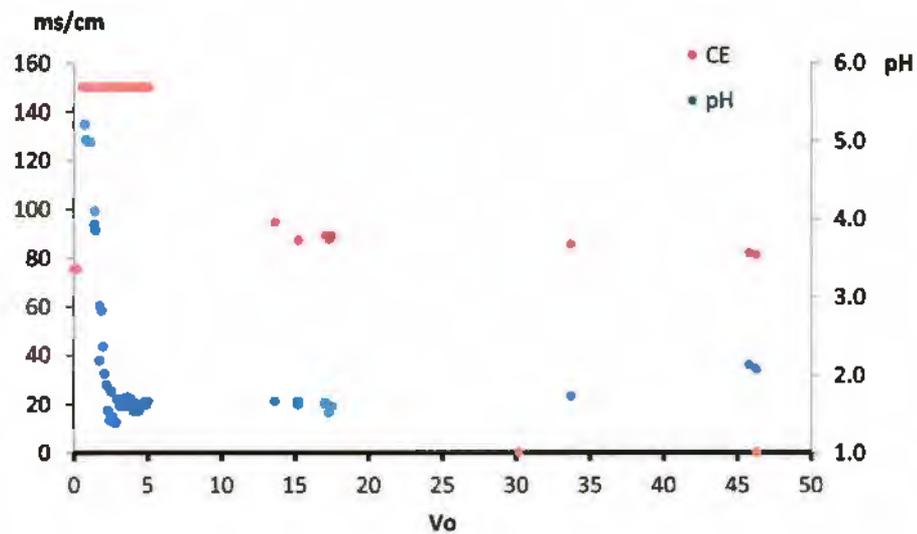
Volumen: 58.905 cm³

Densidad aparente: 1.41 g/cm³

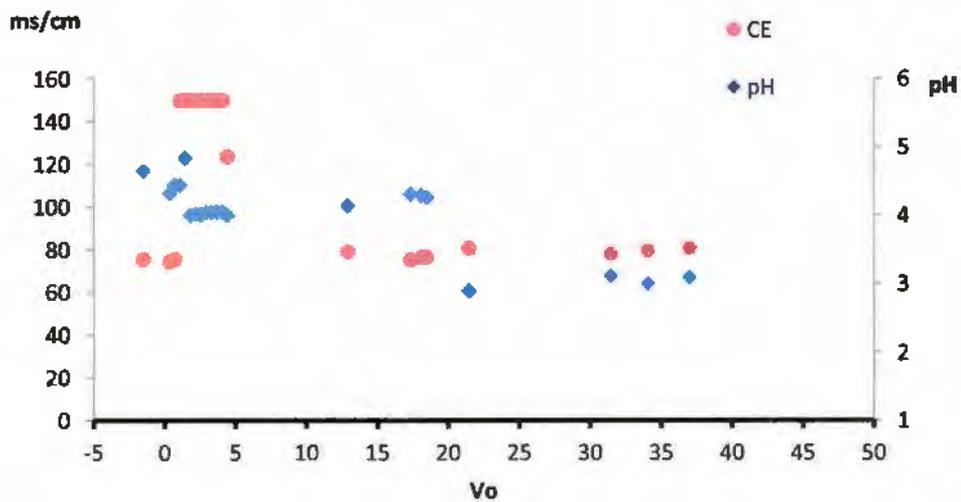
Experimento ST1. Se aplicó 1 Volumen de poro (Vo) del DAM concentrado

Experimento ST2. Se aplicó 0.5Vo del DAM al 50% (diluido 1:2 con cloruro de calcio 0.005 M).

La Figura 21 muestra el comportamiento de los parámetros pH y CE en los lixiviados obtenidos en la columna ST1 (a) y ST2 (b). El valor inicial de la CE es similar, no obstante la menor CE del pulso en la solución aplicada en la columna ST2. En la columna ST1 el valor de la CE de los lixiviados se estabilizó alrededor de 85 ms/cm en un tiempo de 20 volúmenes de poro, en el caso de la columna ST2 el valor de la CE en los lixiviados se estabilizó en 80 mS/cm a alrededor 12 volúmenes de poro. En el caso del pH, el efecto del DAM resultó en una disminución del pH de los lixiviados de 5 (pH natural) hasta aproximadamente 1.6 una vez aplicado el DAM en la columna ST1, y aproximadamente 3 en la columna ST2 en la cual se aplicó el DAM diluido al 50%.



(a)

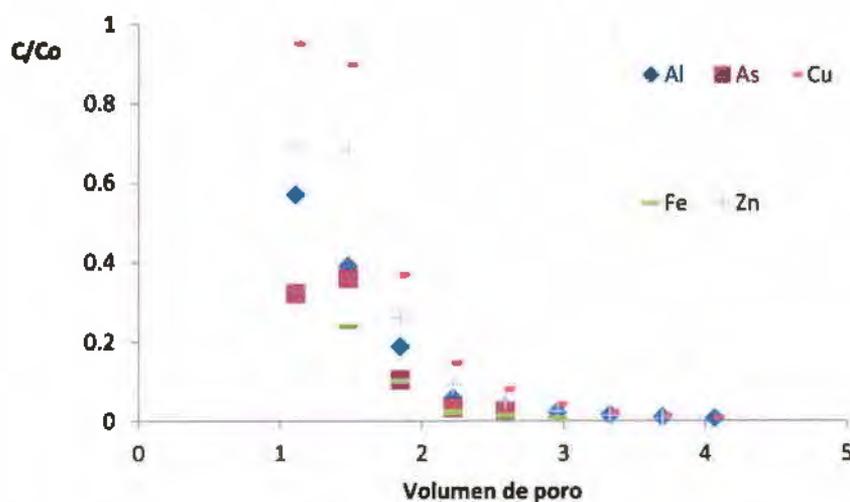


(b)

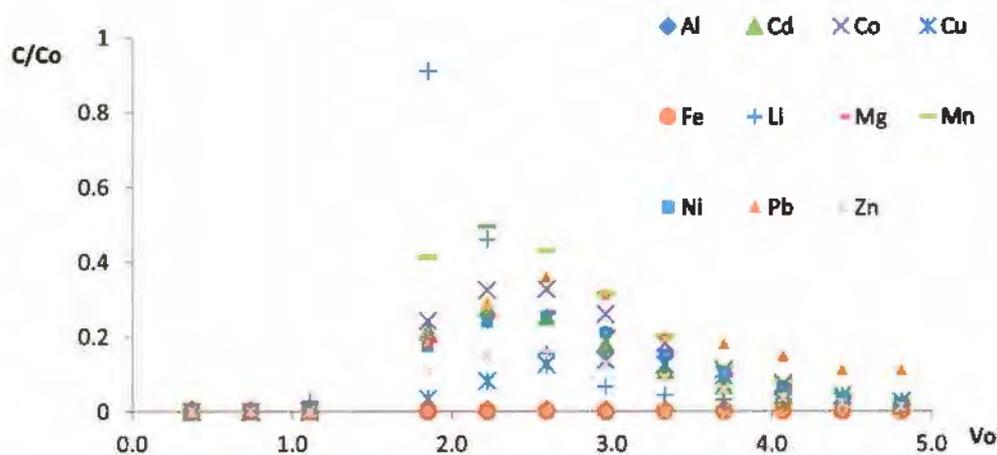
Figura 21. Variación del pH y la CE de los lixiviados antes y después de aplicarse el DAM en la columna ST1 (a) y en la columna ST2 (b).

La Figura 22 muestra las curvas de elución adimensionales de las columnas ST1 y ST2, para los elementos que fueron adsorbidos durante el paso del DAM a través de sedimento del cauce del arroyo Tinajas ($C/C_o < 1$). Se observa que en los elementos reportados en las gráficas, el porcentaje de retención fue similar. Lo interesante a resaltar es el hecho de que

los elementos que no aparecen, corresponden a la lista de metales retenidos completamente en el sedimento.



(a)



(b)

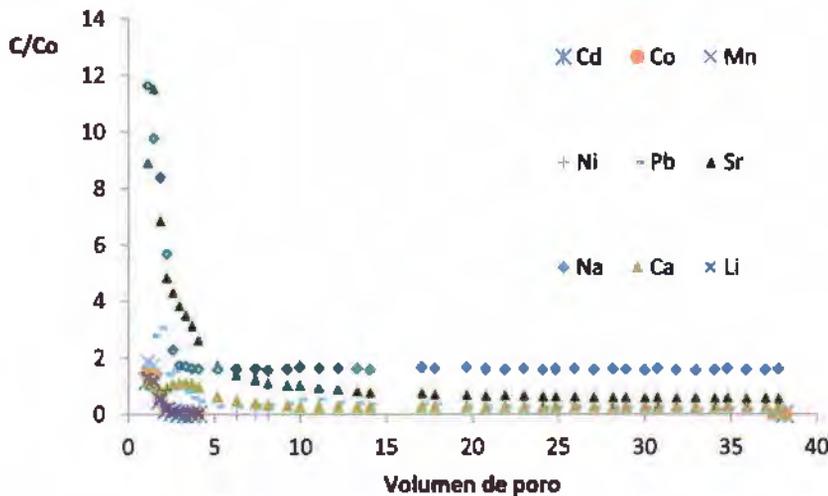
Figura 22. Curvas de elución de las columnas empacadas con sedimentos del cauce del arroyo Tinajas, elementos que se adsorben, en el experimento ST1 (a) y en el experimento ST2 (b).

La diferencia en el número de elementos reportados en las Figura 22a y Figura 22b se debe a que en la columna ST1 fueron retenidos más elementos que en la columna ST2, debido a lo

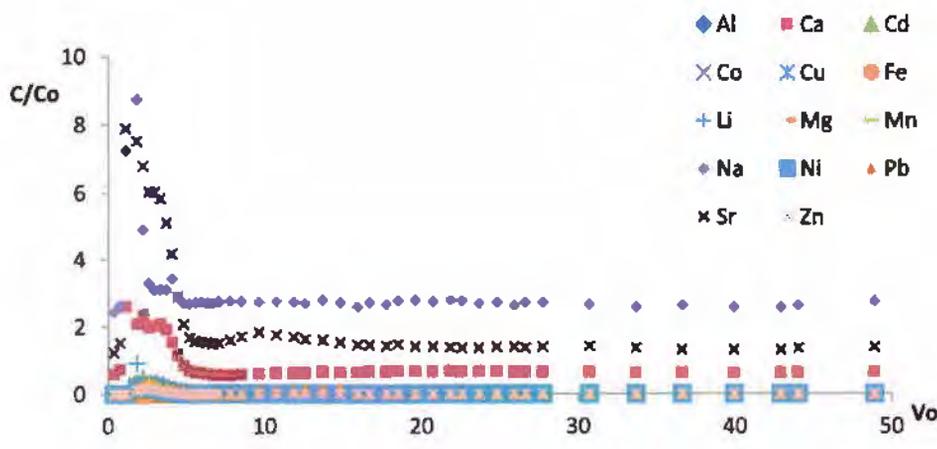
cual tales elementos no están en la gráfica: Li, Mg, Mn, Ni, Pb; mientras que en la columna ST2 el As si fue retenido.

Otro dato interesante se refiere al hecho de que las dos columnas fueron eluidas durante al menos 40 volúmenes de poro, tiempo en el cual no se observó la desorción de ninguno de los elementos previamente adsorbidos, a excepción del Pb que en la columna ST2 resurge a los 10 volúmenes de poro (no mostrado en la gráfica).

La Figura 23 las curvas de elución de los elementos que fueron desorbidos desde el suelo/sedimento ($C/Co > 1$), y a los elementos que pasaron inertes ($C/Co = 1$).



(a)



(b)

Figura 23. Curvas de elución de las columnas empacada con sedimentos del cauce del arroyo Tinajas, elementos que se liberaron, en el experimento ST1 (a) y en el experimento ST2 (b).

Se observa que los elementos liberados del sedimento fueron diferentes en los dos experimentos, los elementos en los que no coinciden son el Al, Cu, Fe y Zn. Se observa también que en el caso de los cationes calcio y sodio que se liberaron en el experimento ST2, se requirió de alrededor de 5 volúmenes de poro para que regresaran al equilibrio original, lográndose recuperar por completo su nivel inicial (valor antes de 1 Vo). Es importante evaluar el efecto que tuvo la fuerza iónica y pH en la solución aplicada, superiores en ST1, sobre la masa del estroncio liberado del material así como en la desorción de otros elementos que no fueron observados en los lixiviados del experimento ST2 donde la solución del pulso aplicado fue de una fuerza iónica y concentración inferior.

A manera de conclusión podemos decir que una vez analizados los resultados obtenidos en dos columnas bajo condiciones experimentales similares con la única diferencia en la concentración del pulso de DAM aplicado, *la fuerza iónica y pH de la solución de DAM, provocan una dinámica particular de los metales del DAM y de los iones del suelo: adsorción, desorción y movilización.*

Columnas intactas:

Se realizaron varios experimentos utilizando columnas intactas, en todos ellos el objetivo principal fue evaluar la capacidad de retención del suelo/sedimento de metales contenidos en el DAM. Sin embargo, en cada uno de ellos hubo un objetivo particular basado en su ubicación respecto a la zona del derrame. A continuación se enlistan los diferentes experimentos realizados:

Sitio: tipo y localización de la columna	Interés particular:
Columna suelo terraza arroyo Tinajas	Suelo localizado en la zona donde ocurrió la retención del derrame. En este suelo se evaluó el efecto de la infiltración de la solución de DAM en la estructura del suelo.
Sedimento Alamo	En este sedimento se evaluó el efecto de la infiltración de la solución de DAM en la estructura y distribución de tamaño de poros del sedimento. Este punto está a la

	salida del Tinajas justo antes de unirse al Bacanuchi.
Sedimentos rancho Chilolo	Se localiza al sur del Alamo, en el Río Bacanuchi, en este sitio se encontraron evidencias del derrame. En estas columnas se evaluó el efecto de la infiltración de la solución de DAM en la velocidad de infiltración del sedimento.
Suelo terraza Río Bacanuchi	Suelo localizado en la terraza del Río Bacanuchi siendo este último el cuerpo de agua receptor del arroyo Tinajas que recibió el derrame.

Columna: Suelo terraza arroyo Tinajas

Se aplicó una lámina de 4 cm en la superficie de la columna, la infiltración ocurrió de forma homogénea y con velocidades típicas de suelos de textura media. El flujo en la base de la columna ocurrió de forma rápida en los primeros minutos, para después alcanzar un estado estacionario durante la infiltración (Figura 24).

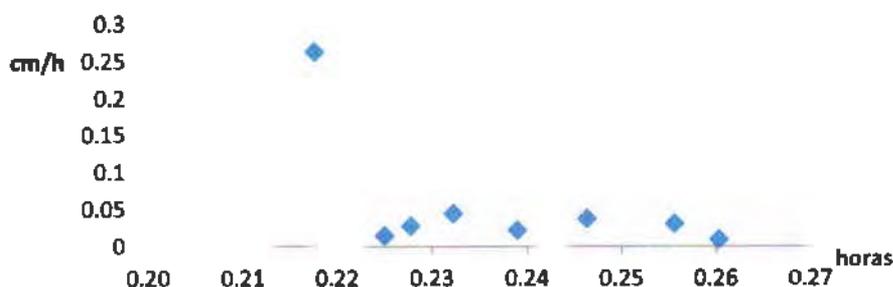


Figura 24. Infiltración en columna de suelo de la terraza arroyo Tinajas.

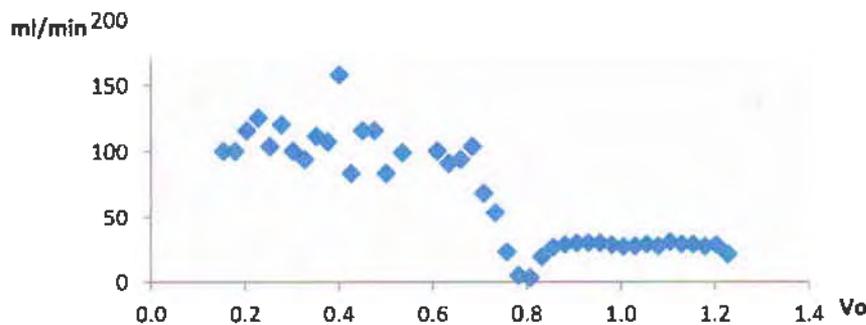


Figura 25. Flujo de lixiviados en la base de la columna de suelo de la terraza arroyo Tinajas.

La conductividad eléctrica de los primeros lixiviados fue de alrededor 13.5 mS/cm y después de medio volumen de poro, se redujo a 11 mS/cm valor alrededor del cual se mantuvo hasta el final del experimento (Figura 26). El pH de los lixiviados se mantuvo alrededor de 2.5 unidades todo el tiempo.

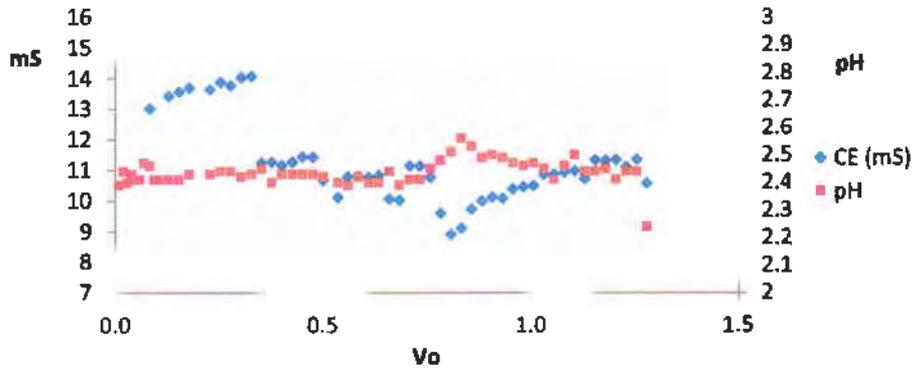


Figura 26. pH y CE en lixiviados de la columna de suelo de la terraza arroyo Tinajas.

La Figura 27a muestran las curvas de elución de los elementos cuya concentración adimensional fue superior a la unidad ($C/C_0 > 1$), es decir, los elementos que fueron extraídos de la columna durante el paso del DAM: Sr>Na>Pb>Mn y Ca. En el caso de los elementos adsorbidos ($C/C_0 < 1$), se observa una retención que varía entre el 80 y 75% para la gran mayoría de ellos. El elemento que se adsorbió en mayor proporción fue el Fe y el elemento que menos se adsorbió fue el Co, el orden de afinidad es el siguiente: Fe>Al>Zn>As, Cu>Li, Cr, Co, Cd, Ni (Figura 27b).

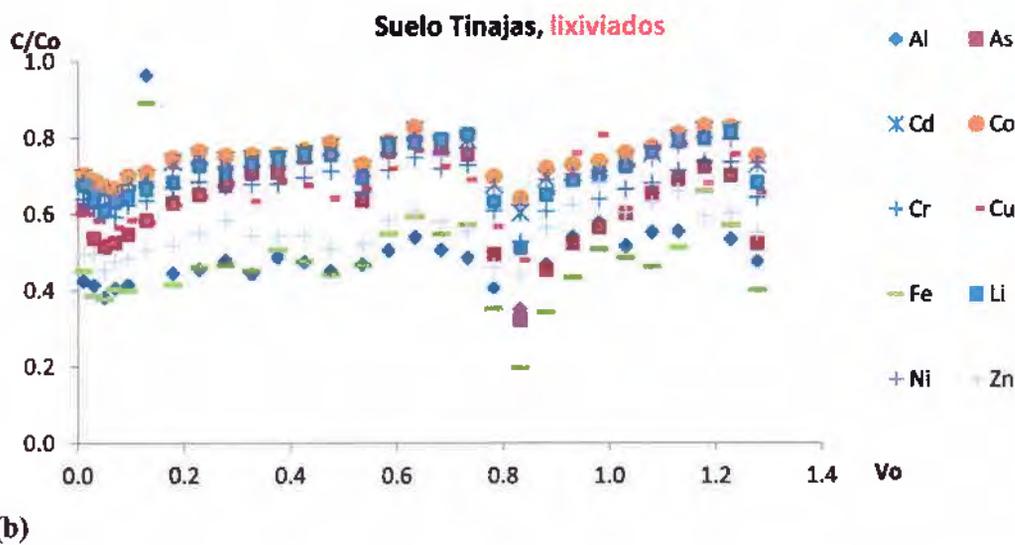
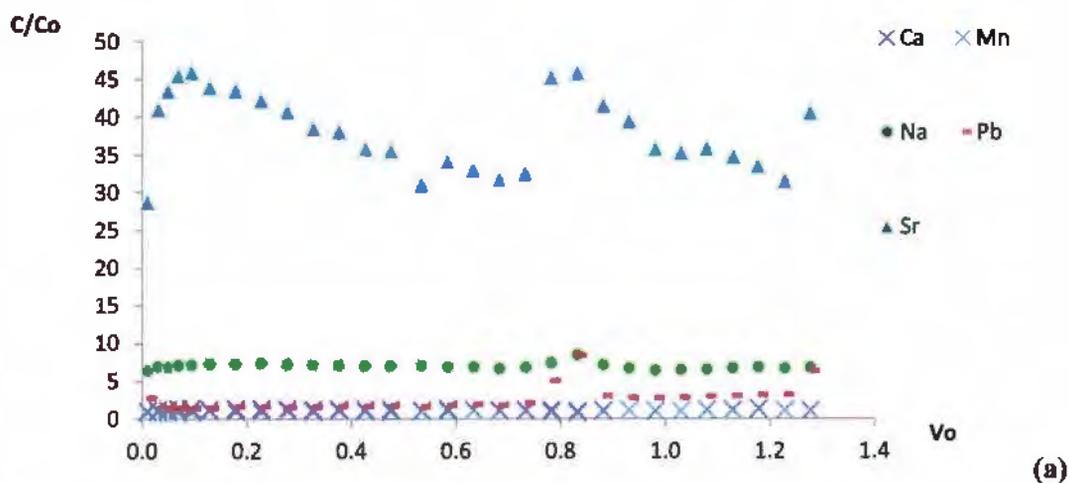


Figura 27. Curvas de elución de los elementos liberados del suelo (a) cuya concentración adimensional fue superior a la unidad ($C/Co > 1$) y de los elementos adsorbidos (b) cuya concentración adimensional fue inferior a la unidad ($C/Co < 1$), en el suelo de la terraza del arroyo Tinajas

Durante el experimento, se colectaron muestras de solución de suelo a lo largo de la columna (a 3.4, 8.7, 9 y 15 cm de profundidad) en diferentes momentos. La Figura 28 muestra la concentración de los diferentes elementos adsorbidos, (a) y liberados desde el suelo (b). Los

elementos desorbidos del suelo son los mismos observados en los lixiviados colectados en la base de la columna, excepto el Mg que si se observa en las muestras de solución de suelo. Se aprecia además que la concentración de los elementos disminuye ligeramente a medida que avanzamos en la profundidad de la columna, la principal diferencia se observa entre la muestra colectada a 3.4 cm de profundidad a los 400 minutos del experimento, y la muestra colectada a 15 cm de profundidad a los 450 min del experimento.

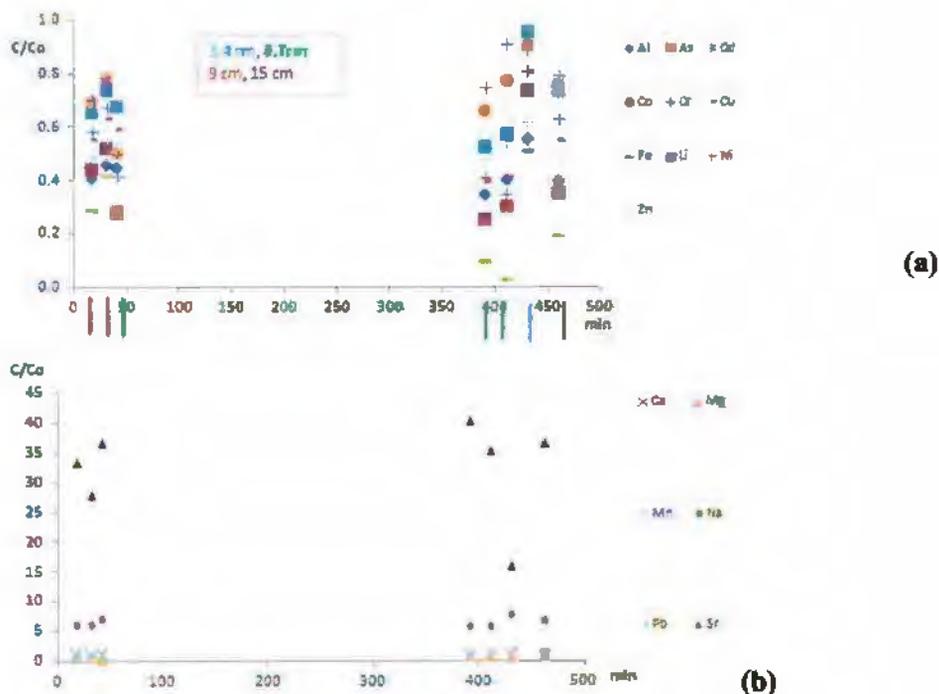


Figura 28. Concentración de elementos en las muestras de solución de suelo colectadas a diferente profundidad de la columna de suelo de la terraza arroyo Tinajas, durante el experimento.

Columna: Sedimento Álamo, localizado a la salida del arroyo Tinajas justo antes de unirse al Río Bacanuchi

A la columna del sedimento Álamo se aplicó un volumen de poro del DAM, a un flujo constante de 0.202 cm/h. El flujo en la base de la columna ocurrió de forma más o menos constante (alrededor de 100 ml/min) la mayor parte del tiempo y disminuyó al final del experimento hasta agotarse. Como era de esperarse el flujo de lixiviados fue mayor al observado en la columna de suelo, alrededor de 70 ml/min (Figura 29).

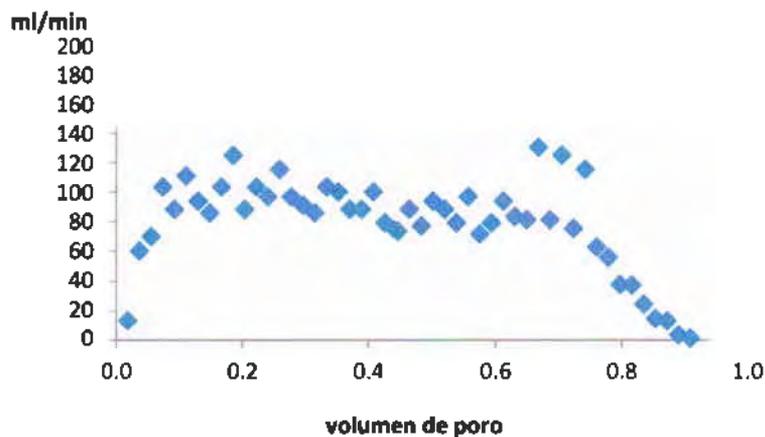


Figura 29. Flujo de lixiviados en la base de la columna de sedimentos Álamo

La conductividad eléctrica de los primeros lixiviados fue de alrededor 8 mS/cm y fue incrementando gradualmente hasta llegar a un máximo 12 mS/cm a aproximadamente 0.7Vo, a partir del cual empezó a descender. El último lixiviado registró un valor de 10 mS/cm. El pH de los lixiviados inició en 3 y disminuyó a 2.5 unidades, valor en que se mantuvo hasta el final del experimento (Figura 30)

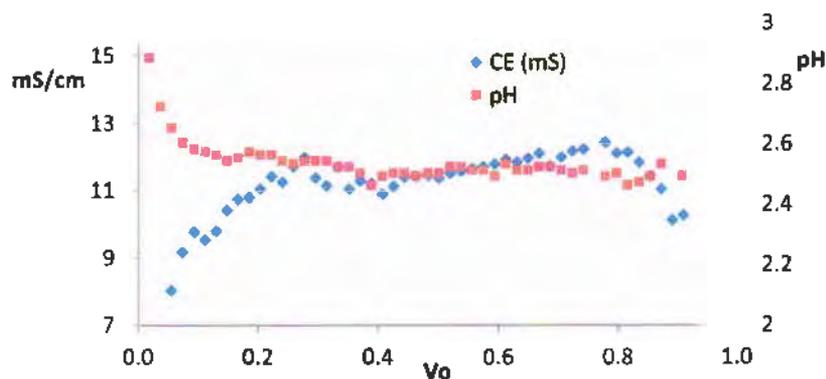


Figura 30. Variación del pH y CE en los lixiviados de la columna de sedimentos Álamo.

La Figura 31 muestra las curvas de elución de los elementos que fueron extraídos de la columna durante el paso del DAM: Sr>Na>Pb>Ca,Mn>Mg>Co, Cd. Para observar mejor la tendencia, fue necesario presentar la gráfica en dos grupos, los liberados en mayor concentración (Sr y Na) que se pueden apreciar en la Figura 31a y los liberados en menor proporción (Pb, Ca, Mn, Mg, Co y Cd), que se presentan en la Figura 31b.

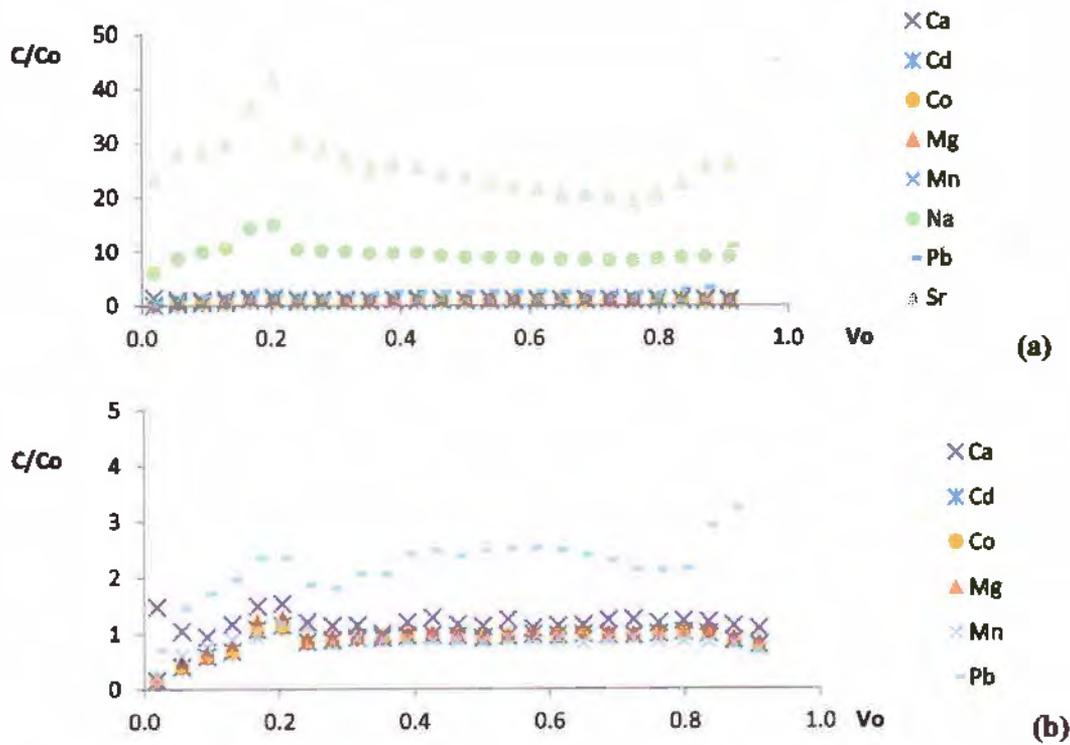


Figura 31. Curvas de elución de los elementos liberados del sedimento Alamo, (a) en mayor proporción y (b) en menor proporción

En el caso de los elementos adsorbidos, la forma de la curva de elución evidencia un flujo más homogéneo que el observado en la columna de suelo del arroyo Tinajas, iniciando con concentraciones cercanas a cero las cuales fueron aumentando hasta tener máximos que variaron entre 0.4 y 0.8, es decir, la adsorción de los elementos varió entre 20 y 60. El elemento que se adsorbió en mayor proporción fue el Fe y el elemento que menos se adsorbió fue el Ni (Figura 31).

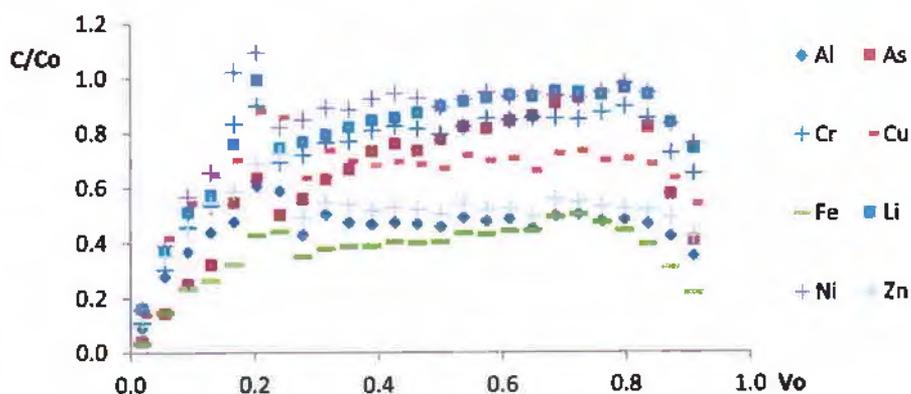


Figura 32. Curvas de elución de los elementos adsorbidos en el sedimento del Alamo.

Durante el experimento, se colectaron muestras de agua de poro a lo largo de la columna (a 3, 5.5, 9 y 15 cm de profundidad) en diferentes momentos. La Figura 33 muestra la concentración de los diferentes elementos adsorbidos (a) y liberados desde el sedimento (b). Los elementos desorbidos del sedimento fueron únicamente tres: Sr>Na>Ca. Referente a la retención de los elementos a medida que el frente de humedad avanza en la columna, no se observa una disminución con la profundidad.

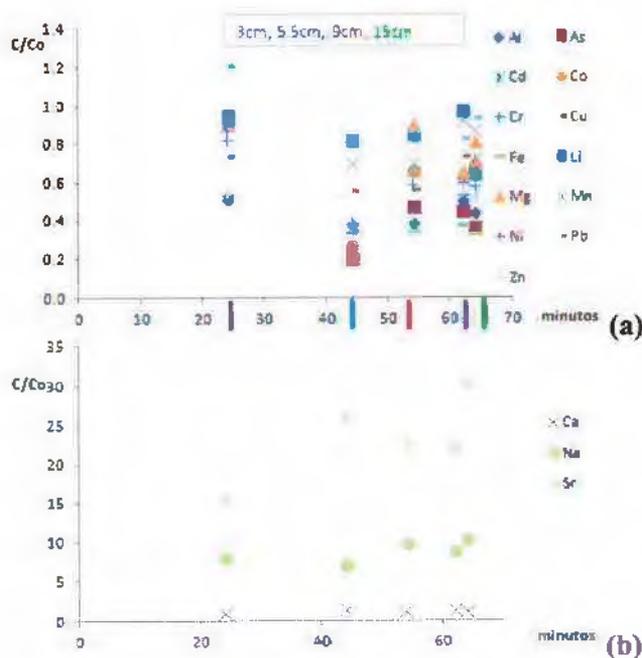


Figura 33. Concentración de elementos en las muestras de agua de poro colectadas a diferente profundidad de la columna de sedimento Alamo. Se muestran los elementos adsorbidos (a) y liberados (b) del sedimento.

Columna: Sedimento rancho Chilolo

En la columna de sedimento de rancho Chilolo se realizaron dos riegos, en el primero se aplicó una lámina de 4 cm del DAM, y en el segundo una lámina de 4 cm de una solución de CaCl_2 0.05 M (fuerza iónica similar a la del arroyo Tinajas). La Figura 34 muestra la velocidad de infiltración y el flujo de lixiviados registrados en los dos riegos. El incremento en la velocidad de infiltración así como la mayor variabilidad en la misma en el segundo riego, pueden ser indicadores de una modificación de la distribución de tamaño de poros en el sedimento de la columna. En el caso del flujo de lixiviados, en el segundo riego se observó una disminución del tiempo en el cual se drenó la lámina aplicada, mientras que el flujo de lixiviados se mantuvo en un valor intermedio al observado en el primer riego. El conjunto de resultados indican que ocurrió un cambio en la porosidad y estructura del suelo de la columna entre el primero y el segundo riego.

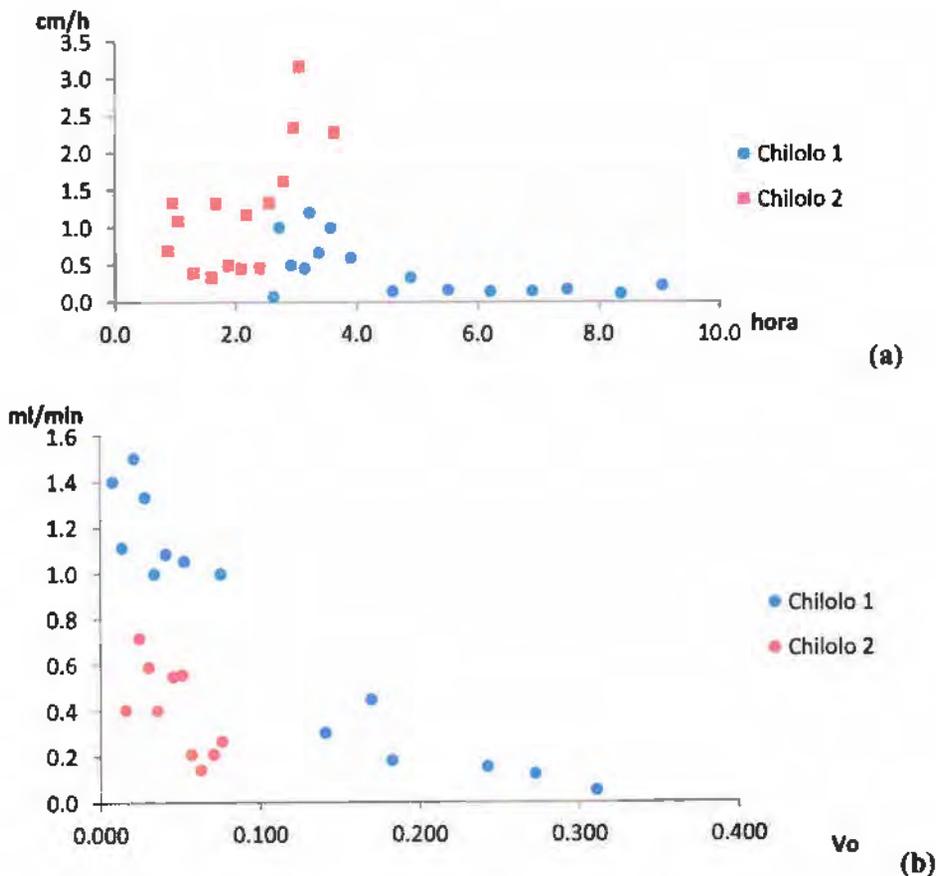
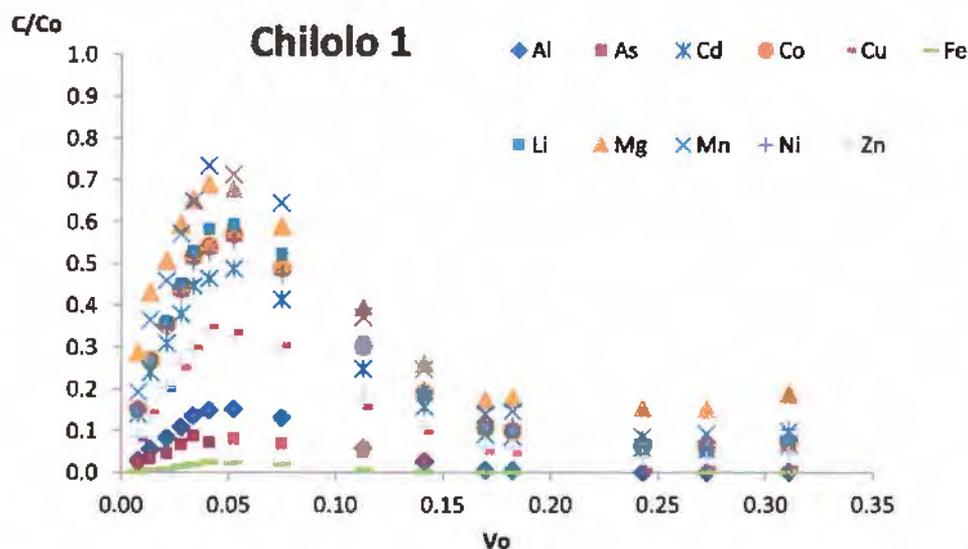


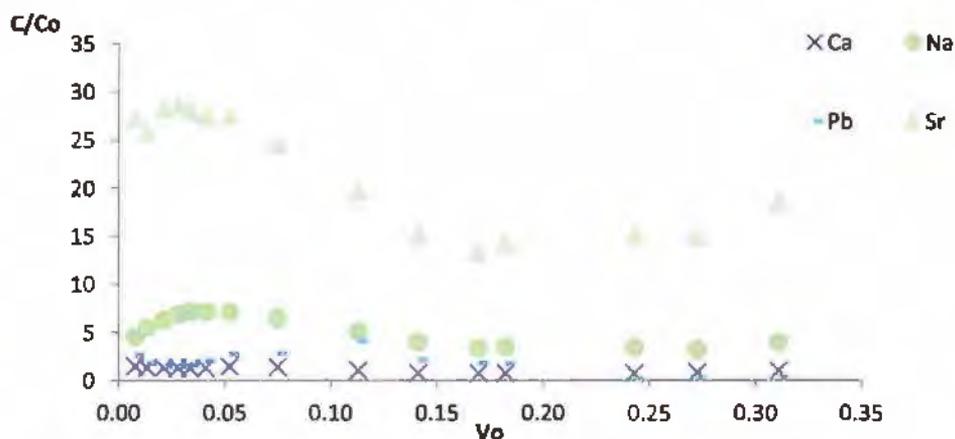
Figura 34. Velocidad de infiltración en la superficie (a) y flujo de lixiviados en la base de la columna de sedimento rancho Chilolo (b).

La Figura 34b muestra las curvas de elución de los elementos que fueron extraídos de la columna durante el paso del DAM: $\text{Sr} > \text{Na} > \text{Pb} > \text{Ca}$. En el caso de los elementos adsorbidos

(Figura 34a), la forma de la curva de elución evidencia un flujo homogéneo no obstante que se trata de sedimentos y no de suelo, evidenciando una textura mediana y menos gruesa que en la observada en los sedimentos del arroyo Tinajas. La curva de elución inicia con concentraciones cercanas a cero, algunas de las cuales fueron aumentando hasta tener máximos que variaron entre 0.08 y 0.8, es decir, la adsorción de los elementos varió entre 20 y 90 %. El orden de adsorción observado fue el siguiente: Fe>As>Al>Cu,Ni>Cd>Co,Li>Zn,Mg>Mn.



