



CIATEC

SIMULACIÓN DE FLUJO Y TRAZADO DE PARTÍCULAS
GENERADAS POR UN DEPOSITO DE JALES MINEROS, PARA EL
ANÁLISIS DE RIESGO EN LA ZONA DE ALTA VULNERABILIDAD
DEL ACUÍFERO SILAO-ROMITA, EN EL MUNICIPIO DE
GUANAJUATO

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

Maestro en Ciencia y
Tecnología en la
Especialidad de Ingeniería
Ambiental

PRESENTA

José de Jesús Esparza Claudio



León, Guanajuato, México Marzo del 2011

TITULO:
**“SIMULACIÓN DE FLUJO Y TRAZADO DE PARTÍCULAS
GENERADAS POR UN DEPOSITO DE JALES MINEROS,
PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO EN LA ZONA DE ALTA
VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO SILAO-ROMITA, EN
EL MUNICIPIO DE GUANAJUATO”**

PRESENTA:

José de Jesús Esparza Claudio

Ing. Agrónomo en Irrigación

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

PICYT

Maestría: Ingeniería en Ambiental

Comité Tutorial:

Dr. Ricardo Jaime Guerra Sánchez (CIATEC)

Dr. Francisco Rodríguez (CIDETEQ)

Dr. José Alfredo Ramos Leal (IPICyT)

ÍNDICE

I.	RESUMEN.....	11
II.	INTRODUCCIÓN.....	12
III.	ANTECEDENTES.....	14
	a) La minería en Guanajuato.	14
	b) Residuos Mineros en Guanajuato.....	14
	c) Contaminación por Residuos Mineros.	15
	d) Contaminación del Agua por Residuos Mineros.....	16
IV.	DEFINICIÓN DEL PROYECTO.	18
V.	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.	18
VI.	OBJETIVOS.	19
	e) Objetivo General.	19
	f) Objetivos Particulares.	19
VII.	MARCO TEÓRICO.....	20
	g) Tipos de Acuíferos.	20
	1) Según el Grado de Confinamiento.	20
	2) Según los Materiales Litológicos.	21
	3) Según la Permeabilidad del Acuífero.	21
	h) Movimiento del Agua en Medio Poroso.	22
	4) Porosidad.....	22
	5) Conductividad Hidráulica.	23
	6) Coeficiente de Almacenamiento.	23
	7) Ley de Darcy.	24
	i) Ecuaciones de Conservación de Masa.....	25
	8) Régimen Estacionario.	25
	9) Régimen Transitorio.....	27
	j) Mecanismos de Transporte de Contaminante.	28
	10) Advección.....	28
	11) Dispersión.....	29

12)	Difusión.....	29
13)	Sorción:	30
14)	Adsorción.....	30
15)	Precipitación.....	31
16)	Coefficiente de Distribución (Kd) en Metales.....	31
k)	Ecuaciones Fundamentales de Flujo de Aguas Subterráneas.....	31
17)	Ley de Darcy para Medio Anisótropo.....	32
18)	Ecuación de Continuidad.....	32
l)	Ecuaciones Fundamentales de Flujo de Aguas Subterráneas.....	32
m)	Resolución de la Ecuación General de Flujo por Diferencias Finitas.....	33
n)	Modelo Clásico de Transporte	34
o)	Métodos de Solución de Transporte en Aguas Subterráneas.....	34
p)	Programas para Flujo de Aguas Subterráneas.....	36
q)	Programas de Trazado de Partículas.....	37
VIII.	METODOLOGÍA.....	38
r)	Zona de Estudio.....	38
s)	Selección de Presas o Depósitos de Jales para Muestreo.....	39
t)	Toma de Muestras.....	39
19)	Presa de jales de la compañía minera Las Torres.....	40
20)	Presa de jales mina Bolañitos.....	41
21)	Deposito de jales Pozuelos.....	41
22)	Presa de jales de jales minera El Rosario.....	42
u)	Toma de muestras.....	42
v)	Análisis de Muestras.....	46
w)	Pruebas Químicas.....	47
23)	pH.....	48
24)	Conductividad Eléctrica.....	48
x)	Difracción de Rayos X.....	48
y)	Método de Extracción de Metales.....	49

z)	Análisis Mineralógico.....	49
aa)	Vulnerabilidad Intrínseca.....	49
25)	Método DRASTIC.....	50
26)	Método AVI.....	51
bb)	Selección del Sitio para Evaluación de Escenario y Simulación de Trazado de Partículas. 52	
cc)	Generación del Modelo Conceptual.....	52
dd)	Generación del Modelo de Flujo.....	53
ee)	Calibración del Modelo.....	54
ff)	Trazado de Partículas.....	54
IX.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
gg)	Selección de Depósitos y Presas de Jales.....	56
hh)	Análisis de Muestras.....	57
27)	Pruebas Químicas en descargas.....	57
28)	pH en descargas.....	58
ii)	Concentración de Metales (NOM-52-SEMARNAT-1993).....	58
jj)	Pruebas Acido-Base (NOM-141-SEMARNAT-2003).....	63
kk)	Identificación Mineralógica por Difracción de Rayos X.....	66
ll)	Extracción de Metales.....	67
mm)	Vulnerabilidad Intrínseca.....	71
nn)	Selección del Sitio para Evaluación de Escenario.....	73
oo)	Generación de Escenario.....	74
pp)	Estimación de Residuos Mineros.....	77
qq)	Migración de la Fuente Contaminante a la Zona de Alta Vulnerabilidad.....	79
rr)	Modelo Conceptual.....	80
29)	Climatología.....	80
30)	Topografía.....	82
31)	Acuífero Silao-Romita.....	83
32)	Geología.....	84

33)	Hidrogeología.....	86
34)	Hidroestratigrafía.	87
35)	Hidrología Superficial.	87
ss)	Construcción del Modelo de Flujo.	88
36)	Selección de Unidades.	88
37)	Los Parámetros de Entrada del Modelo de Flujo.	88
38)	Tiempo de Simulación.	88
39)	Definición del Dominio del Sistema.	88
40)	Discretización o Malla del Modelo.	89
41)	Numero de Niveles o Capas a Considerar.....	91
42)	Asignación de Propiedades del Acuífero.	93
43)	Conductividad Hidráulica.	93
44)	Coficiente de Almacenamiento.	94
45)	Rendimiento Específico.	94
46)	Porosidad.....	94
47)	Condiciones de Frontera.....	94
48)	Carga Constante.	95
49)	Ríos.	96
50)	Presa La Purísima.....	99
51)	Recarga.....	100
52)	Celdas Inactivas.....	101
tt)	Calibración del Modelo de Flujo.....	102
uu)	Condiciones de Ejecución del Modelo de Flujo.....	103
vv)	Reporte Estadístico de Visual ModFlow.....	106
ww)	Trazado de Partículas.	107
X.	CONCLUSIONES.....	111
XI.	PERSPECTIVAS.	113
XII.	BIBLIOGRAFÍA.....	114

Índice de Tablas

Tabla II-1 Relación de la actividad minera y su impacto al ambiente.	13
Tabla IX-1 Depósitos para puntos de muestreo de jales mineros.	57
Tabla IX-2 Resultados de parámetros fisicoquímicos de la descarga en la presa de Las Torres.	57
Tabla IX-3 Resultados de parámetros fisicoquímicos de la descarga de la mina El Rosario.....	57
Tabla IX-4 Resultados de pH de residuos mineros.	58
Tabla IX-5 Resultados de concentración de metales de la descarga en la presa de Las Torres.	59
Tabla IX-6 NOM-052-SEMARNAT-2005, segunda sección Pág., 7	59
Tabla IX-7 Resultados de concentración de metales en muestra compuesta, en la presa de Las Torres (en operación).	60
Tabla IX-8 Resultados de concentración de metales en muestra compuesta, en la presa de Las Torres (fuera de operación).	60
Tabla IX-9 Resultados de concentración de metales en muestra compuesta, en la presa de Bolañitos (en operación).	61
Tabla IX-10 Resultados de concentración de metales en la muestra tomada de la mina El Rosario.	62
Tabla IX-11 Resultados de concentración de metales en la muestra tomada del depósito de Pozuelos.	62
Tabla IX-12 Resultados de pruebas ABA para sitios muestreados en el distrito minero de Guanajuato.	65
Tabla IX-13 Resultados de concentración total de metales presentes en la muestra tomada del depósito de Pozuelos.	68
Tabla IX-14 Estimación del volumen de jales en el depósito de Pozuelos.	79
Tabla IX-15 Rangos de conductividad hidráulica para diferentes materiales.	93
Tabla IX-16 Características de los ríos en la zona de estudio.	97
Tabla IX-17 Parámetros de los pozos del CEAG.	102
Tabla IX-18 Parámetros finales de calibración.	104

Índice de Figuras

Figura VII-1 Cubo diferencial de volumen para deducción de la ecuación de continuidad.	25
Figura VII-2 Esquema de diferencias finitas (las interfaces entre la celda (i,j,k) y las seis celdas adyacentes se muestran con superficies sombreadas)	34
Figura VIII-1 Localización del municipio de Guanajuato.	38
Figura VIII-2 Presa de jales en operación, método de operación por flotación “bulk”.	40
Figura VIII-3 Presa de jales fuera de operación, actualmente es zona de reforestación.	40
Figura VIII-4 Cortina de la presa de jales de la mina Bolañitos.	41
Figura VIII-5 Vaso de la presa de jales, actualmente está operando.....	41
Figura VIII-6 Depósito de residuos mineros en Pozuelos.....	41
Figura VIII-7 Delimitación del depósito de jales en Pozuelos.....	41
Figura VIII-8 Planta de beneficio de la mina la Concepción.	42
Figura VIII-9 Planta de beneficio (molino).....	42
Figura VIII-10 Tubo de descarga de la mina Las Torres.	42
Figura VIII-11 Descarga en la presa de jales de la compañía La Torres.	42
Figura VIII-12 Toma de muestra en la parte poniente de la cortina.	43
Figura VIII-13 Toma de muestra en la parte oriente de la presa de jales.....	43
Figura VIII-14 Estado actual de la presa de jales.....	43
Figura VIII-15 Cubierta de tepetate en el vaso de la presa.	43
Figura VIII-16 Toma de muestra a 1 m de profundidad.	44
Figura VIII-17 Realización de muestra compuesta.....	44
Figura VIII-18 Toma de muestra de la parte central del vaso de la presa.....	44
Figura VIII-19 Diferentes perfiles de jal en la presa de la mina de Bolañitos.	44
Figura VIII-20 Método del cuarteo.	45
Figura VIII-21 Homogenización de muestras.....	45
Figura VIII-22 Coloración del jal depositado en Pozuelos.	45
Figura VIII-23 Toma de muestra en Pozuelos.	45
Figura VIII-24 Muestra homogenizada por método del cuarteo.....	46
Figura VIII-25 Muestra de agua del arroyo que cruza el depósito de jales en Pozuelos.....	46
Figura IX-1 Localización de minas, depósitos y sitios de muestreo de jales.	56
Figura IX-2 Toma de muestra de la descarga.....	58
Figura IX-3 Mediciones en campo.....	58
Figura IX-4 Potencial de neutralización de las presas y depósitos de jal muestreados en el distrito minero de Guanajuato.	64
Figura IX-5 Potencial de acidez de las presas y depósitos de jal muestreados en el distrito minero de Guanajuato.....	64

Figura IX-6	Potencial de generación de drenaje ácido (PN/PA).....	65
Figura IX-7	Difractograma de jales correspondientes a Pozuelos en muestra superficial.	66
Figura IX-8	Difractograma de jales correspondientes a Pozuelos en muestra a 1 mts de profundidad.	66
Figura IX-9	Deposito de jales en Pozuelos.	67
Figura IX-10	Perforación para toma de muestra a 1 m de profundidad.	67
Figura IX-11	Extracción de muestra a 1 m de profundidad.	67
Figura IX-12	Muestra homogenizada.....	67
Figura IX-13	Microanálisis por EDX de jales del depósito de Pozuelos.	69
Figura IX-14	Especies presentes de los minerales más abundantes en el depósito de Pozuelos.....	70
Figura IX-15	Índice DRASTIC para el municipio de Guanajuato.....	71
Figura IX-16	Índice AVI para municipio de Guanajuato.....	72
Figura IX-17	Zona para evaluación de escenario.....	73
Figura IX-18	. Zona de alta vulnerabilidad intrínseca.....	74
Figura IX-19	Diagrama Pourbaix del sistema pirita para Eh - pH.	77
Figura IX-20	Delimitación del depósito de jales de Pozuelos.	78
Figura IX-21	Zonificación del depósito de jales en Pozuelos.....	78
Figura IX-22	Esquema de la sección del depósito.	78
Figura IX-23	Ruta de migración de la fuente contaminante sobre el río Guanajuato.	80
Figura IX-24	Clima presente en la zona de estudio.	81
Figura IX-25	Precipitación media anual en la zona de estudio.....	82
Figura IX-26	Temperatura media anual en la zona de estudio.....	82
Figura IX-27	Modelo digital de elevación de la zona de estudio.....	83
Figura IX-28	Pendientes predominantes en la zona de estudio.....	83
Figura IX-29	Geología presente en la zona de estudio.	85
Figura IX-30	Hidrogeología presente en la zona de estudio.	86
Figura IX-31	Dominio del sistema.....	89
Figura IX-32	Discretización del dominio del área de estudio.....	90
Figura IX-33	Vista 3D de la malla en la zona de estudio.....	91
Figura IX-34	Localización de pozos.	92
Figura IX-35	Corte litológico.....	92
Figura IX-36	Perfil estratigráfico del área de estudio generado en ModFlow.	92
Figura IX-37	Vista 3D secciones o capas en la zona de estudio.	93
Figura IX-38	Vista 3D de recarga en la zona de estudio.....	96
Figura IX-39	Determinación de carga constante en el área de estudio.	96
Figura IX-40	Esquema de una celda tipo río.....	97
Figura IX-41	Celdas tipo río del área de estudio.....	98

Figura IX-42 Vista 3D de celdas tipo rio para la zona de estudio.....	99
Figura IX-43 Presa La Purísima.....	99
Figura IX-44 Vista 3D de la presa La Purísima.....	100
Figura IX-45 Celdas inactivas o de no-flujo (color verde) del área de estudio.....	101
Figura IX-46 Vista 3D de la presa La Purísima.....	102
Figura IX-47 Vista 3D de los pozos de observación y el nivel freático.....	103
Figura IX-48 Grafica de calibración del modelo de flujo.....	105
Figura IX-49 Histograma de calibración del modelo de flujo.....	105
Figura IX-50 Equipotenciales y vectores de dirección del modelo de flujo.....	106
Figura IX-51 Pozos donde se detectaron concentraciones de sulfatos.....	107
Figura IX-52 Equipotenciales y vectores de dirección del modelo de flujo.....	108
Figura IX-53 Equipotenciales (azul), vectores de dirección de flujo (verde) y traslado de partículas (rojo).....	108
Figura IX-54 Trazado de partículas para 50 años.....	109
Figura IX-55 Trazado de partículas para 100 años.....	109
Figura IX-56 Trazado de partículas para 300 años.....	109
Figura IX-57 Trazado de partículas para 450 años.....	109

I. RESUMEN.

Este estudio presenta los resultados de la simulación de las posibles rutas de transporte tanto de elementos metálicos solubles, como del trazado de partículas generadas por jales mineros hacia la zona de alta vulnerabilidad de la presa La Purísima dentro del acuífero Silao-Romita.

Para lograr esto, se muestrearon y caracterizaron 5 sitios provenientes de un total de 30 presas de jales mineros. Así mismo, se determinó la zona más vulnerable del acuífero desde el punto de vista intrínseco mediante los métodos DRASTIC y AVI. La generación del modelo de flujo y trazado de partículas se realizó con el software Visual ModFlow.

La conclusión de acuerdo al modelo de flujo y transporte de partículas fue que los jales del depósito de Pozuelos son transportados principalmente por el río Guanajuato en primera instancia y mucho antes de llegar a la presa La Purísima migran muy lentamente al sur-poniente hacia Cañada de Bustos. Por lo tanto no se considera como uno de los sitios que aporte elementos contaminantes hacia el acuífero Silao-Romita. Sin embargo, químicamente los jales de Pozuelos presentaron un pH ácido (4.5), que de acuerdo a la normatividad no es generador de drenaje ácido. Esto implica que se requieren más estudios al respecto, con el fin de reevaluar la relación entre el Potencial de Neutralización y el Potencial de Acidez de la NOM-141-SEMARNAT-2003.