(a)



(b)

Figura 35. Curvas de elución de los elementos adsorbidos (a) y liberados (b) del primer riego de la columna de sedimento rancho Chilolo.

La Figura 35b muestran las curvas de elución de los elementos que fueron liberados de la columna en el segundo riego de la columna de sedimento del rancho Chilolo, riego en el cual ya no se aplicó la solución de DAM, sino una lámina de cloruro de calcio de fuerza iónica

similar a la del arroyo Tinajas (0.05 M). El orden fue el siguiente: durante el paso del DAM: Sr>Na> Ca. A diferencia del primer riego, ya no se liberó Pb.

En el caso de los elementos adsorbidos (Figura 36), la curva de elución inicia con concentraciones similares a las concentraciones obtenidas en los últimos lixiviados del primer riego. Se observa además que esta concentración se mantiene constante en todos los lixiviados colectados en el segundo riego. Únicamente fueron desorbidos cinco elementos de los 12 retenidos en el primer riego, el orden de adsorción observado fue el siguiente: Li, Mn, Ni>Mg, Pb.

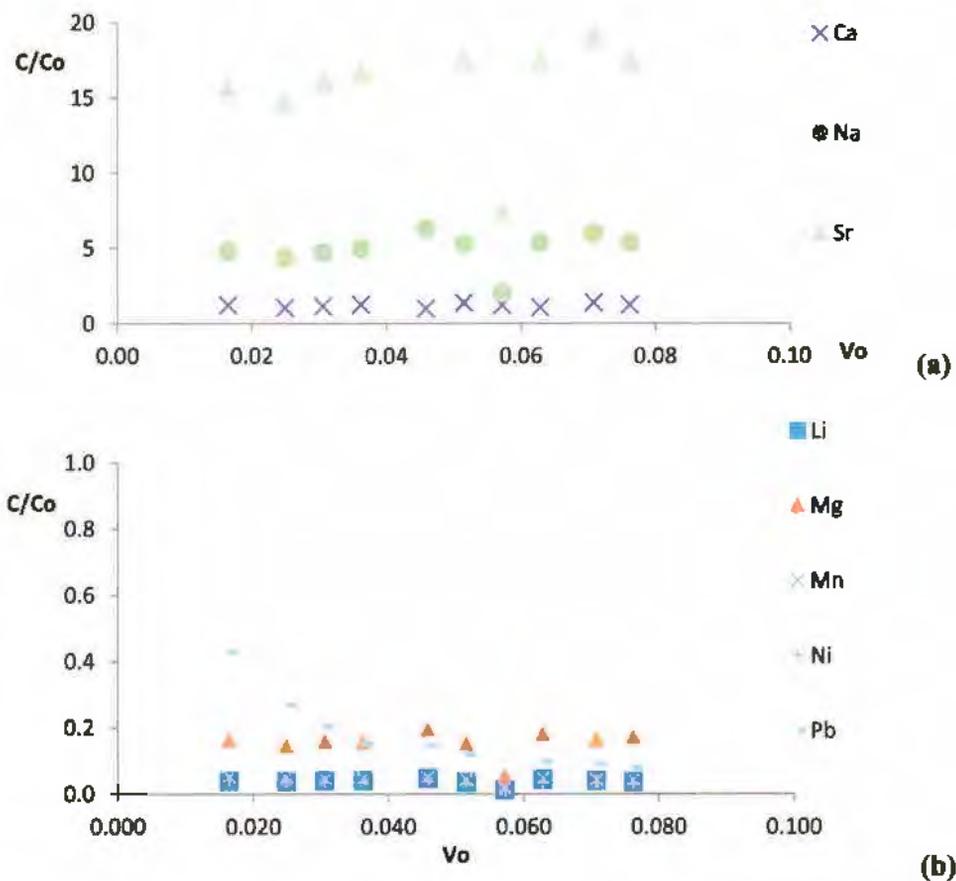


Figura 36. Curvas de elución de los elementos adsorbidos (a) y liberados (b) del segundo riego de la columna de sedimento rancho Chilolo.

Durante el experimento, se colectaron muestras de agua de poro a lo largo de la columna (a 2.5 y 19 cm de profundidad) en diferentes momentos. La Figura 36 muestra la concentración de los diferentes elementos adsorbidos (a) y liberados desde el sedimento (b), en el primer

riego de la columna de rancho Chilolo. Los elementos desorbidos del sedimento fueron: Sr, Na, Ca, Li, Mg, Pb. Referente a la retención de los elementos a medida que el frente de humedad avanza en la columna, se observa una clara disminución con el aumento de la profundidad.

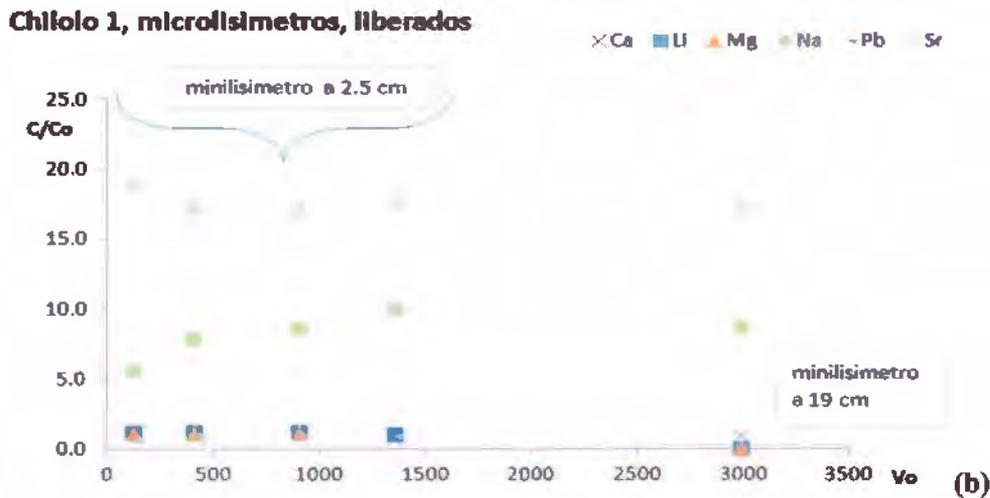
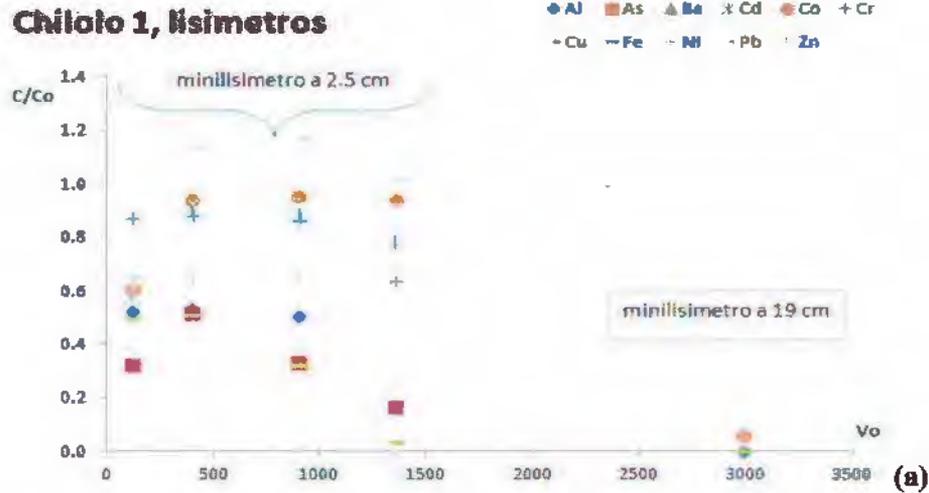


Figura 37. Concentración de elementos en las muestras de agua de poro colectadas a diferente profundidad de la columna de sedimento de Rancho Chilolo, en el primer riego. Se muestran los elementos adsorbidos (a) y liberados (b) del sedimento.

La Figura 37 muestra la concentración de los diferentes elementos adsorbidos (a) y liberados desde el sedimento (b) en las muestras de agua de poro para el segundo riego de la columna de rancho Chilolo. En esta ocasión, los elementos desorbidos del sedimento fueron

únicamente tres: Sr, Na, Ca, es decir, ya no se observaron los elementos Li, Mg, Pb. Referente a la retención de los elementos a medida que el frente de humedad avanza en la columna, también se observa una clara disminución a medida que aumenta la profundidad de la columna

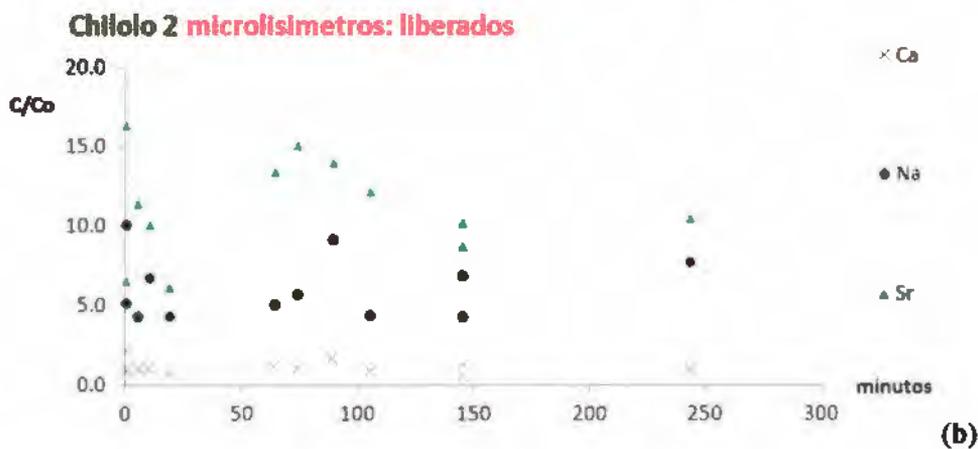
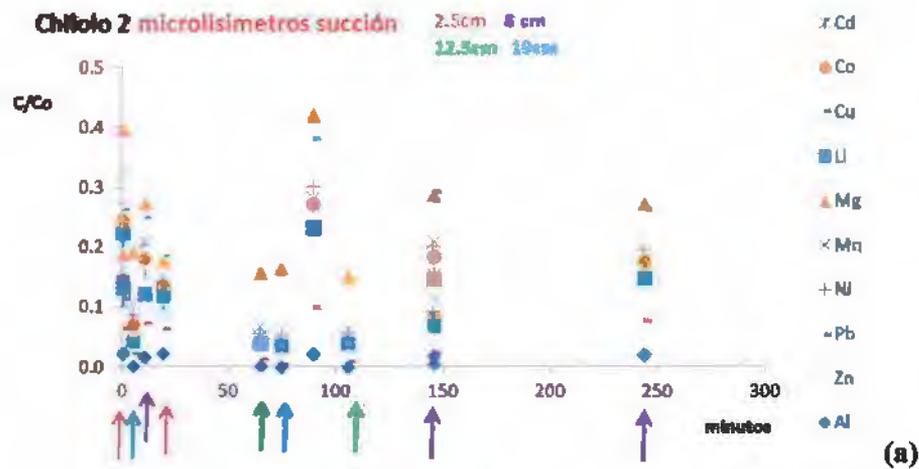


Figura 38. Concentración de elementos en las muestras de agua de poro colectadas a diferente profundidad de la columna de sedimento de Rancho Chilolo, en el segundo riego. Se muestran los elementos adsorbidos (a) y liberados (b) del sedimento.

Columnas: Suelo de la terraza del río Bacanuchi

En la columna de suelo de la terraza del río Bacanuchi, se aplicó una lámina de 4 cm del DAM. La Figura 39 muestra la velocidad de infiltración registrada en el riego.

La conductividad eléctrica de los primeros lixiviados fue de alrededor 6 mS/cm y se incrementó gradualmente hasta llegar a un máximo 7.5 mS/cm a aproximadamente 0.5Vo, a partir del cual empezó a descender para mantenerse constante hasta el final del experimento. El pH de los lixiviados inicio en 7 y fue disminuyendo hasta 2 unidades sin que se alcanzara un valor estable (Figura 40).

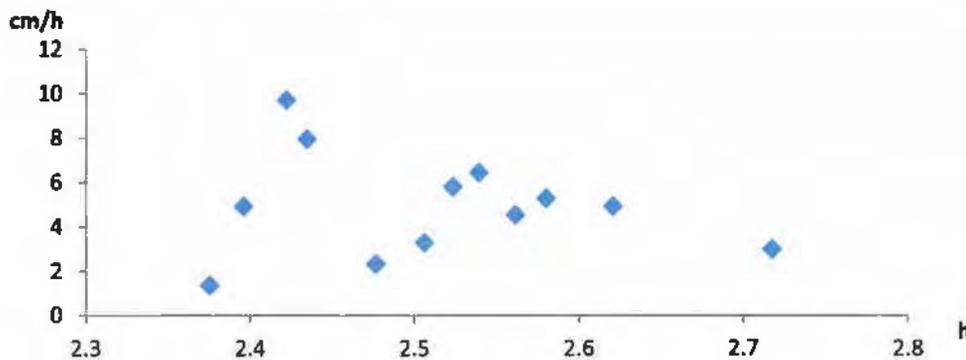


Figura 39. Velocidad de infiltración en la superficie de la columna del suelo de la terraza de río Bacamuchi

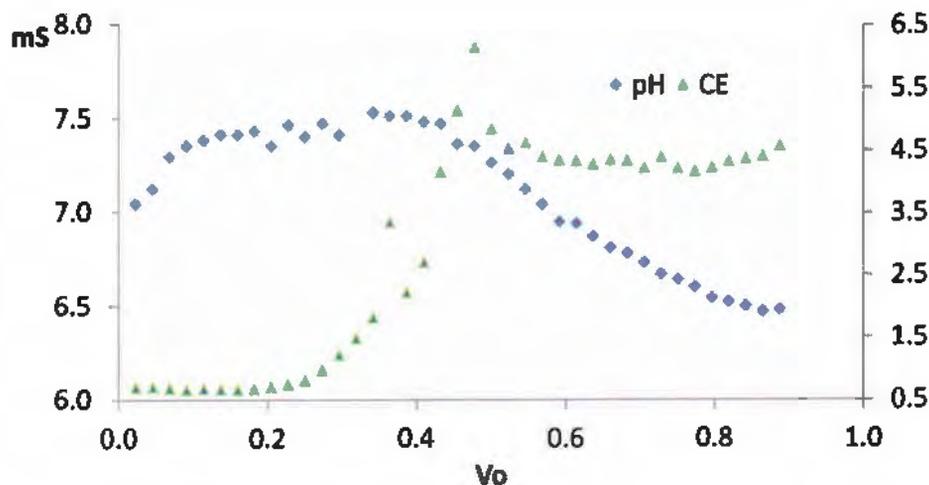


Figura 40. Variación del pH y CE en los lixiviados de la columna de sedimentos Álamo.

La Figura 41b muestra las curvas de elución de los elementos adsorbidos. La forma de las curvas evidencia una fuerte capacidad de retención del suelo de la columna. De los 10 elementos encontrados en los lixiviados, la retención de ocho de ellos estuvo por encima del 99% (Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn y Zn), los dos restantes (Li y Mg) fueron retenidos alrededor de un 50%. Por otra parte la Figura 41a muestra los elementos que fueron

liberados del suelo al paso del lixiviado, el elemento que se liberó en mayor cantidad fue el Sr, seguido del Na y finalmente el Ca.

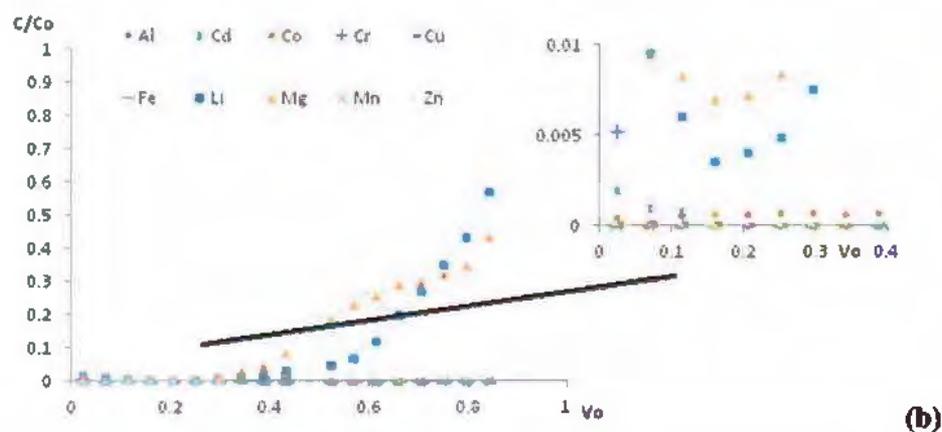
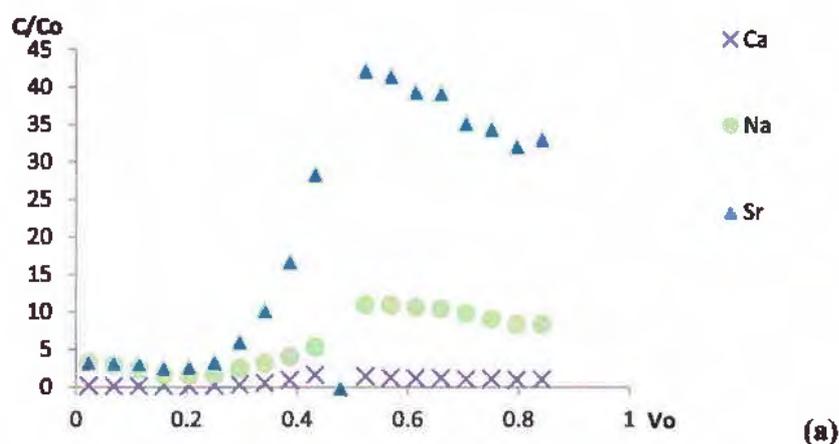


Figura 41. Se muestran las curvas de elución de los elementos que fueron (a) liberados al paso del DAM: $Sr > Na > Ca$ y (b) adsorbidos, en la columna de suelo procedente de la terraza de río Bacanuchi.

Durante el experimento, se colectaron muestras de agua de poro a lo largo de la columna (a 3, 5, 10 y 15 cm de profundidad) en diferentes momentos. La Figura 42 muestra la concentración de los diferentes elementos adsorbidos, (a) y liberados desde el sedimento (b). Los elementos desorbidos del sedimento fueron: $Sr > Na > Pb, Mn$. Referente a la concentración de los elementos a medida que el frente de humedad avanza en la columna, es evidente la disminución de esta con la profundidad, es decir, los primeros 20 cm de la columna son suficientes para provocar un efecto amortiguador de los elementos contenidos en el DAM.

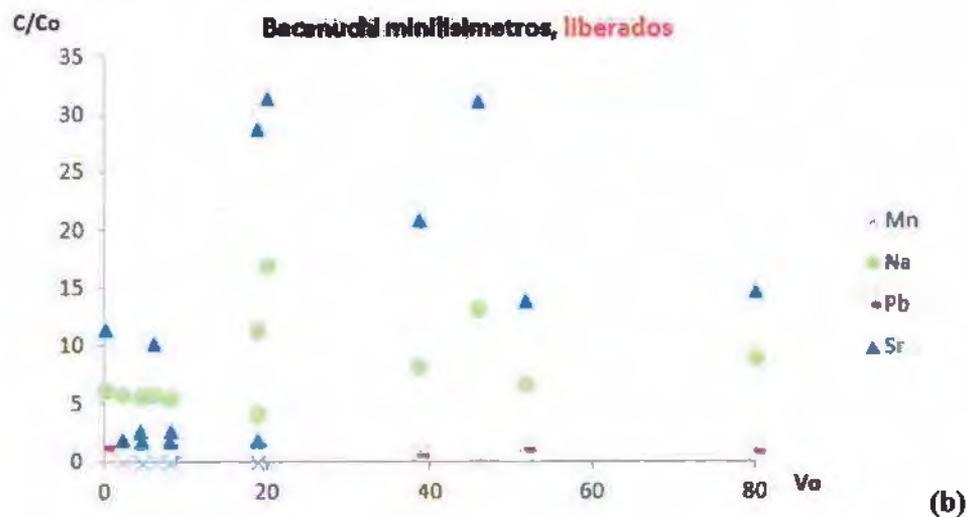
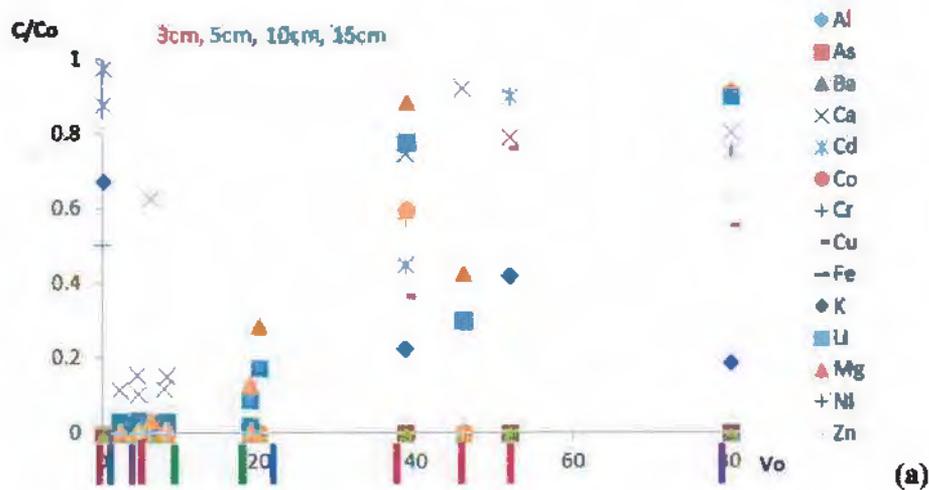


Figura 42. Concentración de elementos en las muestras de solución de suelo colectadas a diferente profundidad de la columna de suelo de la terraza del Río Bacanuchi. Se muestran los elementos retenidos (a) y liberados (b) de la columna.

Análisis del potencial REDOX en los experimentos en columnas intactas de suelos y sedimentos

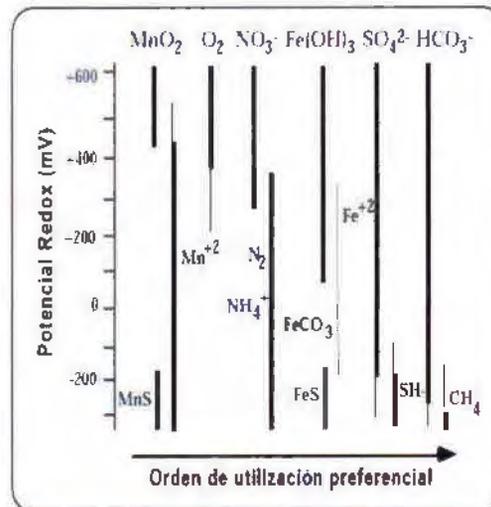
El potencial redox es una medida que permite caracterizar el grado de reducción y predecir la estabilidad de varios compuestos que regulan la disponibilidad de nutrientes y metales en suelos y sedimentos. Es también un parámetro que permite diagnosticar si un sistema es aerobio o anaerobio.

El potencial redox (Eh) define la capacidad de los compuestos de aceptar o donar electrones, esta capacidad está en función de la afinidad de las moléculas por los electrones y de la concentración de compuestos oxidantes o reductores en el medio.

Existen compuestos inorgánicos que son capaces de donar o aceptar electrones. En la Figura 43 se muestran dos esquemas, el primero (a) representa la secuencia de reducción de diversas sustancias inorgánicas presentes en el suelo y los valores de Eh (mV) a los que ocurre su reducción bajo condiciones constantes de pH y temperatura (pH 7 y 25°C); el segundo esquema (b) representa los rangos de Eh (mV) en los cuales se pueden presentar estas reacciones y el orden en que se presentan. Es importante mencionar que el Eh está en función del pH y la temperatura, de tal forma que si estos parámetros cambian también lo hace el potencial redox.

Ecuación 1. Ley de Nerst

Reacción	E_h (mV)	ΔG (kcal mol ⁻¹ e ⁻¹)
Reducción (desaparición) de O ₂	812	-29.9
Reducción de NO ₃ ⁻	747	-28.4
Reducción de Mn ⁴⁺ a Mn ²⁺	526	-23.3
Reducción de Fe ³⁺ a Fe ²⁺	-47	-10.1
Reducción de SO ₄ ²⁻ a H ₂ S	-221	-5.9
Reducción de CO ₂ a CH ₄	-244	-5.6



* Modificada de Atlas y Bartha (1993).
 Datos originales de Nedwell (1984).

Figura 43. Esquema de la secuencia termodinámica de reducción de sustancias inorgánicas a pH 7 y 25°C (a) y rangos y orden en donde se presentan las reacciones de aceptores de electrones (b).

La Figura 44, Figura 45 y Figura 46, muestran el comportamiento del Eh (V) en las columnas intactas de arroyo tinajas, el transcurso de un riego. Dicho parámetro se monitoreó a diferentes profundidades en cada columna a intervalos regulares de tiempo.

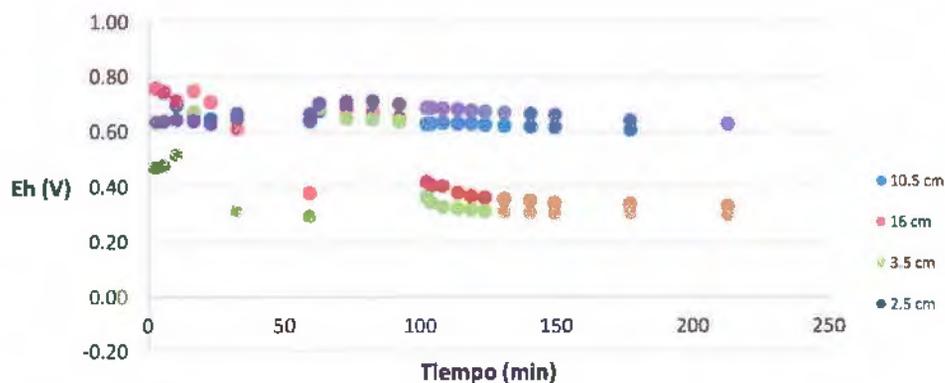


Figura 44. Variación del potencial redox durante el experimento, en la columna de suelo de la terraza arroyo Tinajas.

El potencial redox en la columna de arroyo Tinajas disminuyó ligeramente al iniciar la infiltración de la solución de DAM y se mantuvo alrededor de 0.3 V a las profundidades de 3.5 y 16 cm, mientras que en la parte media se mantuvo alrededor de 0.6 V (Figura 44). Conociendo los valores de Eh, pH y temperatura a lo largo de la columna, es posible determinar la forma en que los diferentes elementos contenidos en el DAM pueden presentarse, para entender su mayor o menor movilidad. En el caso del Fe y el Al, dos de los elementos que se encuentran de forma abundante en el DAM, podemos decir que ambos se presentan en formas solubles y por lo tanto móviles.

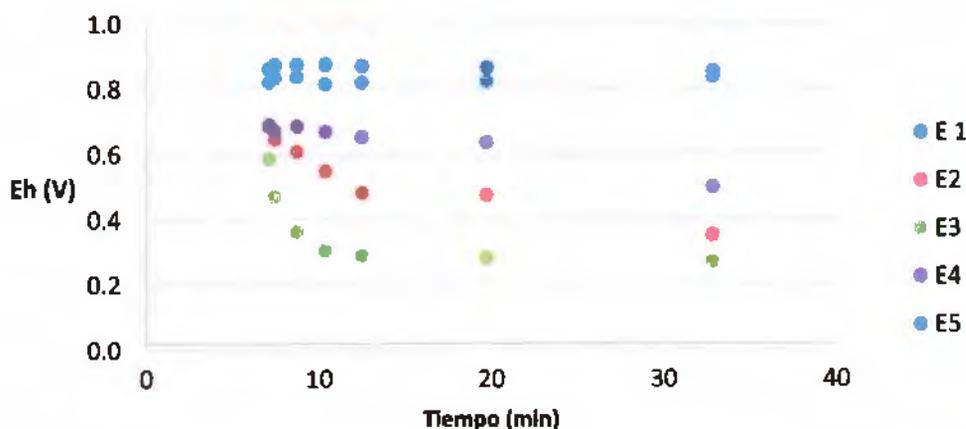


Figura 45. Variación del potencial redox durante el experimento, en la columna de sedimento procedente de la localidad de El Álamo.

El potencial redox en la columna de sedimento de El Álamo, disminuyó ligeramente al iniciar la infiltración de la solución de DAM y se mantuvo alrededor de 0.3 y 0.9 V a lo largo de la columna durante todo el experimento (Figura 45). El hecho de tener condiciones más

oxidantes que la columna del suelo Tinajas, se debe probablemente a que el tamaño de las partículas del sedimento es más grande, lo que le confiere un mayor tamaño de poros y por lo tanto mayor capacidad de aireación.

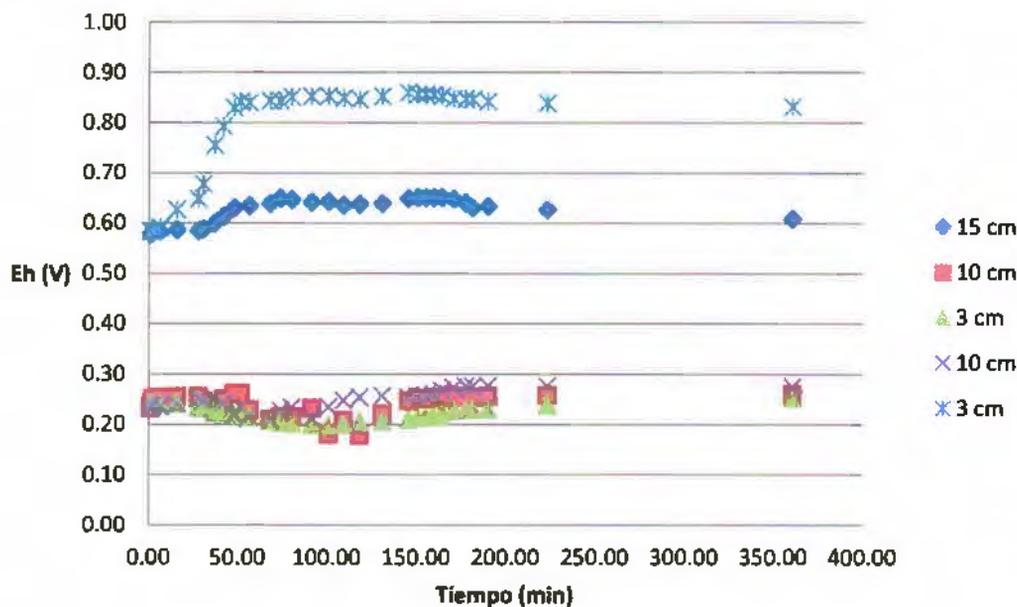


Figura 46. Variación del potencial redox durante el experimento, en la columna de suelo de la terraza del Río Bacanuchi.

La Figura 46 muestra los cambios de potencial redox ocurridos durante el riego a diferentes profundidades, en la columna de suelo colectada en una de las terrazas del río Bacanuchi. El potencial redox varió al iniciar la infiltración de la solución del DAM, por alguna razón este aumentó en el electrodo instalado a 10 cm. En el resto de los electrodos el parámetro mostró la tendencia esperada, ligera variación o bien, no mostró cambios importantes. El valor del potencial redox se mantuvo alrededor de 0.6 V en el electrodo instalado a 15 cm de profundidad, mientras que en los electrodos instalados cerca de la superficie de la columna, este se mantuvo alrededor de 0.25 V. Esto último se debe a que el suelo superficial de la columna se mantiene saturado por más tiempo, reflejándose en una disminución del potencial redox.

De manera general se observa que el Eh disminuye en todas las columnas, lo que significa que la mayoría de los sitios en donde se instalaron los electrodos fueron visitados por el lixiviado. La variaciones de Eh se mantienen entre 0.7 y 0.2 V, en la mayor parte de los casos. Lo anterior representa el cambio de una situación bien aireada a pobremente aireada. No se observa la disminución de Eh hasta valores negativos, esto significa que las columnas nunca estuvieron en condiciones de saturación o inundadas.

Figura 47. Rango del Potencial redox en suelos y sedimentos, se muestra los procesos de metabolismo microbiano y aceptores de electrones. Enciclopedia of soil in the Environment. 2005

De acuerdo a la Figura 47, los cambios de Eh en el transcurso de los riegos, se mantienen en un rango de valores en los que prevalecen procesos metabólicos acrobios y facultativos relacionados con la presencia de NO_3 , Mn y Fe en forma oxidada. Sin embargo, los NO_3 no están presentes en el sistema y dado que la condición simulada en las columnas, involucra concentraciones altas de metales y metaloides tales como el As, Cu, Fe, Al, Mo y S principalmente, entonces los cambios en el Eh se pueden relacionar mejor con las reacciones propuestas en la Tabla 7.

En la Tabla 7 se propone que alrededor de 0.7 V ocurre la disminución de O, es decir un cambio en condiciones de aireación y la reducción de Fe (Fe^{3+} a Fe^{2+}). En Eh entre 0.6 y 0.5 V, las reacciones capaces de aceptar electrones son las relacionadas con Mn (Mn^{4+} a Mn^{2+}), entre Eh 0.5 y 0.4 V, las reacciones involucradas son de As (As^{5+} a As^{3+}), Cu (Cu^{2+} a Cu^0) y finalmente de las reacciones de reducción de los compuestos de S.

El caso de la columna de sedimento del Alamo es el que muestran mayor disminución de Eh, es probable que estos cambios involucren todas las reacciones anteriores. Mientras que en el suelo Bacanuchi los electrodos se comportaron en condiciones extremas, por arriba de 0.7 V y alrededor de 0.2 V, estos últimos sin mucha variación del Eh a través del tiempo. Estos últimos valores se relacionan mejor con las reacciones de Cu y S, ya que otros metales como Mn y Fe, no abundan en el sistema.

La diferencia física principal entre las columnas, es que todas las columnas tienen una composición granulométrica variada en donde dominan cantos finos y gruesos, mientras que el suelo de Bacanuchi es un material más fino y homogéneo. En ese sentido, la probabilidad de que existan más poros en las primeras columnas es mayor y por lo tanto, menor cambio en el potencial redox.

También se observa que todos los electrodos no se comportan de manera semejante, en la mayoría de casos, los electrodos superiores e inferiores tienen Eh más altos. Este

comportamiento es normal en los suelos, ya que la variabilidad de los poros en los suelos es muy alta y la respuesta de los electrodos no es repetible.

Tabla 7. Potencial Eh normales en reacciones de elementos metálicos.

<http://rt000uud.eresmas.net/redox.htm>

Metal	Semireacción	Potencia normal
Aluminio	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e} \square \text{Al}$	-1,66
Arsénico	$\text{H}_3\text{AsO}_4 + 5\text{H}^+ + 5\text{e} \square \text{As} + 4\text{H}_2\text{O}$	+0,37
	$\text{As} + 3\text{H}^+ + 3\text{e} \square \text{AsH}_3$	-0,61
Cobre	$\text{Cu}^{2+} + \text{e} \square \text{Cu}^+$	+0,15
	$\text{Cu}^{2+} + \text{e} \square \text{Cu}$	+0,34
Hierro	$\text{Fe}^{3+} + \text{e} \square \text{Fe}^{2+}$	+0,77
	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e} \square \text{Fe}$	-0,44
Manganeso	$\text{MnO}_4^- + \text{e} \square \text{MnO}_4^{2-}$	+0,56
	$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 2\text{e} \square \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+2,26
	$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e} \square \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	+1,51
	$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{e} \square \text{Mn}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$	+0,95
	$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e} \square \text{Mn}$	-0,20
Molibdeno	$\text{MoO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 3\text{e} \square \text{Mo}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O}$	+0,51
	$\text{Mo}^{3+} + 3\text{e} \square \text{Mo}$	-0,20
Nitrógeno	$\text{HNO}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e} \square \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+0,93
	$\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e} \square \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$	+0,96
	$2\text{NO}_3^- + 10\text{H}^+ + 8\text{e} \square \text{N}_2\text{O} + 5\text{H}_2\text{O}$	+1,17
	$\text{HNO}_2 + 7\text{H}^+ + 6\text{e} \square \text{NH}_4^+ + 2\text{H}_2\text{O}$	+0,86
Oxígeno	$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e} \square \text{H}_2\text{O}_2$	+0,68
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e} \square 2\text{H}_2\text{O}$	+1,23

Azufre	$\text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 6\text{e} \rightleftharpoons \text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$	+0,36
	$\text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 8\text{e} \rightleftharpoons \text{S}^{2-} + 4\text{H}_2\text{O}$	+0,15
	$2\text{SO}_3^{2-} + 6\text{H}^+ + 4\text{e} \rightleftharpoons \text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 3\text{H}_2\text{O}$	+0,71
	$\text{SO}_3^{2-} + 6\text{H}^+ + 6\text{e} \rightleftharpoons \text{S}^{2-} + 3\text{H}_2\text{O}$	+0,23

Se compararon los valores de Eh de los electrodos y pH de las soluciones de los lixiviados, en las columnas de Tinajas, El Álamo y Bacanuchi (Figura 48a, Figura 48b y Figura 48c respectivamente) con los diagramas de POURBAIX (pH vs Eh) de los elementos Fe y Al. (Figura 48d y Figura 48e). Se observó que los valores de Eh, pH, en las columnas de Tinajas y El Álamo caen en la zona de dominio de las especies Fe^{2+} y Al^{3+} , las cuales son especies móviles.

En el caso de la columna de Bacanuchi, se observa que los valores de pH, Eh, caen en las zonas de dominio de las especies $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$, las cuales son especies inactivas en el sistema.

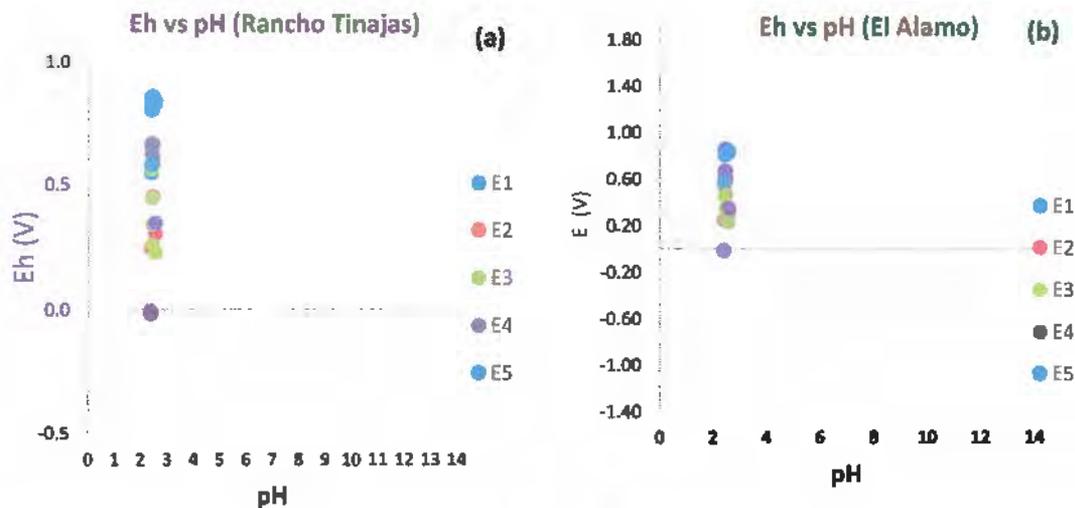


Figura 48. Comparación de los diagramas de Eh vs pH elaborados para las columnas de reproso Tinajas (a), El Álamo (b) y Bacanuchi (c), con los diagramas de PROUBARIX de los elementos Fe (d) y Al (e).

Conclusiones de los experimentos en columnas:

Los resultados obtenidos en los dos riegos realizados en la columna de sedimentos de rancho Chilolo, permiten concluir que el paso de la solución ácida del DAM, modifica la estructura y porosidad del suelo/sedimento. Esto último modifica a su vez la velocidad de infiltración y de lixiviación de los suelos/sedimentos.

Referente a los metales retenidos en el suelo/sedimento, únicamente algunos de ellos son desorbidos en el riego subsecuente, será necesario hacer más riegos en las columnas para determinar el tiempo de retención de los diferentes elementos.

El paso del DAM por el suelo/sedimento, desorbe elementos naturales del suelo/sedimento.

El potencial redox en el sistema, está influenciado por el tamaño de las partículas que constituyen el suelo/sedimento de las columnas.

Aparentemente la capacidad amortiguadora de los suelos/sedimentos de la zona estudiada, aumenta a medida que nos alejamos del arroyo Tinajas, en dirección sur.

La Tabla 8 muestra un resumen de los elementos que son desorbidos/liberados del suelo/sedimento debido al paso del DAM, y los elementos adsorbidos en orden de preferencia del suelo/sedimento.

Nota: a menor número de elementos enlistados en la columna de elementos que se adsorben, mayor será el número de elementos aportados por el DAM, adsorbidos irreversiblemente (en un riego)

Tabla 8. Resumen: adsorción – desorción de elementos en/desde el suelo/sedimento.

Suelo Tinajas	
Elementos que se liberan	Elementos que son retenidos
Sr>Na>Pb>Mn,Ca	Fe>Al>Zn>As,Cu>Li, Cr,Co,Cd,Ni
Sedimento Alamo	
Elementos que se liberan	Elementos que son retenidos
Sr>Na>Pb>Ca>Mn>Mg>Co>Cd	Fe>Al>Zn>Cu> As>Cr>Li>Ni
Sedimento Chilolo	
Elementos que se liberan	Elementos que son retenidos
Sr>Na>Pb>Ca	Fe>As>Al>Cu,Ni>Cd>Co, Li>Zn,Mg>Mn

Suelo terraza Río Bacanuchi	
Elementos que se liberan	Elementos que son retenidos
Sr>Na>Ca	Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Zn>>Li, Mg

Evaluación del efecto del DAM en la porosidad y estructura de suelos y sedimentos mediante micro tomografía.

Para evaluar el efecto del DAM sobre la porosidad y estructura de los suelo y sedimentos se recurrió a una técnica denominada micro-tomografía. Esta técnica logra detectar poros mayores a 80 micrómetros.

Se seleccionaron 2 columnas una de suelo procedente del represo Tinajas (Punto 1) y otra de sedimento colectada en la localidad de el Alamo (Punto 5), sobre el lecho del río. A continuación se presentan los resultados del análisis realizado en la columna del represo.

El primer paso para el estudio consistió en binarizar los datos, separando los voxeles que representan espacio poroso y aquellos que representan porciones de materia sólida (Figura 67). Una vez separados, los voxeles que representan espacio poroso se clasifican de acuerdo a su conectividad. Así un poro se forma por todos los voxeles interconectados en un volumen.

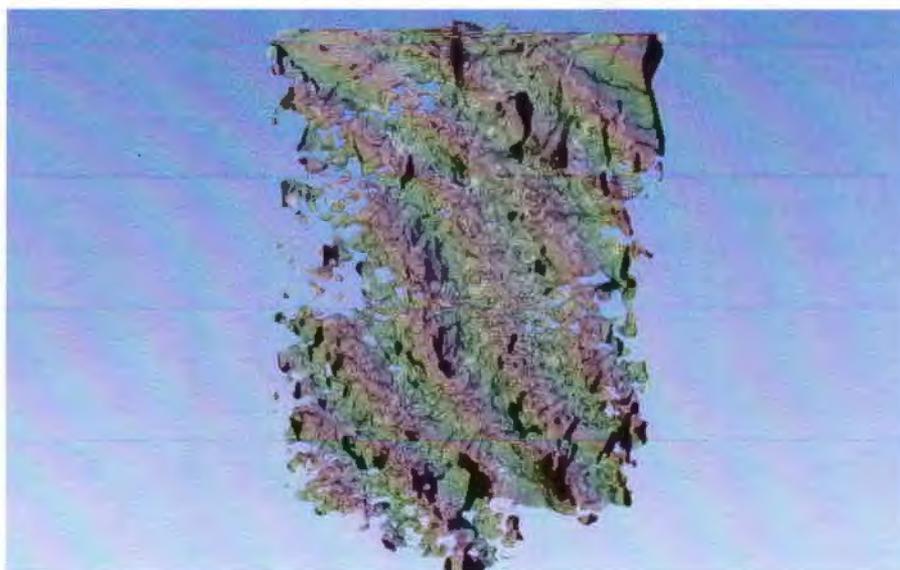




Figura 49. Muestra de una sección de la columna de suelo colectada en el punto 1 (represo Tinajas). Arriba) Representación de los poros en 3D en gris. Abajo) Tres puntos de vista de cortes bidimensionales de los ejemplos de suelos.

El objetivo de utilizar los volúmenes de imágenes es el poder evaluar los cambios de porosidad por corte y en el volumen entero, así como el número de poros en el volumen.

Al evaluar la fracción de porosidad por corte se obtiene una representación bidimensional del cambio de porosidad con respecto a la profundidad. En la Figura 50 se muestra una selección de cortes del volumen de la columna colectada en el represo Tinajas (C6, Punto 1). Los píxeles en blanco pertenecen a poros, así la fracción de porosidad por cada corte es el conteo total de píxeles con valor de intensidad igual a 1 (color blanco) dividido por el tamaño de la imagen (400 píxeles x 400 píxeles = 160,000 píxeles).

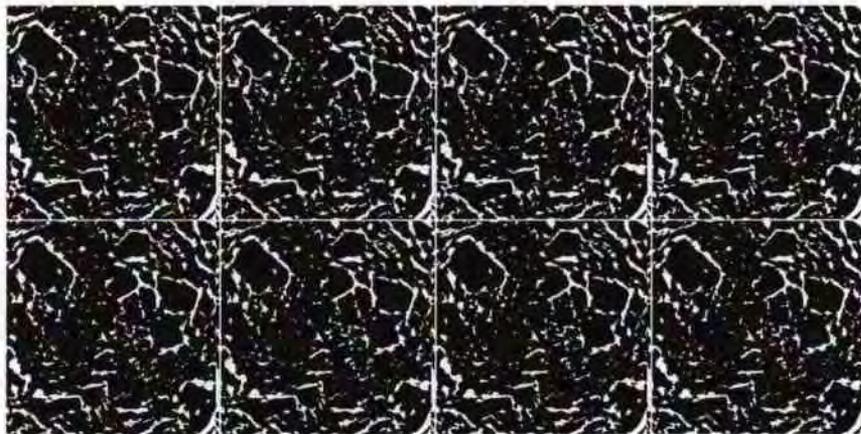


Figura 50. Imágenes de muestra de los cortes que forman el volumen de suelo (Columna represo Tinajas, Punto 1).

El resultado de la fracción por porosidad se muestra en la Figura 51. En general se observa que la fracción de porosidad es similar antes y después del riego, sin embargo, a partir del corte 1825 la porosidad de la columna después del riego parece disminuir respecto a la porosidad de la columna antes del riego.

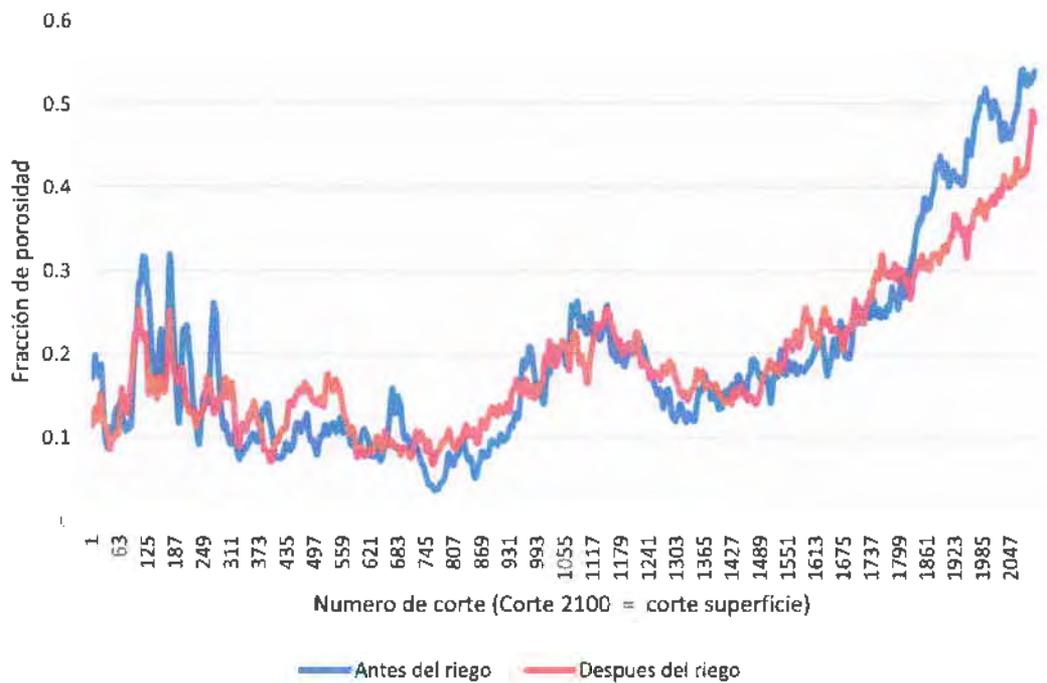


Figura 51. Fracción de porosidad por corte (2100 imágenes), Columna Punto 1 (reproso Tinajas).

En una inspección inicial de las imágenes de la columna de reproso Tinajas antes y después del riego se sospechó que la porosidad había aumentado al observarse un número mayor de poros (Figura 52).

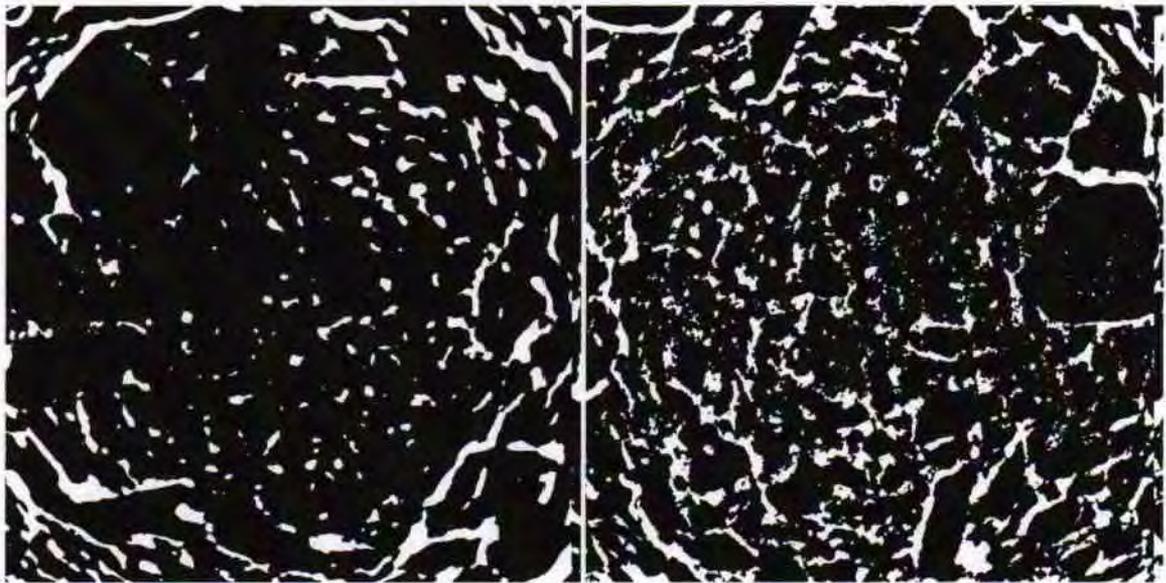


Figura 52. Izquierda) Imagen de muestra de la porosidad de la columna Punto 1 antes del riego. Derecha) Imagen de muestra de la porosidad de la columna Punto 1 después del riego.

Para explorar la relación entre el número de píxeles de poros en la imagen y la poca diferencia entre la fracción de porosidad antes y después del riego, es decir, para evaluar el número de poros y su volumen en la columna original, ésta se dividió en 29 secciones, siendo sus dimensiones originales de 1200 x 1200 x 2100 voxeles en x, y y z.: Las secciones se muestran en la Tabla 9. *Dimensiones de las 19 secciones en que se dividió la columna de represo Tinajas..*

Tabla 9. Dimensiones de las 19 secciones en que se dividió la columna de represo Tinajas.

Dimensión en x	Dimensión en y	Dimensión en z (en número de cortes)
0 a 400	0 a 400	1 a 700
0 a 400	400 a 800	1 a 700
0 a 400	800 a 1200	1 a 700
400 a 800	0 a 400	1 a 700
400 a 800	400 a 800	1 a 700
400 a 800	800 a 1200	1 a 700
800 a 1200	0 a 400	1 a 700

800 a 1200	400 a 800	1 a 700
800 a 1200	800 a 1200	1 a 700
0 a 400	0 a 400	701 a 1400
0 a 400	400 a 800	701 a 1400
0 a 400	800 a 1200	701 a 1400
400 a 800	0 a 400	701 a 1400
400 a 800	400 a 800	701 a 1400
400 a 800	800 a 1200	701 a 1400
800 a 1200	0 a 400	701 a 1400
800 a 1200	400 a 800	701 a 1400
0 a 400	0 a 400	1401 a 2100
0 a 400	400 a 800	1401 a 2100
0 a 400	800 a 1200	1401 a 2100
400 a 800	0 a 400	1401 a 2100
400 a 800	400 a 800	1401 a 2100
400 a 800	800 a 1200	1401 a 2100
800 a 1200	0 a 400	1401 a 2100
800 a 1200	400 a 800	1401 a 2100
800 a 1200	800 a 1200	1401 a 2100

En la Figura 53 se puede observar que el volumen total de poros por cada columna se mantiene similar antes y después del riego.

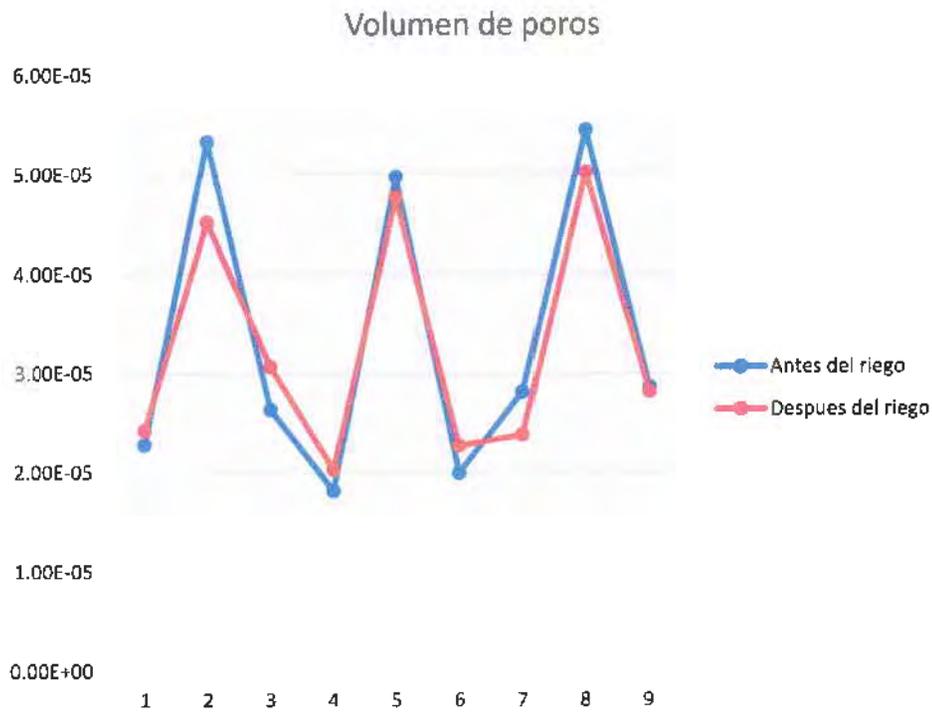


Figura 53. Se muestra el volumen total de poros por cada una de las sub-columnas.

Por otro lado si observamos el número de poros (Figura 45) se puede observar un cambio de comportamiento importante en la columna antes y después del riego. El riego parece causar la formación de nuevos poros.

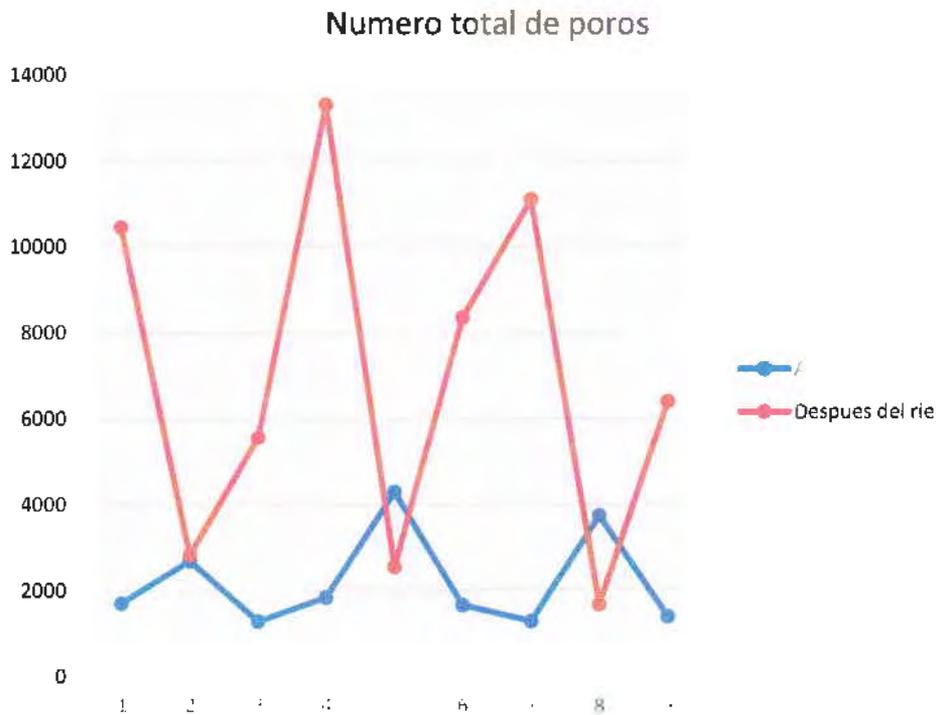


Figura 54. Si evaluamos el número total de poros se puede observar que el riego causa la creación de nuevos poros.

Utilizando los datos obtenidos en las Figura 53 y Figura 54 se puede ver que el proceso de regado si crea nuevos poros pero reduce las dimensiones de estos haciendo que la fracción de porosidad y el volumen total de los poros sea similar.

El volumen promedio de los poros por tanto es menor en la mayoría de las sub-columnas después del regado (Figura 54).



Figura 55. Volumen promedio de poro por sub-columna disminuye después del regado.

Anexos

Anexo 1. Cinética para la determinación del tiempo de equilibrio adsorción que se empleará en el diseño de experimentos de adsorción de metales en suelos y sedimentos

La cinética se llevó a cabo de acuerdo con el procedimiento establecido por la OCDE, (2000)

Equipo y Material

Centrífuga	Probeta de 100 ml
30 tubos de centrifuga de 50 ml	Jeringas de 10 ml
Agitador mecánico	Filtros de jeringa de 0.45 micras
Potenciómetro	30 tubos de centrifuga de 15 ml
Conductímetro	

Reactivos:

Lixiviado minero

CaCl₂ 0.01 M

Muestra de suelo o sedimento:

El suelo o sedimento debe secarse al aire y tamizarse (< 2 mm) previamente a la realización del experimento; asimismo se debe determinar su humedad actual.

Procedimiento:

D
I
A
1

1. Preparar:

Muestras de suelo

Pesar 2 g de suelo por triplicado para cada una de los tiempos de equilibrio a probar (4, 6, 8, 19:30 y 24 horas para el suelo de Cerro Colorado y 4, 6, 8, 11:24 y 24 horas para el sedimento de Tinajas) en tubos de centrifuga de 50 ml.

Muestras control

5 tubos en los que se verterá únicamente el volumen correspondiente de lixiviado sin suelo (40 ml).

Blanco de corrida

Pesar 2 g de suelo en 5 tubos de centrifuga de 50 ml (uno para cada uno de los tiempos de equilibrio a probar)



2. Agregar un volumen de lixiviado suficiente en cada muestra de suelo para alcanzar una relación suelo:solución 1:20. Medir el pH y la CE de la mezcla.

Realizar el mismo procedimiento en los blancos de corrida pero agregando CaCl₂ 0.01 M en lugar de lixiviado.



3. Colocar los sistemas suelo:solución en **agitación**.

4. Transcurrida 1 hora retirar de agitación las primeras 3 muestras de suelo, una muestra control y un blanco de corrida. Determinar pH y CE en cada tubo. Centrifugar a 2500 rpm por 15 min. Filtrar el sobrenadante con filtros de jeringa de 0.45 µm y preservarlos en refrigeración hasta el momento de su análisis.



Repetir este último paso a las 4, 6, 8, 19:30 o 11:24, y 24 horas de agitación



5. Determinar la concentración de metales en el sobrenadante por ICP

Anexo 2. Metodología para la realización de experimentos de adsorción-desorción en lote

Se pesaron 2 g de suelo húmedo en 5 tubos de centrifuga por triplicado. Al primer tubo se le agregó el volumen de CaCl_2 (0.01 M) necesario para saturar el suelo, a los 4 tubos restantes se les agregó suficiente CaCl_2 (0.01 M) para alcanzar volúmenes de solución de 4, 10, 20 y 30 ml (teniendo en cuenta el agua contenida en el suelo). Los sistemas suelo: CaCl_2 se sometieron a agitación por 12 hrs a 120 rpm. Transcurrido este tiempo se le agregó a cada tubo el volumen de lixiviado necesario para alcanzar una relación suelo:solución 1:20. Posteriormente los tubos se colocaron en agitación por 24 horas. Concluido este tiempo se retiraron de agitación, se centrifugaron por 15 min a 2500 rpm y el sobrenadante se filtró con filtros de jeringa de 0.45 micras. El lixiviado filtrado se adicionó con unas gotas de ácido nítrico para preservar los metales en solución y posteriormente se conservó en refrigeración hasta el momento de su análisis por ICP.

Al decantado se le agregó un volumen de CaCl_2 equivalente al volumen extraído, de tal forma que se conservó la relación suelo:solución original. Posteriormente los tubos se colocaron en agitación por 24 horas, se centrifugaron por 15 min a 2500 rpm y el sobrenadante se filtró con filtros de jeringa de 0.45 micras. El lixiviado filtrado se adicionó con unas gotas de ácido nítrico para preservar los metales en solución y posteriormente se conservó en refrigeración hasta el momento de su análisis por ICP. Se realizó una segunda desorción siguiendo el mismo procedimiento.

Anexo 3. Protocolo para la realización de experimentos de transporte en columnas empacadas de suelo para evaluar la movilidad de metales en suelos y sedimentos.

Anexo 4. Protocolo para la realización de experimentos de transporte en columnas inalteradas de suelo para evaluar la movilidad de metales en suelos y sedimentos.

Montaje de la columna:

La columna se sacó del cuarto frío y se desempacó, cuidando siempre mantenerla en posición vertical. Posteriormente se retiró de su superficie la cantidad de suelo necesaria para permitir el establecimiento de la lámina de riego (aproximadamente 4 cm); paralelamente se eliminó con un cuchillo el suelo excedente en la base de la columna, cuidando no dejar huecos ni sellar su superficie. Del suelo retirado en la superficie de la columna se tomó una muestra para determinar el contenido de humedad por gravimetría. Antes de continuar con el montaje de la columna se registró su peso, altura y diámetro. Posteriormente se preparó la base de plástico en la que se asentó la columna; ésta consta de un embudo de teflón,

sobre el que se asienta una rejilla de 5mm de apertura de poro del mismo material y un anillo que contiene un empaque y permite la sujeción de la columna a la base. Entre la base y el extremo inferior de la columna se colocó un filtro de nitrocelulosa con un diámetro de poro de 0.5 μm y enseguida una capa de arena fina, químicamente pura. El filtro cumple la doble función de evitar la pérdida de suelo en la base de la columna y definir el tamaño de los coloides en suspensión que se obtendrán en el lixiviado una vez que la columna sea regada; por su parte, la arena funge el papel de asegurar un buen contacto entre el suelo y la base de la columna. Una vez preparada la base, se asentó la columna sobre ella y se selló la comisura entre ambas con silicón frío.

Instrumentación de la columna:

Habiéndose montado la columna se procedió a instalar sobre sus paredes 5 electrodos para medir el potencial redox y 4 microlisímetros de succión para extraer la solución del suelo durante el riego. Los electrodos se colocaron a 3, 10 y 15 cm de la superficie del suelo y los lisímetros a 3, 5, 10 y 15 cm de la superficie. La instalación de estos dispositivos consistió en perforar con un taladro las paredes de la columna de acrílico, teniendo cuidado en no alterar la estructura y porosidad naturales del suelo. Paralelamente se preparó una mezcla de lodo con el suelo retirado en la parte superior de la columna y agua destilada. Los electrodos y microlisímetros se recubrieron con lodo y posteriormente se introdujeron cuidadosamente por los orificios. Finalmente los orificios se sellaron con silicón frío para evitar la pérdida de lixiviado durante el riego.

Una vez instrumentada, la columna se pesó nuevamente y se regó con CaCl_2 0.01 M hasta observar la salida de lixiviado en su base. Este primer riego se realizó con el doble propósito de favorecer el reacomodo de las partículas de suelo alrededor de los lisímetros y electrodos, y de verificar que no hubiese fugas en la columna.

Riego:

Un episodio de riego consistió en verter en la parte superior de la columna un volumen de drenaje ácido de mina (DAM) equivalente a un volumen de poro de la columna de suelo, esto con el propósito de lograr que todos los poros de suelo fuesen visitados por el DAM. Un volumen de poro se estimó multiplicando el volumen de la columna de suelo por su porosidad total. Durante el riego se mantuvo una lámina de DAM constante en la superficie de la columna (de 2 a 4 cm), únicamente en las columnas de textura gruesa se estableció una lámina de infiltración. El DAM suministrado se dejó pasar por gravedad a través de la columna y el lixiviado se recuperó en la parte inferior de la columna, discretizado en tubos

de centrifuga de 50 ml. El volumen total de lixiviado obtenido a lo largo del riego se discretizó en fracciones de 50 ml; en cada fracción se midió el pH y la conductividad eléctrica para inferir el tipo de especies metálicas presentes en solución.

Durante el riego se monitorearon los siguientes parámetros:

Peso de la columna (antes y después del riego): El pesado de la columna se realizó con el propósito de conocer la cantidad de líquido retenida en el suelo después de la infiltración del DAM.

Velocidad de infiltración de la lámina de riego: Con una regla colocada en la superficie de la columna se midió el descenso de la lámina a intervalos regulares de tiempo.

velocidad del flujo de lixiviado a la salida de la columna: Para cada uno de los tubos de lixiviado colectados a lo largo del riego, se registró el tiempo de inicio y término de llenado. El flujo se estimó dividiendo el volumen total de la fracción de lixiviado entre el tiempo que tardó en llenarse.

Potencial redox: Se midió con un voltímetro a intervalos regulares de tiempo.

Durante el riego también se colectó la solución del suelo extraída por los lisímetros de succión en tubos para la recolección de muestras sanguíneas de plástico (vacutainers). Para cada tubo se registró el tiempo de inicio y término de llenado, así como el volumen total de solución recuperada.

Todas las muestras colectadas durante el riego se centrifugaron por 15 minutos a 2500 rpm para separar los componentes solubles de los sólidos en suspensión, posteriormente el sobrenadante se filtró con filtros de jeringa de 0.45 μm y se acidificaron para determinar el contenido de metales en solución por ICP.

Referencias

- Bhattacharyya, K. y Sen Gupta, S., 2006. Adsorption of Fe(III) from water by natural and acid activated clays: Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions. *Adsorption*, 12:185-204.
- Bradl, H., 2004. Adsorption of heavy metal ions in soils and soil constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 227:1-18.
- Delaune, R. D. and Reddy K, R. 2005. Redox Potential, in Encyclopedia of soil in the Environment, Elsevier, Ltd.
- Feng, Q., Zhang, Z., Chen, Y., Liu, L., Zhang, Z. y Chen, C., 2013. Adsorption and Desorption Characteristics of Arsenic on Soils: Kinetics, Equilibrium, and Effect of Fe(OH)₃ Colloid, H₂SiO₃ Colloid and Phosphate. *Procedia Environmental Sciences*, 18: 26-36.
- Goldberg, S., 2012. Competitive Adsorption of Arsenate and Arsenite on Oxides and Clay Minerals, *Soil Science Society of America Journal*, 66:413-421.
- Hamdi, A. M. B., 2012. Influence of pH and Ionic Strength on the adsorption of Copper and Zinc in Bentonite Clay. *Chem. Sci. Trans.*, 1(2):371-381.
- Kabata-Pendias, A., 2011. Trace elements in soil and plants. Ed. CRC Press, EEUU. 520 p.
- OCDE, 2000. Guideline for the testing of chemical, Adsorption-Desorption Using a Batch Equilibrium Method. Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo, No. 106, 45 p.
- Ulrich, B. 1980. Production and consumption of hydrogen ions in the ecosphere. In: *Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems*. NATO Conference Series. Volume 4: eds. T.C. Hutchinson and M. Havas.
- Ulrich, B. 1983. A concept of forest ecosystem stability and of acid deposition as driving force for destabilization. In: Ulrich B. and J. Pankrath (ed) *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems*. 1- 29. Reidel Publ. Co. Dorecht, Holland.
- <http://rt000uvs.eresmas.net/recursos.htm>. 2001. Potencial Redox en metales.

V. CONDICIONES HIDROGEOQUÍMICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Análisis isotópico

Durante los últimos 50 años, las técnicas isotópicas ambientales han sido de gran ayuda para entender los procesos que rigen el ciclo hidrológico (i.e. precipitación, flujo superficial y subterráneo, evaporación, condensación) y su variabilidad bajo las condiciones climáticas a las que se encuentra sujeto (IAEA, 2003). Los procesos de cambio de fase en el ciclo hidrológico (i.e. evaporación, condensación) causan diferencias en la relación entre isótopos pesados y ligeros de la molécula de agua; esta variación δD - $\delta^{18}O$ (donde δD y $\delta^{18}O$) son la abundancia de deuterio y oxígeno-18 con respecto al VSMOW-Vienna Standard Mean Ocean Water) permite trazar masas de agua para obtener información sobre su origen y movimiento en el medio natural. De esta manera, el uso de isótopos estables ha sido de utilidad para analizar las diferencias en la composición isotópica en tiempo y espacio de la precipitación (Hartsough et al., 2008; Szykiewicz et al., 2008), entender los patrones de movimiento en flujos de agua (Tetzlaff et al., 2014), identificar zonas de recarga de agua subterránea en cuencas (Yeh et al., 2014) y en los últimos años, en el desarrollo de mapas isotópicos (Terzer et al., 2013; West et al., 2014), a menudo aportando conocimiento que no se puede obtener mediante otras técnicas de trazadores.

Para interpretar las diferencias entre las composiciones isotópicas del agua es necesario tener parámetros de referencia, uno de ellos es la línea meteórica global (GMWL-Global Meteoric Water Line por sus siglas en inglés). La ecuación de la GMWL fue determinada por Craig (1961) al encontrar una relación lineal entre $\delta^{18}O$ y δD para las aguas superficiales a escala global representada por la ecuación $\delta D = 8.0 \delta^{18}O + 10$. Esta relación varía regionalmente debido a las diferentes condiciones climáticas y fenómenos atmosféricos a los que están sujetas las precipitaciones en lugares puntuales del planeta. En zonas áridas y semiáridas, la evaporación ambiental provoca un enriquecimiento de isótopos pesados en la composición isotópica de los diferentes reservorios de agua (i.e. ríos, lagos, manantiales) lo que provoca una desviación en la pendiente y el intercepto con respecto a la GMWL, generando una línea meteórica local (LMWL-Local Meteoric Water Line por sus siglas en inglés). A las rectas dibujadas para componentes hídricos no meteóricos se les denomina líneas de evaporación local LEL (Local Evaporation Line) (Gibson et al., 2008). Al cambio en el valor del intercepto de la GMWL se le denomina exceso de deuterio (*d-excess*) y es definido como $d = \delta D - 8\delta^{18}O$. *d-excess*, es un parámetro altamente sensible a los cambios en las condiciones ambientales durante los procesos evaporativos del agua (Dansgaard, 1964; Pfahl y Sodemann, 2014). La generación de líneas meteóricas y de evaporación, proporciona un marco general para la interpretación de datos isotópicos y ayudan a obtener información sobre los factores que regulan las características isotópicas de los flujos de agua (Díaz-Teijeiro et al., 2009).

Objetivo

El objetivo principal de este estudio fue utilizar las composiciones isotópicas de precipitación, agua superficial y agua subterránea en el Río Sonora para realizar una aproximación del origen y movimiento de estos 3 componentes.

Método e interpretación

Se analizaron 68 muestras de agua recolectadas en la Cuenca del Río Sonora; 27 de agua superficial y 38 de agua subterránea. Las muestras de agua fueron colectadas sin filtrar y almacenadas en botes herméticos plásticos de 300 mL y fueron llevadas al laboratorio. Posteriormente, fueron filtradas con membranas de 0.45 μm . También se recolectaron 3 muestras de lluvia compuesta de aproximadamente 4 meses, sin embargo, no son representativas de la espacialidad total de la cuenca por lo que no se puede construir una línea meteórica para la cuenca. Al no existir una línea meteórica para la zona de la cuenca del río Sonora, se compararon las composiciones para agua superficial y subterránea con líneas meteóricas de zonas circundantes, Hermosillo y Cd. Obregón.

Las relaciones isotópicas ($^2\text{H}/^1\text{H}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) fueron determinadas usando un espectroscopio láser (Modelo DLT-100; Los Gatos Research Inc.) utilizando el método descrito en Lis et al. (2008). Todas las muestras fueron normalizadas a estándares internos de laboratorio (LGR#1 $\delta\text{D}:-154.1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}:-19.57\text{‰}$ y LGR#5 $\delta\text{D}:-9.8\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}:-2.96\text{‰}$) que fueron previamente calibrados respecto al VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Los valores de δD y $\delta^{18}\text{O}$ fueron determinados siguiendo la metodología LIMS for lasers establecida por la IAEA. La desviación estándar fue de 0.6‰ para δD y 0.3‰ para $\delta^{18}\text{O}$.

Resultados

Las señales isotópicas varían dependiendo de los diferentes procesos que puedan fraccionar los átomos que conforman la molécula de agua. La composición isotópica de la lluvia es la mayoría del tiempo más negativa que la del agua superficial, ya que una vez que la precipitación pasa a convertirse en escorrentía, el agua es más propensa a sufrir evaporación provocada por los cambios en las condiciones ambientales (i.e. temperatura, humedad relativa). A medida que el agua fluye río abajo, su composición isotópica se vuelve positiva, alejándose de los valores de la lluvia que originó la escorrentía. Estos cambios en la composición isotópica del agua durante su trayecto, permiten trazar el movimiento del recurso hídrico en el medio natural. Un pozo cuya composición isotópica sea parecida a la de la lluvia probablemente esté siendo recargado directamente por la precipitación local. A su vez, un pozo cuya agua presente una composición isotópica más positiva que la lluvia, probablemente esté siendo recargado por agua evaporada del cauce más cercano a este.

La Figura 1 muestra cómo las composiciones isotópicas del agua subterránea y superficial del Río Sonora se encuentran en el mismo rango isotópico por lo que se puede afirmar que estos dos componentes están ligados y presentan una alta interacción entre ellos. Esta afirmación resulta lógica ya que todos los pozos muestreados se encuentran a distancia cercana del cauce principal cuyo flujo parece contribuir en gran manera a la recarga de los pozos muestreados. En la Figura 1 también se puede observar que los puntos tienen mayor tendencia a seguir el comportamiento de la LMWL-Hermosillo. La línea meteórica local de Obregon (LMWL-Obregon) se encuentra por encima de los puntos muestreados, dicha línea representa un comportamiento de la precipitación en el sur de Sonora, más cercano a un clima tropical.

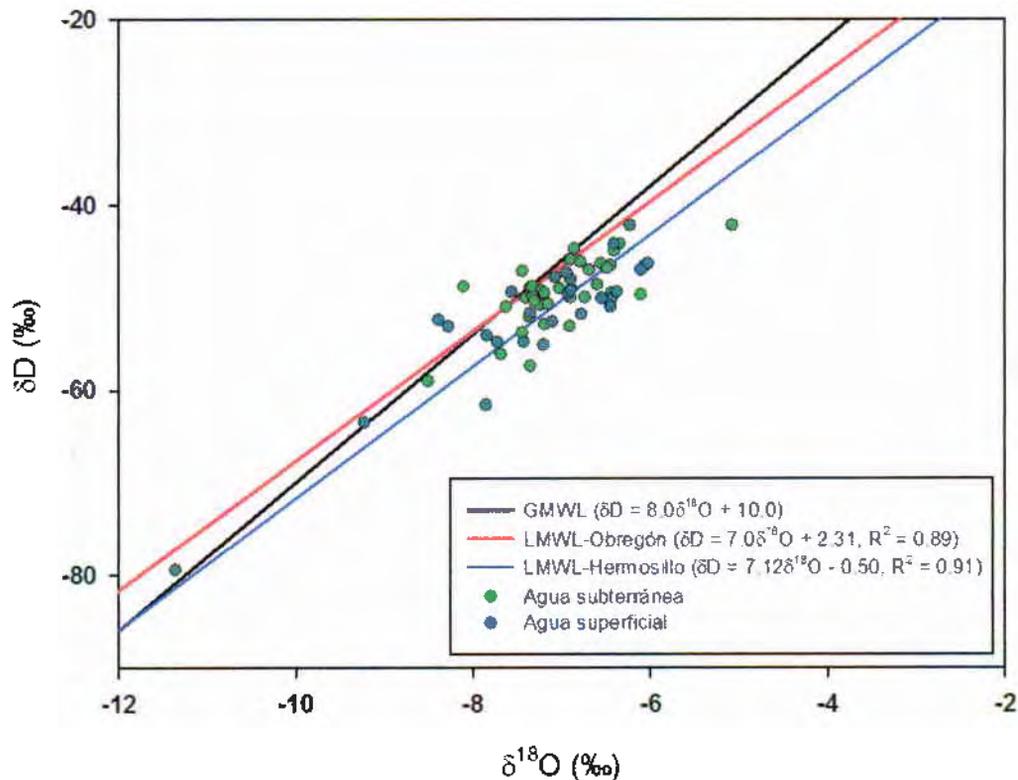


Figura 1. Relación entre la LMWL-Obregon, LMWL-Hermosillo, la GMWL y puntos de composición isotópica de agua subterránea y superficial en la cuenca del Río Sonora.

VI. DISTRIBUCIÓN, DISPERSIÓN POR EFECTO DE LOS HURACANES ODILE Y NORBERTO

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

pág.

Figura 1. (a) Delimitación de las fronteras de la cuenca del Río Sonora y de los límites de la parte alta de la cuenca; Variabilidad espacial de la precipitación acumulada utilizando el método de interpolación de Thiessen (n=8) para (a) Huracán Norberto y (b) Odile en Septiembre del 2014.	151
Figura 2. Precipitaciones diarias registradas del 1 de Junio al 1 de Noviembre del 2014 en las estaciones de CONAGUA de la (a) zona norte (Cananea, Bacoachi, Bacanuchi, Arizpe, Sinoquipe), (b) zona centro (Banamichi, Huepac, Aconchi, Mazocahui) y (c) zona sur (Ures y Topahue).	153
Figura 3. Precipitaciones registradas del 1 de Agosto al 30 de Septiembre del 2014 en la estación de ecología del Grupo Mexico.	154
Figura 4. Variabilidad espacial de la precipitación normalizada a la precipitación máxima registrada del 1 al 26 de Septiembre del 2014 (187 mm) en la cuenca el Río Sonora utilizando el Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte América (NLDAS por sus siglas en inglés) para (a) Huracán Norberto y (b) Odile en Septiembre del 2014.	155
Figura 5. Variabilidad espacial de la precipitación acumulada ajustada en la cuenca el Río Sonora utilizando el Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte América (NLDAS por sus siglas en inglés) para (a) Huracán Norberto y (b) Odile en Septiembre del 2014. Los puntos rojos en el mapa muestran los sitios en los que el Grupo del Agua llevó a cabo trabajos de campo.	156

Estimación de la precipitación media durante los eventos

El presente capítulo describe el análisis de climatología realizado por el grupo del agua para evaluar el impacto de los Huracanes Norberto y Odile durante el mes de Septiembre, 2014 en la cuenca alta del Río Sonora. El propósito del análisis de climatología es para relacionar los eventos de precipitación con los volúmenes de escurrimiento que se generaron y el impacto que tuvieron en la dispersión y dilución de los contaminantes del derrame ocurrido el 6 de Agosto del 2014 en la mina Buenavista del Cobre en Cananea, Sonora, México.

Para elaborar este análisis se obtuvieron datos de precipitación de 10 estaciones de la Comisión Nacional del Agua / Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA / SMN) (ver Figura 1a). Con los datos de precipitación de CONAGUA se generaron mapas de precipitación correspondiente para los dos eventos utilizando el método de interpolación de Thiessen (ver Figura 1b y 1c). Sin embargo, a raíz de la falta de estaciones climatológicas en la región también se utilizaron datos de precipitación de Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte América (North American Land Data Assimilation System, NLDAS por sus siglas en inglés). Dichos datos se utilizaron para generar mapas de variabilidad espacial y temporal de la lluvia.

De acuerdo con los registros de las estaciones oficiales de CONAGUA de Sinoquipe, Arizpe, Bacoachi, Bacanuchi y Cananea (organizadas de sur a norte) las lluvias tuvieron un rango de 18 a 63 mm para el Huracán Norberto en el periodo del 2 al 10 de Septiembre del 2014. En las mismas estaciones de CONAGUA se registraron variaciones de 105 a 213 mm para el Huracán Odile en el periodo del 11 al 26 de Septiembre del 2014. La Figura 2 muestra las series de tiempo de todas las estaciones oficiales de la región organizadas por región norte (Cananea, Bacanuchi, Bacoachi, Arizpe y Sinoquipe), centro (Banamichi, Huepac, Aconchi, Banamichi, Mazocahui) y sur (Ures y Topahue). Las estaciones oficiales también se utilizaron para calcular los periodos de retorno de las lluvias registradas. El periodo de retorno es el tiempo esperado entre sucesos de baja probabilidad. Se calcula utilizando los registros consecutivos de precipitaciones máximas registradas en 24 horas durante un año. De acuerdo al análisis de los periodos de retorno la estación de Ures registró la tormenta más grande en los últimos 33 años para Norberto y la estación de Cananea registro la tormenta de lluvia más grande en los últimos 20 años (Ver Tabla 1). Analizando los registros históricos anuales en cada una de las estaciones oficiales (Ver Anexo I), se observa que a pensar de que el 2014 en muchas estaciones fue un año arriba del promedio, han existido años en todas las estaciones en donde las precipitaciones fueron más altas. Utilizando los datos de las estaciones oficiales también se hizo un análisis histórico de las precipitaciones registradas en el mes de septiembre históricamente (mismas fechas de los huracanes Norberto y Odile). Dicha comparación se presenta en el Anexo II de este capítulo, y reflejan el impacto que tuvieron Norberto y Odile en distintas partes de la cuenca. Es notorio el impacto que tuvieron los huracanes en las estaciones del norte del Río Sonora (Cananea, Bacanuchi, Bacoachi y Arizpe).

Las comparaciones de las precipitaciones anuales La Tabla 2 muestra los datos observados de precipitación de las estaciones de CONAGUA y de NLDAS para los dos eventos extremos. Dichos datos se utilizaron para generar las Figuras 1b y 1c donde se presenta la variabilidad espacial de la lluvia en base a las estaciones de CONAGUA. Como se observa en las figuras 1b y 1c, existen

regiones muy grandes en la parte norte de la cuenca donde las precipitaciones son muy bajas debido a la falta de estaciones.

Estacion	Periodo de Retorno [años]	
	NORBERTO	ODILE
Cananea	19.9	21.2
Bacoachi	18.3	12.3
Bacamachi	17.5	15.3
Arizpe	11.0	12.7
Sinoquipe	16.0	12.5
Banarnichi	8.2	11.3
Huepac	13.3	11.3
Mazocahui	13.3	8.2
Ures	33.3	14.4
Topahue	31.3	11.0

Tabla 1. Periodos de retorno [años] de las precipitaciones máximas registradas de los archivos históricos de 1959-2015 para cada estación en la cuenca del Rio Sonora. El anexo I muestra las series de tiempo históricas anuales para cada estación y el Anexo II muestra las series de tiempo históricas para el mes de septiembre.