II. INTRODUCCIÓN.

Como consecuencia de varios siglos de actividad minera en México y posteriormente, el crecimiento industrial de la química básica, petroquímica y de refinación del petróleo, se han producido grandes cantidades de residuos al ambiente difíciles de cuantificar, incluidos los residuos peligrosos. Aunado a lo anterior, la intensa actividad de otras industrias, accidentes durante el almacenamiento, transporte o trasvase de sustancias (fugas, derrames, incendios), la disposición clandestina de residuos, contribuyen en gran medida a la contaminación de suelos (SEMARNAT, 2002). El número de sitios contaminados, aún en las estimaciones más conservadoras, asciende a miles de lugares cuyo riesgo potencial es desconocido. De acuerdo con datos publicados por el INEGI (2000), la superficie de suelo degradado por causas de contaminación en 1999 fue de 25,967 km².

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, que contribuye en gran medida con el desarrollo económico del país, suministrando insumos a una serie de industrias (construcción, metalúrgica, siderúrgica, química y electrónica). De acuerdo con información de la Dirección General de Minas, la industria minera Nacional es mayoritariamente metálica, y se dedica principalmente a la producción de cobre, zinc, plata y plomo.

Debido al desarrollo y modernización en los procesos de extracción y procesamiento de los recursos minerales, así como a la generación de grandes cantidades de residuos provenientes de sus procesos, la industria minera en México ha generado por décadas una gran cantidad de desechos y un número importante de sitios contaminados a lo largo de todo el país.

La producción minera en México, se concentra en doce entidades: Chihuahua, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Jalisco. En la Tabla II-1, se resumen las etapas de los procesos mineros y su relación en cuanto a impacto al ambiente.

Tabla II-1 Relación de la actividad minera y su impacto al ambiente.

Fase	Descripción	Impacto ambiental
Exploración	Barrenación, obras y perforaciones.	Destrucción de vegetación
Explotación	Obras diversas: tiros, socavones, patios para depósito de minerales, zonas para descarga de materiales	Operación de presas de jales: arrastre de residuos peligrosos. Descarga de aguas residuales
Beneficio	Concentración Trituración y molienda Tratamientos previos	Generación de ruido Vibración y emisión de polvo
Fundición y refinación	Obtención de metales y sus aleaciones (uso de hornos industriales) Eliminación de impurezas en los metales para aumentar la ley de contenido	Emisiones a la atmósfera, residuos peligrosos y aguas residuales

Fuente: Dirección General de Minas, Subsecretaría de Minas, SEMIP, 1994.

En México existe una gran variedad de tipos de yacimientos minerales. Entre los que contienen sulfuros destacan las vetas de metales base, las de reemplazamiento en carbonatos de alta temperatura incluyendo skarns (depósito formado en un ambiente de metamorfismo de contacto con roca de caja de carbonatos como calizas o margas), los vulcanogénicos, así como los pórfidos (roca ígnea plutónica) de cobre. El procesamiento de minerales provenientes de cada tipo de yacimiento resultará en una composición mineralógica distinta de los jales. Además, los residuos se ubican en distintos sitios del país con climas diversos. Esta situación plantea primero la necesidad de desarrollar metodologías que permitan evaluar el efecto real de los jales hacia el medio ambiente nacional, mediante el uso de métodos de modelado accesibles en México (González Reyna 1956; Clark y Salas 1988).

III. ANTECEDENTES.

a) La minería en Guanajuato.

Entre 1548 y 1554 probablemente fue cuando se produce el descubrimiento incidental de abundantes yacimientos de plata, principalmente en las minas de San Bernabé y Rayas, lo que provocó el nacimiento de Guanajuato como centro poblacional. A partir de entonces el tránsito y establecimiento de buscadores de mineral se hizo constante. La ciudad alcanzó altos niveles de prosperidad durante el siglo XVIII debido a la gran bonanza minera y fue tal el esplendor de la época que varios vecinos próceres de la minería se vieron convertidos en nobles.

Guanajuato tiene una tradición minera que data de la época virreinal. Sin embargo, la riqueza del subsuelo no siempre ha sido extraída en forma óptima. Actualmente, la minería en la entidad se encuentra en una etapa de recuperación y se ha consolidado como el primer productor nacional de oro y cuarto en plata.

Igualmente, la entidad se ha convertido en un importante productor de minerales no metálicos, entre los que destacan la fluorita, que ya se exporta, plomo, caolín, sílice y el feldespató.

Las principales empresas dedicadas a la minería son las cooperativas Las Torres, Santa Fe de Guanajuato y el Cubo, a la fecha se tienen en la entidad 51 compañías mineras que emplean a 3, 500 trabajadores, cuya fuerza productiva representa apenas el 15% del producto interno bruto en el estado, lo que refleja el escaso grado de actividad.

Guanajuato representa un futuro halagador en esta rama de la economía, pues se podrá explotar en gran escala ópalo, granito, calizas, azufre, cobre, plomo y hasta diamantes. Las minas se encuentran en los municipios de San Luis de la Paz, Comonfort, Atarjea, Acámbaro, Pénjamo, Guanajuato, San Diego de la Unión, Dolores Hidalgo y Huanímáro.

b) Residuos Mineros en Guanajuato.

En estudios realizados por Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, en 2006, mencionan que en el municipio de Guanajuato encontraron 31 depósitos de jales, los cuales ocupan un área de 81.9 hectáreas y representan 75 millones de toneladas, de los cuales 11 depósitos

son de cianuración generados entre 1905 y 1946, de éstos cuatro están fuertemente erosionados y el resto de los depósitos (20) son presas de jales de flotación 'bulk', cuyos depósitos presentan una clasificación textural de la siguiente forma: las áreas proximales a la cortina de retención tienen textura arenosa, baja capacidad de retención de humedad y están bien aireadas, mientras que las zonas distanciales a la cortina tienen textura arcillosa, baja permeabilidad y baja capacidad de aireación, lo que permite la acumulación de agua en tiempos de lluvias y favorece condiciones reductoras.

Otros estudios reportados por Mendoza–Amézquita et.al (2006) mencionan que en la actualidad se producen 2,000 t/día de jales, se ha estimado a la fecha una producción total de residuos mineros que asciende a 134 Mt. Al respecto otros autores proponen una cifra aproximada de 75 Mt (Ramos–Arroyo et al., 2004) y 150 Mt (Carrillo–Chávez et al, 2003) de residuos.

c) Contaminación por Residuos Mineros.

Uno de los principales problemas ambientales derivado del manejo y disposición de los jales mineros es el drenaje ácido (DA), el cual es producto de la oxidación de los minerales sulfurosos que contienen. El desarrollo de DA en los jales es generalmente muy limitado durante la operación (jales activos) y se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo, después que ha cesado la acumulación en el depósito (jales inactivos). La formación de DA no afecta todos los depósitos de jales y depende del contenido de minerales sulfurosos capaces de producir ácidos y carbonatos, arcillas e hidróxidos capaces de neutralizar los ácidos generados, así como de las condiciones geográficas de los sitios donde están ubicados. La peligrosidad de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) asociados a los jales varía ampliamente, aún para el mismo elemento, dependiendo de su movilidad. La fracción "soluble" (iones y coloides) es la que representa mayor peligro ya que podría ser movilizada y contaminar los cuerpos de aguas (superficiales y subterráneos). También se considera a esta fracción "soluble" como la más peligrosa debido a que puede estar fitodisponible y/o biodisponible (Romero et. al. 2002).

El medio ambiente (agua, suelo, aire, flora y fauna) en el municipio de Guanajuato es actualmente impactado por los residuos mineros, principalmente por metales presentes en los sitios donde se realiza la actividad minera. Uno de los problemas que pudiera generar este sector con un impacto importante para la población es la contaminación del acuífero, ya que este es la principal fuente de abastecimiento de agua para el municipio. En estudios previos en el acuífero reportan evidencias de contaminación en cuerpos de

agua superficial, como lo muestra el estudio de “Transporte y destino final de fósforo en el acuífero de Puente de Guadalupe de Guanajuato” realizado por el Departamento de Química de la Universidad de Guanajuato (2004), concluye que la presa La Purísima funciona como una zona de recarga del acuífero con presencia de fosfatos en el agua de pozos cercanos a la presa.

Existe el reporte de accidentes en presas de jales (Comisión Nacional del Agua CNA, 2001), siendo los más importantes la emergencia por derrames de residuos mineros en cauces federales en el municipio de Guanajuato para las zonas siguientes:

1. Mina Las Torres, Guanajuato, Gto. 1988. Ruptura de alcantarilla central de Presa Las Coronelas 1, por errores en cálculo. Derrame de más de 1,000 toneladas de jal, con un impacto sobre el arroyo los Cedros (hasta 15 km.).
2. Mina Las Torres, Guanajuato, Gto. 1993. Derrame de 250 toneladas de jal por “chino” mal sellado, impacto sobre 5 km. del arroyo Los Cedros.
3. Santa Fe, Gto, 1996. Derrame por rotura de contrabordo en el vaso.
4. Mina Bolañitos, Guanajuato, Gto. 2000. Entrada de jal por alcantarilla central y desbordamiento por presa de emergencia debido a la basura acumulada en la misma por falta de mantenimiento; volumen aproximado de 200 toneladas.

d) Contaminación del Agua por Residuos Mineros.

Los residuos mineros del distrito de Guanajuato son ricos en Pirita y la oxidación de sulfuros (mayoritariamente la oxidación de la pirita) y su asociación al drenaje ácido de minas (DAM) ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, debido a que ha ocasionado graves problemas de contaminación del agua subterránea y superficial (Nordstrom et al., 1979; Jambor y Blowes, 1998; Nordstrom y Alpers, 1999).

El 30 % del agua de abasto para la población de Guanajuato se extrae de las presas La Esperanza y La Soledad localizadas en subcuencas consideradas como áreas naturales protegidas. En ambas cuencas se encuentran minas y residuos mineros abandonados que llegan a verter aguas de drenaje a los arroyos y que representan un riesgo de afectación a la calidad del agua. De estas cuencas Ramos-Arroyo (2009), menciona que se drenan cantidades significativas de sulfatos, más de 10,000 ton al año, al mismo

tiempo se ha observado en la cortina de la presa Burrones que la cantidad de sulfatos disminuye significativamente, sugiriendo que ocurren procesos de sulfato-reducción.

En cuanto la afectación que tienen los jales mineros sobre el agua subterránea o en este caso el acuífero Silao-Romita, no es muy clara dada la complejidad del sistema, sin embargo, estudios recientes de Fuentes-Hernández (2004), ha detectado que el agua subterránea de la zona sur del acuífero, está afectada fuertemente por infiltraciones de cuerpos superficiales y recarga de las colinas basálticas. Así la presa del Conejo influye de manera significativa la calidad del recurso, debido a la presencia de metales y elementos tóxicos en cantidades preocupantes. Bajo este panorama se plantea la necesidad de realizar el estudio en los distintos cuerpos de agua superficial de la zona del acuífero Silao-Romita, tales como la presa la Purísima, la cual es una posible fuente de captación de elementos potencialmente tóxicos de origen minero.

IV. DEFINICIÓN DEL PROYECTO.

Este estudio fue planteado para evaluar el nivel o grado de riesgo del acuífero Silao-Romita ante la presencia de elementos metálicos solubles y potencialmente tóxicos provenientes de jales mineros del distrito de Guanajuato, a través de la generación de un modelo de flujo y trazado de partículas.

V. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

Los proyectos mineros son diferentes a la planeación de otras actividades industriales, esta últimas se pueden establecer en el mejor lugar posible, desde el punto de vista ambiental, sin embargo, una mina se ubicará donde se localice la veta del mineral a explotar, y esto podría incluir comunidades, además de generar alteración ambiental por extraer suelo y alterar su constitución.

En el distrito minero de Guanajuato, las minas han causado un gran impacto ambiental, ya que no consideraron diversos parámetros como el paisaje, la caracterización de suelos, que tipo de flora y fauna habitan en el lugar, si existen aguas superficiales y subterráneas, que usos se le da al suelo y la cultura de las comunidades que residen en la zona.

Actualmente no se cuenta con información que determine o indique un posible escenario del avance y grado de afectación de la contaminación en el subsuelo y el acuífero Silao-Romita proveniente de los jales mineros, debido en este caso al drenaje ácido y metales pesados o elementos potencialmente tóxicos, que desde hace más de 400 años se han estado depositando en ríos, cañadas, barrancas y presas de jales.

Derivado de lo anterior se planteó el estudio de evaluación del impacto de los jales mineros en el acuífero Silao-Romita, considerando a la presa La Purísima como posible fuente de captación de elementos potencialmente tóxicos de origen minero.

Las actividades se enfocaron en analizar una de las 30 presas y/o depósitos de jales fuera de operación y sin manejo adecuado del distrito minero de Guanajuato. Por consiguiente fue necesario evaluar posibles escenarios de riesgo donde se puedan prever las rutas de transporte y afectaciones sobre el agua subterránea que abastece al municipio de Guanajuato.

VI. OBJETIVOS.

e) Objetivo General.

Simular las posibles rutas de transporte de elementos metálicos solubles y trazado de partículas de contaminantes por jales mineros hacia la zona de alta vulnerabilidad de la presa La Purísima del acuífero Silao-Romita aplicando un modelo de flujo determinista (Visual ModFlow v.2009).

f) Objetivos Particulares.

- Obtención de muestras en presas y depósitos de jales mineros para la determinación de la concentración de metales pesados con base en las NOM-052-SEMARNAT-1993 y NOM-141-SEMARNAT-2003.
- Selección de un sitio potencial de contaminación por generación de drenaje ácido y/o elementos metálicos potencialmente tóxicos (Pb, As, Cr, Hg etc).
- Determinación de las zonas de mayor vulnerabilidad intrínseca del acuífero Silao-Romita mediante el método DRASTIC y AVI.
- Evaluación de las condiciones físico-químicas bajo las cuales se pueden liberar contaminantes tóxicos hacia el acuífero Silao-Romita.
- Generación de un “modelo conceptual”, de flujo y trazado de partículas, para la evaluación de escenarios hipotéticos de transporte de contaminantes hacia las zonas más vulnerables del acuífero Silao-Romita.

VII. MARCO TEÓRICO.

g) Tipos de Acuíferos.

De acuerdo a Custodio, E. y Llamas, M.R. (1996), en su manual de Hidrología Subterránea se mencionan los siguientes conceptos sobre acuíferos y el movimiento del agua a través de medios porosos.

Los acuíferos pueden ser ordenados en función de diferentes criterios. De esta manera pueden ser clasificados por:

- El grado de confinamiento
- Los materiales litológicos que lo forman
- La permeabilidad

La descripción tipológica de acuíferos resulta muy importante en su caracterización para la aplicación y generación del modelo conceptual del área de estudio.

1) Según el Grado de Confinamiento.

Acuífero libre o no confinado. Es aquel acuífero que presenta una superficie libre de agua, nivel freático, sujeta a la presión atmosférica. El esquema del acuífero es muy simple formado por un estrato permeable saturado que descansa sobre otro impermeable. El nivel freático coincidirá en este caso con el nivel piezométrico, es decir, el nivel ideal que alcanzaría el agua a presión atmosférica.

Acuífero confinado, cautivo o a presión. Se trata de una formación geológica completamente saturada de agua que se encuentra confinada entre dos estratos impermeables. La presión en esta zona intermedia es superior a la atmosférica de manera que, tras una perforación, el agua asciende hasta una altura que define el nivel piezométrico. Si este nivel quedara por encima de la cota del terreno se habla de pozos surgentes mientras que si queda por debajo se habla de pozo artesiano.

Acuífero semiconfinado. A diferencia de los acuíferos confinados, éstos están limitados en su parte superior por una capa semipermeable (acuitardo) y en su parte inferior por una capa impermeable o por otro acuitardo. En estos acuíferos una disminución en su carga piezométrica supondría la recarga del acuífero por parte del acuitardo.

Acuífero semilibre. Supone una situación intermedia entre un acuífero libre y uno confinado. Es el caso de acuíferos formados por granos gruesos limitado en la parte inferior por una superficie impermeable y por la parte superior por una formación de granos finos con conductividad hidráulica saturada inferior a la del acuífero.

Acuífero colgado. Se produce cuando existe una capa de material impermeable por encima de un nivel freático de manera que se produce una “bolsa de agua” de extensión limitada. Este tipo de acuíferos se dan con mucha frecuencia aunque, por lo general, cuentan con pocos recursos.

2) Según los Materiales Litológicos.

Formados por depósitos no consolidados. Se forman por materiales sueltos como arenas o gravas de origen geológico muy diverso (fluvial, deltaico, y otros depósitos sedimentarios). Los acuíferos en este tipo de materiales forman el 90 % de los acuíferos de explotación del mundo. Tienen por lo general buena recarga y su permeabilidad y porosidad son altas y por tanto proporcionan mayores caudales.

Formados por depósitos consolidados. Se forman por materiales consolidados de origen geológico muy diverso; calizas y dolomías fracturadas o karstificadas, conglomerados y areniscas disueltas, rocas volcánicas alteradas o rocas cristalinas como los granitos fracturados.

3) Según la Permeabilidad del Acuífero.