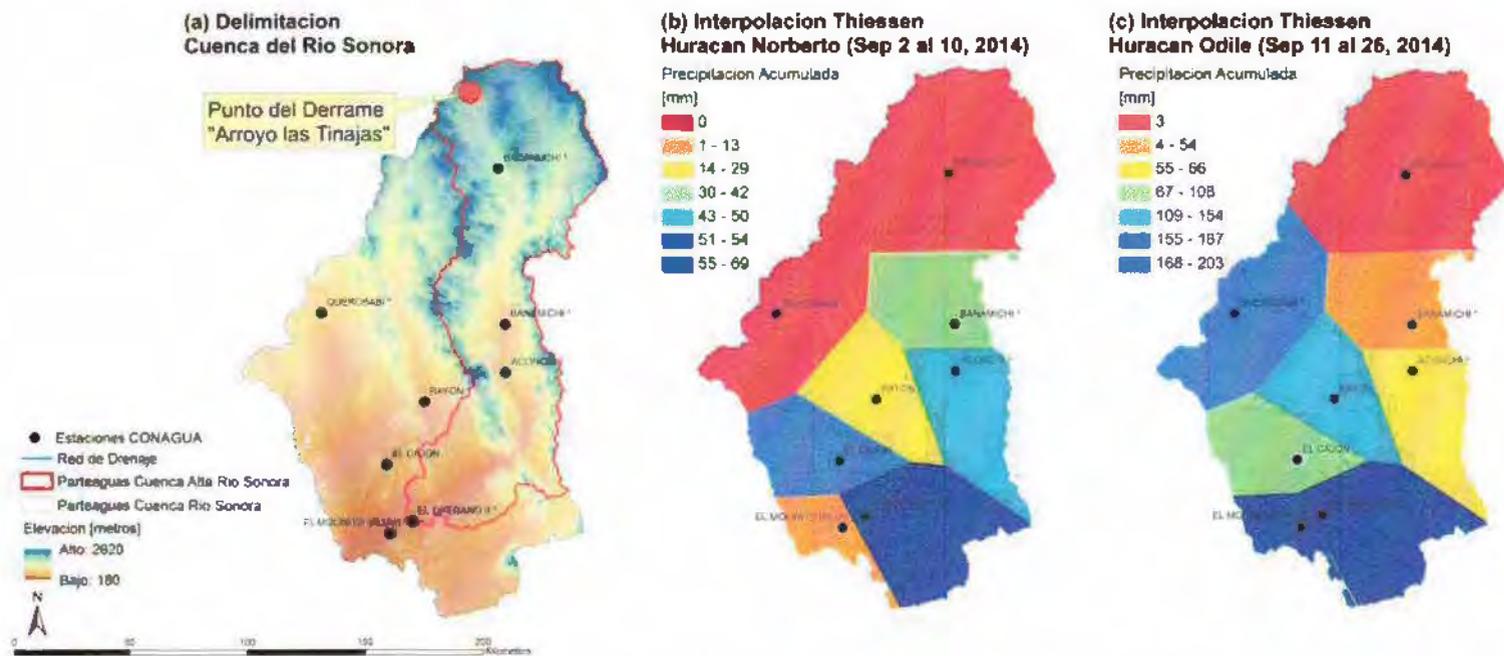


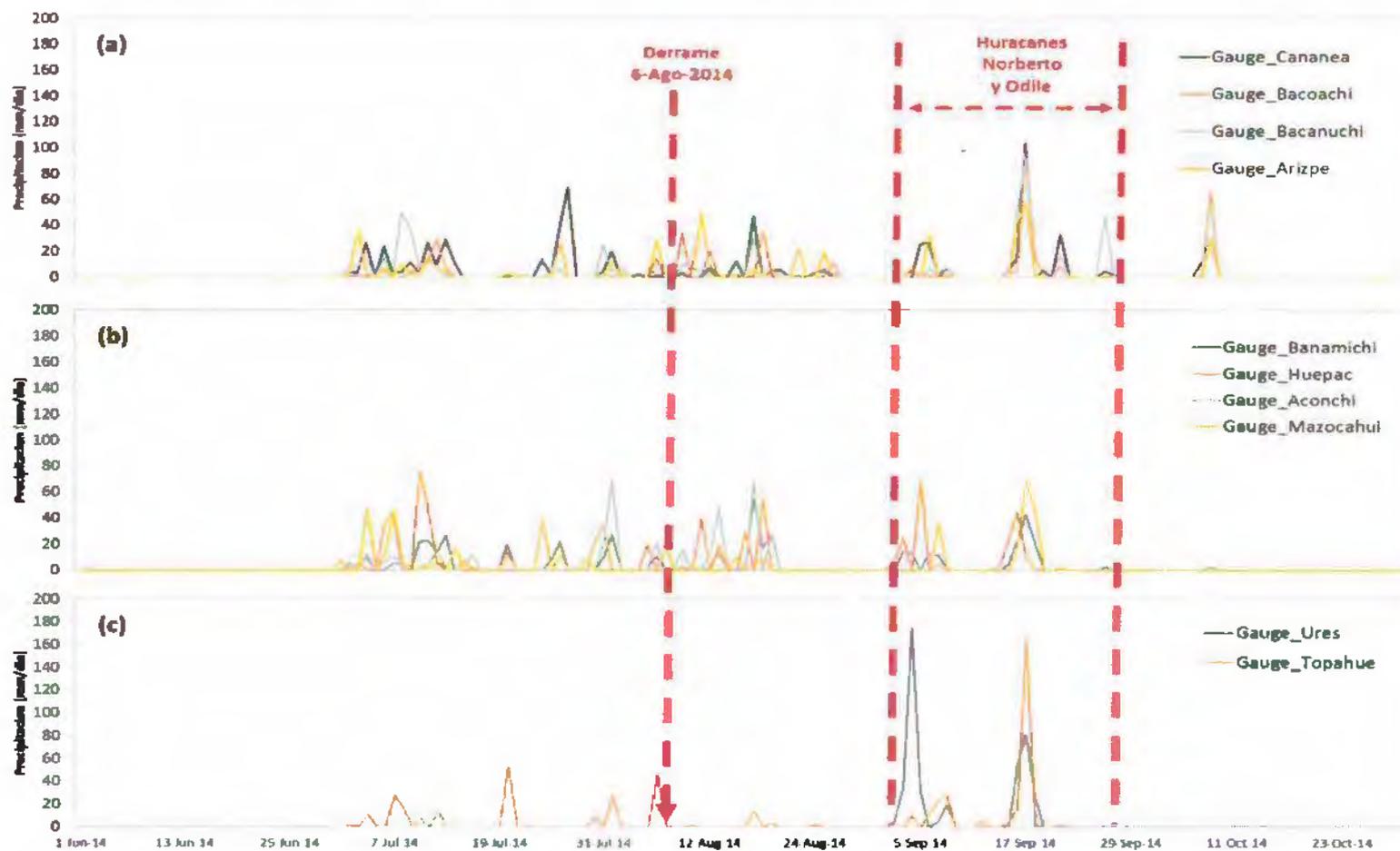
Figura 1. (a) Delimitación de las fronteras de la cuenca del Río Sonora y de los límites de la parte alta de la cuenca; Variabilidad espacial de la precipitación acumulada utilizando el método de interpolación de Thiessen ($n=8$) para (a) Huracán Norberto y (b) Odile en Septiembre del 2014.

Tabla 2. Precipitación acumulada y máxima en milímetros registrada para los Huracanes Norberto y Odile en Septiembre del 2014 utilizando estaciones disponibles dentro del Rio Sonora de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y los pixeles correspondientes a cada estación del Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte América (NLDAS por sus siglas en inglés).

Estacion:	HURACAN NORBERTO (Septiembre 2 al 10, 2014)				HURACAN ODILE (Septiembre 11 al 26, 2014)			
	CONAGUA		NLDAS		CONAGUA		NLDAS	
	Acumulado [mm]	Max [mm]	Acumulado [mm]	Max [mm]	Acumulado [mm]	Max [mm]	Acumulado [mm]	Max [mm]
Cananea *	62.1	28.0	46.1	25.4	167.9	104.3	189.4	108.0
Bacoachi	12.0	5.0	37.2	16.8	130.0	96.0	130.9	66.4
Bacanuchi	17.5	8.0	44.0	19.8	212.8	92.0	152.3	77.3
Arizpe	43.2	34.0	35.9	14.4	104.5	57.5	129.5	64.1
Sinoquipe	85.0	61.0	37.0	12.8	149.0	84.0	137.1	68.8
Banamichi	54.0	14.5	34.3	9.2	93.5	43.0	122.4	55.8
Huepac	107.0	70.0	35.1	9.1	84.0	45.0	121.3	54.6
Mazocahui	37.0	35.0	37.7	12.1	136.0	70.0	123.0	56.4
Ures	269.0	175.0	41.1	11.6	160.4	81.0	131.9	76.7
Topahue	74.2	27.5	35.5	10.9	194.3	164.2	131.8	79.5

* La estación climática del Grupo Mexico registro 251 mm durante todo el mes de Septiembre, 2014. Mientras que CONAGUA registro 232 mm y NLDAS 236 mm en el mismo periodo de tiempo.

Figura 2. Precipitaciones diarias registradas del 1 de Junio al 1 de Noviembre del 2014 en las estaciones de CONAGUA de la (a) zona norte (Cananea, Bacoachi, Bacanuchi, Arizpe, Sinoquipe), (b) zona centro (Banamichi, Huepac, Aconchi, Mazocahui) y (c) zona sur (Ures y Topahue).



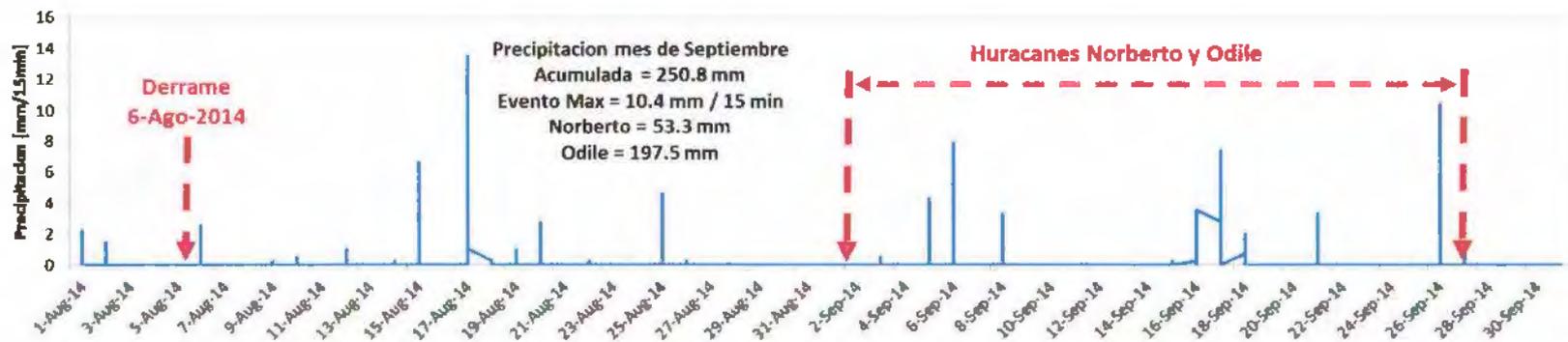


Figura 3. Precipitaciones registradas del 1 de Agosto al 30 de Septiembre del 2014 en la estación de ecología del Grupo Mexico.

Debido a que las estaciones de CONAGUA con datos de precipitación disponibles son muy limitadas se extrajeron los datos de lluvia correspondientes para cada estación disponible del Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte America (North American Land Data Assimilation System, NLDAS por sus siglas en inglés). En el análisis de la precipitación se compararon los datos de las estaciones de CONAGUA (ver Figura 4) con los pixeles correspondientes de NLDAS, y se obtuvieron factores de sesgo para cada tormenta. La Tabla 2 muestra los datos de precipitación correspondientes a las estaciones de CONAGUA y a los pixeles correspondientes de NLDAS antes y después de ser ajustados en dichos puntos. Los factores de sesgo obtenidos fueron aplicados al producto crudo de NLDAS para producir mapas de precipitación de alta resolución (~12km) donde se refleja la intensidad de las lluvias así como una mejor representación de la variabilidad espacial de la lluvia (ver Figura 4 y 5). Las series de tiempo de NLDAS a escalas horarias y diarias se utilizaron para modelar los escurrimientos mediante dos modelos hidrológicos (ver Capítulo 7).

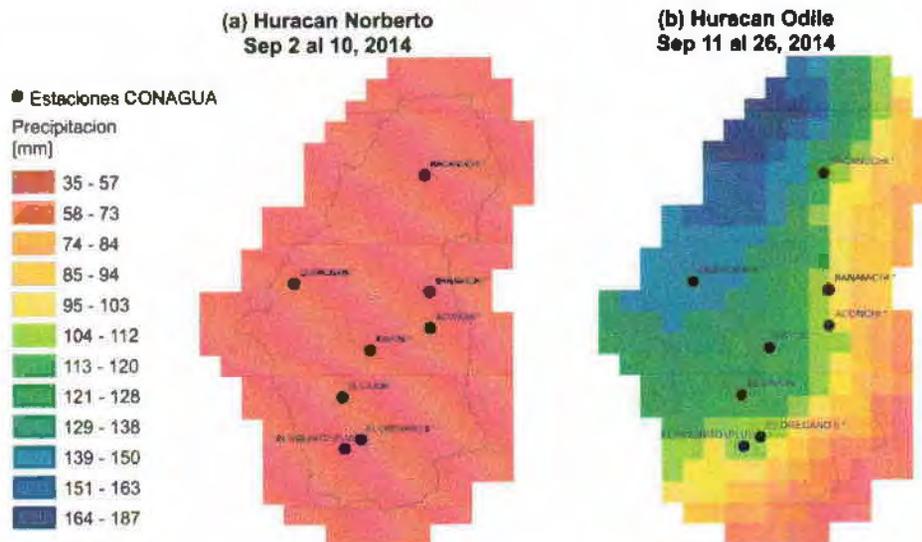
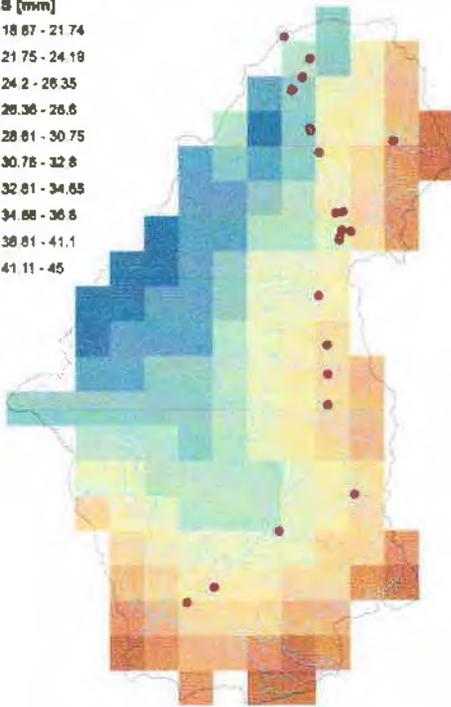


Figura 4. Variabilidad espacial de la precipitación normalizada a la precipitación máxima registrada del 1 al 26 de Septiembre del 2014 (187 mm) en la cuenca el Rio Sonora utilizando el Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte América (NLDAS por sus siglas en inglés) para (a) Huracán Norberto y (b) Odile en Septiembre del 2014.

Huracan Norberto

NLDAS [mm]



Huracan Odile

NLDAS [mm]

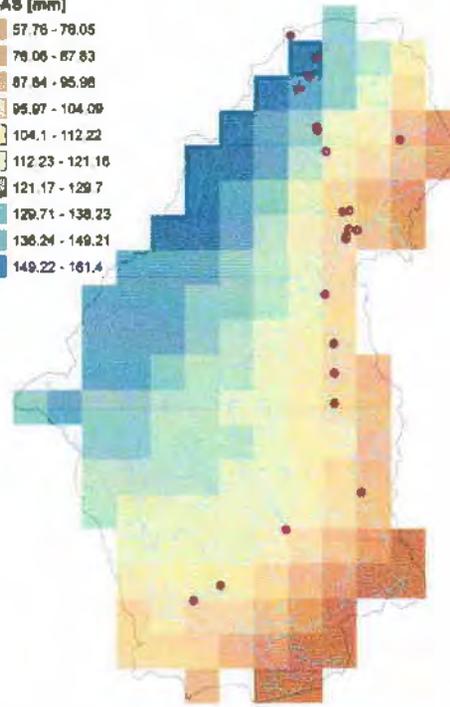
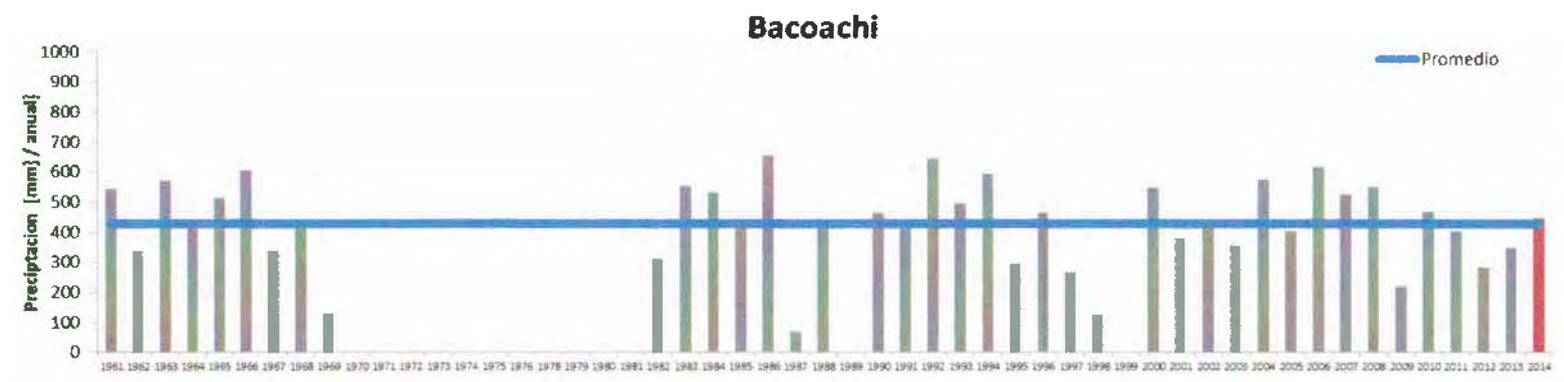
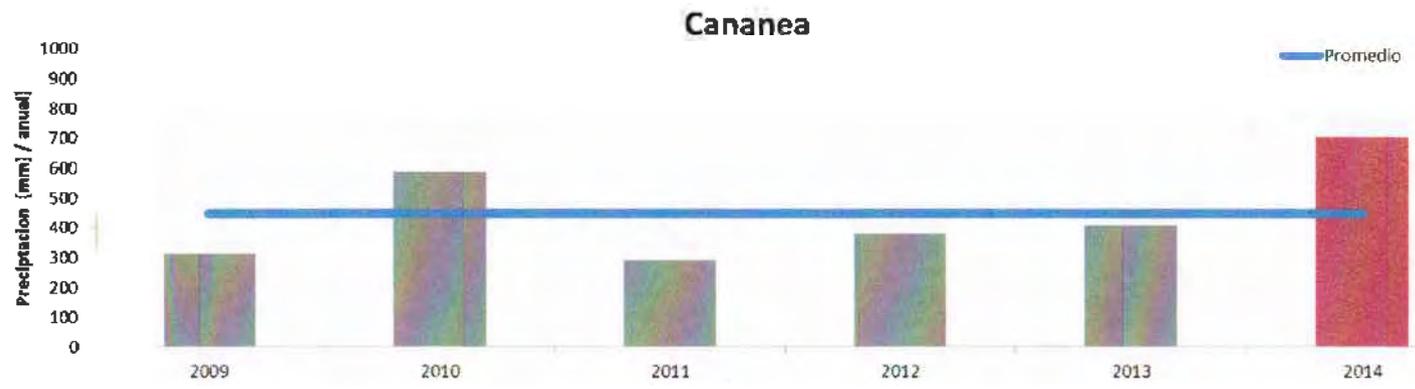
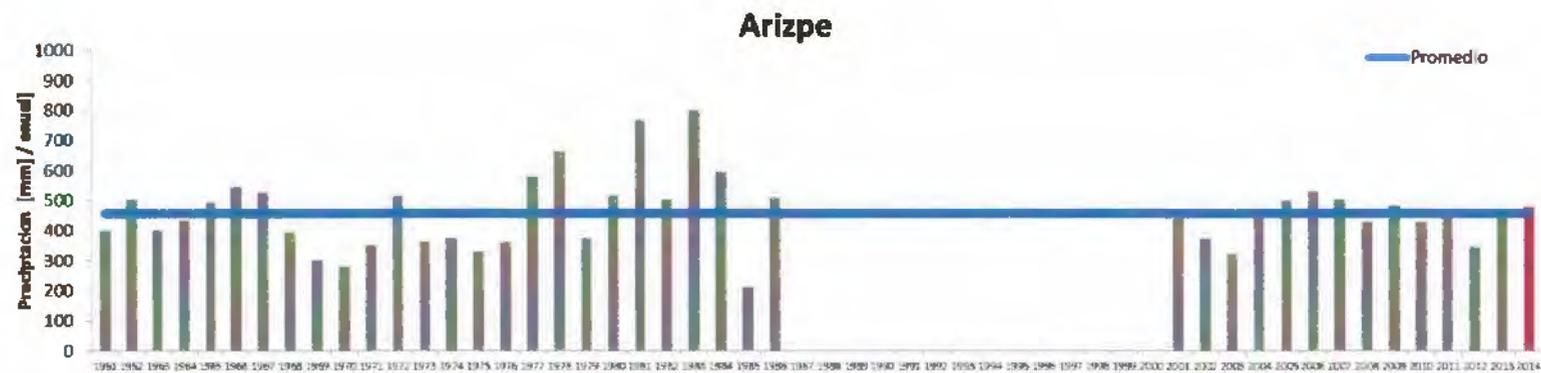
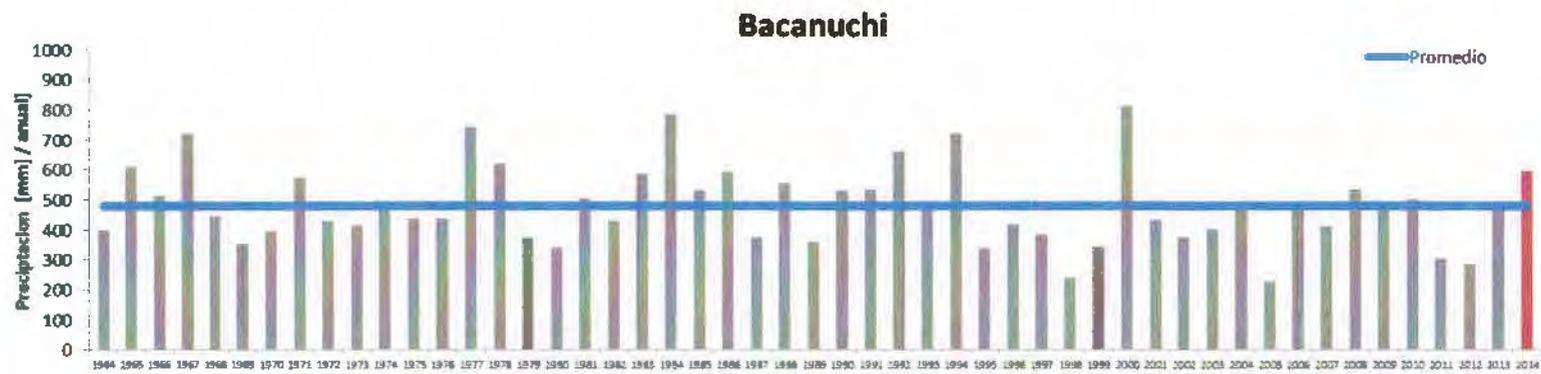


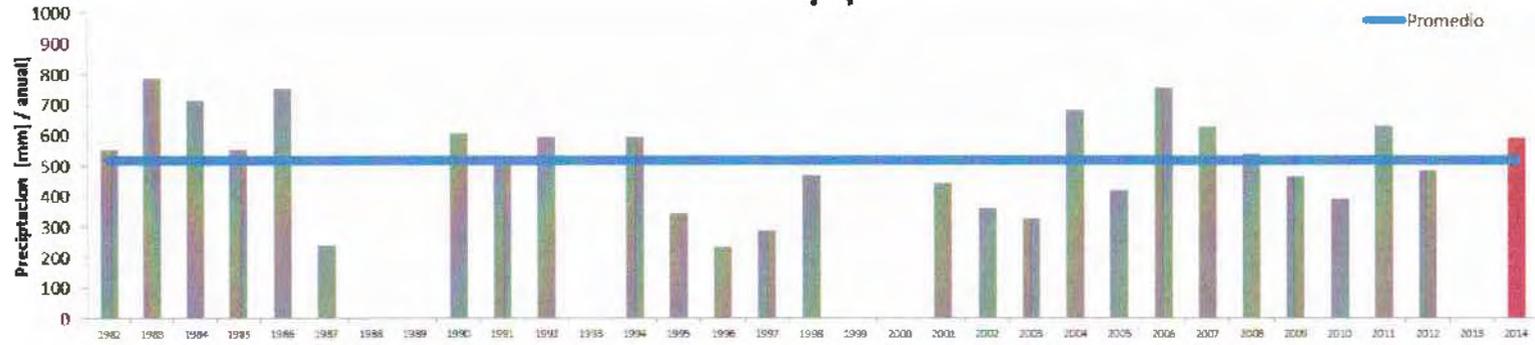
Figura 5. Variabilidad espacial de la precipitación acumulada ajustada en la cuenca el Río Sonora utilizando el Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte América (NLDAS por sus siglas en inglés) para (a) Huracan Norberto y (b) Odile en Septiembre del 2014. Los puntos rojos en el mapa muestran los sitios en los que el Grupo del Agua llevó a cabo trabajos de campo.

ANEXO I: Precipitación anual histórica en las estaciones de CONAGUA del Rio Sonora. La barra de color rojo en cada grafica representa la lluvia total registrada para el año 2014 cuando ocurrió el derrame.

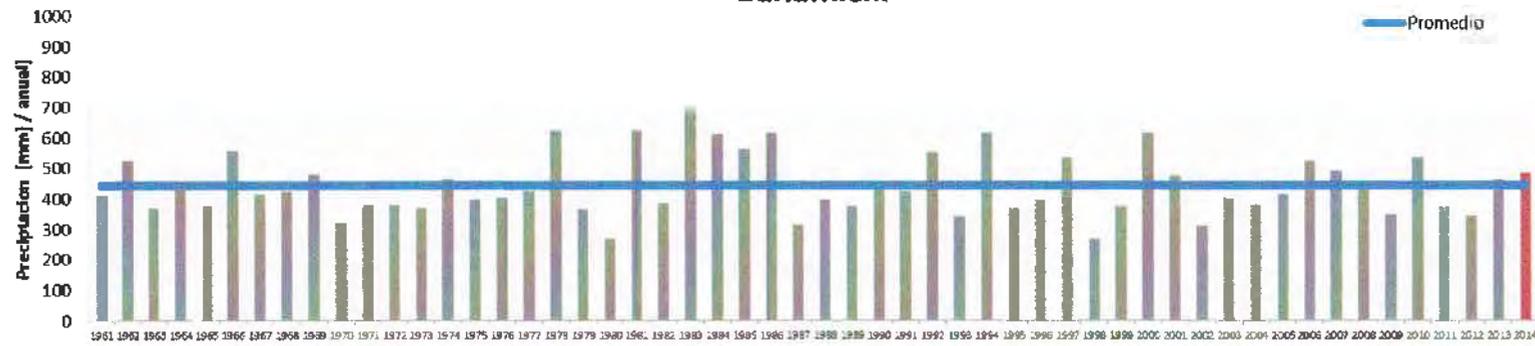


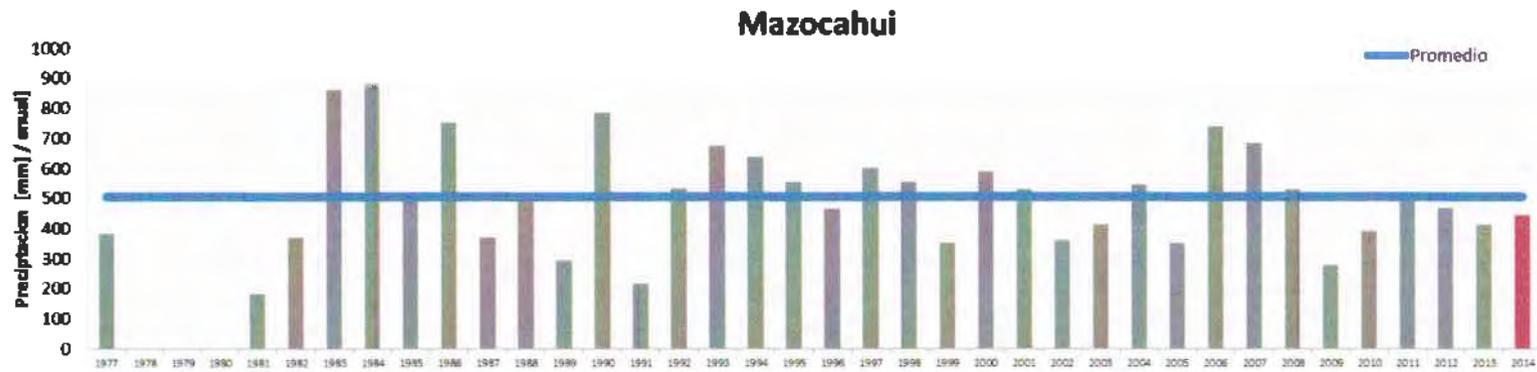
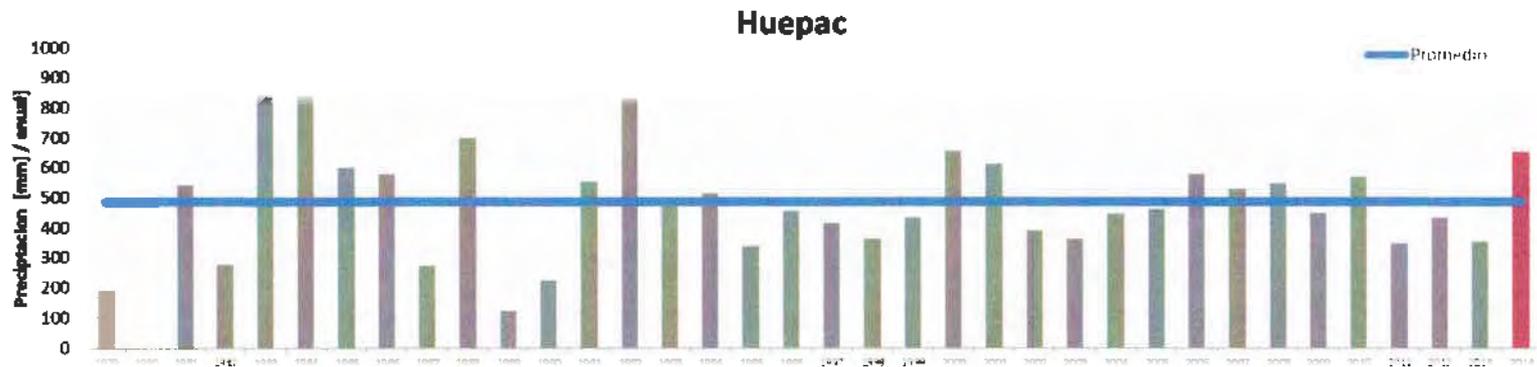


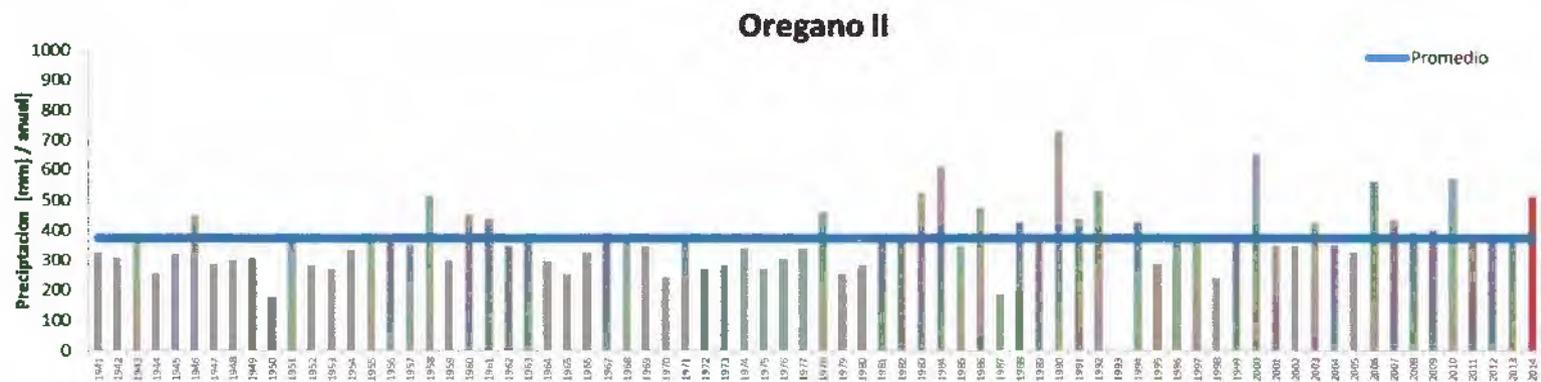
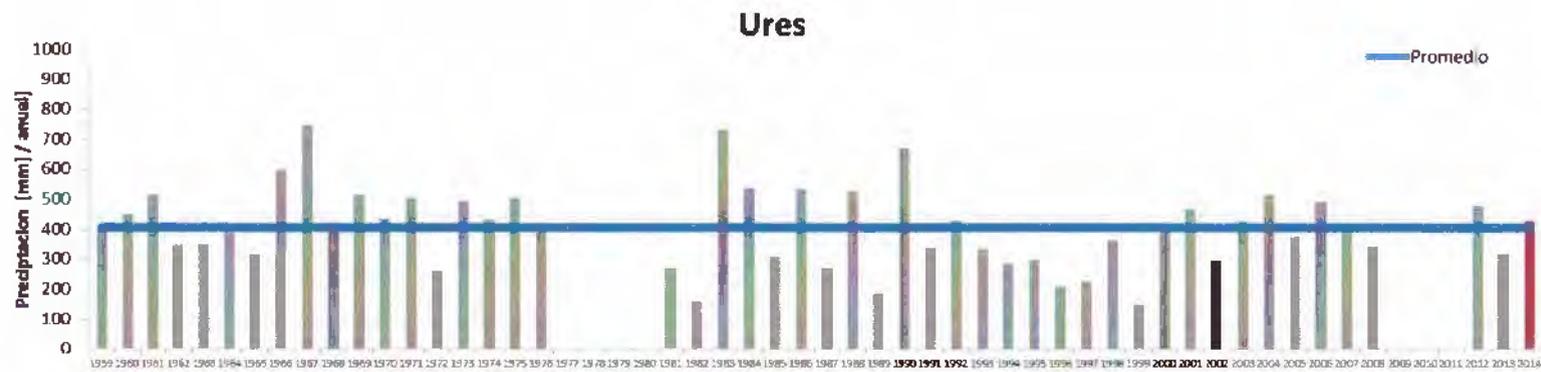
Sinoquipe



Banamichi

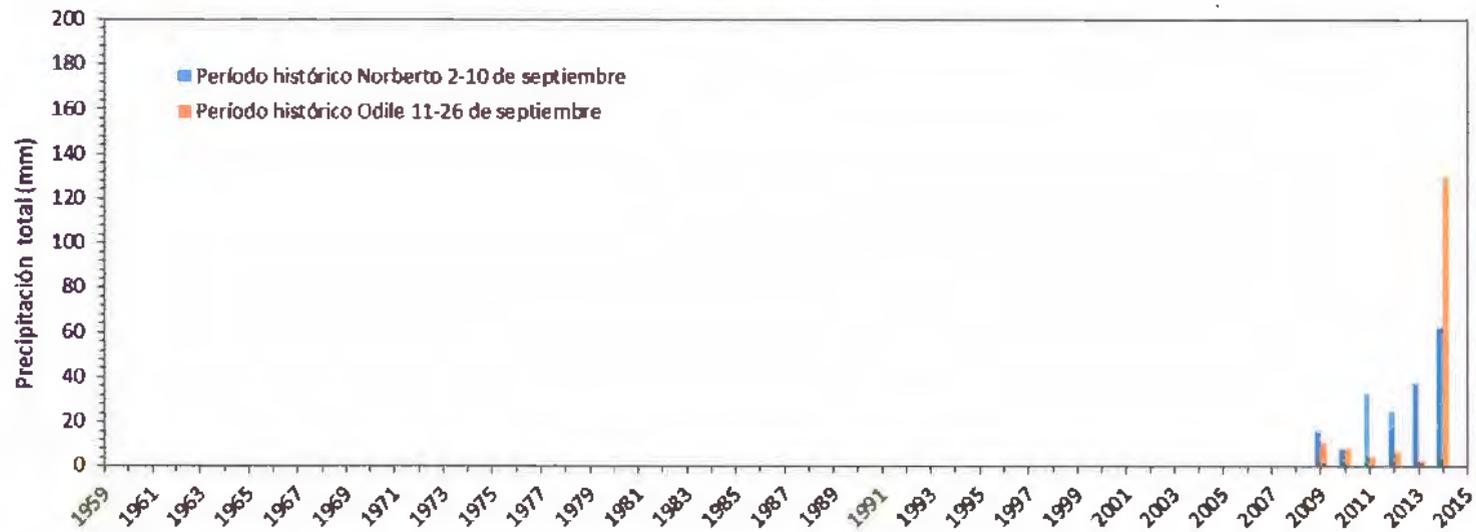




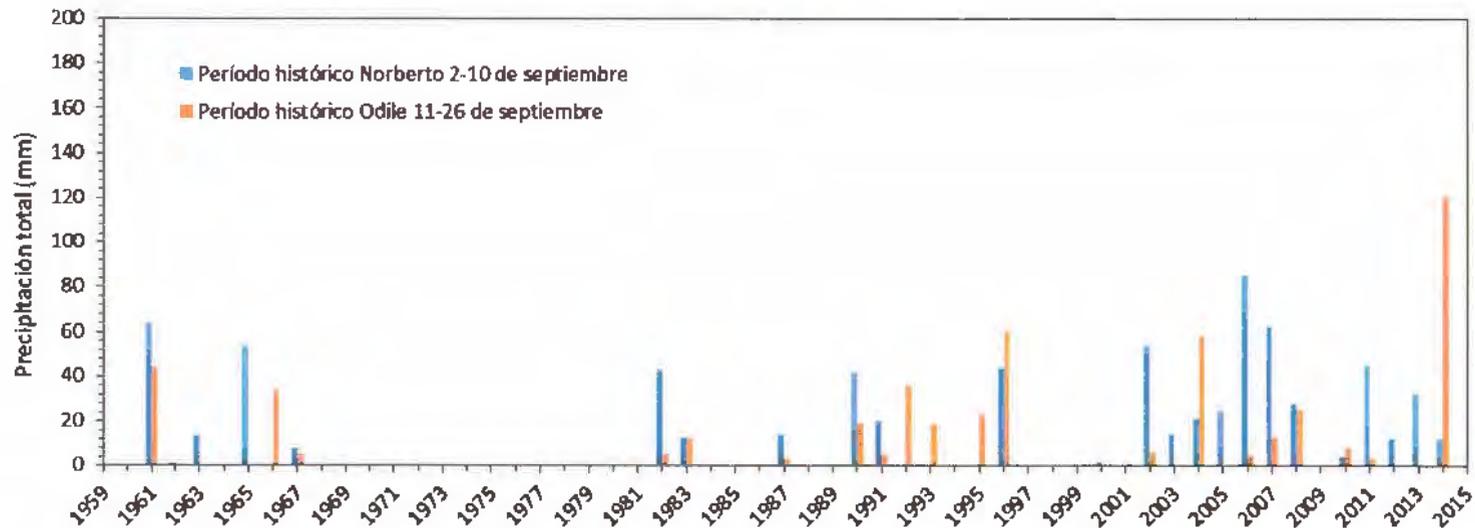


ANEXO II: Comparación histórica de la precipitación en el mes de Septiembre (Época de Huracanes) en las estaciones de CONAGUA del Río Sonora.

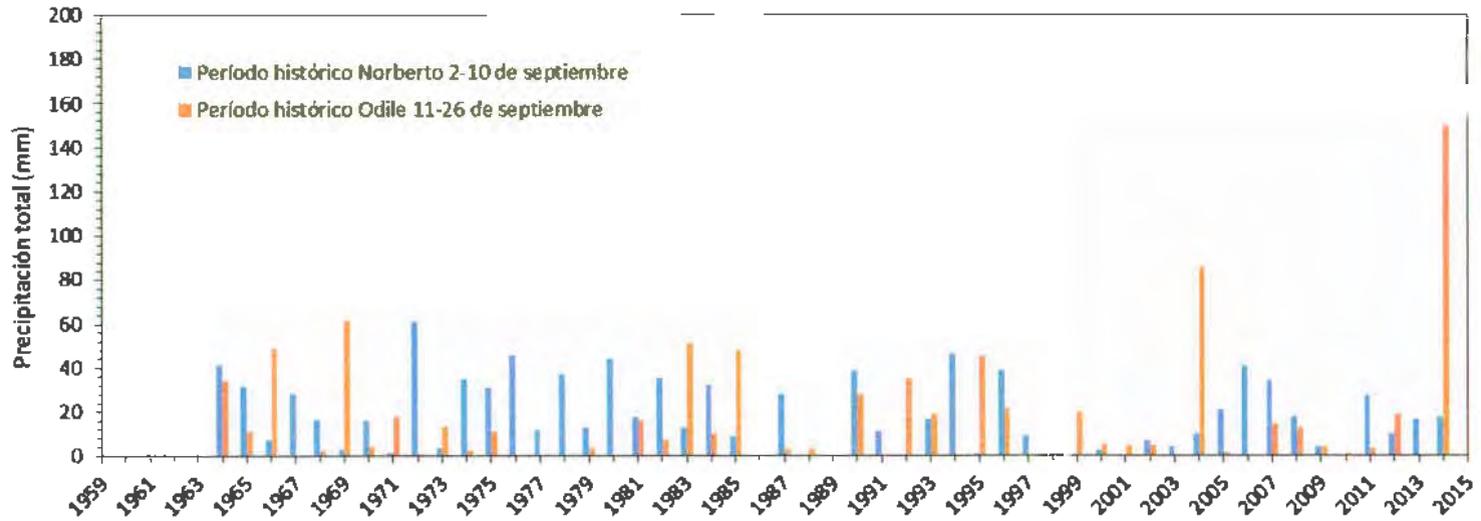
Cananea



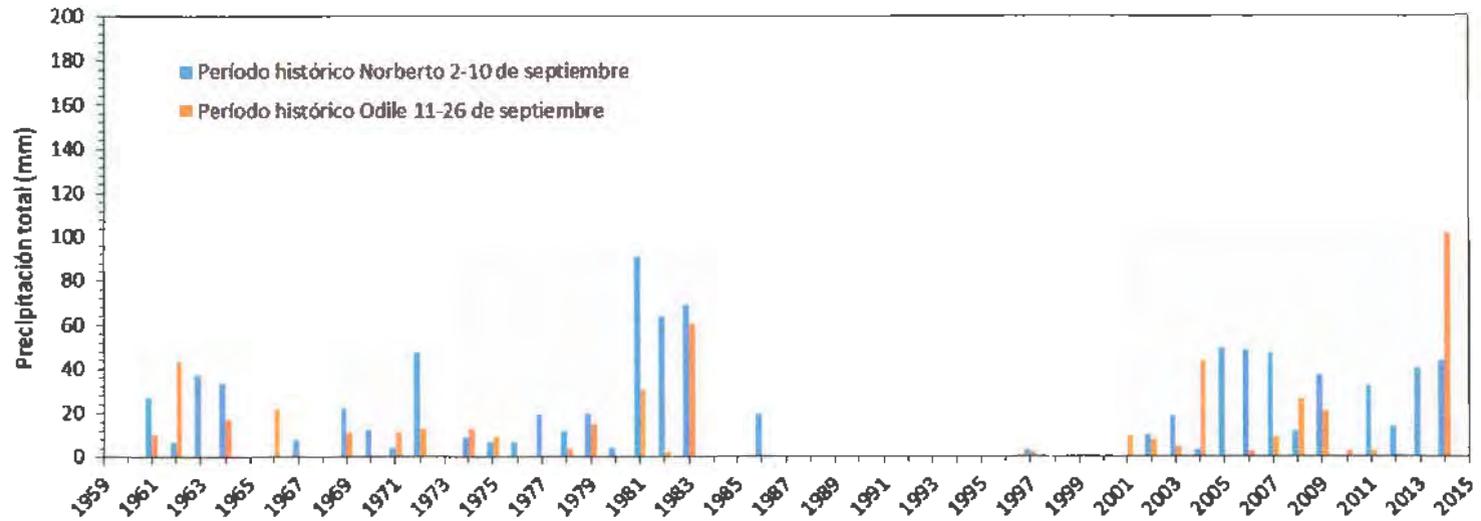
Bacoachi

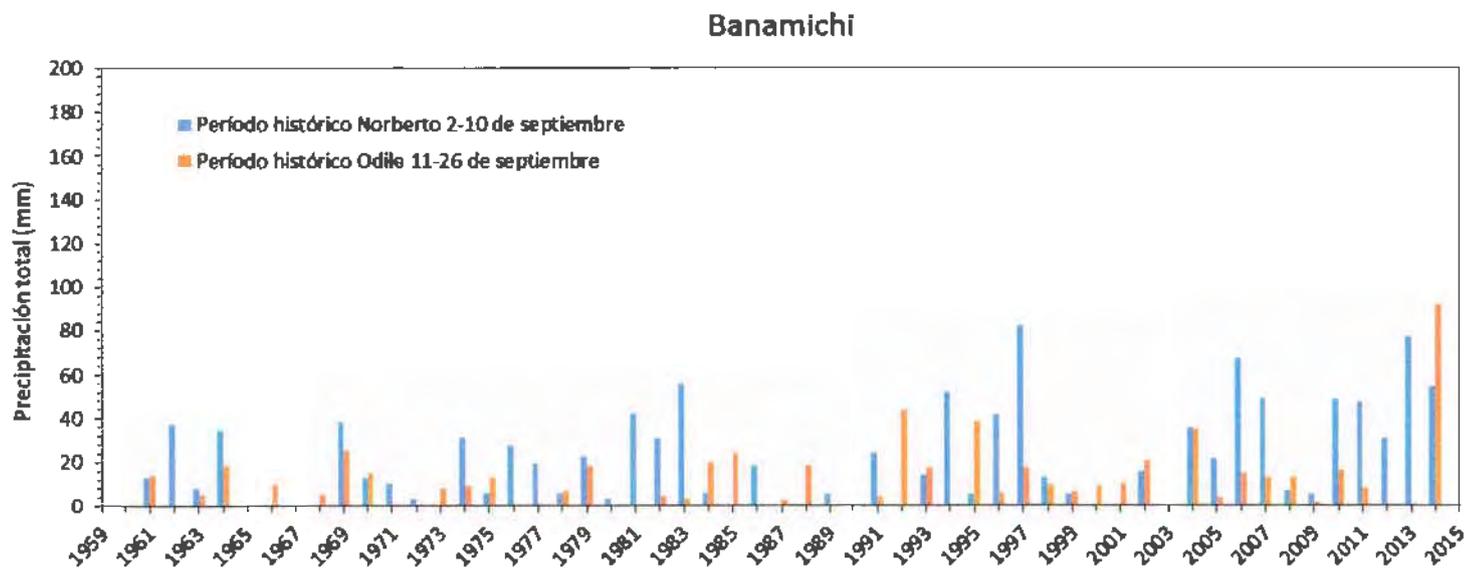
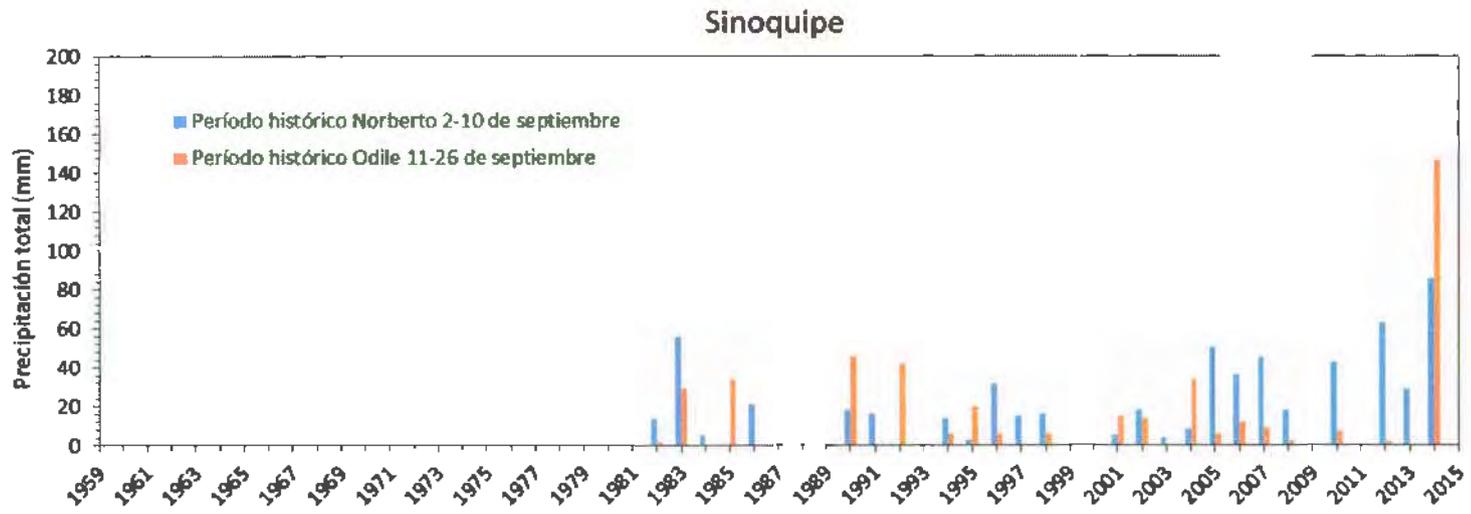


Bacanuchi

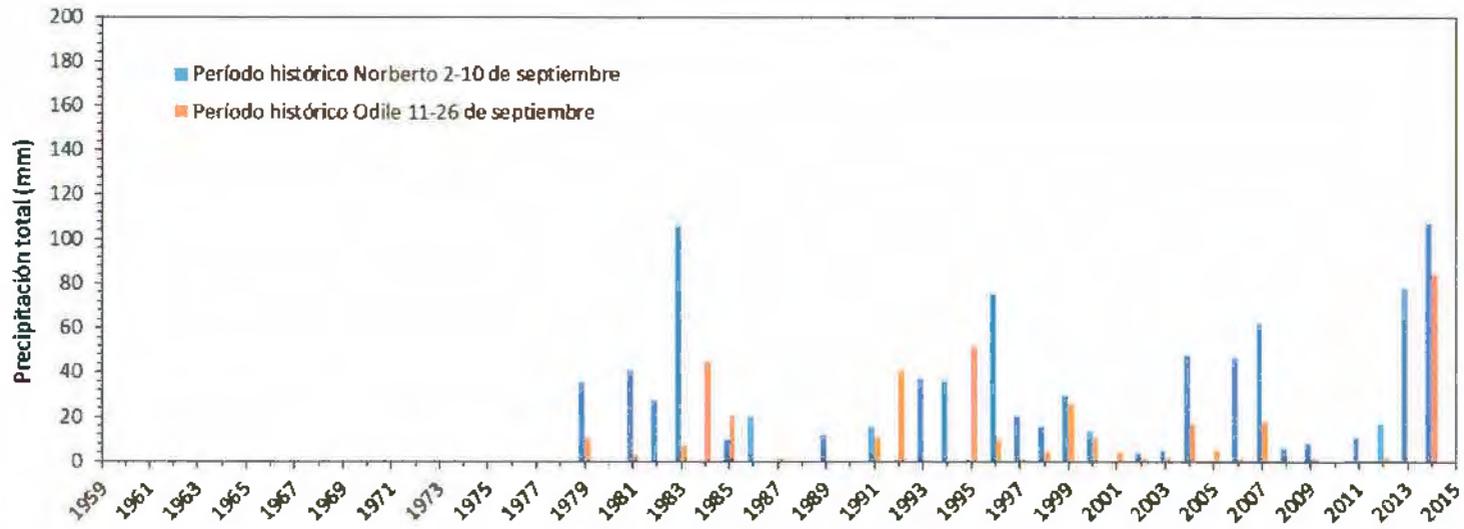


Arizpe

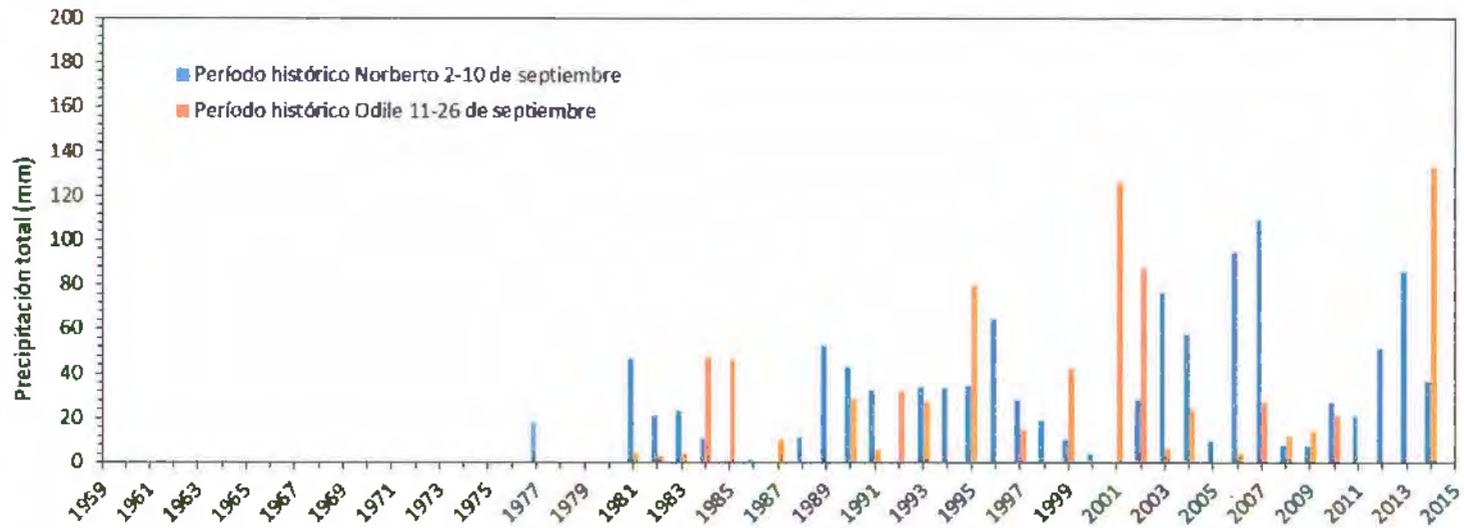




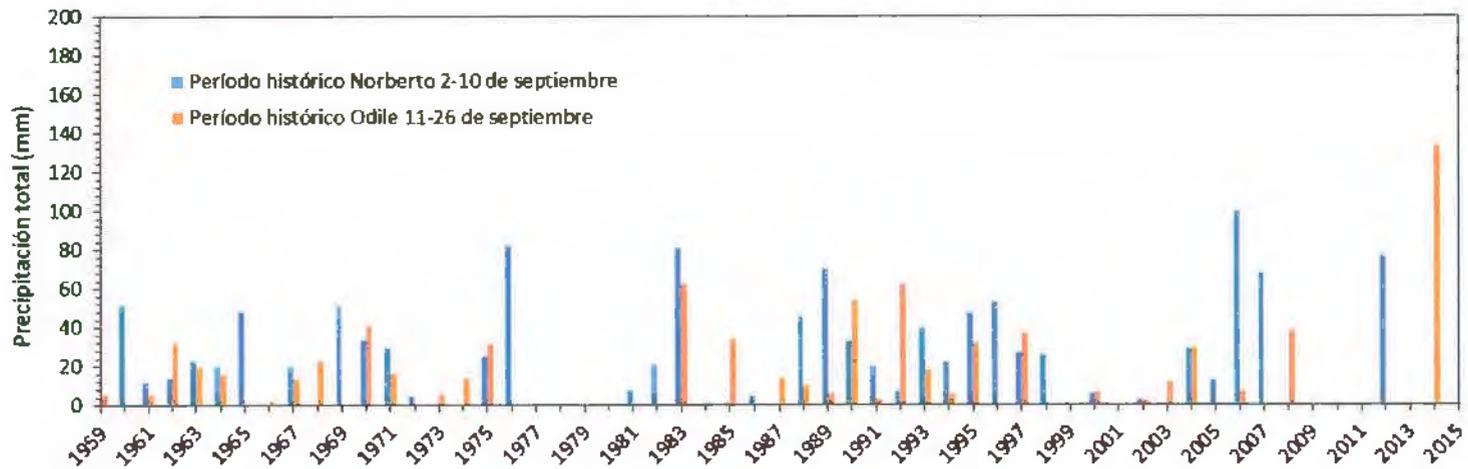
Huepac



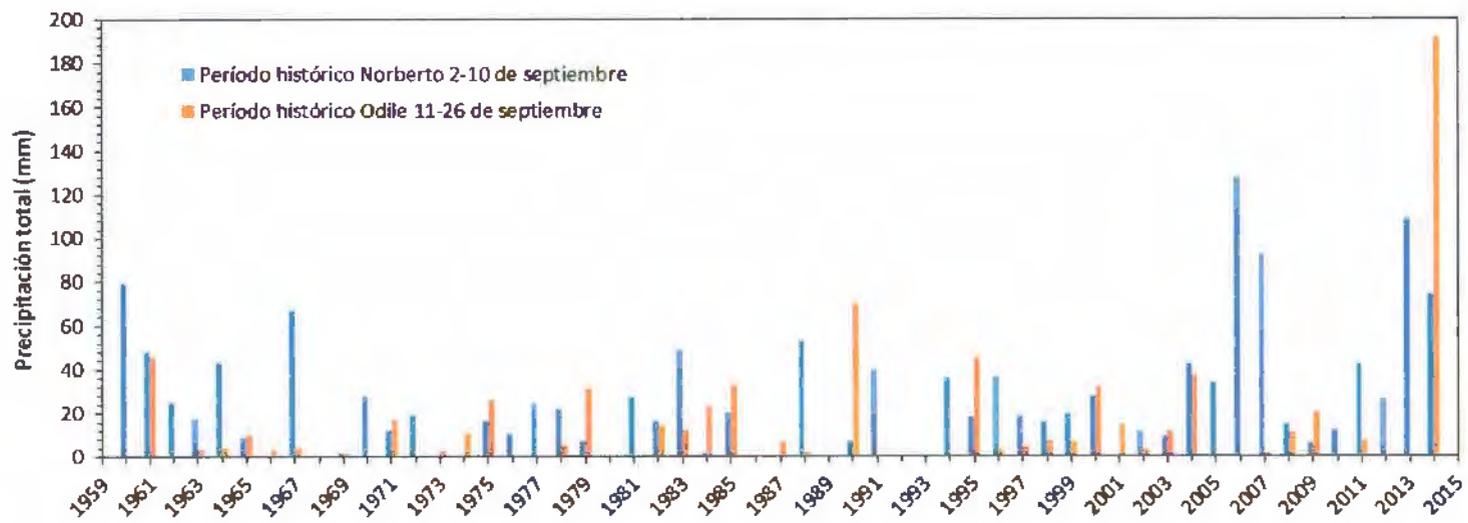
Mazocahui

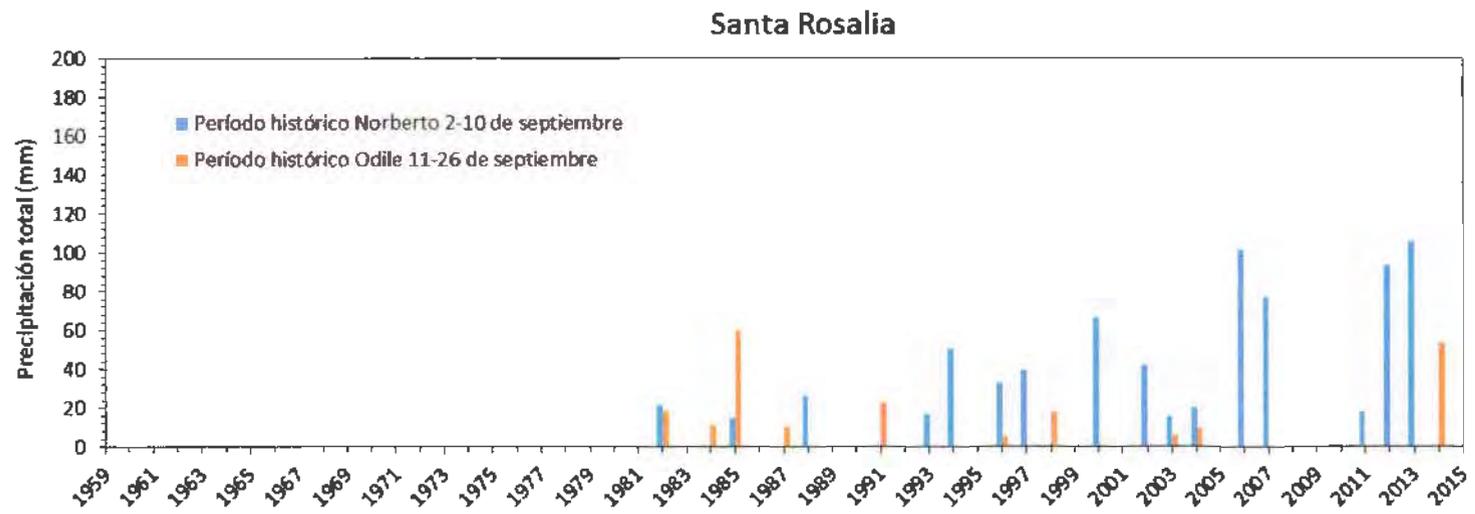


Ures



El Oregano II





VII. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

ÍNDICE DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Escurrecimientos observados en la estación hidrométrica del Orégano II durante el periodo de influencia de los Huracanes Norberto y Odile en Septiembre del 2014.	172
Figura 2. (a) Delimitación de la cuenca alta del Río Sonora, puntos de interés donde se estimaron los escurrecimientos durante los Huracanes Norberto y Odile; (b) Coeficientes de escurrecimiento utilizados en el modelo racional ajustado (Ver Tabla 3 para la descripción de cada punto de interés).	173
Figura 3. Representación del modelo hidrológico HEC-HMS utilizando 57 sub-cuencas para la cuenca alta del Río Bacanuchi, a partir del punto conocido como La Trampa	181
Figura 4. Representación del modelo hidrológico tRIBS utilizando 205,961 polígonos de Voronoi en la cuenca alta del Río Bacanuchi, a partir del punto conocido como La Trampa	182
Figura 5. Representación espacial de los tipos de suelos en la cuenca alta del Río Bacanuchi. Fuente INEGI.	183
Figura 6. Representación espacial de la vegetación / uso de suelo en la cuenca alta del Río Bacanuchi. Fuente INEGI.	184
Figura 7. Variabilidad espacial de profundidad del basamento en la cuenca denominada La Trampa.	184
Figura 8. Distribución espacial de profundidad al nivel freático a lo largo de la cuenca La Trampa expresada en milímetros a partir de la superficie.	185
Figura 9. Líneas equipotenciales obtenidas de los censos de agua subterránea por el grupo del agua en toda la cuenca del Río Sonora y en la parte alta del Río Bacanuchi.	186
Figura 10. Cobertura espacial de los píxeles del producto meteorológico NLDAS dentro de la cuenca La Trampa.	187
Figura 11. Cobertura espacial de los píxeles del producto meteorológico NLDAS dentro de la cuenca La Trampa. Los puntos indican el centro de cada píxel y las líneas azules representan los polígonos de Thiessen que se generaron en ambos modelos para representar la variabilidad espacial de la lluvia en la parte alta de la cuenca del Río Bacanuchi. Las líneas rojas representan las fronteras de las sub-cuencas utilizadas en el modelo HEC-HMS.	188
Figura 12. Resultados de la simulación con el modelo hidrológico tRIBS durante el periodo del 29 de Mayo del 2013 al 16 de Enero de 2015 para (a) la Cuenca alta del Río Bacanuchi a partir del punto conocido como La Trampa (área de 997 km ²); y (b) para el Arroyo Tinajas donde ocurrió el derrame de la minera Buenavista de cobre (área ~ 30 km ²).	196
Figura 13. Resultados de la simulación con el modelo hidrológico HEC-HMS durante el periodo del 29 de Mayo del 2013 al 25 de Junio de 2015 para (a) la Cuenca alta del Río Bacanuchi a partir del punto conocido como La Trampa (área de 997 km ²); y (b) para el Arroyo Tinajas donde ocurrió el derrame de la minera Buenavista de cobre (área ~ 30 km ²).	197

ÍNDICE DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Resultados de las estimaciones de escurrimientos utilizando el método racional a lo largo de la cuenca alta del Rio Sonora. Para estos datos se utilizó la precipitación ajustada de NLDAS, un mapa de acumulación de flujos y el coeficiente de escurrimiento máximo de cada región (INEGI).	174
Tabla 2. Procesos hidrológicos seleccionados para el modelo HEC-HMS.	176
Tabla 3. Propiedades estadísticas de los parámetros del modelo HEC-HMS utilizados en la cuenca de la Trampa.	176
Tabla 4. Valores de los parámetros del modelo HEC-HMS utilizadas en la sub-cuenca del arroyo Tinajas (w650).	177
Tabla 5. Parámetros de vegetación basados en la época verde durante la influencia del monzón de Norteamérica utilizados para el modelo tRIBS.	179
Tabla 6. Parámetros de suelos utilizados para el modelo tRIBS.	180
Tabla 7. Comparación de los datos de precipitación de 10 estaciones climáticas de CONAGUA y de NLDAS (antes y después de ser ajustados).	189
Tabla 8. Comparación de resultados entre los modelos hidrológicos tRIBS y HEC-HMS para las simulaciones de la parte alta de la cuenca del Rio Bacanuchi. Los resultados son del periodo del 6 de Agosto al 30 de Septiembre del 2014. Periodo de influencia de los Huracanes Norberto y Odile.	192
Tabla 9. Resultados de las estimaciones de escurrimientos para el periodo del 6 de Agosto al 30 de Septiembre del 2014 utilizando el modelo HEC-HMS para la parte alta de la cuenca.	193
Tabla 10. Resultados de las estimaciones de escurrimientos para el periodo del 6 de Agosto al 30 de Septiembre del 2014 utilizando el modelo tRIBS para la parte alta de la cuenca.	195

Estimación de Escurrimientos

Este capítulo describe los estudios realizados por el grupo del agua para estimar los escurrimientos en la parte alta de la cuenca del Río Bacanuchi. La razón principal de llevar a cabo estos estudios hidrológicos es para generar rangos de escurrimientos que se presentaron antes, durante y después del derrame del 6 de Agosto del 2014 en la mina Buenavista del Cobre. Las estimaciones de escurrimientos son una parte fundamental para poder evaluar mecanismos de transporte de sedimentos y contaminantes. Debido a que en el área del derrame no se cuenta con estaciones hidrométricas que proporcionen datos reales de los volúmenes escurridos y lo ocurrido después del derrame se realizaron estimaciones a través de ecuaciones empíricas (método racional) y a mediante dos tipos de modelos hidrológicos.

Los modelos hidrológicos seleccionados permiten evaluar y generar estimaciones de escurrimientos a varias escalas temporales y espaciales. Ambos modelos evaluaron a diferentes escalas los escurrimientos generados toda el área norte del Río Bacanuchi, incluyendo sus principales tributarios y el Arroyo Tinajas donde ocurrió el derrame. La capacidad de simular por separado lo ocurrido en diferentes tributarios permite posibles futuros derrames o explorar arrastres de sedimentos bajo condiciones naturales (sin derrame). Las siguientes secciones describen los datos de entrada y la descripción de la forma en que se desarrollaron ambos modelos.

Estimación de Escurrimientos mediante el Método Racional

La estación del Oregano II se encuentra en la parte alta de la presa Rodolfo F. Li Valde El Molino y la única estación en donde se mide diariamente el flujo de agua superficial en la parte alta de la cuenca alta del Río Sonora (ver Figura 1). Ya que no se cuenta con estaciones hidrométricas en las partes altas de la cuenca se estimaron los escurrimientos en varios puntos a lo largo del cauce principal y en varios tributarios utilizando el método racional (Beven, 2012). El método racional modificado se aplicó utilizando la ecuación:

Donde Q representa el caudal máximo [m^3], C representa el coeficiente de escurrimiento [sin dimensión], i representa la intensidad de la lluvia [m] y A representa el área de captación [m^2]. Para estimar escurrimientos en varios puntos de la cuenca se calcularon las áreas de aportación en varios puntos a lo largo del cauce utilizando un sistema de información geográfico (ArcGIS). Igualmente se calcularon los coeficientes de escurrimiento utilizando los rangos máximos oficiales (INEGI, 2000) correspondientes para cada área de captación (Figura 2b). Para poder representar la variabilidad espacial de la lluvia, se utilizaron los datos de precipitación ajustados de NLDAS (ver capítulo 6), los cuales fueron incorporados a la ecuación para estimar los volúmenes escurridos. Los coeficientes de escurrimiento de INEGI (ver Figura 2b) se ajustaron (calibración) hasta que se logró empatar los resultados del modelo racional con los escurrimientos observados en la estación hidrométrica del Oregano II.

Los puntos seleccionados se encuentran en ubicaciones desde la parte alta de la cuenca donde ocurrió el derrame y sobre varios puntos a lo largo del cauce hasta llegar a la estación hidrométrica de Oregano II (Ver Figura 2a). CONAGUA región noroeste proporciono los datos de la estación

hidrométrica el Oregano II que se encuentra a alrededor de 260 km de distancia del punto del derrame. De acuerdo con la información de la estación de aforo del OREGANO existe un error en los cálculos de los gastos estimados mediante la escala física para el Huracán Odile, los cuales aún no han sido corregidos (Comunicación personal con el Ing. Jose Arturo Lopez Ibarra, 19 de Junio del 2015). La Figura 1 muestra los escurrimientos observados en la estación hidrométrica del Oregano II, donde se observa un pico mucho menor para Odile a pesar de haber recibido mayores precipitaciones que durante el Huracan Norberto.

La Tabla 1 muestra las predicciones de los volúmenes de agua que escurrieron para cada tormenta a lo largo de varios puntos de interés (ver Figura 2) en la cuenca alta de la cuenca. Es importante hacer recalcar que los volúmenes de escurrimiento generados por el Huracan Odile son más de tres veces mayores a los escurrimientos generados por el Huracan Norberto. Sin embargo, de acuerdo a los aforos oficiales registrados en la estación del Oregano (Ver Figura 1), los escurrimientos durante el periodo de influencia de Odile aparentan ser más bajos. Esta información no es consistente con las precipitaciones generadas durante el periodo de influencia por el Huracan Odile, ya que la lluvia durante ese periodo fue mucho más alta que las precipitaciones generadas por el Huracán Norberto (Ver Tabla 1 y Tabla 2). Los datos observados de escurrimientos en el Oregano II aún están siendo ajustados por los hidrólogos de la CONAGUA, por lo que los datos oficiales de escurrimientos aún no se encuentran disponibles.

De los volúmenes estimados un porcentaje muy alto de los escurrimientos se están perdiendo por infiltración a lo largo de la travesía de las partes altas de la cuenca hasta la estación hidrométrica del Oregano II. En ese sentido, los volúmenes generados por los dos eventos extremos no solo impactan el transporte de contaminantes superficiales por procesos físicos de advección y dispersión, sino que también afectan el volumen de agua que se infiltra y el transporte de contaminantes en las zonas no saturadas y saturadas subterráneas.

Las estimaciones basadas en el método racional representan el escenario de mayor volumen de agua ya que se utilizó el rango máximo de los coeficientes de escurrimiento. Esto permite evaluar el transporte y dilución máximo que pudo haber ocurrido a raíz de los eventos extraordinarios de Norberto y Odile.

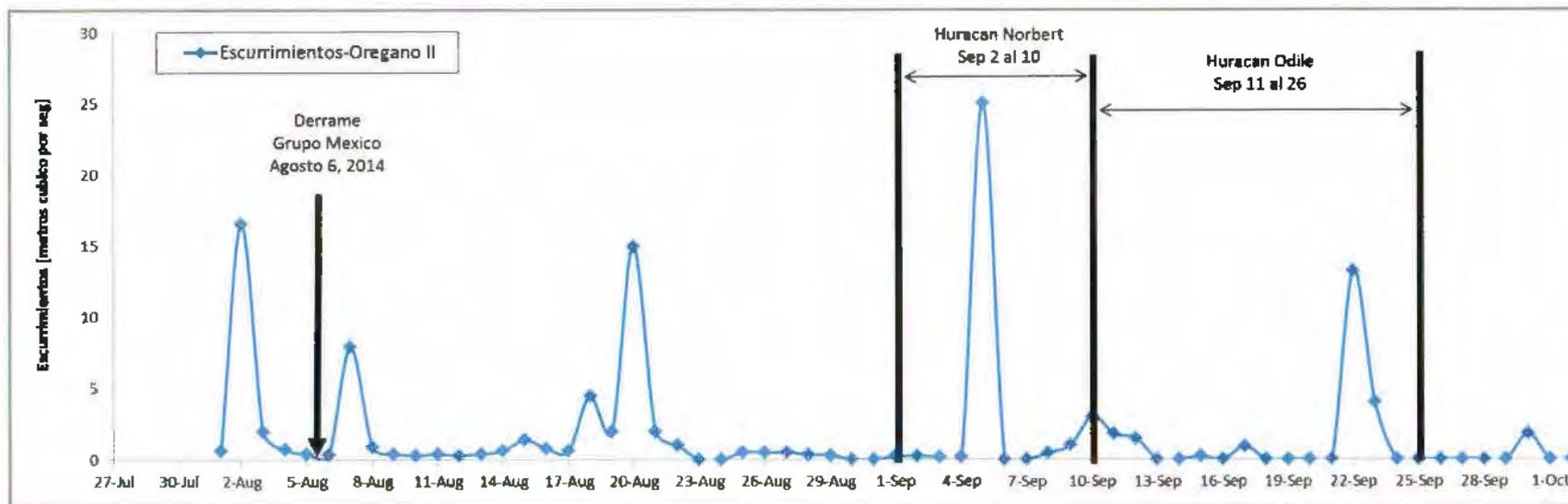


Figura I. Escurreimientos observados en la estación hidrométrica del Orégano II durante el periodo de influencia de los Huracanes Norberto y Odile en Septiembre del 2014.

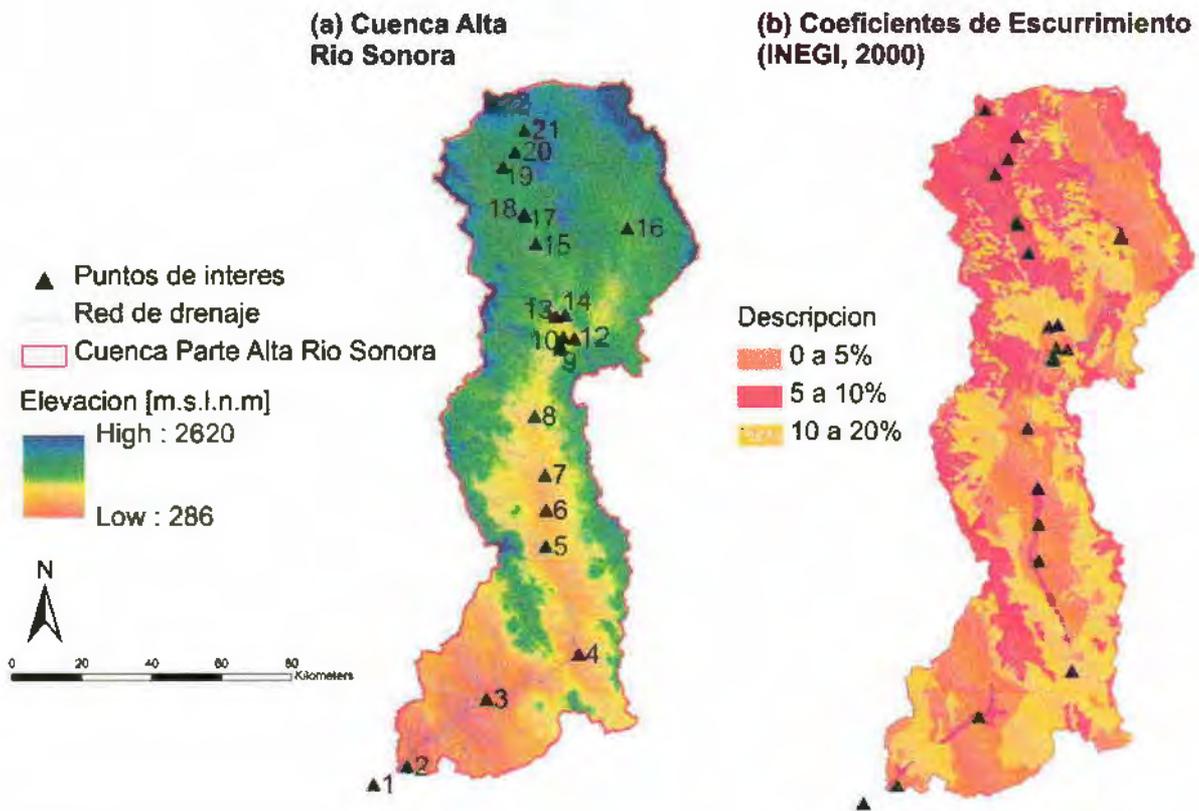


Figura 2. (a) Delimitación de la cuenca alta del Rio Sonora, puntos de interés donde se estimaron los escurrimientos durante los Huracanes Norberto y Odile; (b) Coeficientes de escurrimiento utilizados en el modelo racional ajustado (Ver Tabla 3 para la descripción de cada punto de interés).

Tabla 1. Resultados de las estimaciones de escurrimientos utilizando el método racional a lo largo de la cuenca alta del Rio Sonora. Para estos datos se utilizó la precipitación ajustada de NLDAS, un mapa de acumulación de flujos y el coeficiente de escurrimiento máximo de cada región (INEGI).

Punto de interes	Descripcion sitios de interes	Volumen Escurrido [Millones de m ³]	
		Norberto (2 al 10 de Sep)	Odile (11 al 26 de Sep)
1	Cauce Principal - Presa El Molinito	2.552	9.269
2	Cauce Principal - Hidrometrica Oregano	2.541	9.230
3	Cauce Principal - URES*	2.331	8.492
4	Cauce Principal - MAZOCAHUI*	1.989	7.355
5	Cauce Principal - ACONCHI*	1.680	6.256
6	Cauce Pricipal - HUEPAC*	1.622	6.044
7	Cauce Principal - BANAMITCHI*	1.483	5.528
8	Cauce Principal - SINOQUIPE*	1.263	4.704
9	Cauce Principal - ARIZPE*	1.053	3.966
10	Tributario Cauce Principal - Arizpe	0.000	0.001
12	Rio Bacoachi - 6km Aguas arriba Arizpe	0.546	2.028
13	Tributario Bacanuchi - 3km Norte Arizpe	0.126	0.437
14	Rio Bacanuchi - 10km Aguas Arriba Arizpe	0.400	1.527
15	Rio Bacanuchi - BACANUCHI*	0.284	1.122
16	Rio Bacoachi - BACOACHI*	0.261	1.054
17	Rio Bacanuchi - 10km Aguas Arriba Bacanuchi	0.229	0.913
18	Tributario Bacanuchi - 15km Aguas Arriba Bacanuchi	0.000	0.000
19	Rio Bacanuchi - 26km Aguas Arriba Bacanuchi	0.057	0.237
20	Arroyo Tinajas - 7km Norte Bacanuchi	0.035	0.147
21	Arroyo Tinajas - 12km Norte Bacanuchi	0.012	0.053
22	Arroyo Tinajas - En el punto del Derrame	0.001	0.006
Volumen Observado Estacion Hidrometrica Oregano II		2.480	1.650 *
% Error		2.4%	82.1%

* Los datos de los escurrimientos en la estacion del Oregano II durante el Huracan Odile tienen un problema. CONAGUA esta revisando las escalas tomadas para corregir la estimacion oficial.

Justificación de uso de modelos hidrológicos

Debido a la incertidumbre en las estimaciones del método racional (utilizando coeficientes de escurrimiento) se generaron dos modelos hidrológicos para evaluar y generar estimaciones de escurrimientos a dos escalas temporales y espaciales. En la siguiente parte de este capítulo se describe el método de cada modelo y los resultados obtenidos durante el periodo en que ocurrió el derrame hasta que terminaron los escurrimientos asociados a los huracanes Norberto y Odile (6 de Agosto al 30 de Septiembre del 2014).

Modelo Hidrológico Semi-distribuido HEC-HMS

El modelo hidrológico semi-distribuido Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System, HEC-HMS) desarrollado por el cuerpo de Ingenieros de Estructuras del Estado Unidos fue seleccionado porque es uno de los modelos que ha sido aplicado extensivamente por todo el mundo, incluyendo la evaluación de eventos extremos (Caruso et al., 2013; Foody et al., 2004; Soliman et al., 2015). Además, el modelo HEC-HMS ya ha sido aplicado y calibrado en la cuenca del Río Sonora para predecir los impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua y en la evaluación de nuevas obras de infraestructura (Robles-Morua et al., 2015).

HEC-HMS fue diseñado para simular y entender los procesos lluvia-escurrimiento en una amplia variedad de tipos de cuencas hidrológicas y bajo diferentes condiciones de disponibilidad de datos. Está basado en el concepto de desarrollar sub-cuencas a partir de una red de drenaje y las características morfométricas (Scharffenberg and Fleming, 2010). HEC-HMS tiene una amplia variedad de opciones para tomar en consideración distintos procesos hidrológicos, los cuales dependen de la cantidad de información disponible. Basándonos en los datos disponibles y en nuestro conocimiento del sistema hidrológico de la región (Vivoni et al., 2010, 2012; Robles-Morua et al., 2012) se seleccionaron un grupo de ecuaciones que describen los procesos de transformación lluvia-escurrimiento. La Tabla 2 presenta un resumen de los procesos a nivel sub-cuenca que seleccionados para el modelo HEC-HMS. Dichos procesos incluyen un mecanismo para la interceptación de lluvia que cuantifica el almacenamiento de agua en el dosel, un método para considerar las depresiones de la superficie del terreno, se utilizó el método de balance de agua en la humedad del suelo (zona saturada) para rastrear las pérdidas por infiltración y el movimiento del agua en los suelos, finalmente se utilizó el método de Priestley-Taylor para cuantificar las pérdidas por evapotranspiración. El exceso de lluvia (la que no se infiltra o se evapora) se convierte a escurrimiento utilizando el método de la onda cinemática mediante el cual se transita el escurrimiento en cada sub-cuenca. Una vez que los escurrimientos de cada cuenca llegan al cauce principal, son modelados aguas abajo (orden) utilizando un método de Muskingum-Cunge de diferencias finitas.

HEC-HMS es un modelo semi-distribuido que resuelve las ecuaciones de los procesos seleccionados (Tabla 2) asumiendo que los parámetros requeridos para cada ecuación se evalúan a nivel sub-cuenca. Esto significa que un solo valor único para cada parámetro es utilizado por cada sub-cuenca. La Tabla 3 muestra las propiedades estadísticas de los parámetros más importantes utilizados para el modelo HEC-HMS a escala del área de captación de La Trampa. La Tabla 4 presenta los parámetros utilizados en la sub-cuenca del arroyo Tinajas.

Tabla 2. Procesos hidrológicos seleccionados para el modelo HEC-HMS.

Procesos del modelo HEC-HMS	Descripción	Parámetros	Entradas diarias
Intercepción de Lluvia	Metodo de Almacenamiento de Dosel	Índice de Área Foliar (LAI)	Precipitación (P)
Retención de agua en superficie	Metodo de profundidad de almacenamiento	Pendiente media (S) y profundidad de almacenamiento en terreno (Dd)	Precipitación (P)
Evapotranspiración	Metodo de Priestley-Taylor	Coefficiente de cultivo (Kc) y coeficiente de drenado /secado (Kd)	Radiación Solar (Rs) Temperatura del Aire (Ta)
Infiltración	Metodo de balance de agua en la humedad de suelo	Profundidad de almacenamiento del suelo (Ds) y tasa máxima de infiltración de suelo (Imax)	
Transito en la cuenca	Metodo de la onda cinemática	Longitud de cauce en cada sub-cuenca (L), pendiente media de la cuenca (S) and coeficiente de rugosidad (n)	
Transito en los cauces	Metodo de Muskingum-Cunge	Ancho del cauce en cada sub-cuenca (W), longitud (L), pendiente media (S) y coeficiente de rugosidad (n)	

Tabla 3. Propiedades estadísticas de los parámetros del modelo HEC-HMS utilizados en la cuenca de la Trampa.