Acuíferos figurados o kársticos. Son aquellos en los que el agua circula a través de las fisuras y las grietas de materiales como calizas y dolomías. El flujo se produce a través del sistema de grietas creadas en cada sistema, siendo significativamente diferente al flujo en un medio poroso. En ocasiones se forman auténticos ríos subterráneos.

Acuíferos detríticos o porosos. Aquí el agua circula a través de los poros existentes en un volumen de arena o grava en donde el flujo se realiza en un medio poroso. Este tipo de acuíferos son típicos en zonas cercanas a las montañas, conos de deyección y otras formaciones geológicas sedimentarias.

Acuíferos mixtos. Es el caso de la combinación de los dos tipos de materiales anteriores.

En base a lo anterior se puede mencionar que el acuífero de la zona en estudio es del tipo semiconfinado en medio granular formado por depósitos no consolidados de origen sedimentario y fluvial, según su permeabilidad se clasifica como detrítico.

h) Movimiento del Agua en Medio Poroso.

Existen una serie de parámetros que caracterizan el funcionamiento de los acuíferos y que son muy importantes a la hora de estudiar el movimiento del agua en medios porosos para su modelación.

4) Porosidad.

Se define como la cantidad de huecos, o poros, existente en la formación geológica. Si se tiene un volumen de terreno natural V y el volumen de poros viene definido por V_p , la porosidad total, m , vendrá definida como:

$$m = \frac{V_p}{V}$$

Según la dificultad de circulación del agua a través de los poros, estos pueden clasificarse en interconectados, cuando el agua puede circular libremente, cerrados, cuando el agua no circula o semicerrados, cuando el agua circula con cierta dificultad. En este sentido se define la porosidad efectiva, m_e , como el porcentaje de poros interconectados, cuyo volumen viene dado por V_e y que por lo tanto almacenan agua recuperable.

$$m_e = \frac{V_e}{V}$$

La porosidad total (SGME, 1984) es la suma de la porosidad efectiva (m_e) y la porosidad de retención (m_r).

$$m = m_r + m_e$$

5) Conductividad Hidráulica.

La conductividad hidráulica, k , representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Tiene las dimensiones de una velocidad ($L T^{-1}$) y suele expresarse en cm/s, m/s o m/día. El valor de la conductividad hidráulica es constante para cada medio y para cada fluido en unas mismas condiciones.

Los factores que influyen en K , son la naturaleza del terreno, la densidad y la viscosidad del fluido, que son a su vez función de la temperatura y de la presión. En un sistema estratificado la conductividad será diferente para cada estrato del perfil del suelo. Sin embargo, es posible definir un valor global de todo el sistema. En este sentido habrá que distinguir entre la permeabilidad global cuando el flujo es perpendicular a la estratificación, cuya expresión es:

$$\frac{1}{K_v} = \frac{1}{L} \sum \frac{b_i}{K_i}$$

Donde K_v es la permeabilidad global perpendicular a la estratificación, L es la longitud atravesada, b_i el espesor de cada capa y K_i es la conductividad de cada una de estas capas, o cuando el flujo es paralelo a estas, en cuyo caso la expresión cambia quedando de la siguiente manera:

$$K_h = \frac{1}{L} \sum b_i \cdot K_i$$

Siendo K_h la permeabilidad global paralela a la estratificación. En general encontramos que $K_v < K_h$ ya que el efecto de la estratificación es muy importante. Por otra parte, la conductividad horizontal se subdivide en componentes K_{hx} y K_{hy} aunque se suele admitir isotropía en el plano horizontal, es decir, $K_{hx} = K_{hy}$.

6) Coeficiente de Almacenamiento.

Se define como Coeficiente de Almacenamiento, S , de un acuífero al volumen desplazado por una columna del acuífero de superficie unitaria, cuando la superficie freática desciende un valor unitario. Cuando la carga hidráulica de un acuífero disminuye, su estructura granular se comprime y se reduce la porosidad, por lo que se libera agua. De la misma manera, el volumen de agua liberado será también el resultado de la

expansión del agua en los poros. Por lo tanto, el coeficiente de almacenamiento dependerá físicamente de la compresibilidad de la estructura granular del acuífero y de la compresibilidad del agua en los poros y viene dado por la expresión:

$$S = b * \rho * g(\alpha + m\beta)$$

En donde **b** es el espesor del acuífero, **ρ** es la densidad del agua, **α** es la compresibilidad vertical (normalmente en cm²/dinas), **m**, es la porosidad total del medio y **β** es la compresibilidad del agua.

En un acuífero libre, **S** equivale esencialmente al rendimiento específico o **S_y**, concepto equivalente a la porosidad efectiva descrita anteriormente. El mismo concepto, aplicado a un acuífero confinado, implica el descenso en un valor unitario de la presión hidrostática en la columna del prisma acuífero considerado.

El coeficiente de almacenamiento es, como la porosidad efectiva, adimensional. Los valores promedio de **S** para acuíferos libres oscilan entre 0.3 a 0.02, mientras que para acuíferos confinados, donde predomina el espesor (e) sobre el Coeficiente de Almacenamiento, están entre 0.001 a 0.00001.

Un concepto diferente es el coeficiente de almacenamiento específico, **S_s**, que es el volumen liberado por 1 m³ de acuífero (no por toda la columna de éste) al descender 1 metro la superficie piezométrica. Viene dado por la expresión:

$$S_s = \rho(\alpha + m\beta)$$

Se cumple por lo tanto que:

$$S = b * g * S_s$$

En muchos casos se suele expresar el valor de S_s en unidades de (L⁻¹), para lo que se considera que S_s = g * S_s.

7) Ley de Darcy.

En general, en los estudios hidrogeológicos se tiene en cuenta la velocidad expresada por la ley de Darcy quien definió en el siglo XIX una ecuación fundamental del flujo en medio saturado. Esta ley se expresa como:

$$V = K \cdot i$$

Donde **K** es la permeabilidad o la conductividad hidráulica e **i** es el gradiente hidráulico, por lo que en su forma generalizada, la ley de Darcy viene dada por la expresión:

$$V = -K \cdot grad(h)$$

Se trata de una ley macroscópica que representa el comportamiento de un elevado número de poros sin tener en cuenta el estatus del agua en cada poro.

La ley de Darcy parte del principio de linealidad entre el gradiente hidráulico y el flujo con pendiente **K**. Esta linealidad se pierde a velocidades altas ya que las fuerzas inerciales no son despreciables frente a las viscosas y el fluido adquiere la condición de turbulento. En general la ley de Darcy es válida mientras el número de Reynolds (relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas en un fluido en movimiento) sea menor que 4 ($Re < 4$).

i) Ecuaciones de Conservación de Masa.

El principio de conservación de la masa o el balance de materia desde el punto de vista de régimen estacionario y transitorio se define de la siguiente manera (Millares-Valenzuela,2006):

8) Régimen Estacionario.

En un volumen determinado de medio poroso saturado, la masa de un fluido entrante en determinado periodo de tiempo es igual a la saliente para ese mismo intervalo.

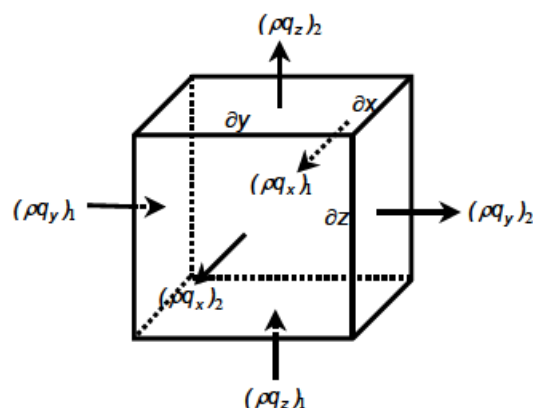


Figura VII-1 Cubo diferencial de volumen para deducción de la ecuación de continuidad.

Tomando un cubo diferencial de un acuífero de lados dx , dy , dz , y suponiendo una entrada de fluido por la cara A en un tiempo dt , igual a:

$$M_x = (\rho \cdot u)_{x+dx} \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

Siendo u la velocidad según el eje x , y ρ la densidad del fluido. Por la cara B opuesta a la cara A sale una masa de fluido que será:

$$M_{x+dx} = (\rho \cdot u)_{x+dx} \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

La diferencia entre la entrada y la salida, aplicando el desarrollo de Taylor y despreciando los términos de exponente mayor que 1, es:

$$\Delta M_x = M_x - M_{x-dx} = dx \cdot dz \cdot dt [(\rho u)_x - (\rho u)_{x+dx}] = -dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \cdot \frac{\partial(\rho u)}{\partial x}$$

Por lo tanto, la variación de masa con respecto al tiempo y con respecto al volumen en el eje x , será:

$$\frac{dM}{dt \cdot dV} = \Delta \mu_x = -\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x}$$

De la misma manera, para los ejes x , y , z se tiene:

$$\Delta \mu_y = -\frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y}$$

$$\Delta \mu_z = -\frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z}$$

En donde v y w son los componentes del vector velocidad según los ejes Y y Z , respectivamente. La diferencia total entre la entrada y la salida será:

$$\Delta \mu = \Delta \mu_x + \Delta \mu_y + \Delta \mu_z = -\left(\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z}\right)$$

Y en notación vectorial se expresaría de la forma:

$$\Delta \mu = -div(\rho \cdot v)$$

Donde: v es el vector velocidad.

Si en el diferencial de volumen considerado se genera un volumen de fluido F como aporte externo por unidad de volumen y unidad de tiempo se tiene que:

$$\Delta\mu + F \cdot \rho = 0 \Rightarrow -div(\rho \cdot v) = F \cdot \rho$$

En el caso de considerar la densidad constante y que el flujo se encuentre dentro del ámbito de validez de la ley de Darcy, esta expresión quedaría de la forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm F = 0$$

Expresión que define el balance de masas de un fluido en medio poroso en régimen estacionario con la consideración de una fuente (si $F > 0$) o un sumidero (si $F < 0$)

9) Régimen Transitorio.

Cuando el régimen no es estacionario, la altura piezométrica en un determinado punto varía con el tiempo. Se tendrá que tener en cuenta en este caso la compresión o expansión del agua y la deformación del acuífero por la presión del agua ya que estudiamos un medio poroso. De acuerdo con el concepto definido anteriormente de coeficiente de almacenamiento específico, la acumulación por unidad de volumen en un tiempo dt es:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = S_s \cdot \frac{\partial p}{\partial t}$$

Siendo $\frac{\partial p}{\partial t}$ la tasa de variación de presión.

Admitiendo que el medio es homogéneo e isótropo, con conductividad constante y en donde las variaciones espaciales de la densidad sean muy pequeñas ($\rho = Cte$), se tiene que:

$$h = z + \frac{p}{\rho \cdot g} + cte \Rightarrow \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\rho \cdot g} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}$$

Por lo que:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial t} \cdot \rho \cdot g$$

Sustituyendo en la ecuación anterior $\rho = Cte$

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = -S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \cdot g$$

Si se expresa el coeficiente de almacenamiento específico en función de g , éste toma dimensiones de (L^{-1}) y la expresión anterior finalmente queda de la siguiente forma:

$$div(v) = -S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Si consideramos un medio anisótropo en el que existen intercambios con una fuente o sumidero, la expresión quedaría de la forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm F = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

Ecuación que define el flujo de agua de densidad constante en un medio poroso heterogéneo y anisótropo cualquiera, siempre que se encuentre dentro del ámbito de validez de la ley de Darcy, expresado en tres dimensiones de manera que las coordenadas x , y , z se encuentran alineadas con las direcciones principales de anisotropía y considerando una fuente o sumidero.

j) Mecanismos de Transporte de Contaminante.

Los mecanismos de transporte en medios porosos más estudiados e importantes son: Advección, dispersión, difusión, sorción (adsorción y desorción) y según Fernández-Torroba (2004) los describe de la siguiente manera:

10) Advección.

La advección se refiere al transporte de los contaminantes que tiene lugar con el flujo de agua a su velocidad lineal a través del medio poroso. Si se considera la Advección como el único mecanismo de transporte, el contaminante se movería de acuerdo a un flujo de pistón. Basándose en la ley de Darcy, la velocidad del fluido puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$v_f = \frac{K \cdot i}{n_e}$$

Donde:

v_f = velocidad del fluido (m/d)

K = conductividad hidráulica (m/d)

i = gradiente hidráulico (m/m)

n_e = porosidad efectiva del acuífero (-)

11) Dispersión.

La dispersión es un mecanismo de mezcla causado por las heterogeneidades del medio poroso, que provocan variaciones en la velocidad y en los caminos del flujo, debido principalmente a:

- diferencias de velocidad entre canales debido a tamaños de poro.
- diferentes longitudes y caminos por los que pueden recorrer el fluido.
- diferencias de fricción en el interior de los canales: las partículas de fluido cercanas a las paredes del canal se moverán a menor velocidad que las que circulan por el centro de éste.

Este mecanismo conlleva un incremento del tamaño de la pluma y una disminución de la concentración de contaminante.

12) Difusión.

La difusión es el proceso de transporte de contaminante a escala molecular debido a la existencia de un gradiente de concentración, que causa el movimiento de los solutos de las zonas de mayor concentración a las de menor. En una dimensión puede ser descrito por la ley de Fick:

$$m_x = -D_d \frac{\partial C}{\partial x}$$

Donde:

m_x = flujo de masa ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

D_d = coeficiente de difusión (m^2/s)

dC/dx = gradiente de concentración

Puede llegar a ser el mecanismo de transporte dominante en aquellos casos en que la advección sea insignificante (velocidades del fluido muy pequeñas), pero en la mayoría de los casos puede ser despreciable con respecto a la advección.

13) Sorción:

Cuando un contaminante se asocia con la fase sólida, no se puede determinar si está adsorbido en la superficie del sólido, absorbido en la estructura del sólido, precipitado como una estructura tridimensional en la superficie del sólido, o particionado en la materia orgánica (Sposito, 1989). Sorción es el término general que se utiliza para referirse a todos estos procesos relacionados con la partición del contaminante entre la fase acuosa y la sólida. Estos procesos provocan un retardo del transporte del contaminante respecto a la velocidad del fluido, que se cuantifica generalmente mediante el coeficiente de partición (o de distribución) K_d , que relaciona la concentración de contaminante en la fase sólida y la presente en la fase acuosa.

En el caso de los metales, los procesos de adsorción y de precipitación son considerados los más importantes:

14) Adsorción.

La adsorción consiste en la acumulación de una sustancia en la interface entre una superficie sólida y la solución en contacto con ella. Se diferencia de la precipitación en que no incluye la formación de una estructura tridimensional sino que la materia se acumula bidimensionalmente en la interface. Se conoce como adsorbato al material acumulado en la interface, adsorbente a la superficie sólida donde se acumula el adsorbato, y adsortivo a la molécula o ión en disolución susceptible de ser adsorbido.

Este proceso es fuertemente dependiente del pH, ya que la magnitud y la polaridad de la carga superficial de los componentes minerales del suelo varían con los cambios de pH.

La adsorción de aniones disminuye al incrementar el pH ya que está ligada a la liberación de iones hidroxilo, mientras que la de cationes disminuye al disminuir el pH al estar ligada a la liberación de protones.

Los procesos de adsorción/desorción son mecanismos determinantes en el transporte de contaminantes inorgánicos especialmente en áreas donde los constituyentes naturales del suelo están en equilibrio, como áreas lejos de la fuente.

15) Precipitación.

Es el proceso mediante el cual se desarrolla un mecanismo de crecimiento en tres dimensiones, pudiendo ser entendida como una adsorción llevada al extremo, cubriendo toda la superficie del sólido y generando una estructura tridimensional.

Los procesos de precipitación/disolución suelen ser los más importantes en condiciones de no-equilibrio, como en las proximidades de la fuente, donde existen grandes concentraciones de contaminante, o fuertes gradientes de pH o potencial redox.

16) Coeficiente de Distribución (Kd) en Metales.

Estimar los valores de Kd para metales es mucho más complicado que para compuestos orgánicos. A diferencia de estos últimos, donde los valores del coeficiente de distribución están controlados en gran medida por un único parámetro (contenido de carbono orgánico del suelo), los valores para metales dependen de un gran número de variables.

Las más importantes son: pH, condiciones redox, contenido de óxidos de hierro, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico. El elevado número de variables y las diferencias entre los diferentes métodos experimentales resultan en un amplio rango de valores de Kd para cada metal (más de 5 órdenes de magnitud en muchos casos).

El parámetro que presenta una mayor influencia es el pH, caracterizándose esta dependencia por su estrecho rango de pH donde la adsorción aumenta cerca de un 100%. La posición de este rango, denominado límite de adsorción, depende de las características ácido-base de cada metal.

k) Ecuaciones Fundamentales de Flujo de Aguas Subterráneas.