Parámetro	Unidad	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Área sub-cuenca	km ²	17.489	54.648	0.149	13.184
Longitud sub-cuenca	m	30721.345	61633.273	3588.628	15101.805
Pendiente promedio sub-cuenca	m/m	0.2106	0.643	0.032	0.165
Profundidad almacenamiento dosel	mm	1.044	1.253	0.952	0.451
Profundidad almacenamiento depresión	mm	2.203	2.5	0.8	0.414
Tasa máxima infiltración suelo	mm/h	6.659	20.947	3.302	3.363
Profundidad almacenamiento suelo	mm	500	500	500	0
Ancho canal	m	10	10	10	0
Longitud Canal	m	4048.236	16535.336	177.797	4178.232
Pendiente promedio canal	m/m	0.00758	0.0163	0.0033	0.003

Tabla 4. Valores de los parámetros del modelo HEC-HMS utilizadas en la sub-cuenca del arroyo Tinajas (w650).

Parámetro	Unidad	Valor
Área sub-cuenca	km ²	29.838
Longitud sub-cuenca	m	50183.838
Pendiente promedio sub-cuenca	m/m	0.1121
Profundidad almacenamiento dosel	mm	1.05
Profundidad almacenamiento depresión	mm	2.4415
Tasa máxima infiltración suelo	mm/h	5.7811
Profundidad almacenamiento suelo	mm	500
Ancho canal	m	10

Modelo Hidrológico distribuido tRIBS

También se realizaron simulaciones utilizando el modelo hidrológico distribuido tRIBS (TIN-based Real time Integrated Basin Simulator) desarrollado en el laboratorio de hidrología superficial del Massachusetts Institute of Technology (MIT). tRIBS es un modelo distribuido basado en parámetros físicos que simulan el acoplamiento entre los flujos de agua y energía de manera continua. El modelo toma en cuenta la variación espacial del terreno, suelo vegetación y forzamiento meteorológico a altas resoluciones espaciales (que dependen de las capas de entrada). tRIBS representa el terreno de la cuenca mediante una red de triángulos irregulares que contiene nodos de elevación, nodos que delimitan los límites de la cuenca y nodos que representan la red de drenaje. De esta manera el modelo es capaz de capturar las características de la topografía con un número reducido de elementos computacionales si se compara con el modelo de elevación digital original. Los polígonos de Voronoi derivados de la red de triángulos irregulares sirven como los elementos computacionales para resolver ecuaciones de balance de agua y energía. tRIBS utiliza una amplia gama de procesos hidrológicos que son simulados entre los que se incluyen los procesos de interceptación de lluvia y fluctuación de energía por el dosel de la vegetación, redistribución de la humedad de suelo e infiltración mediante una modificación del modelo de Green-Ampt, movimiento lateral de agua en la zona saturada y no saturada del subsuelo, evaporación de suelo desnudo, evaporación de agua interceptada por la vegetación, transpiración, escorrentía tanto en la superficie como encaminada hacia la red de drenaje.

Para nuestras simulaciones en la cuenca denominada la Trampa se utilizaron un total de 205,967 polígonos. Para las simulaciones se utilizó una profundidad de suelo variable a lo largo de la cuenca de la Trampa. Dicha información se obtuvo interpolando mediciones obtenidas de estudios geofísicos de profundidad de suelo realizados por la Universidad Nacional de México (CEA,2005). La figura 7 y 8 muestra la variabilidad espacial de profundidad del basamento y del manto freático en la cuenca denominada la Trampa y que se utilizaron para iniciar las simulaciones matemáticas.

tRIBS requiere de 11 parámetros para las ecuaciones del movimiento del agua en los suelos a partir de las ecuaciones de Green-ampt. Igualmente requiere de 12 parámetros para modelar el movimiento del agua en la vegetación a partir de la ecuación de Penman-Montieth. Al igual que con los parámetros utilizados para el modelo HEC-HMS los valores de los parámetros de entrada al modelo tRIBS se basaron en los datos obtenidos de pruebas de campo (Conductividad hidráulica saturada), datos disponibles de otros estudios y en nuestro conocimiento del sistema hidrológico de la región (Vivoni et al., 2010, 2012; Robles-Morua et al., 2012). En particular los estudios de la aplicación de tRIBS en el Río San Miguel (Mendez-Barroso et al., 2014) y en el Río Sonora (Robles-Morua et al., 2012) fueron utilizados para parametrizar el modelo de tRIBS en la cuenca alta del Río Bacanuchi. Las Tablas 5 y 6 presentan los valores de los parámetros de suelos y vegetación utilizados por tRIBS.

Tabla 5. Parámetros de vegetación basados en la época verde durante la influencia del monzón de Norteamérica utilizados para el modelo tRIBS.

Uso de Suelo / Tipo de Vegetación	tRIBS ID#	Parámetros de Vegetación para tRIBS											
		A	b1	P	S	K	b2	Al	H	Kt	Rs	V	LAI
Cuerpo de Agua	1	1	1	0.95	0.01	0.1	3.7	0.3	0.01	0.95	70	0.01	0.01
Bosque de coníferas (perene)	2	1	1	0.25	2.5	0.1	3.7	0.105	10	0.45	135	0.75	6
Bosque caducifolio de hoja ancha	3	1	1	0.2	2.3	0.1	3.7	0.105	10	0.45	135	0.75	5.5
Bosques mixtos	4	1	1	0.23	2.4	0.1	3.7	0.105	10	0.45	135	0.75	5.75
Matorral cerrado	5	1	0.2	0.4	1	0.2	4	0.16	6	0.95	20	0.6	4
Matorral abierto	6	1	0.2	0.4	1	0.2	4	0.16	6	0.95	20	0.6	4
Savana de mesquite	7	1	1	0.45	1.05	0.1	3.7	0.145	10	0.6	125	0.7	4.8
Savana	8	1	1	0.5	1.05	0.1	3.7	0.145	10	0.6	125	0.65	4.5
Pastizales	9	1	1	0.6	0.9	0.1	3.7	0.175	1	0.8	115	0.4	2.6
Humedales continentales (zonas riparias)	10	1	1	0.95	0.1	0.1	3.7	0.3	0.05	0.95	70	0.01	0.01
Áreas de cultivos, agricultura.	11	1	1	0.65	0.8	0.1	3.7	0.175	0.8	0.9	115	0.4	2.5
Zonas urbanas	12	1	1	0.95	0.01	0.1	3.7	0.3	0.01	0.95	70	0.01	0.01
Áreas sin cobertura vegetal	13	1	1	0.75	0.1	0.1	3.7	0.3	0.01	0.95	70	0.01	0.01

A = Canopy storage - storage [mm]

b1 = Interception coefficient -storage []

P = Free throughfall coefficient -rutter []

S = Canopy field capacity -rutter [mm]

K = Drainage coefficient -rutter [mm/hr]

b2 = Drainage exponential parameter -rutter [mm-1]

Al = Land use albedo []

H = vegetation height [m]

Kt = Optical transmission coefficient []

Rs = Canopy average stomatal resistance [sec/m]

V = vegetation fraction []

LAI = Canopy leaf area index []

Tabla 6. Parámetros de suelos utilizados para el modelo tRIBS.

Tipo de Suelos	tRIBS ID#	Parámetros de Suelos para tRIBS										
		Ks	Theta_S	Theta_R	m	PsiB	f	As	Au	n	ks	Cs
FEOZEM	1	9.23823	0.4318	0.0664	0.1925	-199.74	0.01131	550	550	0.5026	1.314	2363338
FLUVIOSOL	2	6.68481	0.4595	0.0837	0.165	-440.82	0.00203	550	550	0.505	1.30405	2345434
LITOSOL	3	6.81379	0.4413	0.0746	0.165	-292.09	0.01131	550	550	0.4943	1.33391	2399147
LUVIOSOL	4	6.91335	0.4278	0.0687	0.1975	-228.83	0.00091	550	550	0.4864	1.34386	2417051
PLANOSOL	5	9.83533	0.417	0.0642	0.2375	-183.42	0.00751	550	550	0.4628	1.4235	2560283
REGOSOL	6	24.1651	0.4276	0.0534	0.2775	-120.41	0.0071	550	550	0.4937	1.33389	2399147
RENDZINA	7	3.33341	0.4475	0.0947	0.0625	-1505.4	0.0009	550	550	0.443	1.47327	2649804
VERTISOL	8	11.3577	0.4147	0.0586	0.23	-178.57	0.01131	550	550	0.4781	1.37373	2470763
XEROSOL	9	10.5655	0.4364	0.0687	0.2075	-148.47	0.0044	550	550	0.486	1.34386	2417051
YERMOSOL	10	6.08259	0.3835	0.056	0.22	-134.69	0.00308	550	550	0.4284	1.51309	2721420
ZONA URBANA	11	1	1	1	1	0	1	550	550	1	1	1
CUERPO DE AGUA	12	1	1	1	1	0	1	550	550	1	1	1

Ks = Saturated Hydraulic Conductivity [mm/hr]

thetaS = Soil Moisture at saturation []

thetaR = Residual Soil Moisture []

m = Pore distribution index []

PsiB = Air entry bubbling pressure [mm] (negative)

f = Decay parameter [mm-1] NOTE: The value of this parameter is negative. However, tRIBS has already inbedded this value as negative.

In this table it should be left as positive.

As = Saturated anisotrophy ratio []

Au = Unsaturated anisotrophy ratio []

n = Porosity

ks = Volumetric Heat Conductivity or thermal conductivity [J/msK]

Cs = Soil Heat Capacity [J/m3K]

Dominios espaciales de HEC-HMS y tRIBS

La delimitación de los dominios de los dos modelos hidrológicos se realizó a partir del punto conocido como La Trampa al r de la com nidad de Bacanuchi a 49 km (sobre el cauce) al sur del punto del derrame (Coordenadas UTM WGS 84 12 N, X=574750.09, Y=3382819.11). Los dominios de simulación de ambos modelos hidrológicos se generaron a partir de un modelo de elevación digital (DEM) de 30 metros de resolución espacial basado en el producto del sensor ASTER (Advance Spaceborne Thermal, Emission and Reflection). Para el modelo tRIBS se generaron dos dominios, el primero e concen r en la c enca del arroyo Tinaja , locali ado en la e remo nor e de la c enca del Rio Bacanuchi y muy cercano a la Mina Buenavista del Cobre (Área cuenca del arroyo Tinajas ~ 30 km²). Paralelamente, se utilizó una cuenca más grande con área de contribución de 997 km² y cuyo punto más bajo coincide con el modelo HEC-HMS en el i io denominado La Trampa .

A pesar de que ambos modelos utilizan el mismo DEM, la representación espacial de la cuenca alta del Rio Bacanuchi utilizando el modelo HEC-HMS se hizo por medio de 57 subcuencas (Ver Figura 3) a diferencia de tRIBS que utilizó una resolución espacial muy detallada mediante el uso de 205,961 polígonos Voronoi (ver Figura 4). Las diferencias espaciales entre los modelos y la forma en que se resuelven las ecuaciones de estado a diferentes escalas temporales nos permitió tener un rango de estimaciones de escurrimientos.

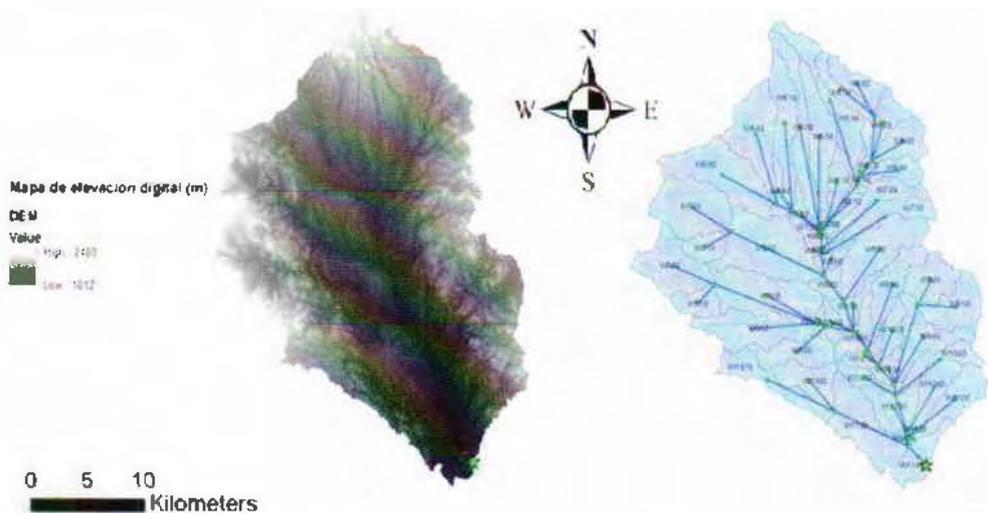


Figura 3. Representación del modelo hidrológico HEC-HMS utilizando 57 sub-cuencas para la cuenca alta del Rio Bacanuchi, a partir del punto conocido como "La Trampa" .

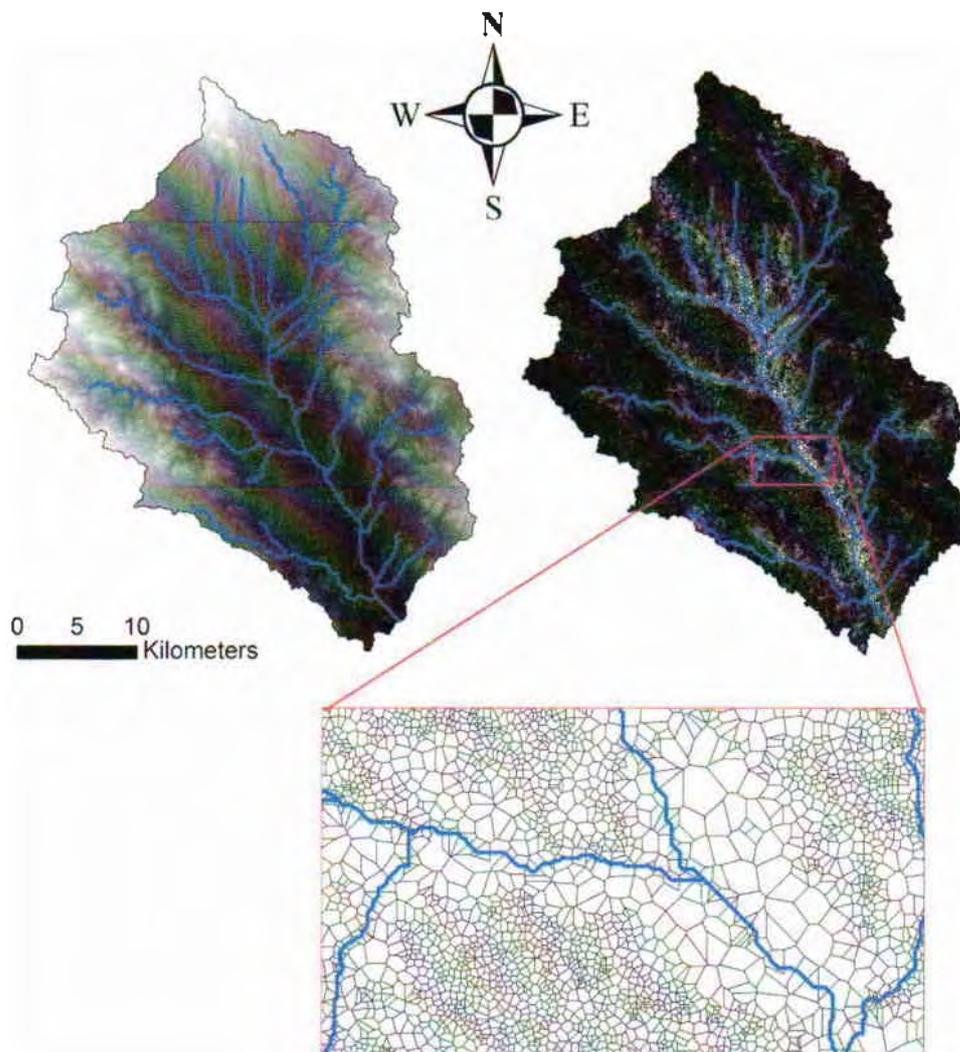


Figura 4. Representación del modelo hidrológico tRIBS utilizando 205,961 polígonos de Voronoi en la cuenca alta del Rio Bacanuchi, a partir del punto conocido como "La Trampa"

Datos de entrada a los modelos HEC-HMS y tRIBS

Ambos modelos requieren datos de entrada que caracterizan las propiedades físicas de los suelos, vegetación, así como parámetros necesarios para simular el tránsito de avenidas y las pérdidas por infiltración. El modelo HEC-HMS utiliza datos diarios de sus variables de entrada y un modelo de evapotranspiración basado en la temperatura del aire y radiación neta. En cambio el modelo tRIBS utiliza datos cada hora y un modelo de evapotranspiración más complejo basado en datos de temperatura del aire, velocidad del viento, presión atmosférica, cobertura de nubosidad y radiación neta. Para iniciar las simulaciones de tRIBS se requiere de un mapa de elevación de los niveles freáticos (Figura 8) y un mapa

de la profundidad de los basamentos (Figura 7). El mapa de niveles freáticos se generó en base a censos de aprovechamiento de aguas subterráneas realizadas por el Grupo del Agua. El mapa de profundidad de basamentos se generó a partir de datos de estudios geofísicos previos en la zona y sus valores fluctuaron entre 0.5 centímetros en las regiones con alta elevación hasta 30 metros en los valles aluviales.

Los dos modelos hidrológicos utilizaron los mismos datos de entrada de precipitación y de climatología (solo hay diferencias en las escalas temporales) tomados a partir de la combinación de las estaciones de CONAGUA / SMN y los datos ajustados del NLDAS (North America Land Data Assimilation System, Mitchell, 2009). La variabilidad espacial de suelos (ver Figura 5) y de vegetación (ver Figura 6) se consideró explícitamente a partir de los mapas oficiales de INEGI. Los parámetros de suelos y de vegetación se consideraron como constantes en el tiempo asumiendo condiciones de alto vigor vegetal ya que el derrame ocurrió en el mes de Agosto.

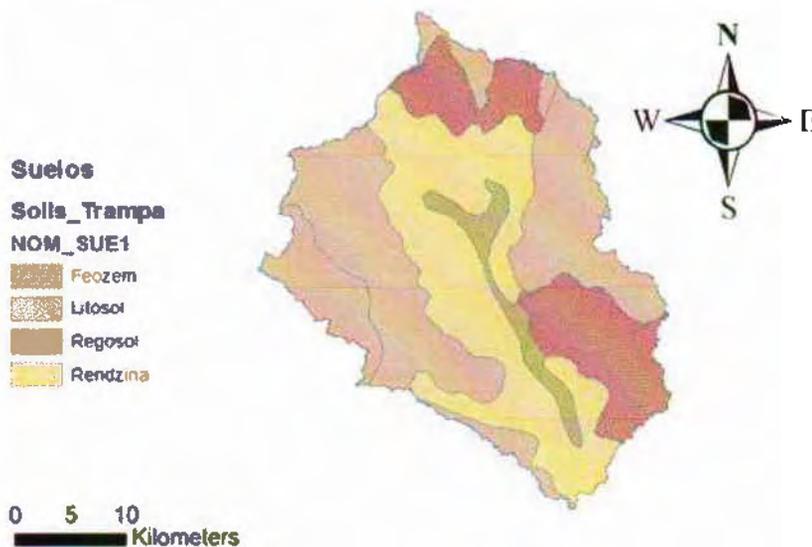


Figura 5. Representación espacial de los tipos de suelos en la cuenca alta del Río Bacanuchi. Fuente INEGI.

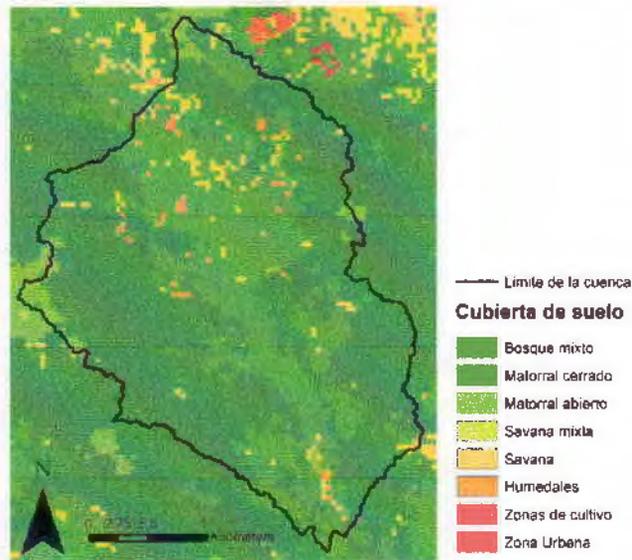


Figura 6. Representación espacial de la vegetación / uso de suelo en la cuenca alta del Rio Bacamuchi. Fuente INEGI.

Representación de acuífero del Rio Bacamuchi y condiciones iniciales del Modelo tRIBS

El modelo hidrológico tRIBS requiere de una capa espacial de entrada de las profundidades de los basamentos (roca madre) para determinar el volumen disponible de almacenamiento en la zona saturada. Dicha capa se generó a partir de las variaciones topográficas y en base a estudios de geofísica realizados en la región (CEA, 2005). Como puede observarse en la Figura 7, el rango de profundidad de suelo oscila entre 7 a 100 metros localizándose los valores más someros en los límites de la cuenca y las suelos más profundos en los valles (región central de la cuenca).

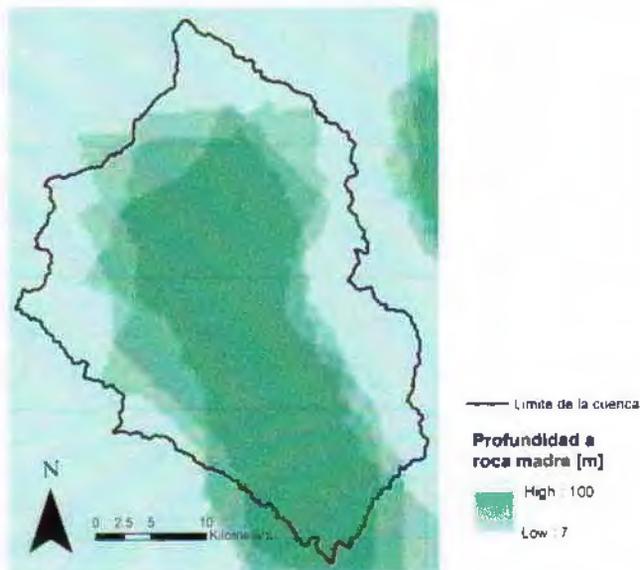


Figura 7. Variabilidad espacial de profundidad del basamento en la cuenca denominada La Trampa.

Además el modelo hidrológico tRIBS requiere de un capa espacial del nivel freático. Dicha capa es necesaria para generar las condiciones iniciales del modelo y evaluar el proceso de drenado de humedad de suelo en el modelo a lo largo de periodos largos de tiempo. El mapa de los mantos freáticos se generó a partir de censos realizados por el grupo del agua en el área de estudio. Igualmente dichos censos se utilizaron para generar mapas de la carga hidráulica en la región y poder inferir las direcciones de movimiento de aguas subterráneas. La Figura 7 muestra el mapa de las elevaciones de los mantos freáticos utilizado para inicializar el modelo tRIBS. Mientras que la Figura 8 muestra las profundidades del basamento. Utilizando los censos de niveles freáticos se generó un mapa de líneas equipotenciales (ver Figura 9) que sirve para determinar la dirección de los flujos subterráneos.

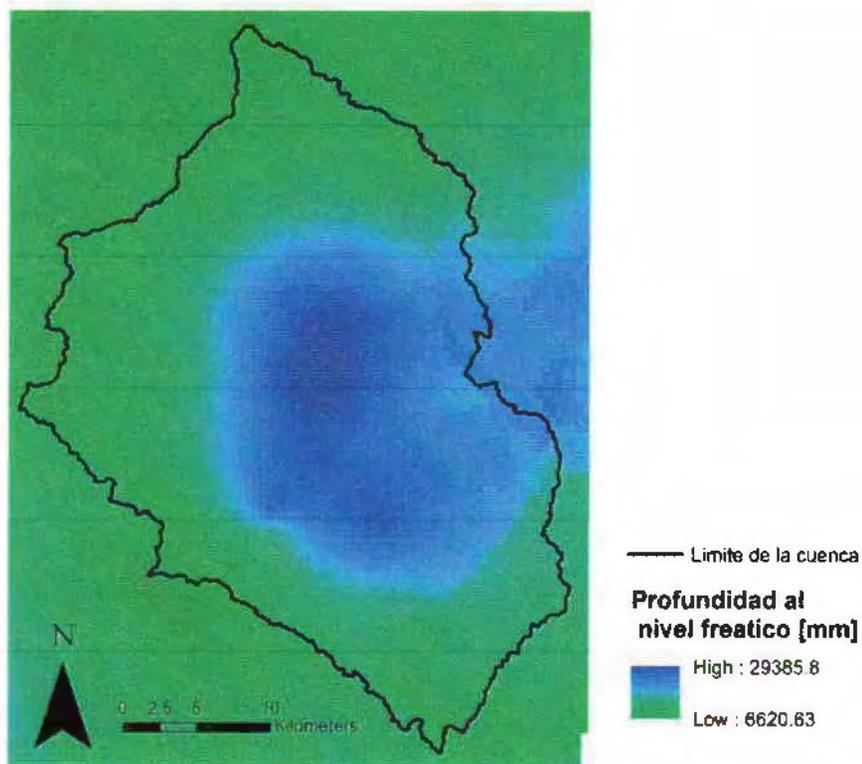


Figura 8. Distribución espacial de profundidad al nivel freático a lo largo de la cuenca La Trampa expresada en milímetros a partir de la superficie.

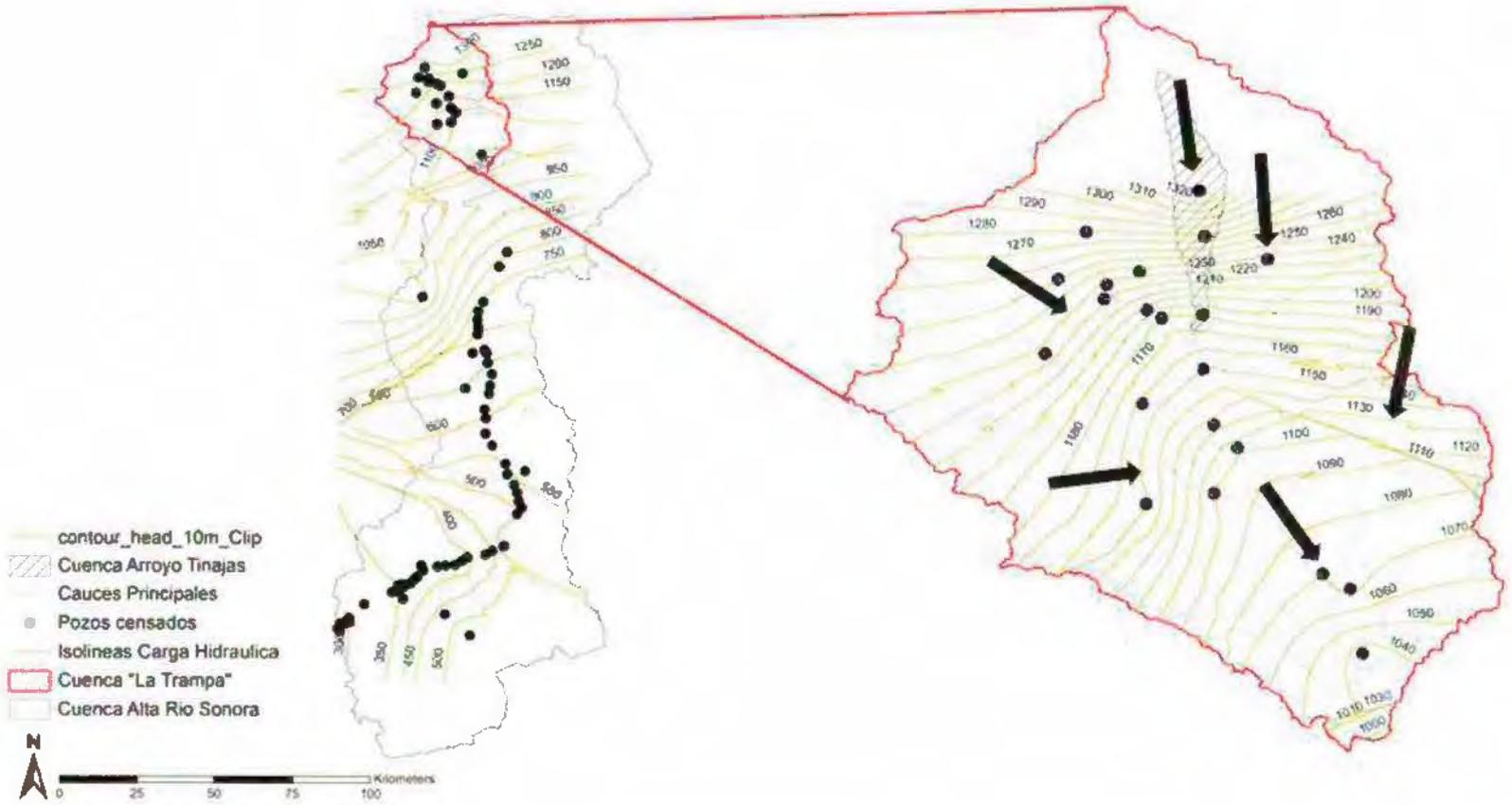


Figura 9. Líneas equipotenciales obtenidas de los censos de agua subterránea por el grupo del agua en toda la cuenca del Rio Sonora y en la parte alta del Rio Bacanuchi.

Datos climáticos de entrada a los modelos

Debido a la escasez de datos espaciales de datos meteorológicos en la cuenca del Río Sonora, se utilizaron variables meteorológicas de NLDAS-2 (North American Land Data Assimilation, versión 2) con una resolución temporal de 1 hora y espacial de 12 kilómetros. Los datos de NLDAS se ajustaron utilizando 10 estaciones de CONAGUA / SMN para que representaran adecuadamente las mismas magnitudes de lluvia observadas en las estaciones. La Tabla 7 presenta la comparación de las estaciones de CONAGUA y los resultados de NLDAS antes y después de ser ajustados.

Los datos de NLDAS se utilizaron como forzamiento para los dos modelos hidrológicos después de que se corrigieron siguiendo la metodología de Robles-Morua et al. (2010). La Tabla 2 del capítulo 6 y la Tabla 7 de este capítulo presentan los resúmenes de los datos de precipitación y los factores de ajuste utilizados para el producto de NLDAS. Los píxeles de NLDAS fueron corregidos utilizando información meteorológica y de lluvia de una red de estaciones operadas por la Comisión Nacional del Agua y la Comisión Estatal del Agua. Basado en una comparación diaria, se aplicó un factor de corrección para cada día. Las variables que se utilizaron para forzar el tRIBS fueron presión atmosférica (PA), temperatura del aire (TA), humedad relativa (RH), velocidad de viento (WS) e irradiación solar (ISR). Mientras que las variables que se utilizaron para el modelo HEC-HMS a escalas diarias fueron temperatura del aire (TA), irradiación solar (ISR) y precipitación (RA). La Figura 10 muestra la cobertura de los píxeles de NLDAS dentro de la cuenca La Trampa y la Figura 11 muestra los polígonos de Thiessen generados por el modelo HEC-HMS, los cuales son iguales a los generados por el modelo tRIBS.

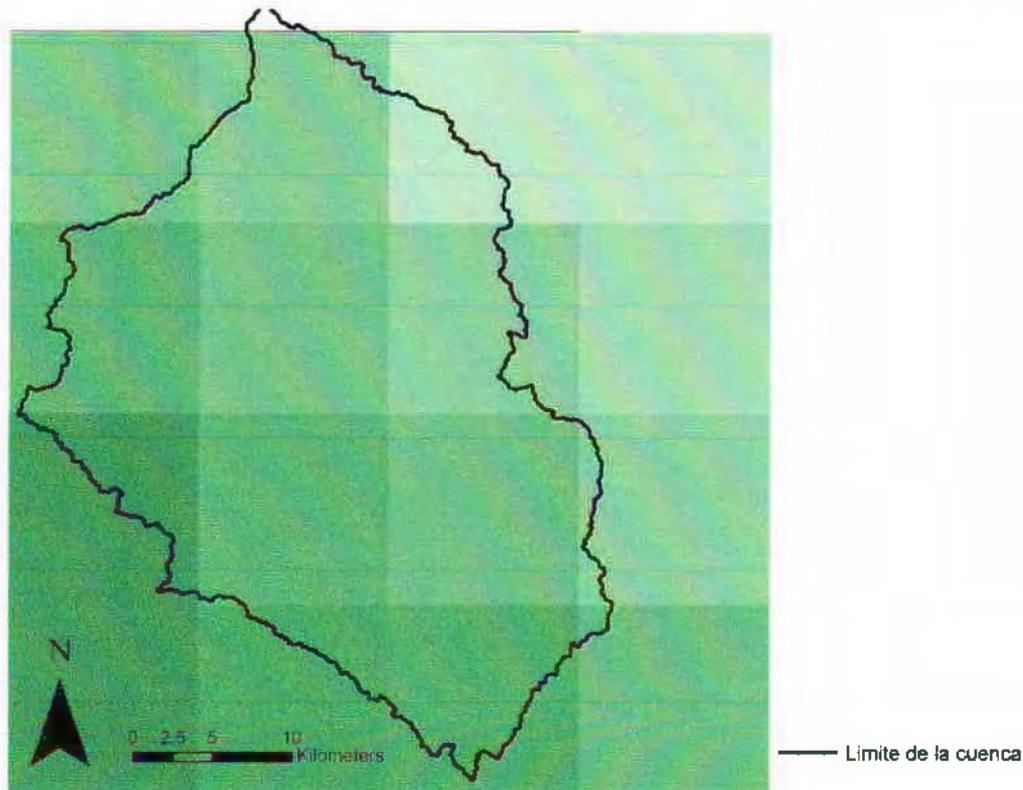


Figura 10. Cobertura espacial de los píxeles del producto meteorológico NLDAS dentro de la cuenca La Trampa.

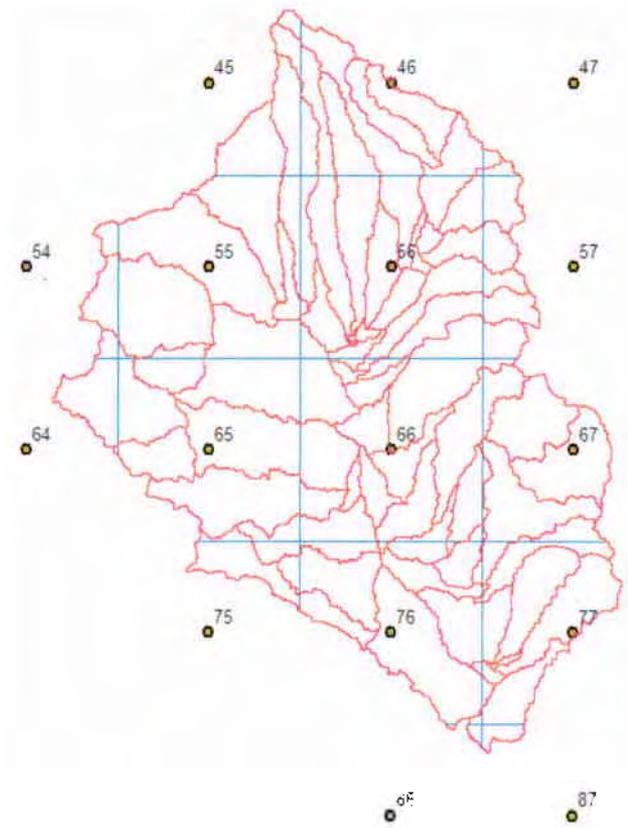


Figura 11. Cobertura espacial de los pixeles del producto meteorológico NLDAS dentro de la cuenca La Trampa. Los puntos indican el centro de cada pixel y las líneas azules representan los polígonos de Thiessen que se generaron en ambos modelos para representar la variabilidad espacial de la lluvia en la parte alta de la cuenca del Rio Bacanuchi. Las líneas rojas representan las fronteras de las sub-cuencas utilizadas en el modelo HEC-HMS.

Tabla 7. Comparación de los datos de precipitación de 10 estaciones climáticas de CONAGUA y de NLDAS (antes y después de ser ajustados).

		CONAGUA / SMN									
		Gauge_Cananea	Gauge_Bacoachi	Gauge_Bacanuchi	Gauge_Arizepe	Gauge_Sinoquipe	Gauge_Bananuchi	Gauge_Huepac	Gauge_Mazocahui	Gauge_Ures	Gauge_Topalme
Lluvia Annual [mm]		827	595	641.7	622.3	731	621.6	647	439	635.4	585.75
Lluvia ODILE y NORBERTO [mm]		230	142	230.3	147.7	234	147.5	191	173	429.4	268.5
		NLDAS SIN AJUSTAR									
		pix_Cananea	pix_Bacoachi	pix_Bacanuchi	pix_Arizepe	pix_Sinoquipe	pix_Bananuchi	pix_Huepac	pix_Mazocahui	pix_Ures	pix_Topalme
Lluvia Annual [mm]		724.4381	629.8862	612.6108	614.7968	609.2115	619.1615	614.3913	579.5029	540.1424	492.3935
BIAS Pre (P/G)		0.8768	1.0586	0.9547	0.9879	0.8334	0.9961	0.9496	1.3201	0.8581	0.8406
Mean Field BIAS Pre		0.9667	ERROR GLOBAL -3.33%								
		NLDAS AJUSTADO									
		pix_Cananea	pix_Bacoachi	pix_Bacanuchi	pix_Arizepe	pix_Sinoquipe	pix_Bananuchi	pix_Huepac	pix_Mazocahui	pix_Ures	pix_Topalme
Lluvia Annual [mm]		726.3928	613.5545	650.7623	604.3397	609.9524	631.8396	628.2546	598.6036	551.7006	516.8306
BIAS Post (P/G)		0.8783	1.0312	1.0141	0.9711	0.8344	1.0004	0.9587	1.3453	0.8683	0.8823
Mean Field BIAS Post		0.9784	ERROR GLOBAL -2.16%								
Lluvia ODILE y NORBERTO [mm]		240.7	160.4	195.9	171.4	169.2	164.9	163.9	151.8	182.1	172.9
BIAS Odile		1.05	1.13	0.85	1.16	0.72	1.12	0.86	0.88	0.42	0.64

Experimentos numéricos con HEC-HMS y tRIBS

Debido a que no se cuenta con ninguna estación hidrométrica o datos de humedad de suelo para comparar los resultados de los modelos con observaciones de campo **los modelos hidrológicos no fueron calibrados**. Ante esta situación, se utilizaron las dos plataformas de modelación para presentar rangos de incertidumbre en los escurrimientos buscando generar la mayor confianza utilizando parámetros basados en representaciones físicas que ya habían sido calibradas o probadas con datos de campo en el Rio Sonora.

Es importante mencionar que a pesar de que no se llevó a cabo una calibración tradicional (comparación modelos Vs. observaciones) los parámetros de ambos modelos fueron determinados en base a las propiedades físicas de los suelos, de la vegetación y de la topografía. Dichos parámetros ya habían sido estimados en estudios previos del Rio Sonora. Los parámetros de suelos y de vegetación para ambos modelos se basaron en las simulaciones con calibración de humedad de suelo realizadas por Mendez-Barroso et al. (2014) y para los datos de tránsito de avenidas se utilizaron los parámetros de Robles-Morua et al. (2015). Es trabajo de Robles-Morua et al. (2015) llevo a cabo calibraciones en el Oregano II del periodo de 1980-1990 y de validación de 1990-2000 utilizando el modelo HEC-HMS. Esta calibración fue fundamental para generar confianza en la aplicación de este modelo en la parte alta de la cuenca del Rio Bacanuchi. Sin embargo, es importante recalcar que la parte alta de la cuenca del Rio Bacanuchi se encuentra a alrededor de 258 km de distancia de la estación hidrométrica más cercana y los parámetros de HEC-HMS calibrados en esa estación no son un reflejo real de lo que sucede en la parte alta del Rio Bacanuchi.

Utilizando HEC-HMS se llevaron a cabo simulaciones durante el periodo del 29 de Mayo del 2013 al 29 de Junio del 2015 utilizando los datos de climatología ajustados del sistema de asimilación de datos terrestres de Norteamérica (NLDAS por sus siglas en ingles). Las simulaciones y los datos de entrada de lluvia de HEC-HMS se llevaron a cabo a una resolución temporal diaria. La única variación que se llevó a cabo en las simulaciones de HEC-HMS fue que se realizó un análisis de sensibilidad de la influencia del ancho del cauce principal en los resultados de escurrimientos, para esto se realizaron pruebas con anchos del cauce de 1, 3, 5, 8 y 10 metros. Los resultados del análisis de sensibilidad de dichas pruebas mostraron una variación entre el ancho de 1 y 10 metros del 0.04%, lo que representa un valor muy pequeño, por lo tanto las simulaciones presentadas en este reporte están basadas en un ancho de cauce de 10 metros. Dicho valor se tomó de mediciones de campo en varios puntos y utilizando imágenes satelitales. Todas las simulaciones se llevaron a cabo bajo la suposición de un estado de la vegetación estática, asumiendo condiciones de alto verdor porque el derrame ocurrió durante el mes de agosto.

Las simulaciones que se realizaron con el modelo tRIBS se llevaron a cabo durante el mismo periodo que en el modelo HEC-HMS utilizando los mismos datos ajustados de NLDAS pero a una resolución temporal horaria. Al igual que con el modelo HEC-HMS se realizaron varias simulaciones evaluando la influencia del ancho del cauce. Dichas variaciones no resultaron tener variaciones significativas por lo que los resultados presentados en este reporte son utilizando un ancho de cauce de 10 metros.

Dehido a que ambos modelos requieren lograr una estabilidad numérica para resolver las ecuaciones de estado se utilizó un periodo de iniciación de un año. Este periodo de iniciación (spinup por sus siglas en inglés) simula las lluvias del 2014 (año en que sucedió el derrame) utilizando las mismas

lluvias pero en un periodo de simulación previo. Esto permite que al momento de para las fechas de Junio del 2014 los modelos ya han pasado por un proceso de estabilización. Esto significa que en el 2013 se iniciaron las simulaciones para asegurarse de que las condiciones iniciales establecidas llegaran a un nivel estable donde ya no hay fluctuaciones en comparación con el estado inicial. Las series de tiempo de resultados finales de ambos modelos, a pesar de contar con estimaciones de mayo del 2013 al 2015, solo se utilizaron los resultados de Junio a Diciembre del 2014.