Como parte del ciclo hidrológico, el agua subterránea está permanentemente en movimiento desde zonas de recarga natural o artificial hacia zonas de descarga. La fuerza impulsora del flujo de agua en el subsuelo es el potencial o carga hidráulica y causa el movimiento del agua subterránea. Si el fluido tiene la misma carga en cualquier punto, no hay flujo, pero si hay una diferencia de carga en el espacio, el agua fluye en la dirección en que disminuye la carga hidráulica (Ihobe, 2000).

El movimiento del agua subterránea ocurre a velocidades extremadamente bajas. Sin embargo, debido a las grandes secciones transversales a través de las cuales se realiza el movimiento, se transportan grandes cantidades de agua.

Las leyes básicas y ecuaciones que gobiernan el movimiento del agua subterránea en los acuíferos son las siguientes:

17) Ley de Darcy para Medio Anisótropo.

$$q_x = \left[-K_{xx} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] - \left[-K_{xy} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] - \left[-K_{xz} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right]$$

$$q_y = \left[-K_{yx} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] - \left[-K_{yy} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] - \left[-K_{yz} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right]$$

$$q_z = \left[-K_{zx} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] - \left[-K_{zy} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] - \left[-K_{zz} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right]$$

En general los problemas con suelos anisótropos pueden transformarse fácilmente en problemas para suelos isotrópicos si se considera que $K_{xy}=K_{xz}=K_{yz}=K_{zy}=K_{zx}=K_{zy}=0$, aproximación que puede hacerse en la mayoría de los casos (Lui y Liptak, 2000).

18) Ecuación de Continuidad.

Teniendo en cuenta el concepto de coeficiente de almacenamiento específico antes indicado, se obtiene la expresión de la ecuación de continuidad (Custodio y Llamas 1996, Lui y Liptak 2000).

$$-\left\{ \frac{\partial(\rho q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho q_z)}{\partial z} \right\} \pm F\rho = \rho S_o \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

I) Ecuaciones Fundamentales de Flujo de Aguas Subterráneas

A partir de la ecuación de continuidad, si se considera que la densidad del agua permanece constante, y se aplica la Ley de Darcy se obtienen distintas ecuaciones en función del medio (Custodio y Llamas 1996).

Medio no homogéneo y anisótropo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right\} \pm F = S_o \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

Medio isótropo no homogéneo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ K \frac{\partial \phi}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K \frac{\partial \phi}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \frac{\partial \phi}{\partial z} \right\} \pm F = S_o \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

Medio homogéneo e isótropo:

$$K \left\{ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right\} \pm F = S_o \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

En el caso de flujo estacionario, o bien cuando tanto el sólido como el fluido sean incompresibles, el segundo término de la ecuación se anula:

$$K \left\{ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right\} \pm F = 0$$

Finalmente en régimen estacionario y sin aporte o retirada de agua (F), se obtendría la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 \phi \equiv \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

m) Resolución de la Ecuación General de Flujo por Diferencias Finitas.

Cada una de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales planteadas anteriormente está relacionada con un caso específico de flujo a través de medios porosos, en sí misma no contiene información acerca del problema específico y tiene un infinito número de soluciones que corresponden a casos particulares de flujo a través del dominio del flujo (Lui y Liptak, 2000).

En general los métodos que permiten alcanzar la solución de un determinado sistema se clasifican en analíticos y numéricos. En este caso nos vamos a enfocar a los métodos numéricos, ya que estos requieren de una discretización espacial y temporal y son capaces de soportar heterogeneidades en el sistema. La discretización consiste en reemplazar el carácter continuo del sistema dado por diferencias infinitesimales, por

pequeños incrementos finitos $\Delta\Phi$, en el espacio y en el tiempo Δt , de manera que los elementos diferenciales $d\Phi$ y dt son sustituidos por incrementos $\Delta\Phi$ y Δt .

Dentro de los métodos numéricos hay dos tipos: los métodos basados en diferencias finitas y los basados en elementos finitos, en la actualidad los métodos que más se emplean es por diferencias finitas, en los paquetes informáticos de investigación hidrológica, uno de los cuales puede ser Visual Modflow, el cual será utilizado en este trabajo.

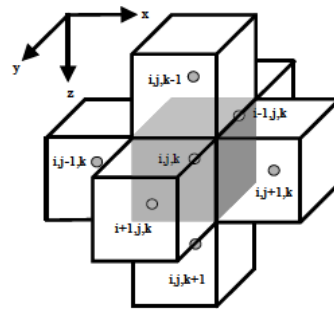


Figura VII-2 Esquema de diferencias finitas (las interfaces entre la celda (i,j,k) y las seis celdas adyacentes se muestran con superficies sombreadas)

n) Modelo Clásico de Transporte

Conceptualmente, la elaboración de un modelo de transporte en medios porosos debe considerar tres etapas. Primero, se debe caracterizar correctamente el sistema de flujo de agua subterránea para describir el tipo de transporte que se relaciona con el movimiento solidario de partículas de soluto junto al flujo (advección). Segundo, se definen los conceptos de transporte dispersivo, tales como dispersión mecánica y difusión molecular. La última etapa incluye conceptos relacionados con la entrada y salida de masa al sistema. Estas componentes se clasifican en términos fuente/sumideros y reacciones, las cuales son utilizadas para describir los procesos físicos, químicos y biológicos que pueden afectar en el transporte de contaminantes.

o) Métodos de Solución de Transporte en Aguas Subterráneas.

Los métodos numéricos para resolver la ecuación de transporte están clasificados en tres grupos que son: de Euler, de Lagrange y mixtos. Para este estudio se planteo utilizar el software ModFlow comercializado por Schulmberger, el cual utiliza una combinación

de varios métodos dependiendo del tipo de problema y solución que se deba encontrar. A continuación se mencionan los métodos utilizados por ModFlow.

Métodos mixtos Euler-Lagrange (basados en rastreo de partículas)

- Método de las características (MOC).
- Método modificado de las características (MMOC).
- Método híbrido de las características (HMOC).

Métodos de Euler (basados en diferencias finitas)

- Método estándar de diferencias finitas
 - Diferencias finitas Upstream
 - Diferencias finitas Central
- Método TVD (total-variation-diminishing)

El modelado matemático que realiza ModFlow se basa en la ecuación que describe el movimiento del agua subterránea de densidad constante en un medio poroso:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right\} \pm F = S_o \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

Esta ecuación describe el flujo del agua subterránea bajo condiciones hidrodinámicas en un medio heterogéneo y anisótropo, donde los ejes principales de conductividad hidráulica están alineados con la dirección de los ejes de coordenadas. Junto con las especificaciones de flujo o nivel piezométrico en los bordes del sistema y las especificaciones del nivel piezométrico inicial, constituye la representación matemática del sistema de flujo subterráneo. En su representación al transporte de contaminantes se expresa de la siguiente manera.

$$-\frac{\partial}{\partial x_j} (V_j C) \pm \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x} \right) \pm q_s \frac{C_s}{\theta} - \lambda \left(C + \rho_h \frac{S}{\theta} \right) = R \frac{\partial C}{\partial t}$$

C= Concentración del soluto disuelto

Cs= Concentración de la fuente

V= Velocidad de transporte

D=Coefficiente de dispersión

q= Flujo volumétrico

θ = Porosidad efectiva

S=Almacenamiento

ρ = Densidad del fluido

ModFlow resuelve la ecuación anterior en derivadas parciales por medio del método de diferencias finitas TVD (total-variation-diminishing), que es uno de los métodos aproximados, donde el sistema continuo es reemplazado por un sistema discreto de puntos en el espacio y en el tiempo, y las derivadas parciales son reemplazadas por términos calculados a partir de la diferencia del nivel piezométrico entre estos puntos. El proceso determina un sistema de n ecuaciones algebraicas lineales simultáneas con n incógnitas, la solución de cada una de estas ecuaciones determina el nivel piezométrico en cada punto en un tiempo específico. El conjunto de estos valores constituye una aproximación de la distribución del nivel piezométrico en el tiempo que podría constituir una solución analítica de la ecuación de flujo en derivadas parciales.

La ecuación en diferencias finitas del flujo de agua subterránea surge de la aplicación de la ecuación de continuidad: la suma de todos los flujos entrantes o salientes de la celda debe ser igual a la variación del almacenamiento de la celda.

p) Programas para Flujo de Aguas Subterráneas.

ModFlow es un programa informático que simula el flujo tridimensional de aguas subterráneas a través de medios porosos usando el método de diferencias finitas (McDonald y Harbaugh, 1988).

El empleo de ModFlow como herramienta para estudio del flujo de agua subterránea y transporte de contaminantes está ampliamente reconocido y extendido entre la comunidad científica, siendo uno de los principales programas utilizados por la EPA. No obstante, muchos de estos trabajos de investigación, por su impacto y repercusión social, tienen carácter confidencial con un mínimo en publicaciones de divulgación científica.

Visual ModFlow utiliza como solucionador numérico de las ecuaciones de flujo el WHS Solver (Waterloo Hydrogeologic, 2002). Este método como el resto de los disponibles aproxima la solución de un gran número de ecuaciones de derivadas parciales de forma iterativa a través de una solución aproximada.

WHS Solver trabaja empleando un doble plano, o doble bucle de iteraciones para así lograr la solución para un tiempo dado, las denominadas iteraciones externas son empleadas para ajustar en cada iteración los parámetros hidrogeológicos del modelo de flujo en las matrices factorizadas, los distintos niveles de factorización permiten que esas matrices sean inicializadas de forma diferente para incrementar la eficacia y estabilidad del modelo, por su parte las denominadas iteraciones internas son usadas para solucionar de forma iterativa las matices en las iteraciones externas.

q) Programas de Trazado de Partículas.

Estos simulan el recorrido de partículas en el seno del fluido trazando las líneas de flujo. Los principales códigos son FLOWPATH dentro de la familia PLASM y PATH3D y MODPATH, dentro de la familia MODFLOW.

El más utilizado y que será utilizado en este estudio es el código MODPATH, el cual calcula las trayectorias de partículas en tres dimensiones de seguimiento y en régimen de flujo estacionario y transitorio. El esquema de trazado de partículas es semianalítico, es decir el método se basa en que cada componente de velocidad varía linealmente de dirección dentro de una cuadrícula o celda. Este supuesto permite describir la trayectoria de las partículas a través del flujo en cada una de las celdas de la cuadrícula.

VIII. METODOLOGÍA.

r) Zona de Estudio.

La zona de estudio está comprendida en el municipio de Guanajuato, el cual se localiza en la región III-Centro-Oeste del estado, limitado al Norte con el municipio de San Felipe; al Este con Dolores Hidalgo; al Sur con Salamanca e Irapuato y al Oeste con Silao y León, teniendo como límites las coordenadas geográficas 101°02'00" y 101°26'30" de longitud Este al meridiano de Greenwich y a los 20°48'42" y 21°13'03" de latitud Norte. De acuerdo al marco geoestadístico (2000) el municipio cubre una superficie de 1,010.8 kilómetros cuadrados que representa el 3.3% del total de la superficie del estado.

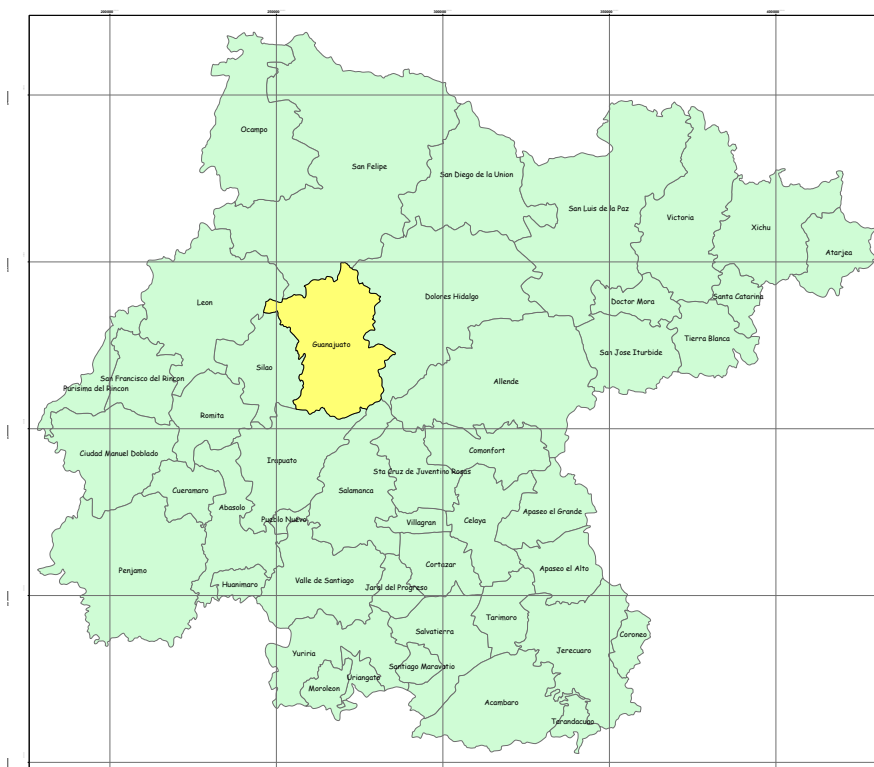


Figura VIII-1 Localización del municipio de Guanajuato.

La fuente de generadora de jales mineros, está identificada como el Distrito Minero de Guanajuato que se localiza en la porción Centro Occidental del Estado del mismo nombre. Tiene una longitud de 20 km con un ancho de 16 km y ocupa un área de 320 km².

De Acuerdo al Inventario Físico de los Recursos Minerales del Municipio Guanajuato, Gto., emitido por el Consejo de Recursos Minerales Dirección de Minas de Guanajuato (2004), describe a 126 localidades en el inventario las cuales se categorizan de la siguiente manera:

- 87 con yacimientos de minerales metálicos, los cuales explotan principalmente oro, plata, plomo, zinc y cobre.
- 21 localidades constituidas por bancos y prospectos de rocas volcánicas.
- 12 de yacimientos no minerales como caolín, zeolita, caliza y arcilla para cerámica.
- 6 yacimientos de materiales para la industria de la construcción (agregados pétreos) tales como rocas volcánicas, de origen extrusivo, ígneas intrusivas y a una secuencia de rocas vulcano sedimentarias.

s) Selección de Presas o Depósitos de Jales para Muestreo.

Como se muestra la actividad minera en el municipio de Guanajuato es variada desde la extracción de minerales metálicos, no metálicos hasta la extracción de materiales para la industria de la construcción, por ello sus residuos también son variados en cuanto a sus características y la forma en que los disponen. Derivado de lo anterior, el muestreo fue dirigido hacia los depósitos de residuos de minas de extracción de metales, ya que son las que más generan residuos potencialmente tóxicos.

La selección de los sitios de muestreo, fue en base a búsqueda documental para estimar el número de depósitos o presas de jales existentes en el área de estudio. Posteriormente se efectuó un barrido con fotografía aérea de escala 1:10,000 para contrastar lo reportado con la información del método de fotointerpretación. Se continuó con un recorrido de campo para verificar su accesibilidad y permisos para la obtención de muestras en espacios privados. De manera complementaria se geoposicionaron los sitios de interés a través del uso de GPS (global positioning system) para su correcta integración al mapa base del área de estudio.

t) Toma de Muestras.

Para este estudio una de las estrategias en campo de los sitios contaminados y del suelo incluyó la observación de diferencias de textura y color superficial, así como indicadores que mostraran cambios en la composición (vegetación, barreras físicas, etc.); se consideró la forma del depósito y se obtuvieron muestras superficiales y a un metro de profundidad, en ambos casos y por separado se mezclaron para utilizar la técnica de cuarteo, que consiste en dividir la muestra en porciones iguales y descartar los extremos hasta obtener la cantidad de residuo requerido.

Los materiales que se requirieron para la toma de muestra fueron los siguientes:

Equipo:

- Kit de muestreo de suelos con nucleador; con torque para extraer suelos a diferentes profundidades.

Material:

- Frascos de capacidad de 1L y de 600 mL
- Palas para excavación
- Espátulas
- Caja de herramientas
- Guantes de látex
- Bata de Algodón
- Bolsas de plástico de polietileno grandes (para método de cuarteo)
- Hielera

19) Presa de jales de la compañía minera Las Torres.

Esta compañía cuenta con seis presas de jales distribuidas en todo el distrito minero, las seleccionadas para el muestreo se localizaron dentro de la microcuenca 12Bd MEB (Cuenca arroyo el Cedro) en la parte Oriente de la zona urbana sobre el dren principal tributario al arroyo El Cubo entre los cerros de Chichíndaro y el Trompetero. El método de beneficio corresponde a flotación bulk, la presa que opera tiene una altura de cortina de aproximadamente 40 m con una superficie de 22.5 hectáreas, que comparada con la presa fuera de operación, ésta cubre una superficie de 10.7 hectáreas y una altura de cortina de aproximadamente 10 m.



Figura VIII-2 Presa de jales en operación, método de operación por flotación "bulk".



Figura VIII-3 Presa de jales fuera de operación, actualmente es zona de reforestación.

20) Presa de jales mina Bolañitos.



Figura VIII-4 Cortina de la presa de jales de la mina Bolañitos.



Figura VIII-5 Vaso de la presa de jales, actualmente está operando.

Esta presa se localiza al Norponiente del municipio, dentro de la microcuenca 12Bd-FAI (Cuenca arroyo El Realejo), entre las comunidades del Melladito y el Romerillal (El Torito), cubriendo una superficie de 3.6 hectáreas, con una altura de cortina de aproximadamente 20 a 30 m. y de longitud 130 m, no se observaron obras de desviación del cauce natural ni vertedor de demasías, el método de beneficio es de flotación bulk, actualmente se encuentra operando.

21) Deposito de jales Pozuelos.

Este sitio se encuentra actualmente abandonado, se estima un tiempo de abandono de mínimo de 50 años (Ramos-Arroyo, 2006), la superficie estimada que cubren los residuos en este sitio es de 2.17 hectáreas, con altura promedio de 5 m, en cuanto a su localización se encuentra en la zona urbana del municipio, sobre la carretera panorámica en la colonia del mismo nombre (Pozuelos).



Figura VIII-6 Depósito de residuos mineros en Pozuelos.



Figura VIII-7 Delimitación del depósito de jales en Pozuelos.

22) Presa de jales de jales minera El Rosario.



Figura VIII-8 Planta de beneficio de la mina la Concepción.



Figura VIII-9 Planta de beneficio (molino).

Este sitio se encuentra actualmente en operación y se localiza al Norte de la zona urbana, se estima que cubre una superficie de 5.5 hectáreas, con una altura de cortina entre los 20 y 30 m, el método de beneficio es de flotación bulk.

u) Toma de muestras.

Muestreo 1. Descarga líquida en la presa Las Torres (en operación).

La muestra se tomó directamente del tubo de descarga a la presa, se llenó un Garrafón de 20 L, esta se mezcló vigorosamente para obtener la muestra a analizar en frascos individuales y para obtener los parámetros de campo.



Figura VIII-10 Tubo de descarga de la mina Las Torres.



Figura VIII-11 Descarga en la presa de jales de la compañía La Torres.

Muestreo 2. Muestra solida de jal en la presa Las Torres (en operación).



Figura VIII-12 Toma de muestra en la parte poniente de la cortina.



Figura VIII-13 Toma de muestra en la parte oriente de la presa de jales.

El siguiente muestreo se planeó para obtener una muestra compuesta que fuera representativa de la presa de jales, para esto se determinaron cinco puntos de muestreo alrededor de la presa, estas fueron homogenizadas por el método de cuarteo con el fin de obtener 2 kg de muestra final para los análisis químicos y fisicoquímicos.

Muestreo 3. Muestra solida de jal en la presa Las Torres (fuera de operación).

En este sitio se realizó un muestreo compuesto con recolección de 3 muestras en diferentes partes del depósito y a 1 metro de profundidad, el método de homogenización fue el de cuarteo y se recuperaron 2 kg para los análisis correspondientes, cabe mencionar que este sitio tiene 20 años de abandono y en la parte superior está cubierto con una capa de tepetate.



Figura VIII-14 Estado actual de la presa de jales



Figura VIII-15 Cubierta de tepetate en el vaso de la presa.



Figura VIII-16 Toma de muestra a 1 m de profundidad.



Figura VIII-17 Realización de muestra compuesta

Muestreo 4. Muestra de jal en mina Bolañitos.

El muestreo se llevó a cabo bajo el mismo criterio que en las anteriores presas de jales; se determinaron seis puntos para obtener una muestra más representativa de los residuos, esto debido a que en algunos puntos al momento de hacer la excavación se observó que el jal presentaba varias capas, la respuesta del operador de la presa menciona que es debido a que el material encajonante o mena de los minerales es distinta. Por último se llevó a cabo la homogenización por el método de cuarteo.



Figura VIII-18 Toma de muestra de la parte central del vaso de la presa.



Figura VIII-19 Diferentes perfiles de jal en la presa de la mina de Bolañitos.



Figura VIII-20 Método del cuarteo.



Figura VIII-21 Homogenización de muestras.

Muestreo 5. Muestra de jal en Pozuelos.

Siguiendo los criterios establecidos anteriormente, se procedió a la colecta de cuatro muestras de jal en distintos puntos del depósito y a diferentes profundidades, para posteriormente realizar el método del cuarteo para la homogenización y obtención de 2 kg de residuo para los análisis correspondientes. Durante el muestreo se observó que el residuo presentaba una coloración naranja a rojiza lo cual indica la presencia del metal Fe proveniente de la pirita, misma que ha sido reportada por Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach (2006) y a su vez es un indicador potencial de generar drenaje ácido o de liberación de elementos potencialmente tóxicos.

En este punto debido a las condiciones antes mencionadas, se decidió tomar una muestra del agua del arroyo que cruza el depósito, con el fin de verificar si se está liberando drenaje ácido o algún elemento potencialmente tóxico.



Figura VIII-22 Coloración del jal depositado en Pozuelos.



Figura VIII-23 Toma de muestra en Pozuelos.

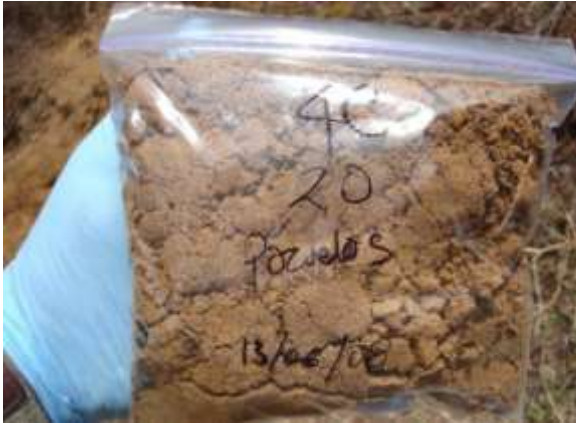


Figura VIII-24 Muestra homogenizada por método del cuarteo.



Figura VIII-25 Muestra de agua del arroyo que cruza el depósito de jales en Pozuelos.

Muestreo 6. Muestra de jal en mina El Rosario.

En esta ocasión no se obtuvo acceso a la presa, por lo que la compañía solo permitió tomar la muestra directamente de la planta de beneficio, ante esta circunstancia solo se procedió a llenar un garrafón de 20 L, y llevado al laboratorio para los análisis físico químicos.

Al final de los muestreos se identificaron las muestras, siendo preservadas en hielo y transportadas al laboratorio para sus pruebas correspondientes.

v) Análisis de Muestras.

El análisis de muestra tomó como referencia la norma NOM-141-SEMARNAT-2003 para la caracterización de jales mineros.

La primer etapa: se compone de dos métodos; el primero determina la extracción del constituyente tóxico y determina la peligrosidad en función de la movilidad de los tóxicos con agua, conforme a la "Prueba ASTM D 3987-85 modificada para realizar la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO_2 "; el segundo consiste en evaluar la peligrosidad en función del potencial de generación de drenaje ácido de acuerdo con la "Prueba de Balance Acido-Base (PM-ABA modificada por Lawrence y Wang, 1997) para jales que contienen sulfuros de metales"

La extracción de metales y metaloides a partir de jales utilizó la técnica referida a la "Prueba realizar la extracción de metales y metaloides de jales con agua en equilibrio

con CO₂”, el procedimiento utilizó como extractante agua destilada en equilibrio con CO₂ en condiciones estándar (ácido carbónico, pH=5.5) preparada al momento de su uso.

En el extracto obtenido se cuantificaron los metales y metaloides regulados en la NOM-52-SEMARNAT-1993 mediante Espectrometría de Emisión Atómica por inducción acoplada a plasma ICP.

Las pruebas de generación de drenaje ácido se realizaron con el propósito de caracterizar la peligrosidad de los jales por su reactividad. Se definió el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquéllos potencialmente consumidores, para determinar la capacidad neutralizante neta de los constituyentes del jal “Prueba de Balance Acido-Base para jales que contienen sulfuros de metales”. El análisis de las muestra fue ejecutado en base a la norma NOM-141-SEMARNAT-2003, que menciona los métodos para determinar el potencial de neutralización (PN) y el potencial de acidez (PA) dichos métodos se incluyen en las normas NMX-B-400-1970, NMX-B-021-1982 y el Método EPA 9038

Al realizar la determinación, se registró el valor del potencial de neutralización (PN) y el potencial de acidez (PA) de las muestras, calculando el potencial de neutralización neto (PNN) como sigue:

$$PNN = \frac{PN}{PA}$$

Para la identificación de los jales mineros respecto a si constituyen drenaje ácido, se usaron los criterios de la sección 5 del anexo 5 de la NOM-141-SEMARNAT-2003:

Cuando $PN/PA \leq 1,2$ Los jales son potencialmente generadores de drenaje ácido

Cuando $PN/PA > 1,2$ Los jales no son generadores de drenaje ácido

w) Pruebas Químicas.

Los residuos mineros depositados en presas de jales, son expuestos a las condiciones climáticas ambientales bajo las cuales ocurre alteración, dispersión y movilidad química que dan origen a una mineralogía secundaria. Por esto se evaluaron los parámetros de pH, conductividad y temperatura de los lixiviados de las muestras de jales en muestras de campo y lixiviados.

23) pH.

El pH se determinó en las distintas muestras sólidas por el método para suelo NMX-AA-008-SCFI-2000, el cual consiste en mezclar el jal: agua destilada en relación 1:10 durante 10 minutos, posteriormente, se filtra o decanta durante 10 minutos, y se mide el pH con un potenciómetro WTW (Wissenschaftlich-Technisch-Werkstätten) modelo Multiline ML P4 F/SET-3/110V, para su calibración se utilizaron soluciones buffer marca WTW de 4.01 (\pm 0.16) y 7.00 (\pm 0.12).

24) Conductividad Eléctrica.

La conductividad eléctrica es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura.

Este parámetro fue determinado de acuerdo al procedimiento NMX-AA-093-SCFI-2000, el cual consiste en preparar un extracto (mezcla de sólidos con agua destilada), en relación 1:10, mezclada durante 10 minutos y se mide la conductividad en el sobrenadante. El equipo usado fue un WTW (Wissenschaftlich-Technisch-Werkstätten) modelo ML P4 F/SET-3/110V, para su calibración se utilizó el estándar WTW de 0.01 mol/l KCl con 1,413 μ S/cm a 25°C.

x) Difracción de Rayos X.

Los depósitos de jales mineros del distrito Guanajuato contienen en su mayoría sulfuros, mismos que pueden ser liberados bajo procesos de oxidación. Por lo anterior se identificaron las fases minerales presentes en el sitio con mayor potencial de contaminación, para descartar o confirmar la presencia de minerales sulfurosos que contribuyan a escenarios de contaminación.

La Difracción de Rayos X, se basa en uno de los fenómenos físicos que se producen al interaccionar un haz de rayos X de una determinada longitud de onda con una sustancia cristalina, logrando la identificación de la fase mineral presente.

y) Método de Extracción de Metales.

Uno de los problemas más serios de identificación de metales pesados o elementos potencialmente tóxicos en el medio acuoso viene dado por la disolución de especies minerales que están en desequilibrio con las condiciones del medio que las contiene. En la minería la problemática consiste en la formación del denominado drenaje ácido, consistente en la formación de aguas de gran acidez, por lo general ricas en sulfatos, y con contenidos variables en metales pesados. Dicho drenaje se origina a partir de la lixiviación de sulfuros metálicos o en este caso piritita presente en los residuos mineros, de ahí la importancia de identificar las especies presentes en los jales mineros.

En los laboratorios del CIDETEQ se realizó la especiación utilizando la técnica de extracción secuencial propuesta por Tessier (1979) y resultados reportados por Medel-Reyes (2009). El método utiliza la extracción secuencial, tratando el jal con reactivos de agresividad creciente para liberar gradualmente los metales en función de su capacidad de movilización. En este esquema se evaluaron 5 fracciones: metales adsorbidos e intercambiables, metales unidos a carbonatos, metales unidos a óxidos amorfos de hierro y manganeso, metales unidos a sulfuros y metales en forma residual.

z) Análisis Mineralógico.

La identificación de elementos potencialmente tóxicos de forma cualitativa se realizó por la técnica de Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X, EDX por sus siglas en ingles (Energy Dispersive X Ray), la cual es utilizada para la identificación de la composición elemental de la muestra.

El resultado de la prueba se presenta en una grafica en forma de espectro EDX conocida como microanálisis, la cual relaciona la frecuencia con la que es recibido un rayo X para cada nivel de energía, cada una de las señales es única para cada átomo, por lo tanto corresponde a un solo elemento. El equipo utilizado fue un JEOL JSM-5400LV.

aa) Vulnerabilidad Intrínseca.

En este caso se consideró la susceptibilidad natural que presenta el acuífero frente a la contaminación, determinando las áreas naturalmente vulnerables (vulnerabilidad intrínseca). Las zonas más sensitivas son el suelo, subsuelo y las rocas que no proveen

adecuada protección y existe un potencial para la transferencia rápida de contaminación al agua subterránea.

Determinar la vulnerabilidad de un acuífero, permite conocer que tan susceptible son los sistemas de agua subterránea de incorporar solutos provenientes de fuentes potenciales y activas de contaminación localizadas en la superficie, lo que origina alteraciones en la calidad del agua. La zonificación relativa de vulnerabilidad se obtuvo con apoyo de los estudios realizados por la Comisión Estatal del Agua del Guanajuato y otros proyectos realizados en el acuífero de interés (Silao-Romita), en cuanto a los métodos utilizados en la zona se encuentran el DRASTIC y AVI.

25) Método DRASTIC.

La construcción del índice DRASTIC (ID) se basó en la determinación de siete parámetros hidrogeológicos a los que se les dio dos valoraciones: un peso relativo (5 a 1) según fuera más o menos importante en su contribución a la contaminación y una escala (1 a 10) según el menor o mayor impacto sobre la vulnerabilidad. Los parámetros fueron:

- 1- Profundidad hasta el nivel freático (D)
- 2- Recarga neta (R)
- 3- Material del acuífero (A)
- 4- Suelo (S)
- 5- Topografía (T)
- 6- Impacto de la zona no saturada (I)
- 7- Conductividad hidráulica (C)

El índice de vulnerabilidad obtenido es el resultado de sumar los productos de los diferentes parámetros por su índice de ponderación:

$$\text{Índice de vulnerabilidad} = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw$$

Siendo “r” el valor obtenido para cada parámetro y “w” el índice de ponderación

Para este método se retomó la información generada por la Universidad Iberoamericana en el proyecto “Estructuración de mapas temáticos de índice de vulnerabilidad de las subcuencas de los ríos Turbio y Guanajuato, 1999” desarrollado para la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.

Para la aproximación DRASTIC se utilizó información sobre la recarga neta del área, utilizando la expresión de Turc (1955), la cual considera el tipo de material geológico que forma el acuífero, el tipo de suelo y la topografía del sitio.

Para el tipo de suelo se utilizaron las cartas de INEGI, donde la información fue estructurada de acuerdo al tipo de suelo predominante, así como las características físico-químicas, principalmente la textura.

La descripción de la topografía del sitio se basó en información del INEGI, la cual proporciona las características relevantes del área de estudio como: tipo de pendiente y fisiográfica.

La conductividad hidráulica de los diferentes materiales geológicos del acuífero, normalmente se obtiene de pruebas de bombeo, pero para este caso se retomó información de la carta geohidrológica de la CEAG e información reportada por otros estudios realizados en la zona (Reyes, 1996; Guysa, 1998).

26) Método AVI.

El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar la vulnerabilidad, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material que se encuentran sobre el nivel del agua. (Baez, 2001).

Es un índice para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero (Van Stempvoort *et al.* 1992), por medio de la resistencia hidráulica “c” al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero. La resistencia hidráulica “c” se calcula por la expresión:

$$C = \sum [b_i / K_i] \text{ para las capas } 1,2,3,\dots,i$$

Donde:

b_i - Es el espesor de cada capa sobre el acuífero

K_i - Es la conductividad hidráulica de cada capa

C - Es la resistencia hidráulica total (inverso de la conductividad hidráulica, tiene dimensiones de tiempo) indica el tiempo aproximado de flujo por unidad de gradiente de carga, que atraviesa el agua hacia abajo al pasar por varias capas de sedimentos, por encima del acuífero. A mayor resistencia hidráulica c , menor vulnerabilidad.

Para este método se retomó la información del estudio de Guysa (1998) y la carta hidrogeológica del área de estudio (CEAG, 1999), para obtener la representación grafica de las zonas delimitadas con líneas de igual índice AVI.

bb) Selección del Sitio para Evaluación de Escenario y Simulación de Trazado de Partículas.