Resultados Modelos Hidrológicos (tRIBS y HEC-HMS)

La Tabla 8 presenta un resumen de los rangos de escurrimientos que se obtuvieron con los dos modelos hidrológicos. Es importante aclarar que el modelo experimental tRIBS logra capturar la variabilidad de la topografía a un detalle mucho más alto que el modelo HEC-HMS. Por esta razón los resultados de tRIBS tienen mayores pérdidas por infiltración ya que no hay valores agregados a grandes escalas. tRIBS por utilizar una resolución temporal más fina (horaria) estimó picos máximos más altos en la aldea de la c enca La Trampa ($area = 997 \text{ km}^2$) en comparación que HEC-HMS. En este sentido ambos modelos utilizan representaciones diferentes para estimar los eventos máximos. HEC-HMS al utilizar datos diarios y representar la cuenca de manera más grande (57 subcuencas) a diferencia de tRIBS (205,961 polígonos voronoi) tuvo magnitudes menores en los eventos máximos. Estas diferencias espaciales entre los modelos y la forma en que resuelven las ecuaciones de estado también ocasiono que HEC-HMS no tuviera tantas pérdidas por procesos de Evapotranspiración y de Infiltración. Esto ocasiono diferencias en los volúmenes totales escurridos entre los dos modelos.

Debido a que no se cuenta con ninguna estación hidrométrica o datos de humedad de suelo para comparar los resultados de los modelos con observaciones de campo los modelos no fueron calibrados. Ante esta situación se utilizaron las dos plataformas de modelación para presentar rangos de incertidumbre en los escurrimientos. Es importante mencionar que a pesar de que no se llevó a cabo una calibración tradicional (comparación modelos Vs. observaciones) los parámetros de ambos modelos fueron determinados en base a las propiedades físicas de los suelos, de la vegetación y de la topografía. Dichos parámetros ya habían sido estimados en estudios previos del Rio Sonora. Los parámetros de suelos y de vegetación para ambos modelos se basaron en las simulaciones con calibración de humedad de suelo realizadas por Mendez-Barroso et al. (2014) y para los datos de tránsito de avenidas se utilizaron los parámetros de Robles-Morua et al. (2015). El trabajo de Robles-Morua et al. (2015) llevo a cabo calibraciones en el Oregano II del periodo de 1980-1990 y de validación de 1990-2000 utilizando el modelo HEC-HMS. Esta calibración fue fundamental para generar confianza en la aplicación de este modelo en la parte alta de la cuenca del Rio Bacanuchi. Sin embargo, es importante recalcar que la parte alta de la cuenca del Rio Bacanuchi se encuentra a alrededor de 258km de distancia de la estación hidrométrica más cercana y los parámetros de HEC-HMS calibrados en esa estación no son un reflejo real de lo que sucede en la parte alta del Rio Bacanuchi.

Tabla 8. Comparación de resultados entre los modelos hidrológicos tRIBS y HEC-HMS para las simulaciones de la parte alta de la cuenca del Rio Bacanuchi. Los resultados son del periodo del 6 de Agosto al 30 de Septiembre del 2014. Periodo de influencia de los Huracanes Norberto y Odile.

	Sitio	MODELO HIDROLOGICO	
		tRIBS	HEC-HMS
Escorrentamiento Maximo [m ³ /seg]	"La Trampa"	1600	718
	"Arroyo Tinajas"	2.1	12.4
Volumen Total Escorrentado [Millones m ³]	"La Trampa"	49	208
	"Arroyo Tinajas"	0.08	3.58

Las Tablas 9 y 10 presentan el resumen de los escurrimientos máximos y volúmenes totales simulados durante el periodo de influencia de los Huracanes Norberto y Odile. Los resultados de las series de tiempo de las simulaciones de cada modelo se agregan a este reporte como Anexos. Las Figuras 12 y 13 presentan las series de tiempo graficadas de modelo tRIBS y HEC-HMS, respectivamente para los periodos de interés antes, durante y después del derrame. Estas dos figuras presentan las series de tiempo simuladas en la cuenca de la TRAMPA (997 km²) y en la cuenca del Arroyo Tinajas (~30 km²).

De los resultados de las simulaciones se puede observar (Figuras 12 y 13) que ambos modelos representaron adecuadamente una respuesta del Huracan Odile y en una mucho menor magnitud los escurrimientos del huracán Norberto. En este sentido las simulaciones presentan una idea clara de la respuesta que se tuvo y de los rangos de variación en respuesta a las tormentas de lluvia que se registraron después del derrame. Es importante aclarar que en esta región no existen estaciones de aforo. La estación más cercana (Oregano II) se encuentra a cerca de 258 km sobre el cauce del rio aguas abajo. Los registros de los aforos en la estación de aforo Oregano II (CONAGUA) indican que los escurrimientos registrados por el huracán Odile fueron menores a los del Huracan Norberto. CONAGUA aún no ha liberado los registros oficiales de dicha estación, los datos presentados en la Figura 1 fueron obtenidos de la oficina regional noroeste de CONAGUA mediante una petición formal que se le hizo al Ing. Lucas Oroz, director técnico de dicho organismo.

Tabla 9. Resultados de las estimaciones de escurrimientos para el periodo del 6 de Agosto al 30 de Septiembre del 2014 utilizando el modelo HEC-HMS para la parte alta de la cuenca.

Ubicacion	Area [km ²]	UTM WGS 84 X	UTM WGS 84 Y	Precipitacion Maxima [mm/dia]	Precipitacion Total [mm]	Escurrimiento Maximo [m ³ /seg]	Volumen Total Escurrido [Millones m ³]
Outlet	996.90	574750.09	3382819.11	105.15	349.09	717.60	208.62
W1140	16.57	569153.53	3419189.58	83.09	316.31	0.50	2.38
W1130	1.71	572827.61	3384784.31	85.88	318.70	0.80	2.40
W1120	0.84	572713.68	3385724.19	80.24	309.08	0.60	2.38
W1110	38.22	569153.53	3419189.58	86.53	323.13	4.50	2.76
W1100	22.40	572713.68	3385724.19	80.24	309.08	5.50	2.84
W1090	20.03	572685.20	3386179.89	86.19	319.86	0.50	2.38
W1080	18.23	572685.20	3386179.89	80.24	309.08	3.30	2.65
W1070	21.33	565166.17	3388401.42	101.97	343.75	14.40	3.67
W1060	20.40	565166.17	3388401.42	97.68	339.10	15.20	3.78
W1050	8.36	571403.55	3390110.30	86.37	320.54	5.20	2.80
W1040	13.87	571403.55	3390110.30	86.62	318.02	7.40	2.99
W1030	7.24	571318.10	3391249.54	89.40	321.57	5.80	2.89
W1020	10.53	569637.71	3393129.30	94.98	334.72	7.10	3.02
W1010	7.90	569637.71	3393129.30	95.83	334.57	5.60	2.85
W1000	13.05	568526.95	3394838.17	97.80	341.39	7.80	3.32
W990	6.65	567045.93	3396717.93	100.54	342.07	5.60	2.85
W980	21.49	564055.40	3397230.59	100.54	342.07	5.60	2.85
W970	2.56	564055.40	3397230.59	100.54	342.07	2.40	2.54
W960	34.77	563229.45	3397543.88	107.09	352.69	29.70	5.06
W950	24.09	573739.00	3399509.08	89.55	322.02	10.60	3.32
W940	27.15	571318.10	3391249.54	91.61	329.52	12.70	3.47
W930	10.17	567045.93	3396717.93	100.54	342.07	6.00	2.86
W920	21.08	573739.00	3399509.08	89.55	322.02	12.00	3.40
W910	12.61	552492.04	3401588.21	119.26	371.50	10.90	3.39
W900	44.24	563229.45	3397543.88	107.06	352.59	27.10	5.22
W890	23.24	568526.95	3394838.17	95.13	332.38	17.30	4.05
W880	8.19	565935.16	3399907.82	100.54	342.07	7.60	3.03
W870	33.41	552492.04	3401588.21	122.62	373.30	35.10	6.04
W860	5.42	563884.51	3402528.09	102.82	342.62	4.30	2.73

Ubicación	Area [km ²]	UTM WGS 84 X	UTM WGS 84 Y	Precipitacion Máxima [mm/día]	Precipitacion Total [mm]	Escurrimiento Máximo [m ³ /seg]	Volumen Total Escurrido [Millones m ³]
W850	1.75	563685.15	3404635.70	100.54	342.07	1.80	2.51
W840	54.65	563884.51	3402528.09	110.58	356.78	44.70	6.76
W830	39.15	565935.16	3399907.82	99.04	337.19	30.50	5.14
W820	3.60	563685.15	3405347.73	105.73	352.26	3.30	2.63
W810	11.28	554229.40	3407056.60	116.71	365.60	10.00	3.21
W800	0.15	554229.40	3407056.60	108.60	354.73	0.60	2.38
W790	0.27	563599.70	3407028.12	108.60	354.73	0.70	2.39
W780	1.26	563599.70	3407028.12	108.60	354.73	1.50	2.47
W770	12.11	563514.26	3407170.52	108.60	354.73	10.60	3.31
W760	8.20	554229.40	3407056.60	115.48	365.39	9.20	3.24
W750	41.08	554229.40	3407056.60	129.23	385.02	42.90	6.24
W740	6.36	564226.29	3408110.40	115.41	365.19	6.20	2.94
W730	19.79	563685.15	3404635.70	103.59	346.93	16.40	3.82
W720	18.30	563685.15	3405347.73	103.75	347.45	15.00	3.71
W710	6.66	563514.26	3407170.52	108.60	354.73	6.20	2.87
W700	2.49	560580.70	3409306.61	108.60	354.73	2.80	2.58
W690	12.38	567273.78	3412012.32	103.78	344.86	10.50	3.41
W680	45.69	558957.27	3409904.72	129.35	385.34	46.70	7.45
W670	2.30	567273.78	3412012.32	108.60	354.73	2.60	2.62
W680	16.80	558957.27	3409904.72	104.18	344.02	14.20	3.79
W650	29.84	568840.24	3414547.15	109.63	356.40	26.80	4.82
W640	38.07	558957.27	3409904.72	122.52	378.12	41.20	6.17
W630	11.66	563371.85	3407626.22	111.10	359.55	12.40	3.59
W620	16.67	558957.27	3409904.72	106.93	350.36	16.20	3.94
W610	29.80	564226.29	3408110.40	116.25	367.81	31.30	5.52
W600	27.69	568840.24	3414547.15	112.30	361.08	28.60	5.33
W590	29.75	560580.70	3409306.61	114.53	366.09	32.70	5.72
W580	13.41	563371.85	3407626.22	111.10	359.55	13.70	3.77

Tabla 10. Resultados de las estimaciones de escurrimientos para el periodo del 6 de Agosto al 30 de Septiembre del 2014 utilizando el modelo tRIBS para la parte alta de la cuenca.

Nodo	UTM WGS 84 X	UTM WGS 84 Y	Escurrimiento Maximo [m ³ /seg]	Volumen Total Escurrido [Millones m ³]
Outlet	574750.09	3382819.11	1600.700	48.955
186874	563904.8709	3407770.373	0.589	0.019
187056	564389.0509	3406004.54	1.979	0.039
187057	564474.4945	3405976.059	1.073	0.031
187105	565955.5158	3396919.044	0.824	0.026
189837	571765.6766	3392134.206	0.225	0.009
191447	566553.6206	3400422.229	2.708	0.082
193160	563961.8332	3407770.373	2.196	0.061
193225	571851.1201	3392219.649	0.885	0.025
193443	563249.8037	3407029.863	0.974	0.028
194047	563876.3897	3408567.847	2.143	0.083
194283	566194.2403	3396886.491	3.648	0.085
197426	563279.8826	3402609.28	9.292	0.226
197457	569046.5548	3395600.944	9.377	0.277
197458	569003.0021	3395551.947	6.983	0.243
200028	563563.0967	3408169.11	16.771	0.383
200217	566154.8841	3400365.267	13.821	0.318
203472	563238.7655	3402610.993	24.754	0.662

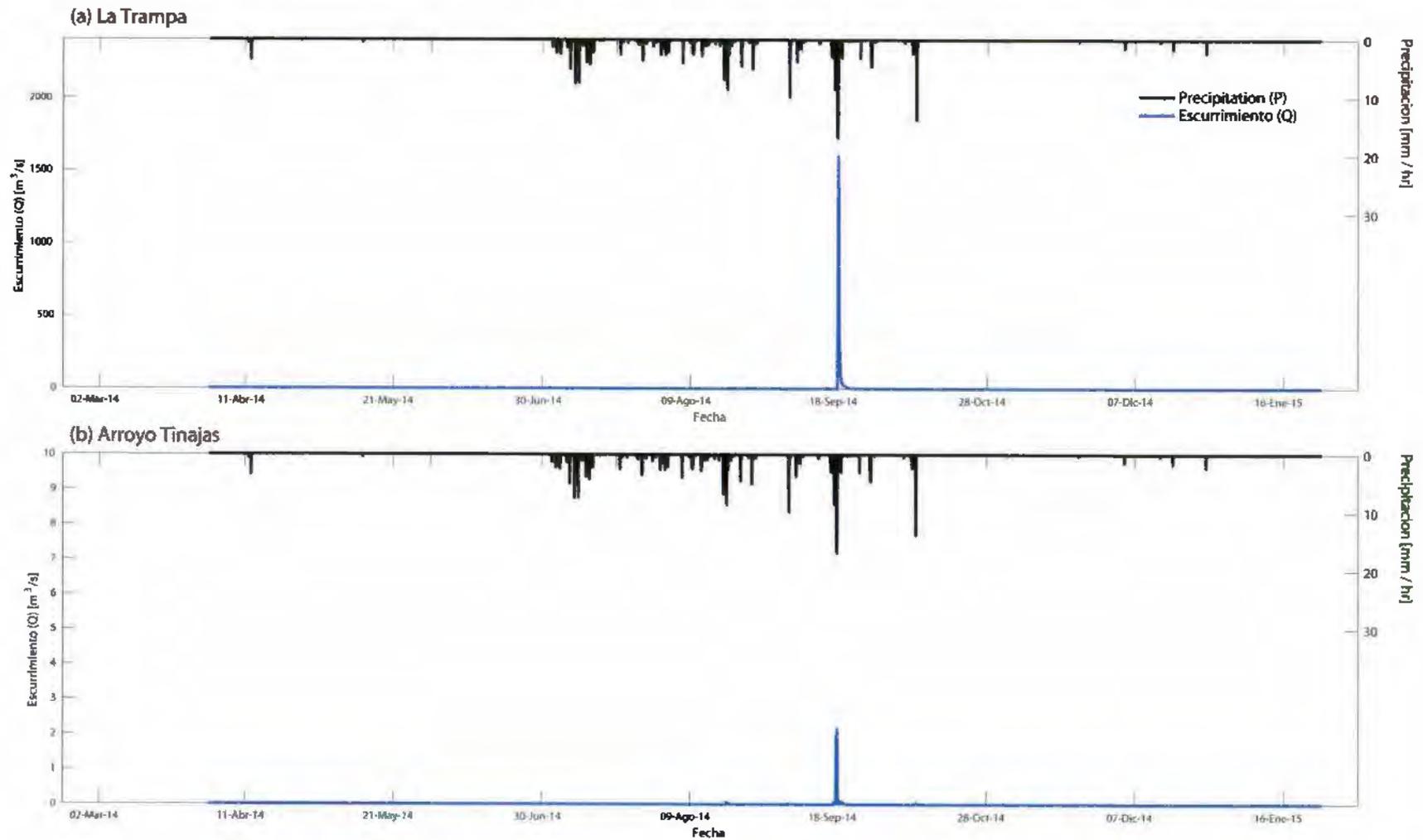


Figura 12. Resultados de la simulación con el modelo hidrológico tRIBS durante el periodo del 29 de Mayo del 2013 al 16 de Enero de 2015 para (a) la Cuenca alta del Rio Bacanuchi a partir del punto conocido como "La Trampa" (área de ~997 km²); y (b) para el Arroyo Tinajas donde ocurrió el derrame de la minera Buenavista de cobre (área ~ 30 km²).

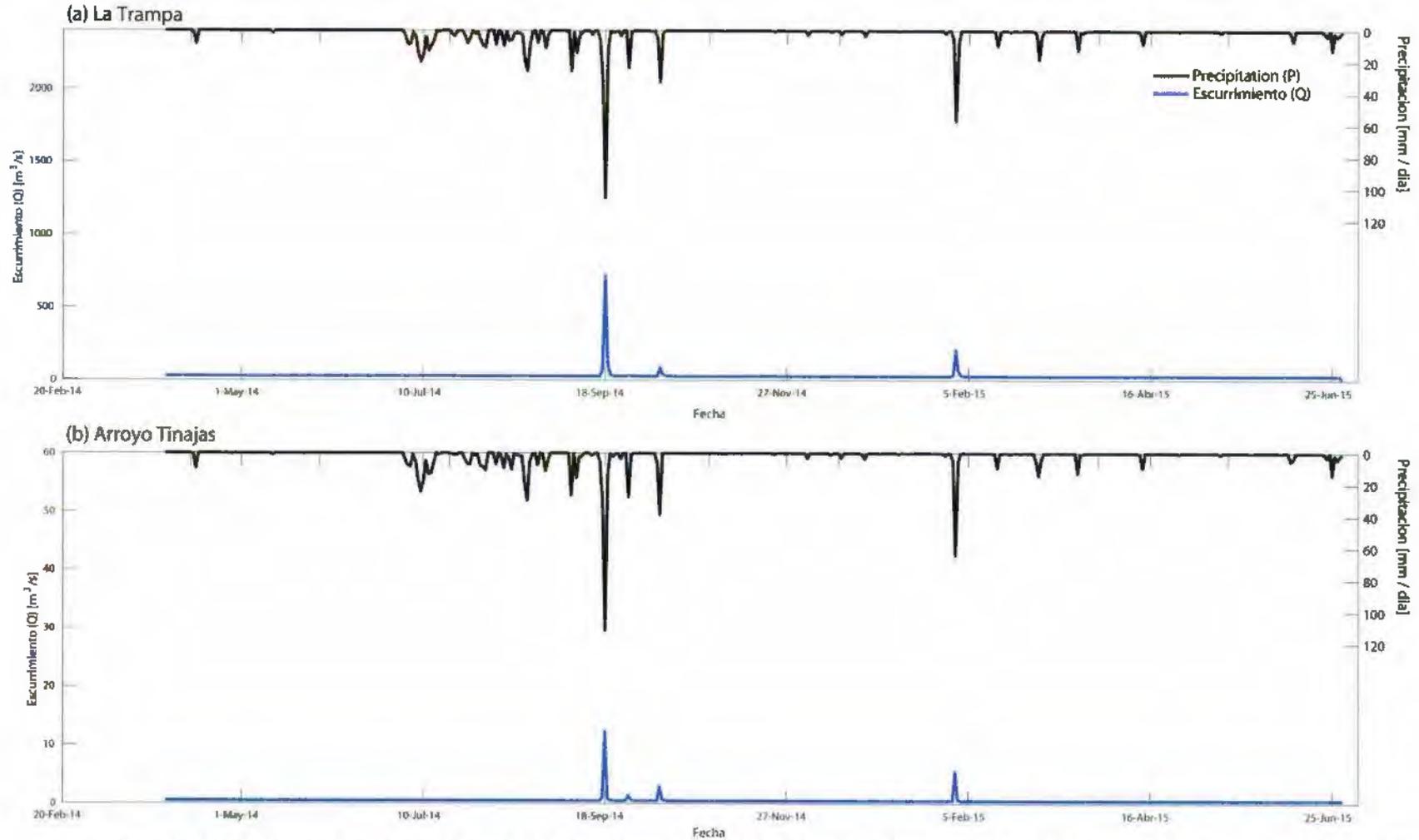


Figura 13. Resultados de la simulación con el modelo hidrológico HEC-HMS durante el periodo del 29 de Mayo del 2013 al 25 de Junio de 2015 para (a) la Cuenca alta del Rio Bacanuchi a partir del punto conocido como "La Trampa" (área de ~997 km²); y (b) para el Arroyo Tinajas donde ocurrió el derrame de la minera Buenavista de cobre (área ~ 30 km²).

Bibliografía

- Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modeling: The Primer*. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ. USA. 457 pages.
- Caruso, B. S., Rademaker, M., Balme, A., & Cochrane, T. A. (2013). Flood modelling in a high country mountain catchment, New Zealand: comparing statistical and deterministic model estimates for ecological flows. *Hydrological Sciences Journal*, 58(2), 328-341.
- CEA, (2005). Estudio geo-hidrolo' gico de las subcuencas de las Rios Sonora, Zanja' n, San Miguel, Mesa del Seri-La Victoria y cuenca Bacoachi. Comision Estatal del Agua Rep. CEA-ED-081 and CEA-ED-081-CA1, 391 pp.
- Foody, G. M., Ghoneim, E. M., & Arnell, N. W. (2004). Predicting locations sensitive to flash flooding in an arid environment. *Journal of Hydrology*, 292(1), 48-58.
- INEGI, (2000). Cartas hidrologicas de aguas superficiales. Instituto Nacional de Estadisticas y Geografia Rep., 1 pp.
- Lapham, W. W. (1989), Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical groundwater flow and vertical hydraulic conductivity, USGS Water Supply Pap., 2337, 1 35
- Mitchell, K. E., et al. (2004), The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system, *J. Geophys. Res.*, 109, D07S90, doi:10.1029/2003JD003823.
- Mendez-Barroso, L. A., E. R. Vivoni, A. Robles-Morua, G. Ma caro, E. A. Yepe , J. C. Rodr g e , C. J. Watts, J. Garatuza-Pa an, and J. A. Sa -Hernandez (2014), A modeling approach reveals differences in evapotranspiration and its partitioning in two semiarid ecosystems in Northwest Mexico, *Water Resour. Res.*, 50, doi:10.1002/2013WR014838.
- Rawls, W. J., and D. L. Brakensiek (1989), Estimation of soil water retention and hydraulic properties, in *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling: Theory and Practice*, pp. 275 300, Kluwer Acad., Dordrecht, Netherlands.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, and N. Miller (1983), Green-Ampt infiltration parameters from soils data, *J. Hydraul. Eng.*, 109(1), 62 70.
- Robles-Morua, A., E. R. Vivoni, and A. Mayer (2012), Distributed hydrologic modeling in Northwest Mexico reveals the links between runoff mechanisms and evapotranspiration, *J. Hydrometeorol.*, 13, 785 807.
- Robles-Morua, A., Che, D., Mayer, A.S., and Vivoni, E.R. (2015). Hydrologic Assessment of Proposed Reservoirs in the Sonora River Basin, Mexico, under Historical and Future Climate Scenarios. *Hydrological Sciences Journal*. 60(1): 50-66.

Soliman, M. M., El Tahan, A. H. M., Taher, A. H., & Khadr, W. M. (2015). Hydrological analysis and flood mitigation at Wadi Hadramawt, Yemen. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11), 10169-10180.

Van Genuchten, M. T. (1980), Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.

VII. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

ÍNDICE DE FIGURAS

pag.

Figura 1. Resolución de la velocidad en el grid (tomado de O'Brien, 2001).	203
Figura 2. Área de simulación. a) Localización de los dominios computacionales. La línea roja delimita la cuenca del río Tinajas. La línea amarilla el dominio computacional 1 y la línea naranja, el dominio computacional 2. b) Malla con una resolución de 15*15m creada sobre el dominio 1.	205
Figura 3. Obtención de la granulometría por el método de intersecciones de Rosiwal (1898). a) Máscara construida sobre la imagen calibrada con una serie de líneas paralelas. b) Tabla con los datos asociados a cada una de las partículas ubicadas sobre la máscara.	207
Figura 4. Hidrogramas utilizados para las simulaciones del derrame de sulfato de cobre. En todos los casos el área de bajo la curva representa el volumen total del derrame de 40 000m ³	208
Figura 6. Hidrogramas utilizados como datos de entrada para la simulación del transporte de sedimentos.	209
Figura 5. a) Mapa de ubicación de los hidrogramas de entrada (puntos A5, A4 y A1) para las simulaciones de transporte de sedimentos.. La línea roja delimita la cuenca del río Tinajas. El triángulo amarillo y el pentágono rosa, muestran la ubicación del represo poniente y represo de emergencia respectivamente. b) Inflows dentro de la cuenca La Trampa.	209
Figura 7. Histogramas granulométricos del cauce activo. El triángulo amarillo indica la zona del derrame, el pentágono rosa la ubicación del represo de emergencia y los círculos verdes los sitios de muestreo.....	210
Figura 8. Histogramas granulométricos del cauce activo en la zona distal. Los cuadros negros indican puntos de muestreo y los rojos la ubicación de estacione de Conagua. Los polígonos rojo y verde delimitan las cuencas del río Tinajas y La Trampa respectivamente.	211
Figura 9. Parámetros estadísticos de las muestras del cauce del Río Sonora y su variación con la distancia.	212
Figura 10. Variación de la granulometría en la cuenca del río Tinajas. Se muestra la variación en la distribución granulométrica a lo ancho del cauce y con la profundidad.....	213
Figura 11. Variación de la granulometría desde la salida de la cuenca del río Tinajas hasta la zona de Bacanuchi. Se muestra la variación en la distribución granulométrica a lo ancho del cauce y con la profundidad.....	214
Figura 12. Resultados de las simulaciones del derrame de sulfato cobre. Las simulaciones fueron realizadas bajo condiciones saturadas del terreno.....	215
Figura 13. Comparación de los resultados de las simulaciones del derrame de sulfato de cobre, con y sin infiltración. La línea roja delimita la cuenca del río Tinajas.....	216
Figura 14. Resultados de la simulación del transporte de sedimentos para la cuenca del río Tinajas. El recuadro indica su ubicación con respecto al área total de la simulación. El pentágono rosa indica la localización del represo de emergencia. La línea roja delimita la cuenca del río Tinajas.	217

Figura 15. Resultados de la simulación del transporte de sedimentos para la cuenca del río Tinajas. Se muestran en detalle los resultados de la zona 1. El recuadro indica su ubicación con respecto al área total de la simulación.	218
Figura 16. Resultados de la simulación del transporte de sedimentos. Se muestran en detalle los resultados de la zona 2. El recuadro indica su ubicación con respecto al área total de la simulación. El pentágono rosa indica la localización del represo de emergencia.	219
Figura 17. Resultados de la simulación del transporte de sedimentos. Se muestran en detalle los resultados de la zona 3.	219
Figura 18. Resultados de la simulación del transporte de sedimentos. Se muestran en detalle los resultados de la zona 4.	220
Figura 19. Resultados de las simulaciones de transporte de sedimentos donde se muestran las zonas de depósito distribuidas a lo largo del cauce. La parte norte del mapa se encuentra a la salida de la cuenca del río Tinajas mientras que el límite sur es a los 28 km a partir de la zona del derrame.	221
Figura 21. Superficie de erosión y depósito a 24.5 km de la zona del derrame. La superficie de erosión afecta los sedimentos contaminados que fueron cubiertos posteriormente por sedimentos “frescos”.	222
Figura 20. Resultados de las simulaciones de transporte de sedimentos donde se muestran las zonas de depósito distribuidas a lo largo del cauce. La parte norte del mapa se encuentra a los 28km a partir de la zona del derrame y el límite sur es el poblado de Bacanuchi.	222

REPORTE PRELIMINAR: SIMULACIÓN DEL DERRAME DE SULFATO DE COBRE Y DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS OCASIONADO POR FENÓMENOS HIDROMÉTÉOROLÓGICOS

Introducción

Una de las herramientas más utilizadas en la actualidad para determinar el alcance de diferentes procesos geológicos e hidrometeorológicos (ej. inundaciones, volcanes, procesos de remoción en masa), es el uso de herramientas de simulación. Su uso es particularmente importante cuando no se conoce con exactitud la magnitud y/o el alcance que pudo o puede tener un evento y, por lo tanto, sus efectos.

En el presente trabajo se propone el uso de una herramienta de simulación de flujos no confinados en canales abiertos, en particular el software FLO2D (O'Brien, et al., 1993; O'Brien, 2001), para determinar el alcance probable que pudo tener el derrame de la solución de sulfato de cobre ocurrida el 6 de agosto del 2014 en el represo poniente, localizado en la cuenca del río Tinajas, en la zona de Cananea, Sonora. Esta aplicación resulta novedosa pues este tipo de herramientas generalmente son usadas para estimar áreas de afectación, profundidades de flujo y velocidades de inundaciones y corrientes muy concentradas de agua y sedimentos (flujos de escombros y flujos hiperconcentrados) y representa una nueva opción para estimar el alcance probable de derrames en minas cuyo comportamiento dinámico sea similar al de un flujo de agua.

Por otro lado, otro de los alcances de este informe es establecer la influencia de la dinámica fluvial en la redistribución de sedimentos contaminados, especialmente durante las lluvias ocasionadas por los huracanes Norberto y Odile, ocurridas un mes después del derrame de sulfato de cobre.

Antecedentes teóricos del modelo de simulación del derrame y de transporte de sedimentos.

Para estimar la probable distribución del derrame se utilizó el software FLO2D (O'Brien et al., 1993; O'Brien, 2001), que se utiliza para simular la distribución de flujos no confinados en canales abiertos. Para ello, FLO2D utiliza la ecuación de onda dinámica:

$$S_t = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - (V_x / g) * \frac{\partial V_x}{\partial x} - (1/g) * \frac{\partial V_x}{\partial t}$$

Diagrama de la ecuación de onda dinámica con anotaciones:

- $S_t = S_o$: onda cinemática
- $-\frac{\partial h}{\partial x}$: onda difusa
- $-(V_x / g) * \frac{\partial V_x}{\partial x}$: aceleración convectiva
- $-(1/g) * \frac{\partial V_x}{\partial t}$: aceleración local
- La suma de los términos de onda difusa, aceleración convectiva y aceleración local constituye la onda dinámica.

FLO2D utiliza una malla que se sobrepone al modelo digital de elevación, donde se incluyen todos los datos de entrada, que varían en función del tipo de simulación. FLO2D resuelve la ecuación de onda dinámica en 8 direcciones para la velocidad, para cada una de las celdas de la malla (Figura 1). Este cálculo, aunado con la información del modelo digital de elevación, le permite al software calcular el volumen de flujo en 8 direcciones. Como es un modelo de conservación de volumen, FLO2D utiliza el dato del volumen de flujo que fluye en cada dirección y los resta al volumen total. A partir del nuevo volumen vuelve a generar una nueva información hasta que el volumen total se haya distribuido sobre el canal.

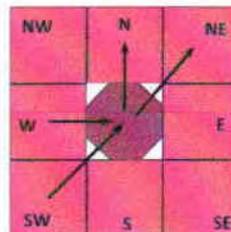


Figura 1. Resolución de la velocidad en el grid (tomado de O'Brien, 2001).

Transporte de sedimentos

Para determinar el transporte de sedimentos se utilizó el software FLO2D incorporando un swieth que permite la entrada de datos de granulométricos de los sedimentos a los largo del cauce. Estos datos aunados la ecuación MPM-Smart (Smart, 1984) se utilizan para determinar el transporte de sedimentos en sistemas fluviales en donde el lecho del río está compuesto por sedimentos mayores a 0.4mm (aprox. 1.5 ϕ). La adaptación de Smart (1984)

permite incorporar a las simulaciones el efecto de distribuciones granulométricas no-uniformes.

Objetivos

- Simular la distribución del derrame inicial.
- Estimar la remobilización de sedimentos contaminados debido a las lluvias ocasionadas por los huracanes Odile y Norberto.

Metodología

Para simular tanto la distribución del derrame, como el transporte de sedimentos, se utilizó el software FLO2D que simula flujos no confinados sobre topografía compleja. Para las simulaciones, los parámetros de entrada requeridos son: el modelo digital de elevación (MDE), coeficiente de rugosidad del terreno, granulometría, conductividad hidráulica y el hidrograma de entrada. Adicionalmente, para el transporte de sedimentos se requiere conocer las características granulométricas del cauce.

a) Modelo Digital de Elevación (MDE) y dominio computacional.

Para las simulaciones, se utilizó un modelo digital de elevación de 15 m (fuente INEGI) sobre el cual se construyó la malla o grid que representa el dominio computacional. Para la simulación del derrame, se seleccionó la cuenca del río Tinajas como *dominio computacional 1* (Figura 2a), con una resolución de 15m*15m para la malla (Figura 2b). El dominio 1 tiene como límite norte el represo poniente, ubicado como el punto donde ocurrió el derrame, y como límite sur la salida de la cuenca del río Tinajas. Para la simulación del transporte de sedimentos, se utilizó la cuenca de La Trampa como *dominio computacional 2* (Figura 2a) y la resolución del grid fue de 30m*30m. El *dominio computacional 2* tiene como límite norte la zona de captación de la cuenca del río Tinajas y como límite sur el poblado de Bacanuchi.

b) Coeficiente de rugosidad del terreno o valor de Manning.

Para determinar este coeficiente se utilizaron las tablas empíricas del USGS (United States Geological Survey; Phillips y Tadayon, 2006). Para establecer su valor, se utilizan las características morfológicas y granulométricas del cauce. El primer paso consiste en establecer un valor base con base en el tamaño del material presente en el cauce. Este valor

asume un canal recto y uniforme, por lo que se necesitan establecer ajustes en el factor de rugosidad, con base en las irregularidades presentes en el canal, las variaciones en sección transversal, la presencia de obstrucciones en el cauce, la cantidad de vegetación y los meandros.

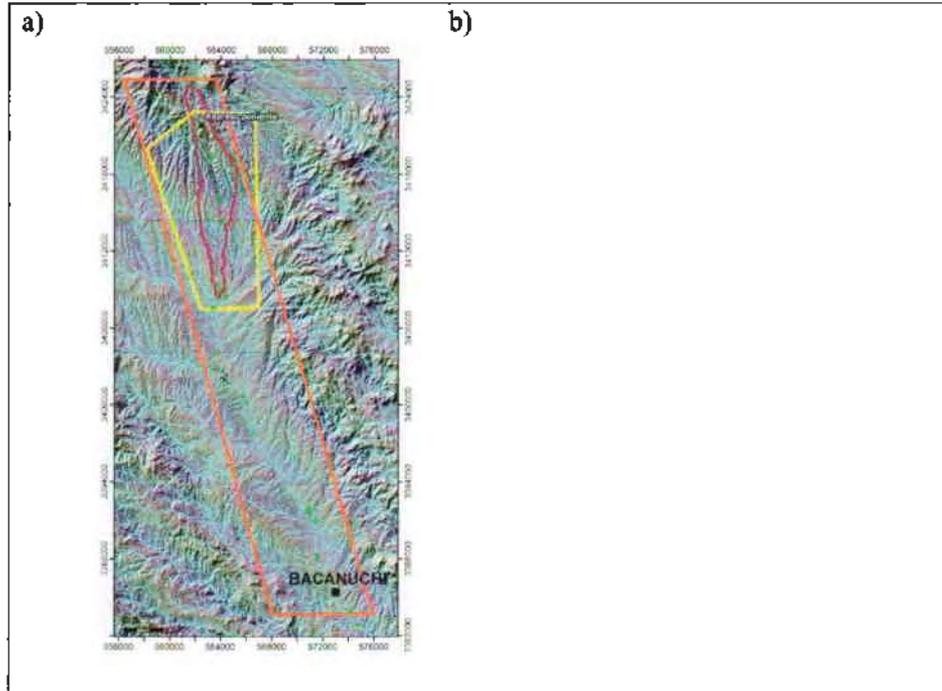


Figura 2. Área de simulación. a) Localización de los dominios computacionales. La línea roja delimita la cuenca del río Tinajas. La línea amarilla el dominio computacional 1 y la línea naranja, el dominio computacional 2. b) Malla con una resolución de 15*15m creada sobre el dominio 1.

De acuerdo con las características granulométricas, el valor base para canales donde predomina el material grueso es de 0.03-0.05, debido a la gran variabilidad en el tamaño del sedimento y la disminución en el diámetro medio de las partículas en los primeros 50km. Se tomó un valor base de 0.04. Los ajustes de rugosidad, se obtienen a partir de la fórmula:

$n = (n_0 + n_1 + n_2 + \dots + n_n)m = 0.21$ <p>Valores de:</p> <ul style="list-style-type: none"> $n_0 = 0.175$ (valor base) $n_1 = 0.008$ (grado de irregularidad) $n_2 = 0.0125$ (variaciones en la sección transversal) $n_3 = 0.01$ (obstrucciones presentes en el canal) $n_4 = 0$ (cantidad de vegetación en el canal) $m = 1$ (presencia de meandros) 	<p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> n = valor base $n_0, n_1, n_2, \dots, n_n$ = factores de ajuste de rugosidad m = ajuste por meandros
--	---

Con base en los valores anteriores, el valor de Manning usado para las simulaciones fue de $n= 0.21$.

c) Granulometría.

Para calibrar el modelo de transporte de sedimentos se requiere conocer la granulometría en el cauce activo, por lo tanto, se seleccionaron diversos 10 sitios a lo largo del cauce para conocer la granulometría y sus cambios con la distancia. Adicionalmente, se tomaron muestras a lo ancho del cauce, para ver las variaciones longitudinales en las características granulométricas. En las zonas donde se observó una preponderancia del material grueso ($>-4\phi$ o 16mm) se completó el análisis granulométrico por medio del análisis de imágenes ópticas.

Para realizar los análisis granulométricos, las fracciones con diámetro igual o mayor a -3ϕ (16mm), se midieron a través de fotografías digitales por medio del método de intersecciones de Rosiwal (Rosiwal, 1898; Sarocchi, 2007). En este método, se crea una máscara sobre la imagen, constituida por una serie de líneas paralelas, separadas a intervalo regular, en función del diámetro promedio de las partículas (Figura 3a). A continuación, se mide la longitud total de las líneas de referencia y la longitud de las intersecciones sobresalientes de los rasgos o longitud de los clastos (Figura 3b) y mediante la relación:

$Ll/Lt=Aa/At=Va/Vt$	Donde: Ll= longitud de las intersecciones de los rasgos Lt= longitud total de la línea analizada Aa= área ocupada por los rasgos de las partículas At= área total analizada Va= volumen ocupado por la partículas Vt= volumen total analizado
---------------------	---

se obtiene el volumen de los clastos de los clastos y volumen de matriz.

Las fracciones entre -3 y 4ϕ (8mm a $63\mu\text{m}$) fueron tamizadas en seco a intervalos de 1ϕ por medio de agitación manual.

Debido a que en todas las muestras los valores de la fracción menor a $63\mu\text{m}$ (4ϕ) no superó el 1wt% no se consideró necesario analizar la fracción fina.

Los valores obtenidos por los dos métodos de análisis granulométrico, se normalizaron y juntaron, con el fin de representar la distribución granulométrica total. Una vez realizados los análisis granulométricos, se obtuvieron los parámetros estadísticos con el software DECOLOG 5.1. (Borselli & Sarocchi, 2004, 2015), el cual utiliza el método Montecarlo para obtener los parámetros sedimentológicos clásicos (Folk, 1980) que son la media (Mz), la

desviación estándar (s), la asimetría (Sk) y la curtosis (k) y permite individualizar y caracterizar de forma automática hasta tres de las modas que constituyen las mezclas aproximándolas con curvas lognormales.

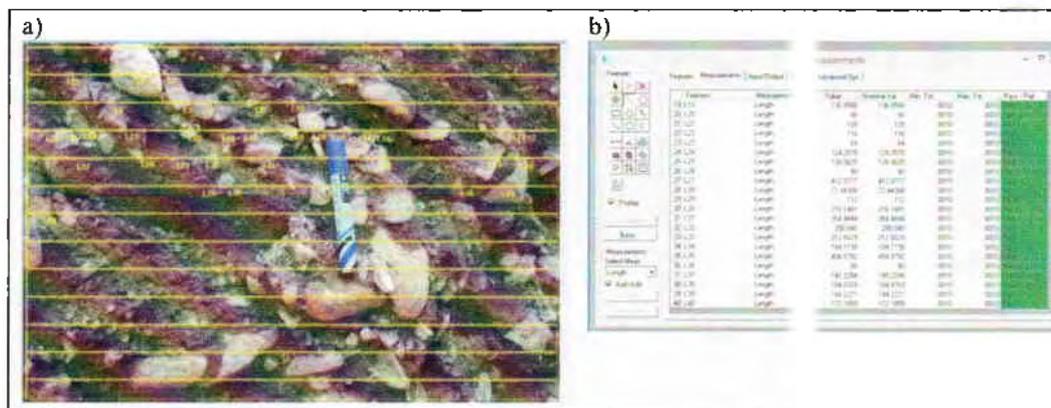


Figura 3. Obtención de la granulometría por el método de intersecciones de Rosiwal (1898). a) Máscara construida sobre la imagen calibrada con una serie de líneas paralelas. b) Tabla con los datos asociados a cada una de las partículas ubicadas sobre la máscara.

d) Conductividad hidráulica.

La conductividad hidráulica se estimó a partir de datos de campo con un infiltrómetro de doble anillo. Tanto la metodología como los resultados se encuentran descritos en la sección del modelo hidrológico.

e) Hidrograma.

Hidrograma para la simulación del derrame

El hidrograma de entrada para las simulaciones se estimó a partir de un $V= 40\ 000\text{m}^3$ que es el volumen máximo que fue estimado para el derrame y que es el único dato conocido para el cálculo de este. Para estimar el hidrograma se requiere conocer el gasto ($Q= A*v$), y el tiempo de duración del evento. En un hidrograma, el área bajo la curva representa el volumen. Por lo tanto, si se asume un caudal uniforme, entonces:

$$Q= (Q1+Q2+Q3+..+Qn)/\Delta T$$

El tiempo de duración del derrame para para las simulaciones fue de $t= 3, 6, 12, 24, 48$ horas (Figura 4) y el ΔT se obtuvo dividiendo el tiempo total en 25 pasos de magnitud constante. El cálculo de los hidrogramas se puede observar en el Apéndice A.

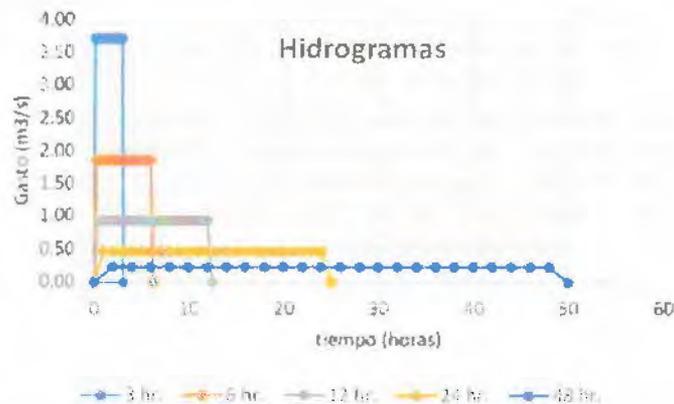


Figura 4. Hidrogramas utilizados para las simulaciones del derrame de sulfato de cobre. En todos los casos el área de bajo la curva representa el volumen total del derrame de $40\,000\text{m}^3$.