La selección del sitio se realizó considerando 3 criterios, donde el primero se basó en la identificación de las zonas más vulnerables del acuífero de acuerdo a los métodos antes mencionados y que no necesariamente se tienen que traslapar, el segundo de los criterios para la definición del área fue que estuviera expuesto a elementos potencialmente tóxicos derivados de depósitos de jales y tercero que existiera la suficiente información para la generación del modelo de flujo y trazado de partículas.

cc) Generación del Modelo Conceptual.

El desarrollo del modelo conceptual es una simplificación de las condiciones reales geológicas e hidrogeológicas de la zona de estudio, que incluye los aspectos esenciales del sistema hidrogeológico. El desarrollo del modelo conceptual es la construcción de un modelo matemático de aguas subterráneas valido, puesto que debe servir para identificar las características del sistema hidrológico que controla el sistema (Guiguer, 2007).

Para los propósitos de este trabajo el modelo conceptual generó las bases para comprender el funcionamiento del sistema de aguas subterráneas, así como la estimación de posibles rutas de migración de contaminantes en las zonas más vulnerables de acuífero expuestas a la presencia de residuos mineros. Para la generación de este modelo se describió el acuífero Silao-Romita usando la información de la CEAG, y los componentes de geohidrología, hidroestratigrafía, hidrología superficial, niveles freáticos y conductividad hidráulica.

Una vez recopilada la mayor cantidad de información útil, se procedió a la construcción del modelo conceptual que simplificara sus características, esto como etapa previa al modelo matemático. Esta etapa destaca del trabajo ya que un planteamiento inadecuado del modelo puede condicionar posteriormente el ajuste y convergencia del modelo matemático.

De manera explícita en esta etapa se realizó la idealización y simplificación de las características conocidas de la zona de estudio con apoyo del software Visual MODFLOW 3D-Builder 2008.1 y de la cartografía vectorial y temática proporcionada por Instituto de Planeación del Estado de Guanajuato (1:10,000 y 1:50,000), para la determinación del dominio del sistema, el número de niveles o capas a considerar y entradas y salidas de agua del sistema (recarga, drenajes, ríos, etc.).

dd) Generación del Modelo de Flujo.

Una vez establecido el modelo conceptual, la siguiente actividad fue la implementación del modelo matemático que simulara el comportamiento real del acuífero (modelo de flujo). En este modelo matemático el dominio del sistema fue discretizado mediante un mallado tridimensional que estructuró el sistema en celdas, para esto se utilizó el software Visual MODFLOW 2009.1 como aplicación para el desarrollo del modelo matemático.

Cabe mencionar que MODFLOW es un programa de simulación del flujo del agua subterránea, disponible al público, desarrollado por el U.S. Geological Survey (McDonald y Harbaugh, 1988), bien documentado y usado por consultores, agencias gubernamentales e investigadores además de su amplia aceptación en procedimientos reguladores y legales.

Una vez discretizado el sistema se procedió a la asignación de las propiedades básicas que controlan el flujo y trazado de partículas. En primer lugar se definió la conductividad hidráulica teniendo en cuenta las características hidrogeológicas del sistema en base a los valores que se reportan en la carta geohidrología de la CEAG y valores promedio de K para diferentes tipos de rocas propuesta por Freeze and Cherry (1979). Otra de las propiedades que fueron asignadas al modelo fueron las siguientes: coeficiente de almacenamiento (S), rendimiento específico (S_y), porosidad total y porosidad específica.

El siguiente paso fue asignar las condiciones de frontera, las cuales establecieron las entradas y salidas de agua del sistema. A partir del modelo conceptual y el estudio hidrogeológico del acuífero (CEAG, 1998), se definieron las condiciones de frontera del tipo: carga constante, ríos y recarga. Al aplicar estas condiciones al modelo matemático fue necesario especificar la variable fundamental: el tiempo, el cual se determinó para un periodo de 20 años (7300 días), este valor fue propuesto en base a una estimación de tiempo promedio que tiene la principal fuente o depósito de jales.

Otro punto importante fue la definición de la extensión del modelo, es decir la frontera de no-flujo donde el conglomerado aflora y forma parte de una barrera natural de la Sierra de Guanajuato con el acuífero (Ramos-Leal, 2010).

Entre las condiciones de borde hidráulico de este modelo, se consideró a los ríos Guanajuato y el proveniente del Mineral del Cubo, como carga constante se tomó la presa La Purísima y la información del nivel estático de la red de monitoreo de la Comisión Estatal de Agua (3 pozos). Por último se asignaron los valores reportados en el estudio hidrogeológico de la zona (CEAG, 1998) para la recarga neta anual promedio del acuífero.

ee) Calibración del Modelo.

La calibración del modelo consiste en modificar los parámetros de entrada del modelo hasta que los resultados se ajusten razonablemente con las condiciones reales registradas del sitio. En este estudio se calibró el modelo en estado estacionario, es decir las variables no cambiaron en el tiempo, la información utilizada fueron los niveles piezométricos registrados en los pozos de observación de la Comisión Estatal del Agua del Estado.

Como parámetros de calibración se utilizaron el error promedio cuadrático (RMS) y el coeficiente de correlación, que son generalmente utilizados para la validación de estos modelos (Schlumberger Water Services, 2007).

ff) Trazado de Partículas.

El análisis de rastreo de partículas es utilizado ampliamente como una herramienta valiosa para ayudar en la evaluación de la evolución geoquímica de contaminantes, al mismo tiempo para proveer estimaciones de los orígenes y tiempos de residencia en el agua subterránea en diferentes partes del acuífero (Weaver y Bahr, 1991).

En general, un programa de rastreo de partículas consta de dos componentes principales: uno para la realización de la interpolación de la velocidad siempre que sea necesario, y otro para el avance de partículas usando análisis o integración numérica. Comúnmente los códigos de seguimiento de partículas se basan en la solución

semianalítica de los códigos USGS MODPATH (Pollock 1989, 1994) y la USEPA WHPA código (Blandford y Huyakorn, 1991). MODPATH fue diseñado para utilizar la solución de la carga del código USGS MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988; Harbaugh y McDonald, 1996). WHPA es una colección de soluciones analíticas y numéricas para delimitar áreas de protección de pozo, incluido en el paquete WHPA es el código seguimiento de partículas, GPTRAC, que se basa en la solución semianalítica y puede aceptar la solución de la carga, ya sea un bloque centrado con diferencias finitas de flujo o un cuadrilátero con elementos finitos de flujo. Ambos MODPATH y WHPA están disponibles fácilmente.

Dentro de los objetivos de este trabajo fue el identificar las rutas de transporte o migración de los contaminantes generados por un depósito de jales, para determinar los posibles sitios de depósito y si entran en contacto con la zona de alta vulnerabilidad del acuífero.

En esta actividad se utilizó el software MODFLOW en la versión que se utiliza (Visual Modflow 2009 v.1) se encuentra el código de seguimiento de partículas MODPATH (Pollock, 1989), el cual calcula el desplazamiento advectivo de partículas hipotéticas en un tiempo determinado dentro del flujo modelado, permitiendo mostrar la trayectoria de dichas partículas tanto hacia adelante (en el sentido del flujo) como hacia atrás, lo cual es muy importante para este trabajo

IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

gg) Selección de Depósitos y Presas de Jales.

De la revisión bibliográfica, fotointerpretación y recorridos de campo que se realizaron en la primera etapa del estudio para identificar los depósitos de residuos mineros, se detectaron 30 presas o depósitos de jales, los cuales se encuentran repartidos en la zona alta de la cabecera municipal, aunque algunos están localizados dentro de la zona urbana pero fuera de operación.

El muestreo se realizó únicamente a 5 depósitos de jales para la toma de muestras, donde 3 sitios se encontraban en operación y 2 como depósitos con varios años de abandono. Lo anterior fue gracias al apoyo del Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato que intercedió ante las distintas compañías mineras, ya que la mayoría no permitieron el acceso por cuestiones particulares.

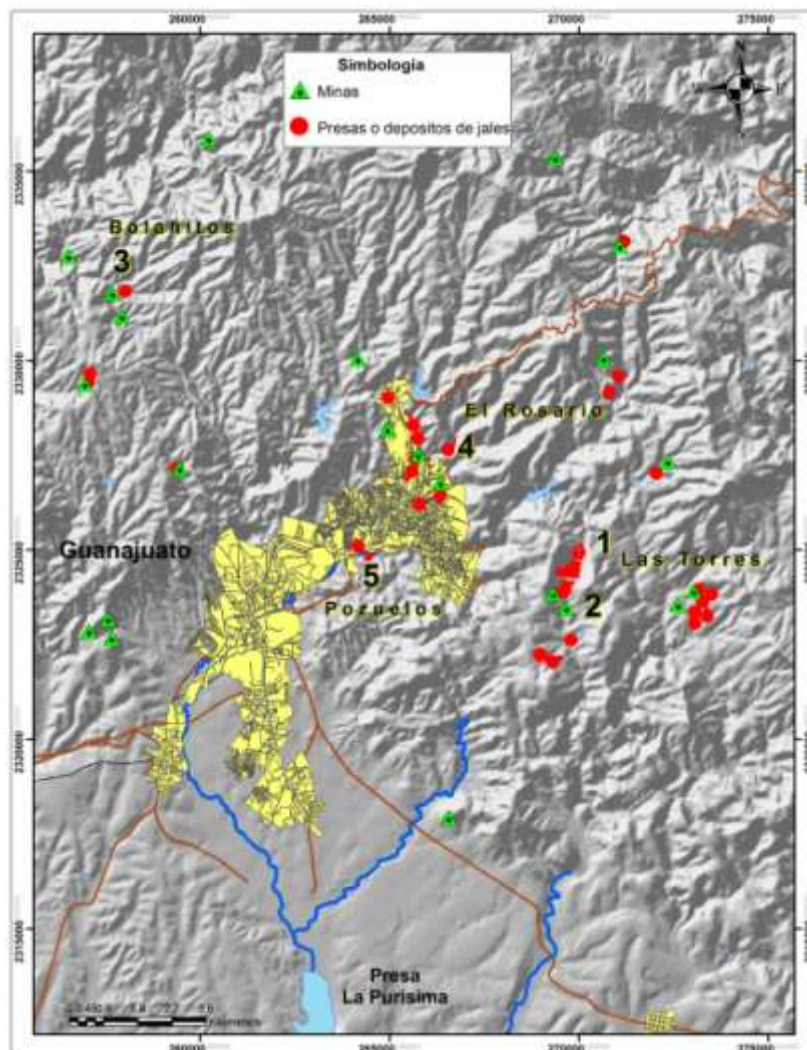


Figura IX-1 Localización de minas, depósitos y sitios de muestreo de jales.

Tabla IX-1 Depósitos para puntos de muestreo de jales mineros.

No.	Deposito	Status	Coordenadas UTM	
			X	Y
1	Las Torres	En operación	269,460	2,323,903
2	Las Torres	En abandono	269,585	2,324,362
3	Bolañitos	En operación	258,040	2,331,946
4	El Rosario	En operación	266,547	2,327,643
5	Pozuelos	En abandono	264,426	2,324,787

hh)Análisis de Muestras.

27) Pruebas Químicas en descargas.

Los análisis químicos de las descargas de las presa Las Torres y El Rosario, mostraron que los residuos depositados en dichas presas no presentan acidez respecto a lo indicado por la NOM-141-SEMARNAT-2003, con respecto al pH este es casi neutro, con conductividad baja y alto contenido de sólidos suspendidos totales, interpretándose como normal o común dado el método de beneficio de estas minas.

Tabla IX-2 Resultados de parámetros fisicoquímicos de la descarga en la presa de Las Torres.

PRUEBA	MÉTODO EMPLEADO	RESULTADOS	UNIDADES
pH	NMX-AA-008	7,32	---
Conductividad Electrolítica	MNX-AA-093	205	mS/m
Sólidos Disueltos Totales	NMX-AA-034	16900	mg/L
Sólidos Suspendidos	MNX-AA-034	210 300	mg/L
Cianuros	MNX-AA-058	< 0,0075	mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	NMX-AA-030	3 214	mg/L

Tabla IX-3 Resultados de parámetros fisicoquímicos de la descarga de la mina El Rosario.

PRUEBA	MÉTODO EMPLEADO	RESULTADOS	UNIDADES
pH	NMX-AA-008	7,62	---
Conductividad Electrolítica	MNX-AA-093	340	mS/M
Sólidos Disueltos Totales	NMX-AA-034	23968	mg/L
Sólidos Suspendidos	MNX-AA-034	94 000	mg/L
Cianuros	MNX-AA-058	< 0,0075	mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	NMX-AA-030	1894	mg/L

28) pH en descargas.

Los datos de pH de los sitios muestreados estuvieron dentro de un rango de neutral a ligeramente alcalino, estas pruebas preliminares indicaron que los jales de los sitios visitados no presentaban acidez. Sin embargo, el depósito en Pozuelos su pH fue ligeramente ácido, el cual deberá ser confirmado con la prueba de drenaje ácido tal y como lo marca la norma NOM-141-SEMARNAT-2003 con sus normas mexicanas NMX-B-021-1982, NMX-B-400-1970 y el método EPA 9038.

Tabla IX-4 Resultados de pH de residuos mineros.

Muestra	Sitio	pH
1	Muestra líquida Presa Las Torres en operación	7,22
2	Muestra compuesta Presa Las Torres en operación	7,73
3	Muestra compuesta Presa Las Torres sin operación	7,86
4	Muestra compuesta Presa Bolañitos	8,32
5	Muestra líquida de jal El Rosario	7,62
6	Muestra compuesta depósito Pozuelos	4,5



Figura IX-2 Toma de muestra de la descarga



Figura IX-3 Mediciones en campo.

ii) Concentración de Metales (NOM-52-SEMARNAT-1993).

En las muestras de depósitos y jales se cuantificaron 25 tipos de metales pesados (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, etc.) Los resultados Tabla VIII-5 fueron comparados con los límites máximos permisibles de la NOM-52-SEMARNAT-1993, esto con el fin de poder determinar si los jales mineros pueden ser considerados como residuos peligrosos y a su vez es recomendado por la NOM-141-SEMARNAT-2003.

Tabla IX-5 Resultados de concentración de metales de la descarga en la presa de Las Torres.

PRUEBA	MÉTODO EMPLEADO	RESULTADOS	UNIDADES
Plata	EPA 6010B	< 0,10	mg/L
Aluminio		4 716	
Arsénico		8,68	
Bario		12,99	
Berilio		0,36	
Calcio		4 072	
Cadmio		0,74	
Cobalto		2,02	
Cromo		11,79	
Cobre		5,99	
Fierro		3 754	
Potasio		12 464	
Magnesio		1 141,2	
Manganeso		127,82	
Molibdeno		0,45	
Sodio		253,2	
Niquel		3,23	
Plomo		5,36	
Antimonio		<1,96	
Selenio		<1,44	
Talio		<0,08	
Vanadio		<0,03	
Zinc		12,28	
Estaño		3,39	
Mercurio	0,06		

La norma NOM-052-SEMARNAT-2005 marca los siguientes límites máximos permisibles para concentraciones de metales.

Tabla IX-6 NOM-052-SEMARNAT-2005, segunda sección Pág., 7

CONTAMINANTE	LMP (mg/L)
Arsénico	5,0
Bario	100,0
Cadmio	1,0
Cromo	5,0
Mercurio	0,2
Plata	5,0
Plomo	5,0
Selenio	1,0

Para la muestra de la descarga en la presa de Las Torres, los metales que exceden los límites máximos permisibles son: Arsénico, Cromo, Plomo.

De la muestra compuesta de la presa de jales Las Torres (en operación) se realizaron los análisis para determinar metales, dando los resultados siguientes:

Tabla IX-7 Resultados de concentración de metales en muestra compuesta, en la presa de Las Torres (en operación).

PRUEBA	MÉTODO EMPLEADO	RESULTADOS	UNIDADES
Plata	EPA 6010B	< 0,10	mg/L
Aluminio		0,82	
Arsénico		<0,09	
Bario		0,16	
Berilio		<0,003	
Calcio		19,07	
Cadmio		<0,004	
Cobalto		0,06	
Cromo		0,1	
Cobre		0,29	
Fierro		0,57	
Potasio		35,22	
Magnesio		2,29	
Manganeso		0,42	
Molibdeno		<0,004	
Sodio		2,56	
Níquel		<0,02	
Plomo		<0,16	
Antimonio		<20	
Selenio		<0,14	
Talio	<0,01		
Vanadio	<0,003		
Zinc	0,13		
Mercurio	0,001		

Como se observa en la tabla anterior los metales presentes en el jal se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles de la NOM-052-SEMARNAT-2005, por lo tanto esta muestra en este estado no representa toxicidad por metales.

Los análisis para la presa Las Torres (fuera de operación) también fueron realizados y se muestran a continuación:

Tabla IX-8 Resultados de concentración de metales en muestra compuesta, en la presa de Las Torres (fuera de operación).

PRUEBA	MÉTODO EMPLEADO	RESULTADOS	UNIDADES
Plata		< 0,10	
Aluminio		2,44	
Arsénico		<0,09	
Bario		<0,16	
Berilio		<0,003	
Calcio		10,65	
Cadmio		<0,004	
Cobalto		<0,004	
Cromo		0,001	
Cobre		0,29	
Fierro		1,80	

PRUEBA	MÉTODO EMPLEADO	RESULTADOS	UNIDADES
Potasio	EPA 6010B	35,22	mg/L
Magnesio		2,29	
Manganeso		0,42	
Molibdeno		<0,004	
Sodio		2,56	
Níquel		<0,02	
Plomo		<0,16	
Antimonio		<20	
Selenio		<0,14	
Talio		<0,01	
Vanadio		<0,003	
Zinc		0,13	
Mercurio		0,001	

Como se observa los resultados de esta muestra no exceden los límites máximos permisibles mencionados en la norma NOM-052-SEMARNAT-2005, por lo tanto estos jales no presentaron toxicidad por metales.

Los resultados para la presa Bolañitos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla IX-9 Resultados de concentración de metales en muestra compuesta, en la presa de Bolañitos (en operación).

PRUEBA	MÉTODO EMPLEADO	RESULTADOS	UNIDADES
Plata	EPA 6010B	< 0,10	mg/L
Aluminio		<0,11	
Arsénico		<0,09	
Bario		<0,16	
Berilio		<0,003	
Calcio		14,3	
Cadmio		<0,004	
Cobalto		<0,004	
Cromo		<0,01	
Cobre		0,29	
Fierro		0,44	
Potasio		11,69	
Magnesio		2,01	
Manganeso		0,39	
Molibdeno		<0,004	
Sodio		1,90	
Níquel		<0,02	
Plomo		<0,01	
Antimonio		0,41	
Selenio		<0,14	
Talio		<0,01	
Vanadio		<0,003	
Zinc		<0,13	
Mercurio		<0,001	

Los resultados para determinación de toxicidad por metales en el jal de la mina Bolañitos y al igual que las dos muestras anteriores se encuentran por debajo los límites máximos permisibles de la norma NOM-052-SEMARNAT-2005.

Los análisis que se realizaron para la concentración de metales en la muestra de la mina del Rosario, mostraron los siguientes resultados

Tabla IX-10 Resultados de concentración de metales en la muestra tomada de la mina El Rosario.

PRUEBA	MÉTODO EMPLEADO	RESULTADOS	UNIDADES
Plata	EPA 6010B	< 0,0523	mg/L
Aluminio		830,25	
Arsénico		2,47	
Bario		2,02	
Berilio		0,61	
Calcio		15,60	
Cadmio		0,28	
Cobalto		0,44	
Cromo		4,93	
Cobre		1,77	
Fierro		1112,0	
Potasio		133,14	
Magnesio		849,38	
Manganeso		116,39	
Molibdeno		0,06	
Sodio		25,48	
Níquel		1,28	
Plomo		1,14	
Antimonio		0,24	
Selenio		0,16	
Talio	<0,0042		
Vanadio	<0,0017		
Zinc	3,13		
Mercurio	<0,001		

Al realizar la comparación de la concentración de metales entre los sitios de estudio se observa que están dentro de los límites permisibles marcados por la NOM-052-SEMARNAT-2005 ya que no los sobrepasan, por lo que se consideran no peligrosos.

El último de los análisis se realizó en la muestra del depósito de Pozuelos Tabla IX-11

Tabla IX-11 Resultados de concentración de metales en la muestra tomada del depósito de Pozuelos.

PRUEBA	MÉTODO EMPLEADO	RESULTADOS	UNIDADES
Plata		< 0,052	
Aluminio		0,22	
Arsénico		<0,024	
Bario		0,13	
Berilio		<0,003	
Calcio		6,38	
Cadmio		<0,002	

PRUEBA	MÉTODO EMPLEADO	RESULTADOS	UNIDADES
Cobalto	EPA 6010B	<0,0019	mg/L
Cromo		0,01	
Cobre		0,03	
Fierro		0.28	
Potasio		<0,22	
Magnesio		0,44	
Manganeso		<0,0012	
Molibdeno		0,07	
Sodio		0,86	
Níquel		<0,008	
Plomo		0,19	
Antimonio		<0,07	
Selenio		0,01	
Talio		0,01	
Vanadio		-	
Mercurio		< 0,008	

Al igual que las muestras anteriores, el depósito de residuos mineros en Pozuelos no rebasó los límites máximos permisibles por la norma 052 y por lo tanto no presentan toxicidad.

Las muestras de jales en general no mostraron peligrosidad por concentración de metales, caso contrario en la descarga en la presa de la compañía Las Torres, donde se rebasaron los límites en concentración de plomo, cromo y arsénico, lo cual será importante analizar en las pruebas ABA.

jj) Pruebas Acido-Base (NOM-141-SEMARNAT-2003).

El análisis de las muestras, se realizó con base en la norma NOM-141-SEMARNAT-2003, donde el potencial de neutralización (PN) y el potencial de acidez (PA) están normados por las NMX-B-400-1970, NMX-B-021-1982 y el Método EPA 9038.

Para la determinación del potencial de neutralización (PN), se hicieron reaccionar los jales con ácido clorhídrico (HCl) a ebullición, lo cual sobreestima la capacidad de neutralización de los jales bajo condiciones ambientales, ya que el HCl caliente logra disolver carbonatos poco reactivos, como el de Fierro (FeCO₃), que en condiciones ambientales no participan en el proceso de neutralización. Los resultados mostraron que la presa de Bolañitos y la presa de Las Torres (sin operación) son las de mayor potencial de neutralización de 98.74 y 98.19 kg CaCO₃/ton respectivamente, caso contrario la muestra del depósito de Pozuelos, la cual mostró un valor de 6.7 kg CaCO₃/ton.



Figura IX-4 Potencial de neutralización de las presas y depósitos de jal muestreados en el distrito minero de Guanajuato.

Para calcular el potencial de acidez (PA) indicado por la NOM-141-SEMARNAT-2003, se utilizó la prueba ABA la cual sobre estima la capacidad de generar ácido de los jales, pues no todos los compuestos que contienen azufre pueden formar ácido sulfúrico. Los resultados indicaron que las muestras de las descargas de la mina El Rosario y la descarga de Las Torres tienen mayor potencial de generación de acidez con valores de 13.98 y 13.59 kgCaCO₃/ton respectivamente, caso contrario la presa de la mina Bolañitos la cual apenas alcanza un valor de 0.016 kgCaCO₃/ton.



Figura IX-5 Potencial de acidez de las presas y depósitos de jal muestreados en el distrito minero de Guanajuato.

De acuerdo a la Norma NOM-141-SEMARNAT-2003, el criterio de generación de drenaje ácido mencionado en la sección 5 del anexo 5 se obtiene de la siguiente relación:

Cuando $PN/PA \leq 1,2$ los jales son potenciadores de drenaje ácido

Cuando PN/PA > 1,2 Los jales no son generadores de drenaje ácido

Lo cual concluye que de acuerdo al criterio de la norma, los jales mineros presentes en este estudio, no son generadores de drenaje ácido, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla IX-12 Resultados de pruebas ABA para sitios muestreados en el distrito minero de Guanajuato.

Muestra	PN kgCaCO3/ton	PA kgCaCO3/ton	Drenaje ácido PN/PA
Presas las Torres en Operación (presa)	94.23	2.4	39.26
Presas las Torres sin operar	98.19	1.53	64
Presas mina Bolañitos en operación	98.74	0.016	6171
Presas mina El Rosario	93.91	13.98	6.71
Presas Pozuelos	6.7	0.5	13.4

Un punto que llama la atención en esta etapa del trabajo, es el valor del pH de 4.5 en el depósito de Pozuelos, dado que de acuerdo a la norma no ocurriría un potencial de generación de drenaje ácido. **Esto condujo a que se planteara este sitio como posible fuente de contaminación, siendo necesario estimar la concentración total de metales presentes, así como determinar las especies minerales presentes, con el fin de valorar la mineralogía y plantear un escenario de posible riesgo para el acuífero de Silao-Romita.**

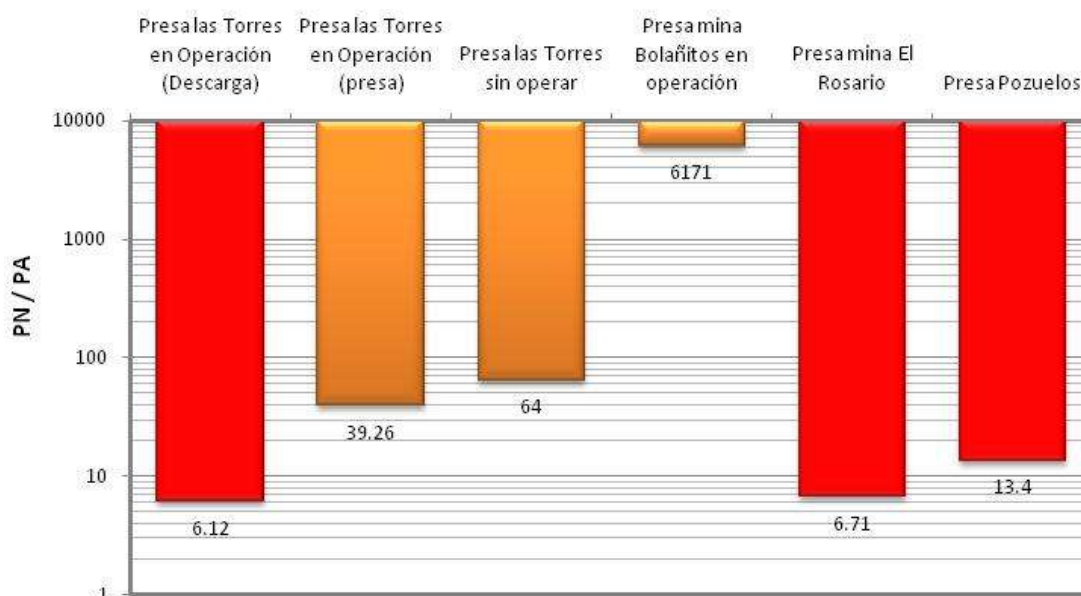


Figura IX-6 Potencial de generación de drenaje ácido (PN/PA).

kk) Identificación Mineralógica por Difracción de Rayos X.

Esta prueba solo se realizó para el depósito de Pozuelos dado que las pruebas anteriores la ubicaron como una fuente potencial de contaminación. De acuerdo a las características del distrito minero de Guanajuato y su origen epitermal, se supuso la presencia de metales en forma de sulfuros, además del tiempo de abandono (más de 70 años) y a los métodos de beneficio cuando no eran muy eficientes.

En la muestra de Pozuelos, dado que los sulfuros pueden ser liberados bajo procesos de oxidación y generar drenaje ácido o liberar elementos potencialmente tóxicos al ambiente, la determinación de difracción de Rayos X, se aplicó en el material tomado a distintas profundidades.

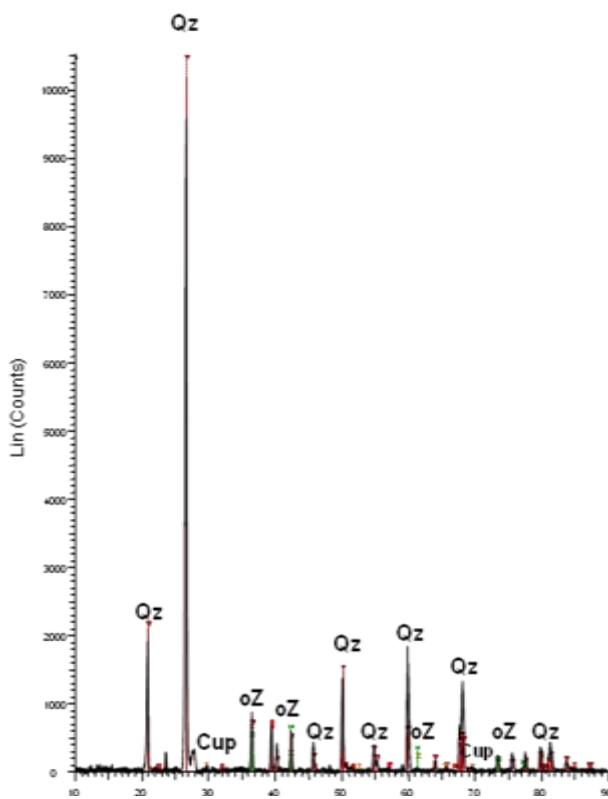


Figura IX-7 Difractograma de jales correspondientes a Pozuelos en muestra superficial.

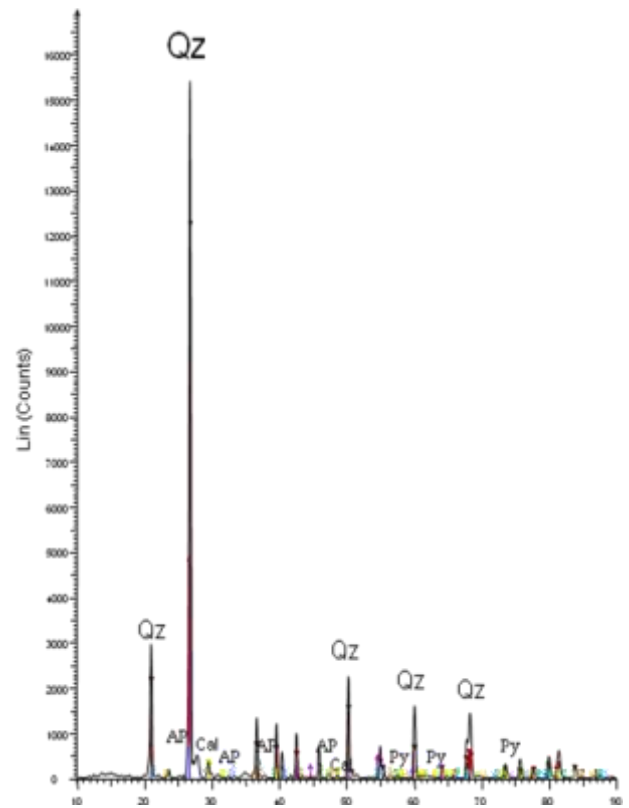


Figura IX-8 Difractograma de jales correspondientes a Pozuelos en muestra a 1 mts de profundidad.

Los resultados reportados por Medel-Reyes (2009) en las figuras IX-7 y IX-8 muestran que la parte superficial del depósito está compuesta por Cuarzo (Qz-SiO₂), Cuprita (Cup-Cu₂O) y Óxido de Zinc (Oz-ZnO), lo cual descarta la presencia de sulfuros, pues resulta lógico debido al intemperismo al que están expuestos provocando su oxidación y arrastre por la lluvia. Al comparar la muestra compuesta tomada a 1 metro de profundidad, esta

presenta un contenido mineralógico de Cuarzo (Qz), Pirita (Py) (FeS_2), Arseniato de Plomo-AP (PbAs_2O_6) y Calcita (CaCO_3), indicando la presencia de sulfuros de hierro en la Pirita, situación que se esperaba por el tipo de yacimientos del distrito minero de Guanajuato del que provienen estos residuos.

II) Extracción de Metales.

Una vez identificada la presencia de sulfuros nuevamente se muestreó el sitio de interés para determinar el contenido total de elementos potencialmente tóxicos y determinar las especies químicas presentes en el depósito para valorar el potencial de contaminación de este sitio.



Figura IX-9 Deposito de jales en Pozuelos.



Figura IX-10 Perforación para toma de muestra a 1 m de profundidad.



Figura IX-11 Extracción de muestra a 1 m de profundidad.



Figura IX-12 Muestra homogenizada.

El contenido total de metales y especies presentes se muestran en la tabla IX-13.

Tabla IX-13 Resultados de concentración total de metales presentes en la muestra tomada del depósito de Pozuelos.

PRUEBA	MÉTODO EMPLEADO	RESULTADOS	UNIDADES
Plata	EPA 6010B	5,95	mg/kg
Aluminio		282,99	
Arsénico		16,10	
Bario		19,10	
Berilio		0,09	
Calcio		163,15	
Cadmio		0,47	
Cobalto		0,30	
Cromo		8,29	
Cobre		11,97	
Fierro		4209,61	
Potasio		10,82	
Magnesio		58,55	
Manganeso		0,06	
Molibdeno		3,22	
Sodio		9,75	
Níquel			
Plomo		53,39	
Antimonio		1,85	
Selenio		3,90	
Talio	4,14		
Vanadio	14,98		
Zinc	29,85		
Mercurio	0,18		

El contenido de metales muestra la presencia de alta concentración de Fierro (Fe), situación que corrobora o incrementa la posibilidad de que se encuentre en su forma mineral de Pirita (FeS_2) como fuente de azufre y principal generador de drenaje ácido. Otro punto a resaltar es la presencia en concentraciones significativas de otros elementos potencialmente tóxicos como el Arsénico y Plomo, así como altos contenidos en Aluminio, Calcio, Zinc, Magnesio y Cobre, los cuales también fueron detectados en distintas fases minerales en las pruebas de Difracción de Rayos X.