Hidrogramas para el transporte de sedimentos por el huracán Odile

Para la simulación del transporte de sedimentos se utilizó el dominio computacional 2 (Figura 2a), que incluye la cuenca denominada como La Trampa y la subcuenca del río Tinajas. Se utilizaron 2 tipos de entradas, ambas generadas a partir del modelo hidrológico. Para el cauce del río Tinajas, se usaron 3 hidrogramas ubicados de manera que se observara el aporte de los principales secundarios al caudal principal (Figura 5a). El tiempo de duración de la hidrógrafa fue de 197 horas y abarca del 17 al 25 de septiembre del 2014, con datos de lluvia cada hora (Figura 6). Aunque el huracán Odile ocurrió del 10-19 de septiembre, los datos del modelo hidrológico indican que existió un gasto significativo en el cauce de los ríos Tinajas y Bacanuchi, hasta 6 días después de finalizado el evento hidrometeorológico. Las tablas de entrada con los datos del gasto a intervalos de 1hr. se pueden observar en el Apéndice A.

Por otro lado, para la zona ubicada fuera de la cuenca del río Tinajas pero dentro de la cuenca de La Trampa se utilizaron los datos de lluvia generados por el modelo hidrológico (Figura 5b).

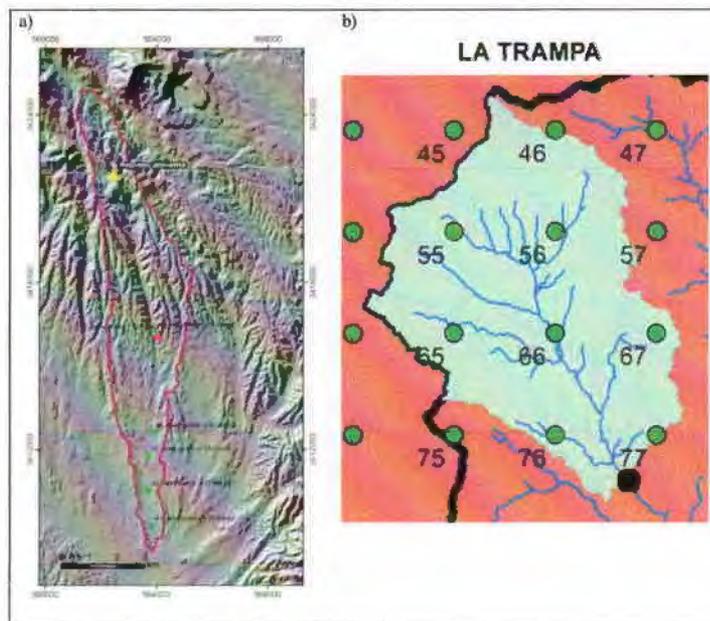


Figura 6. a) Mapa de ubicación de los hidrogramas de entrada (puntos A5, A4 y A1) para las simulaciones de transporte de sedimentos.. La línea roja delimita la cuenca del río Tinajas. El triángulo amarillo y el pentágono rosa, muestran la ubicación del represo poniente y represo de emergencia respectivamente. b) Inflows dentro de la cuenca La Trampa.

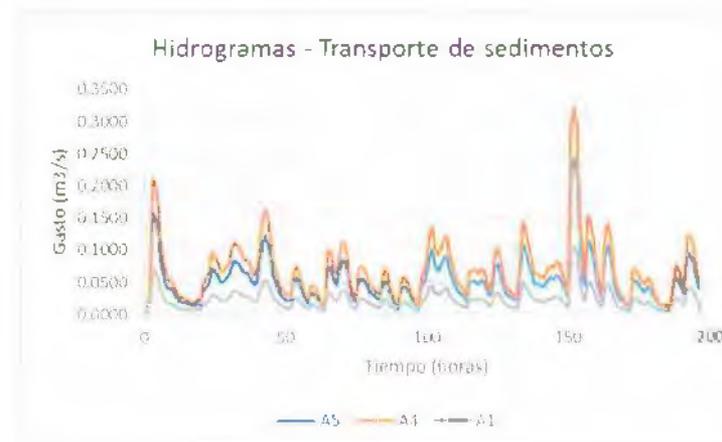


Figura 5. Hidrogramas utilizados como datos de entrada para la simulación del transporte de sedimentos.

Resultados preliminares

Características granulométricas de los sedimentos del cauce

Los histogramas granulométricos muestran distribuciones bimodales especialmente en la zona comprendida entre 0-36 km (Figura 7). La moda de la fracción gruesa se observa en las fracciones de 8/4 mm ($-3/2\phi$) y la moda en la fracción arenosa predomina en la fracción de 0.5mm (1ϕ). A partir del Sitio 2 (36.2 km al sur del sitio del derrame), los histogramas granulométricos muestran una distribución unimodal con moda en la fracción arenosa en la fracción de 0.5mm (1ϕ) y 0.25mm (2ϕ). Después de los 100 km hay tanto distribuciones bimodales como unimodales (Figura 8).

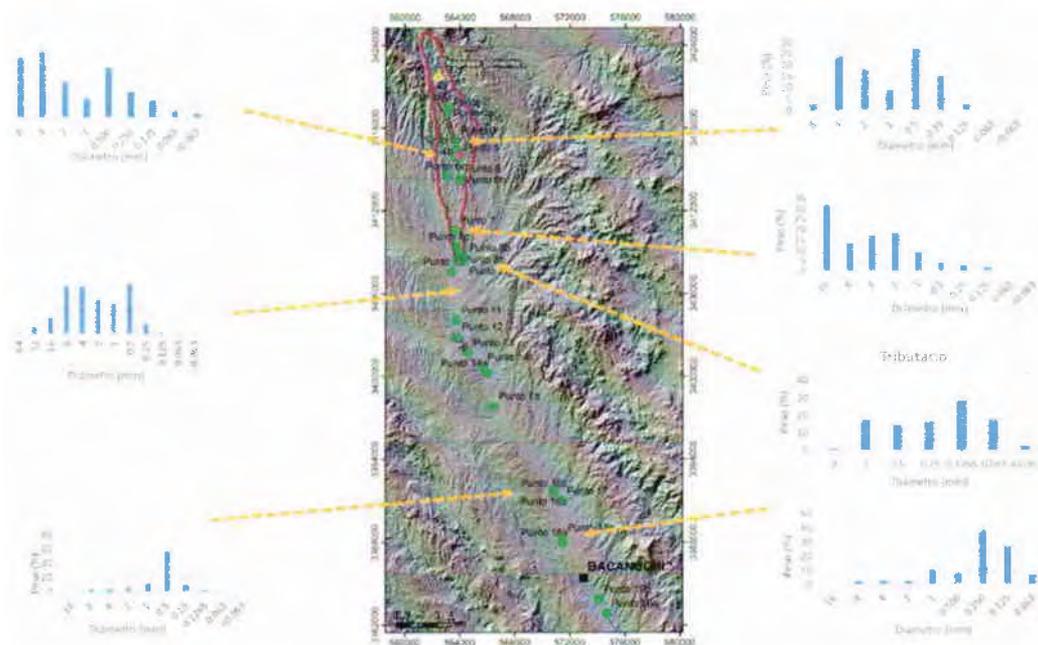


Figura 7. Histogramas granulométricos del cauce activo. El triángulo amarillo indica la zona del derrame, el pentágono rosa la ubicación del represo de emergencia y los círculos verdes los sitios de muestreo.

Los parámetros estadísticos (Apéndice B), indican un decremento en el valor del diámetro medio de los sedimentos del cauce con la distancia hasta el Sitio 1 localizado al norte de Bacanuchi (tabla 1; Figura 9b), lo cual se confirma con en el valor de la mediana (q_{50} ; Figura 9a). Posterior a este punto, el valor de la media aumenta en las zonas más distales de la cuenca del río Sonora, desde Arizpe hasta Topahue.

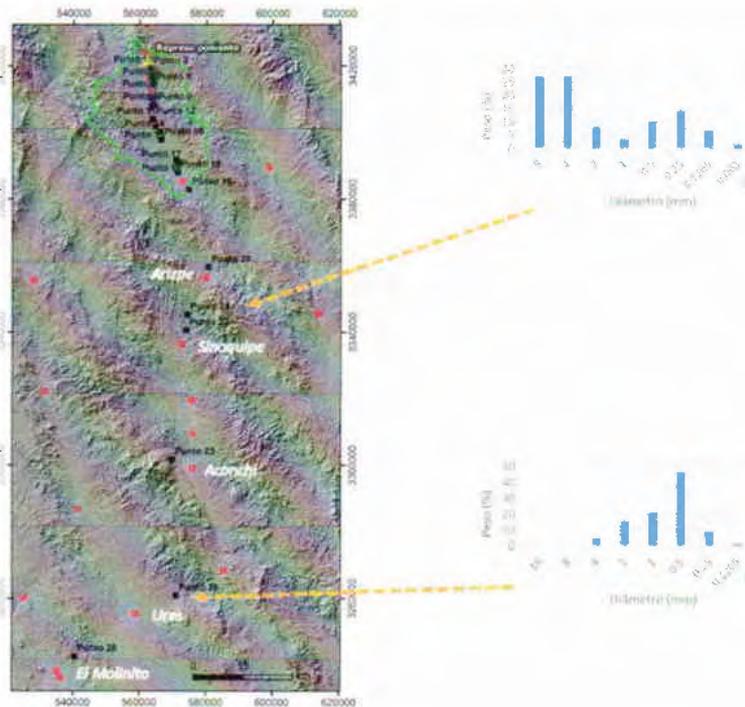


Figura 8. Histogramas granulométricos del cauce activo en la zona distal. Los cuadros negros indican puntos de muestreo y los rojos la ubicación de estacione de Conagua. Los polígonos rojo y verde delimitan las cuencas del río Tinajas y La Trampa respectivamente.

La desviación estándar indica un grado de selección de los sedimentos de malo a muy malo, lo que indica una gran variabilidad en su tamaño a lo largo de todo el cauce (Figura 9c) y se refleja en la bimodalidad de los histogramas granulométricos (Figura 7). Sin embargo, se observa que en los primeros 50km existe una tendencia a la disminución de este parámetro con la distancia, es decir, indica una mejora en el grado de selección de los sedimentos.

Los valores de la asimetría muestran una asimetría positiva en las muestras ubicadas a aprox. 6.7km con respecto a la zona del derrame. Esto indica un exceso de material fino con respecto a una curva de distribución normal. Con la distancia, la asimetría cambia a valores positivos, que indican un exceso de material grueso, producto del aumento de las fracciones arenosas con la distancia. Hacia la zona más distal, después de los 100km, la asimetría vuelve a cambiar a positiva.

A nivel general, todos los parámetros estadísticos reflejan un cambio abrupto posterior a los 50km de distancia a partir del derrame. Este cambio se correlaciona con la unión del afluente del cauce proveniente de la zona de Bacoachi, que causa el cambio de histogramas granulométricos unimodales a bimodales y un incremento en los valores de q_{50} , la media, la

desviación estándar y la asimetría. Esto es evidencia, de que este cauce tributario, incorpora gran cantidad de material grueso al cauce del río Sonora.

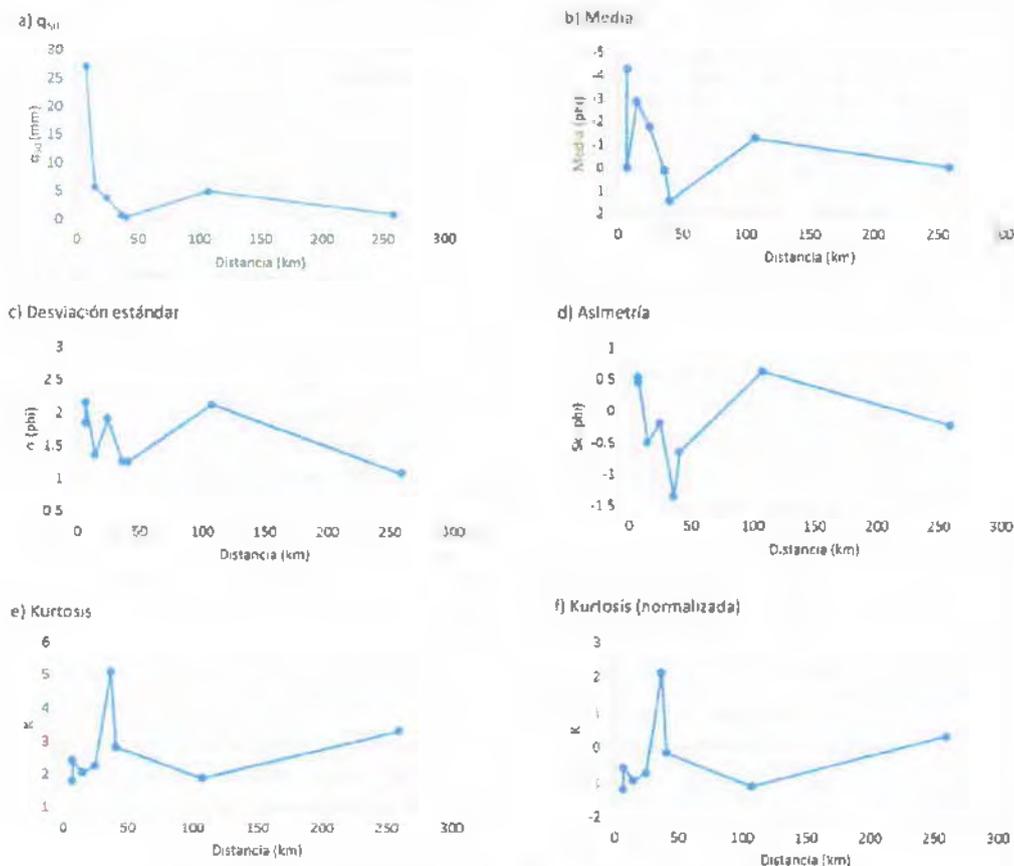


Figura 9. Parámetros estadísticos de las muestras del cauce del Río Sonora y su variación con la distancia.

Variabilidad de las características granulométricas a lo ancho del cauce.

En la parte central de la cuenca del río Tinajas, entre los 6.7 y 14 km de distancia del derrame (Figura 10a), los histogramas granulométricos muestran distribuciones unimodales y bimodales con modas en las fracciones de 4mm (-2ϕ) y 0.5mm (1ϕ) por lo tanto, las distribuciones granulométricas son muy similares a las del cauce activo. Sin embargo, en la salida de la cuenca del Tinajas a 14.5 km, de la zona del derrame los histogramas son bimodales con modas en 16mm (-4ϕ) y 2mm (-1ϕ) y el contenido de arena es muy bajo (<18wt%) por lo tanto, evidencian una zona enriquecida en material grueso (Figura 10b).

En la zona más distal, a 40.3 kilómetros de distancia (Figura 11b), es donde se observa la mayor variabilidad granulométrica a lo ancho del cauce ya que en los márgenes laterales el histograma muestra una distribución bimodal, con modas en las fracciones de 8mm (-3ϕ) y 1mm (0ϕ). En contraste, el cauce activo muestra una distribución unimodal, donde predomina la fracción arenosa.

a) Sitio 6 – 6.7 km
Norte del represo de
emergencia



b) Sitio 5 – 14.5 km

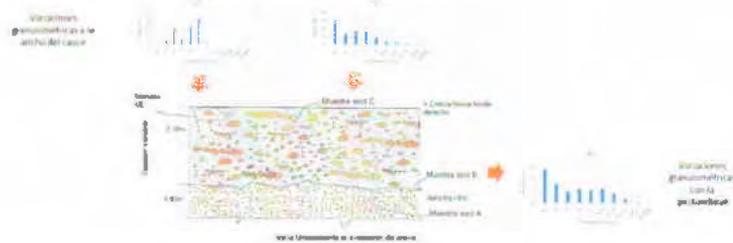


Figura 10. Variación de la granulometría en la cuenca del río Tinajas. Se muestra la variación en la distribución granulométrica a lo ancho del cauce y con la profundidad.

Variación de la granulometría con la profundidad

Los resultados de los análisis granulométricos indican una variabilidad muy importante con la profundidad. La muestra localizada a 6.7 km kilómetros de la zona del derrame y 2.9 m de profundidad contiene únicamente material con diámetro mayor a 2mm (grava) y predominan las fracciones de 32mm (-5ϕ) y 2mm (-1ϕ) (Figura 10a).

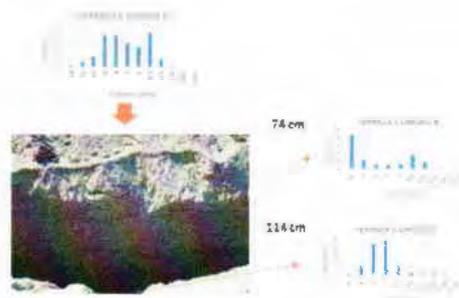
La muestra ubicada a 14.5 km de distancia muestra también claras diferencias con respecto al sedimento en superficie. Entre los 0.43 y 2.53 m el sedimento muestra un incremento en la fracción arenosa y llega a constituir hasta el 35wt% (Figura 10b).

A 24.5 km de distancia se realizaron análisis granulométricos a 74 cm y 114 cm. La muestra ubicada a 74 cm muestra una distribución bimodal (Figura 11a). Se observa un aumento en

la fracción de 16mm (-4ϕ) y una moda menos pronunciada en la fracción de 0.5mm (1ϕ). A 1.14m de profundidad la distribución de los sedimentos se vuelve unimodal y más del 70% de la muestra pertenece a las fracciones entre 2 y 4mm (-2 y -1ϕ).

a) Sitio 3 – 24.5 km

Variaciones granulométricas a lo ancho del cauce



Variaciones granulométricas con la profundidad

b) RA Sitio 1– 40.3 km



Figura 11. Variación de la granulometría desde la salida de la cuenca del río Tinajas hasta la zona de Bacanuchi. Se muestra la variación en la distribución granulométrica a lo ancho del cauce y con la profundidad.

Resultados de las simulaciones en condiciones saturadas del terreno (no hay infiltración)

Los resultados de las simulaciones permiten observar la distribución probables escenarios, en la figura 12 se observan los resultados para los $t= 3, 6, 12, 24$ y 49 horas en condiciones saturadas del terreno, es decir no hay infiltración de la solución de sulfato de cobre.

Se puede observar que en todos los escenarios el derrame se mantiene dentro de la cuenca del río Tinajas. Dentro de las simulaciones las de mayor extensión son aquellas en donde la fuga de material se da en un lapso de 24 y 48 horas. En estos escenarios el alcance máximo es de 13 kilómetros partir del represo poniente.

Resultados de las simulaciones en condiciones no-saturadas (infiltración)

Un escenario alternativo es que el derrame ocurrió bajo condiciones no-saturadas del terreno. En este caso parte de la solución de sulfato de cobre se infiltraría. El volumen de infiltración dependerá del tiempo de duración del derrame y, de acuerdo con los resultados, variará desde un 14% en el escenario de 6 horas hasta un 67% para el escenario de 48 horas lo que restringe su movilidad río abajo (tabla 1; Figura 13).

En la figura 13 se muestra una comparación de los resultados de las simulaciones en suelo saturado y en suelo no saturado para el mismo tiempo de simulación. Se observa que en condiciones no-saturadas el alcance es de entre 1 y 1.5 km menor que en condiciones saturadas del terreno.

Escenarios de distribución inicial del derrame.

GRID: 15m

Salida de 40 000 m³ en:

t= 3	
t= 6	
t= 12	
t= 24	
t= 48	

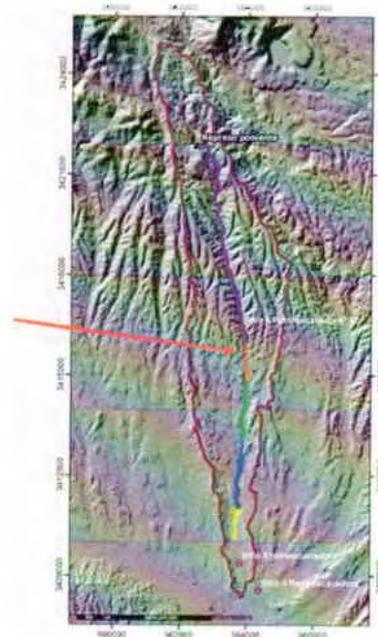


Figura 12. Resultados de las simulaciones del derrame de sulfato cobre. Las simulaciones fueron realizadas bajo condiciones saturadas del terreno.

Resultados del transporte de sedimentos

De acuerdo con las características granulométricas (Figuras 7-9), la mejor ecuación para simular el transporte de sedimentos fue MPM-Smart (Smart, 1984).

Los resultados de las simulaciones tienen 2 salidas: a) Mapa de zonas erosión y; b) Mapa de sedimentación.

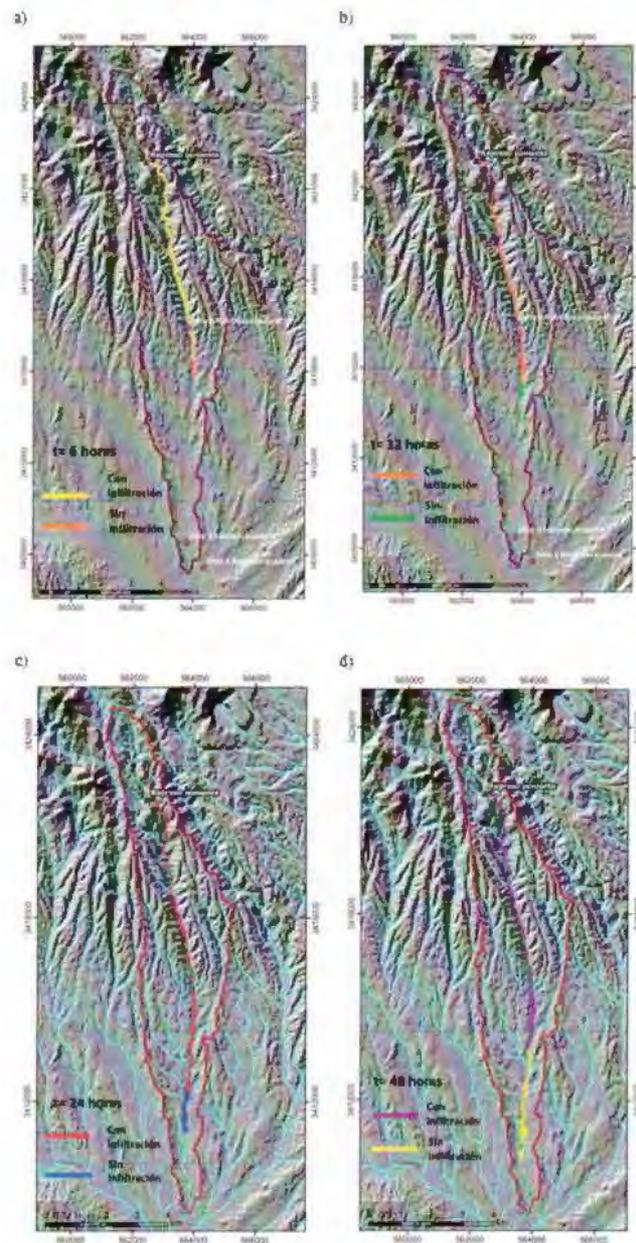


Figura 13. Comparación de los resultados de las simulaciones del derrame de sulfato de cobre, con y sin infiltración. La línea roja delimita la cuenca del río Tinajas.

a) Mapas de zonas propensas a la erosión.

El mapa de erosión indica que dentro de la cuenca del río Tinajas no hay erosión durante las lluvias ocasionadas por Odile (Figura 14). Los procesos erosivos comienzan río abajo, una vez que el cauce principal es alimentado por otros cauces secundarios, a partir de la salida de la cuenca del río Tinajas y hasta el poblado de Bacanuchi, esta zona corresponde a la cuenca denominada La Trampa (Figuras 15-17). El mapa de erosión muestra 4 zonas en donde se concentra la erosión y es donde el material contaminado por el derrame es susceptible de ser removilizado.

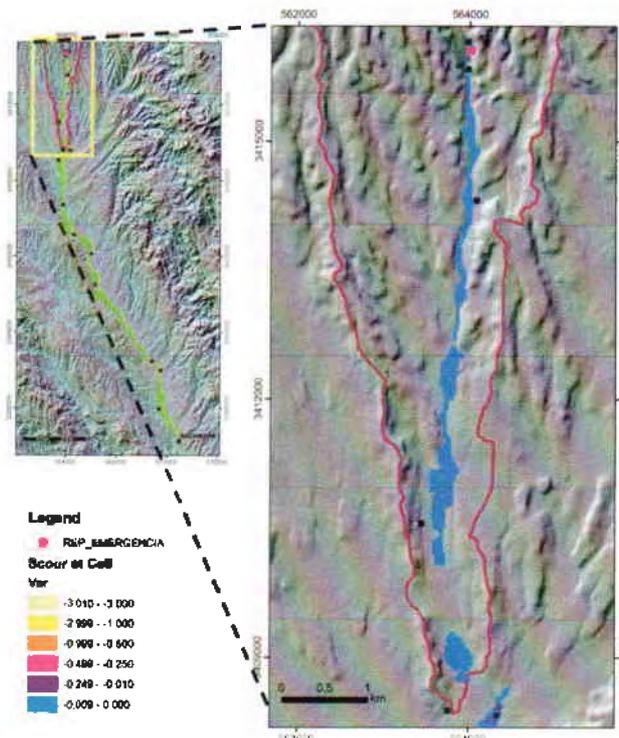


Figura 14. Resultados de la simulación del transporte de sedimentos para la cuenca del río Tinajas. El recuadro indica su ubicación con respecto al área total de la simulación. El pentágono rosa indica la localización del represo de emergencia. La línea roja delimita la cuenca del río Tinajas.

La *zona 1* (Figura 15), abarca de los 16-21.3 kilómetros aproximadamente (el punto de referencia es el represo poniente, zona donde ocurrió el derrame). La erosión del lecho del cauce varía de 1 a 25cm y se centra en la parte central del canal. Localmente, en una zona de curvatura del río, la erosión es mayor a 25cm y llega a alcanzar -1 m.

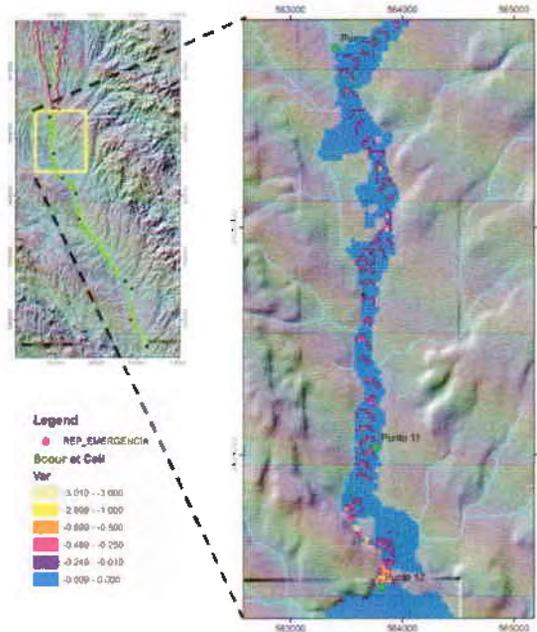


Figura 15. Resultados de la simulación del transporte de sedimentos para la cuenca del río Tinajas. Se muestran en detalle los resultados de la zona 1. El recuadro indica su ubicación con respecto al área total de la simulación.

Las *zona 2* (Figura 16) y *3* (Figura 17), abarcan desde los 25 a los 28km y de los 30.8 a 32.2 km respectivamente, la erosión en ambas zonas abarca hasta los 25cm de profundidad del lecho del cauce. Finalmente, *la zona 4* (Figura 18), es la zona más distal de la simulación y va de los 40 a los 42.5km, en general el potencial de erosión abarca los 25cm de profundidad del lecho del cauce pero, localmente, la erosión puede penetrar hasta los 50cm de profundidad.

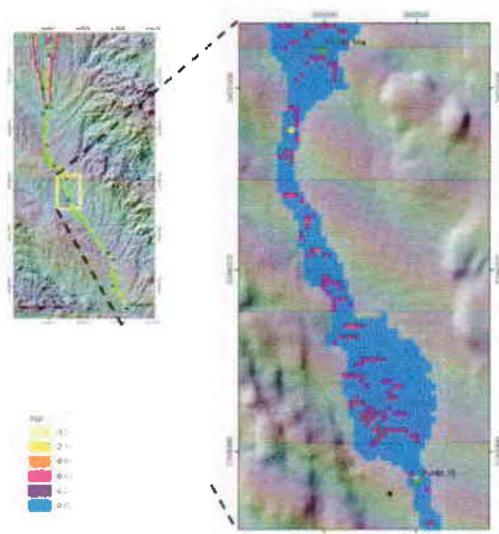


Figura 16. Resultados de la simulación del transporte de sedimentos. Se muestran en detalle los resultados de la zona 2. El recuadro indica su ubicación con respecto al área total de la simulación. El pentágono rosa indica la localización del represo de emergencia.

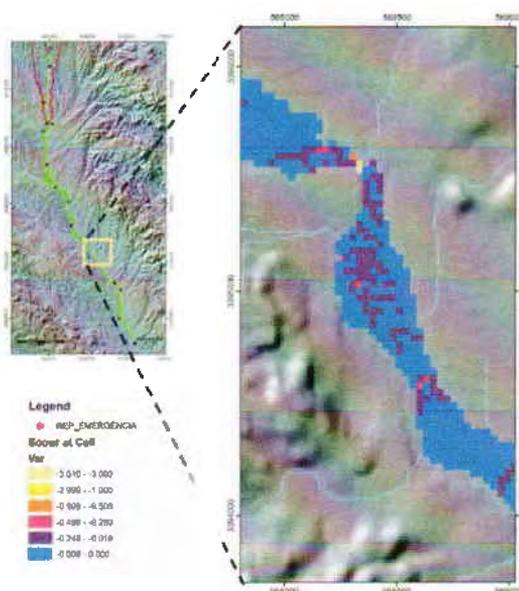


Figura 17. Resultados de la simulación del transporte de sedimentos. Se muestran en detalle los resultados de la zona 3.

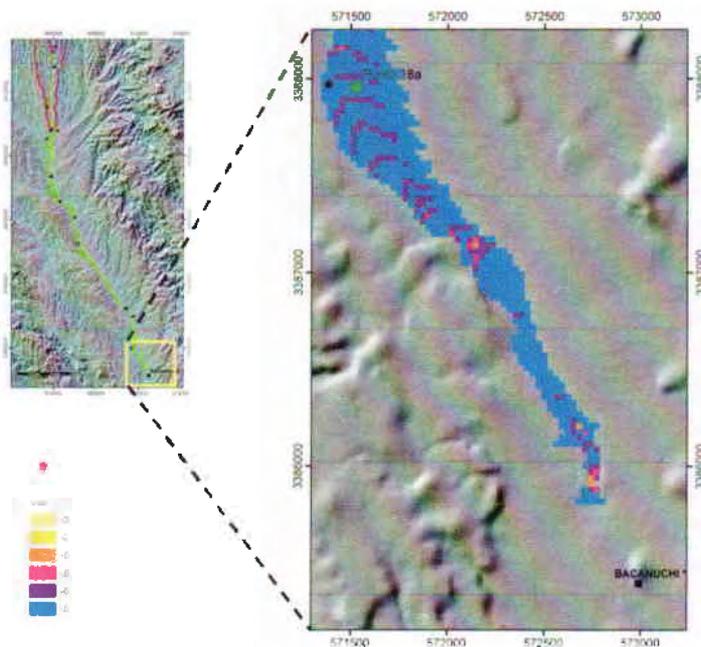


Figura 18. Resultados de la simulación del transporte de sedimentos. Se muestran en detalle los resultados de la zona 4.

b) Mapa de zonas de depósito

El resultado de las simulaciones muestra que las zonas de depósito se encuentran distribuidas a lo largo del cauce (Figuras 19 y 20), a diferencia de las zonas de erosión. Lo anterior indica, que durante las lluvias ocasionadas por el Huracán Odile hubo periodos de alternancia entre erosión y depósito que conducirían a patrones de redistribución de sedimentos contaminados muy complejos. El depósito provoca un agradación del lecho de que varía de 1-20 cm y, de manera muy localizada puede alcanzar hasta 1m. El patrón de erosión-sedimentación se corrobora a los 24.5 km, en el punto de muestreo denominado Sitio 3 (retroexcavadora), donde se encontró una superficie de erosión que afectaba los sedimentos contaminados, por encima de la superficie de erosión se encontraron sedimentos “frescos” es decir, sin marcas de contaminante (Figura 21). El espesor de estos sedimentos era entre 10 cm y más de 1m. Los resultados de las simulaciones en este punto indican una deposición de entre 10 y 40 cm y a unos metros del sitio 3 de hasta 1.3m. Lo cual indica, una buena concordancia entre los resultados de las simulaciones y el dato medido en campo.

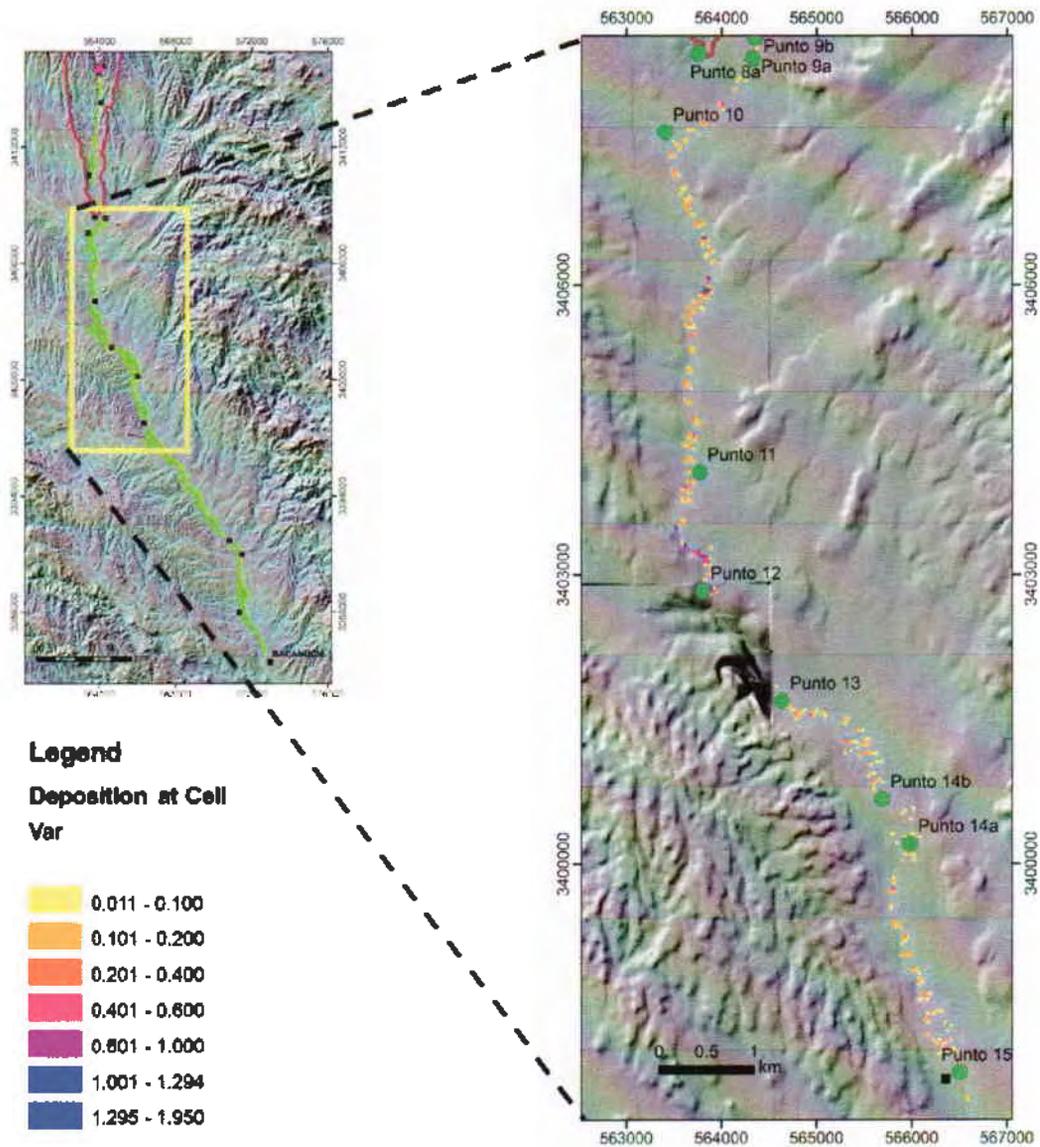


Figura 19. Resultados de las simulaciones de transporte de sedimentos donde se muestran las zonas de depósito distribuidas a lo largo del cauce. La parte norte del mapa se encuentra a la salida de la cuenca del río Tinajas mientras que el límite sur es a los 28 km a partir de la zona del derrame.

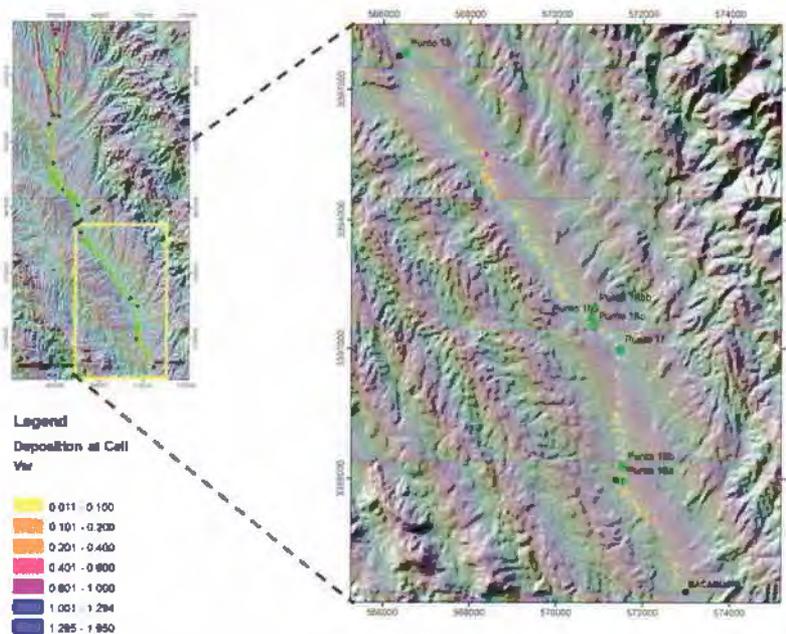


Figura 21. Resultados de las simulaciones de transporte de sedimentos donde se muestran las zonas de depósito distribuidas a lo largo del cauce. La parte norte del mapa se encuentra a los 28km a partir de la zona del derrame y el límite sur es el poblado de Bacanuchi.



Figura 20. Superficie de erosión y depósito a 24.5 km de la zona del derrame. La superficie de erosión afecta los sedimentos contaminados que fueron cubiertos posteriormente por sedimentos "frescos".

Conclusiones y trabajo futuro

Los análisis granulométricos indican que en la zona de la cuenca del río Tinajas las características granulométricas del cauce son homogéneas, sin embargo, existe una gran variabilidad en la textura de los sedimentos con respecto a la profundidad. Con la distancia, las características granulométricas indican que hay una mayor variabilidad a lo ancho del cauce.

Los resultados de las simulaciones indican que la solución de sulfato de cobre, en todos los escenarios, se mantuvo dentro de la cuenca del río Tinajas independientemente de las condiciones iniciales del terreno (suelo saturado vs suelo no saturado). Sin embargo, es necesario realizar más simulaciones a mayor resolución del modelo digital de elevación, ya que a la resolución utilizada, en esta etapa preliminar, existe evidencia de que el derrame inicial se extendió más allá de la cuenca del río Tinajas. Otro de los factores que pudieron tener una influencia significativa es si, al momento del derrame, existía agua fluyendo en algún punto del cauce del sistema Tinajas-Bacanuchi. Los resultados del gasto en todos los afluentes se incluirán en las simulaciones una vez afinado el modelo hidrológico para estos puntos.

Con respecto al transporte de sedimentos, se observa que el software FLO2D con el switch de transporte de sedimentos adaptado ecuación MPM-Smart, demostró ser sensible a los valores de entrada para el sistema Tinajas-La Trampa (Bacanuchi). Los mapas de erosión y depósito indican que hubo periodos de alternancia de erosión y deposición durante las lluvias ocasionadas por el Huracán Odile. Las zonas de erosión se centralizaron en 4 zonas ubicadas dentro de la cuenca de La Trampa y se centran en las partes centrales del canal y en las zonas de curvatura. Las corrientes ocasionadas por las lluvias fueron capaces de remobilizar, de manera general, 25cm del lecho del cauce, y en zonas extremas y muy focalizadas hasta 1m. Por otro lado, las zonas de depósito se encuentran distribuidas a lo largo de toda la cuenca y ocasionaron cambios de elevación en el substrato, generalmente, entre 1 y 40cm.

Para determinar con mayor precisión la zona de influencia del derrame de sulfato de cobre y las zonas de remobilización de sedimentos, se deben de correr las simulaciones a mayor resolución del modelo digital de elevación. Con respecto al transporte de sedimentos, también se deben correr simulaciones incorporando los datos de escurrimiento de todos los cauces tributarios y generar un grupo de simulaciones, con los mismos puntos de entrada, pero con el escurrimiento ocasionado por el Huracán Norberto.

Referencias

- Borselli, L., & Sarocchi, D. (2004, 2015). DECOLOG (Version 5.0).
- Folk, R. (1980). *Petrology of Sedimentary Rocks*: Hemphill Publishing Company.
- O'Brien, J., Julien, P., y Fullerton, W. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(2), 244-261.
- O'Brien, J. (2001). *FLO-2D users manual*. Nutrioso Arizona, 63pp.
- Phillips, J. V. y Tadayon, S. (2006). Selection of Manning's roughness coefficient for natural and constructed vegetated and non-vegetated channels, and vegetation maintenance plan guidelines for vegetated channels in Central Arizona: US Department of the Interior, US Geological Survey, Scientific Investigations Report 2006-5108, 40pp.
- Rosiwal, A. (1898). Über geometrische Gesteinsanalysen usw: *Verhandl. . Geol. Reichsanst*, 5, 143-175.
- Sarocchi, D. (2007). Estudio sedimentológico del depósito de flujo de bloques y ceniza del 17 de julio de 1999 en el volcán de Colima (Vol. 11). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Smart, G. M. (1984). Sediment transport formula for steep channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(3), 267-276.