De manera complementaria el microanálisis por espectroscopia de energía dispersiva (EDX) en la muestra corroboró de manera semicuantitativa la presencia del azufre.

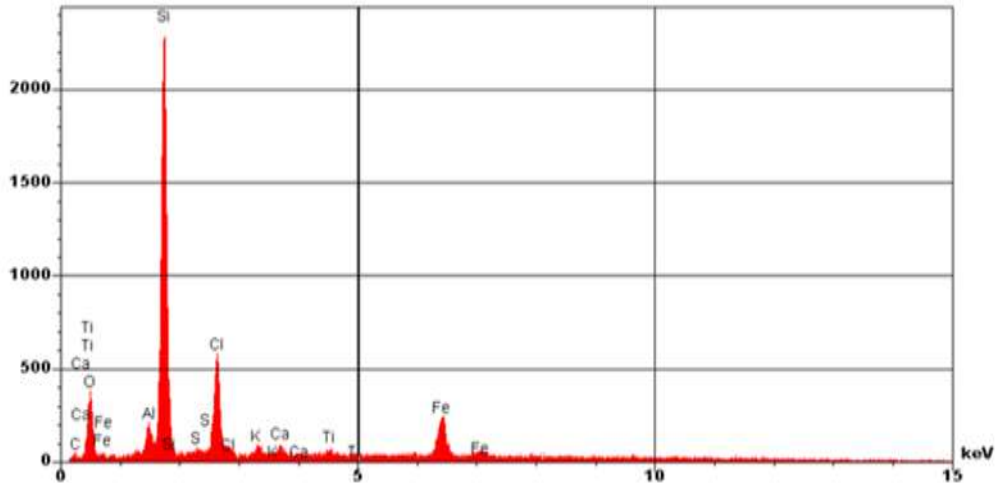


Figura IX-13 Microanálisis por EDX de jales del depósito de Pozuelos.

La prueba de EDX, además del azufre (S), indicó la presencia silicio (Si) y Titanio (Ti), elementos que previamente no se habían analizado el método EPA 6010B.

Las pruebas de especiación química reportadas por Medel-Reyes (2009) en base al método de Tissier (1979) de extracción secuencial, mostraron cinco fracciones evaluadas, las cuales se mencionan a continuación:

Fracción 1: Metales absorbidos e intercambiables.

Está constituida por los metales fijados al suelo mediante reacciones de adsorción a arcillas, óxidos hidratados de hierro y manganeso.

Fracción 2: Metales unidos a carbonatos.

Los minerales carbonatados son susceptibles a cambios de pH y los elementos potencialmente tóxicos asociados (precipitados o coprecipitados con carbonatos) pueden solubilizarse bajo ciertas condiciones ambientales.

Fracción 3: Metales unidos a óxidos amorfos de hierro y manganeso.

Estos óxidos y oxihidróxidos de Hierro y Manganeso, se presentan como nódulos o simplemente como cemento de unión entre partículas, constituyendo magníficos depósitos de elementos potencialmente tóxicos, los óxidos aparecen en un grado muy variable de cristalinidad y son termodinámicamente inestables bajo condiciones anóxicas.

Fracción 4: Metales unidos a sulfuros.

Esta se refiere a los metales asociados al Azufre como pirita (FeS_2), esfalerita (Zn, FeS), calcopirita (CuFeS_2), galena (PbS), pirargilarita (Ag_3SbS_3), arsenopirita (FeAsS) que son

las más comunes en los jales mineros del distrito de Guanajuato y que bajo condiciones de oxidación pueden ser liberados.

Fracción 5: Metales en forma residual.

Está constituida principalmente por minerales primarios y secundarios asociados a elementos potencialmente tóxicos en su estructura cristalina y que no son liberados fácilmente al menos bajo condiciones naturales, se considera que estos elementos solo pueden movilizarse mediante digestión del sólido residual utilizando ácidos fuertes o a elevadas temperaturas.

Con base en lo anterior y las características de los jales presentes en el depósito de Pozuelos se puede determinar que las fracciones que interesan para los minerales (Fe, Cu, Zn, Pb) posiblemente asociados a sulfuros y generadores de drenaje ácido y liberación de elementos tóxicos son: metales intercambiables y metales unidos a sulfuros.

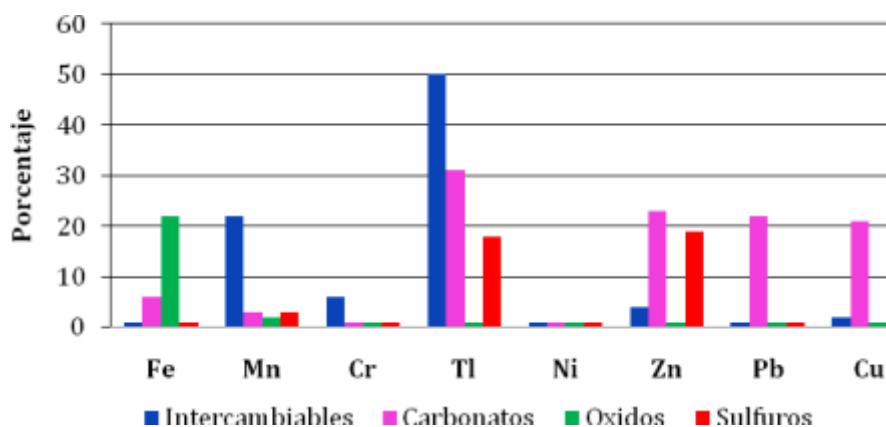


Figura IX-14 Especies presentes de los minerales más abundantes en el depósito de Pozuelos.

Los resultados marcan que el 2% de Hierro presente en la muestra está en la fracción intercambiable al igual que en la fracción de sulfuros presente como pirita (FeS_2), en el caso del zinc (Zn) este se encuentra en un 4% como intercambiable y en 19% como sulfuro o esfalerita, el cobre (Cu) presenta un 2.5% en fracción intercambiable y un 17% como sulfuro o calcopirita, por último el plomo (Pb) el cual presentó un 2% en fracción intercambiable al igual que en forma de sulfuro. Lo anterior demuestra que efectivamente los depósitos de jales del sitio de estudio representan una fuente que libera lixiviados ácidos.

mm) Vulnerabilidad Intrínseca.

Los resultados obtenidos en este trabajo por el método DRASTIC considerando los estudios realizados por la CEAG (1998), nos muestran que los valores obtenidos por este método en el municipio de Guanajuato varían desde 80 a 190. Al hacer el mapeo de aproximación, se observó que la mayor parte del territorio presenta índices entre 80 y menores a 150 lo que predominantemente confiere al carácter de baja vulnerabilidad, esto debido a los valores de conductividad hidráulica, la profundidad del nivel piezométrico y los valores de recarga.

Al suroeste se localizan zonas con índices entre 150 y 170, las cuales pueden considerarse como zonas de vulnerabilidad de media a alta, esto debido principalmente a las características de la zona vadosa que presentan buenas conductividades y que permiten el paso de solutos desde la superficie.

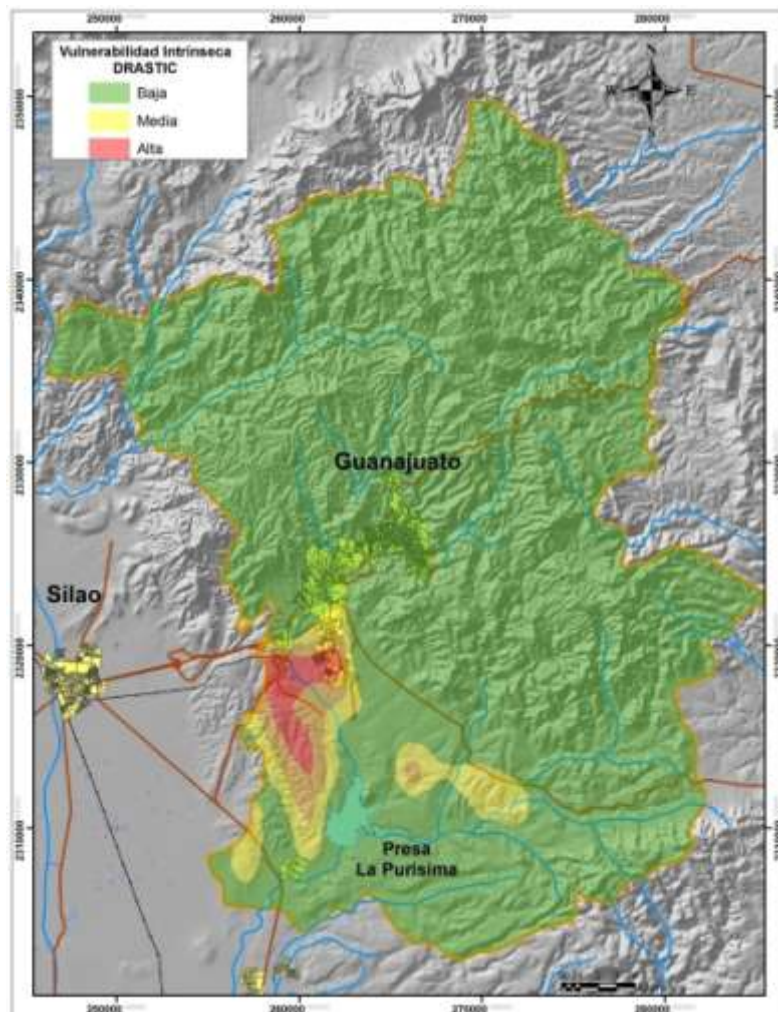


Figura IX-15 Índice DRASTIC para el municipio de Guanajuato.

La zonas más crítica se localizó al poniente de la presa la Purísima que se encuentra al sur del municipio (figura IX-15), de manera más específica a la altura de las comunidades Santa teresa y Las Pachonas, los índices DRASTIC van desde 170 a 190 que indican una alta vulnerabilidad, esto debido a las características del sitio ya que presentan materiales de buena granulometría, como conglomerados, los cuales presentan valores altos de conductividad, estos aspectos predominaron sobre uno de los factores más determinantes que es la profundidad del nivel piezométrico.

Con respecto al método AVI, el cual solo consideró dos parámetro como el espesor y la conductividad hidráulica de las capas que se encuentran sobre el acuífero o nivel freático, se desarrollo tomando en consideración la información del estudio de Guysa (1998), para obtener la representación grafica de las zonas delimitadas con líneas de igual índice AVI.

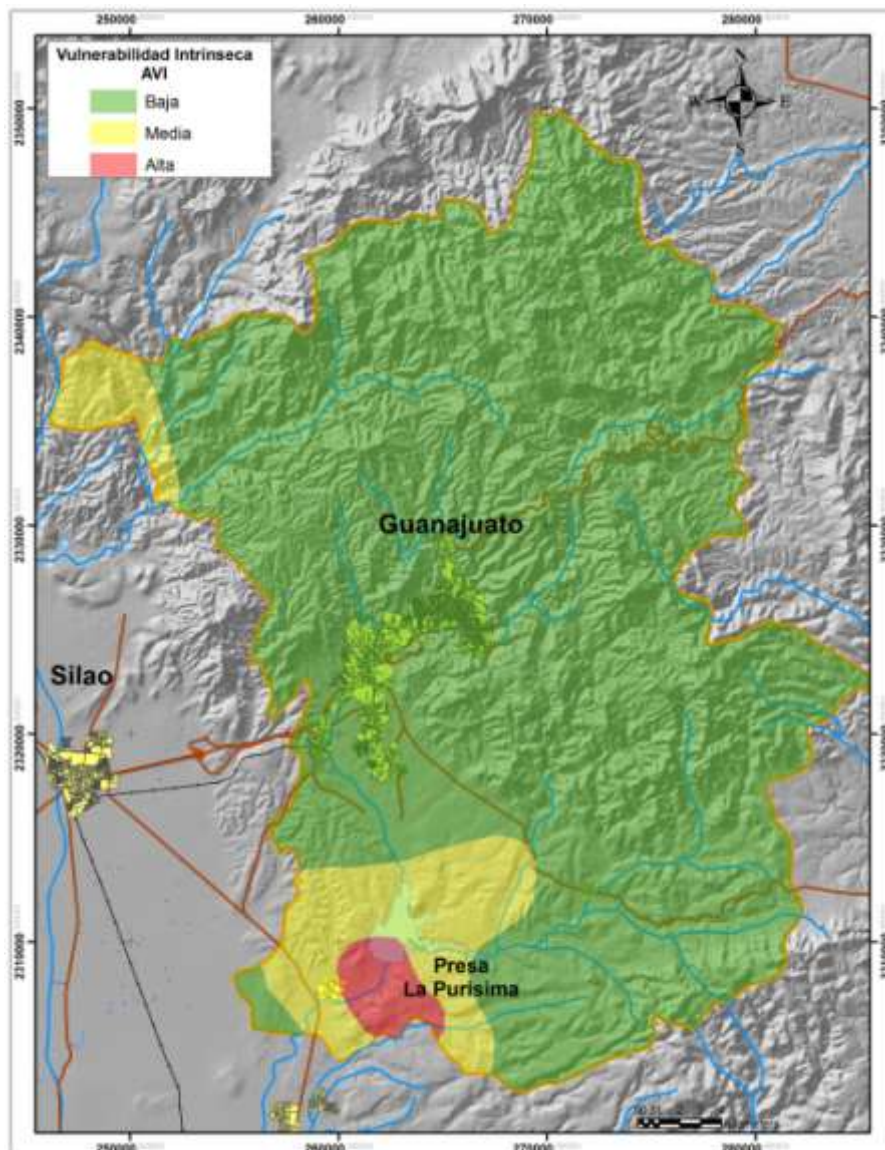


Figura IX-16 Índice AVI para municipio de Guanajuato.

El mapa obtenido para este estudio muestra que de acuerdo a las características antes mencionadas para estimar este índice, el municipio de Guanajuato presenta una vulnerabilidad gradual que va de media a alta, presentando dos áreas críticas (vulnerabilidad alta), una en la parte norponiente cercana al Cerro del Cubilete y otra en la zona sur cerca de la presa la Purísima (figura IX-16), el resto del municipio presenta una tendencia de vulnerabilidad media con tiempos de transición de 50 a 20 días.

nn) Selección del Sitio para Evaluación de Escenario.

La selección del sitio para la modelación del trazado de partículas y generación del modelo de flujo, tomó en consideración las zonas más vulnerables ante una presunta contaminación y que se encuentre en el paso de residuos arrastrados desde el depósito de jales de Pozuelos.

De acuerdo a los métodos DRASTIC, AVI y al flujo del Rio Guanajuato como principal medio de transporte de la fuente contaminante, el sitio se localizó al Oriente del acuífero Silao-Romita, en la zona de influencia de la presa La Purísima, con una cobertura de 16,500 hectáreas (figura IX-17 y IX-18).

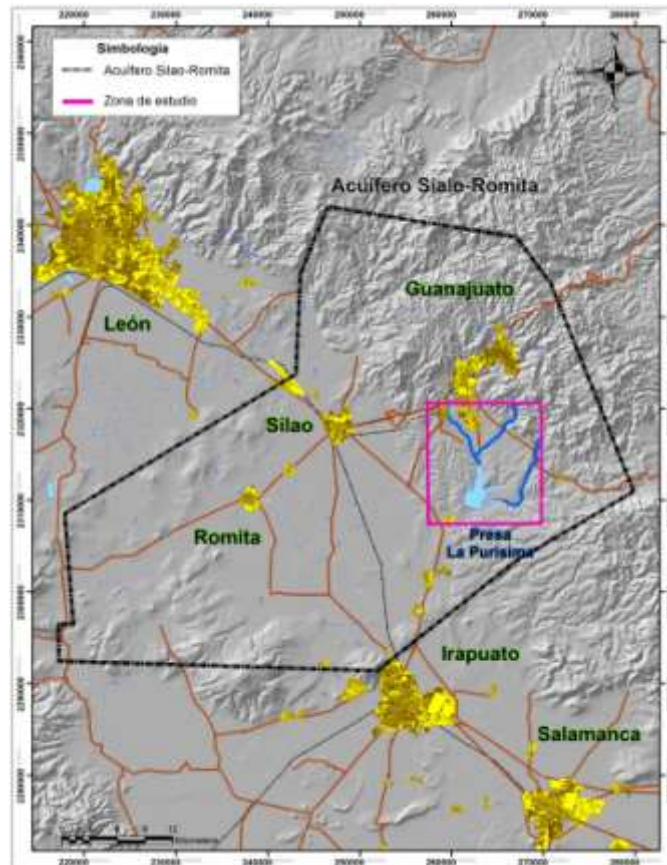


Figura IX-17 Zona para evaluación de escenario.

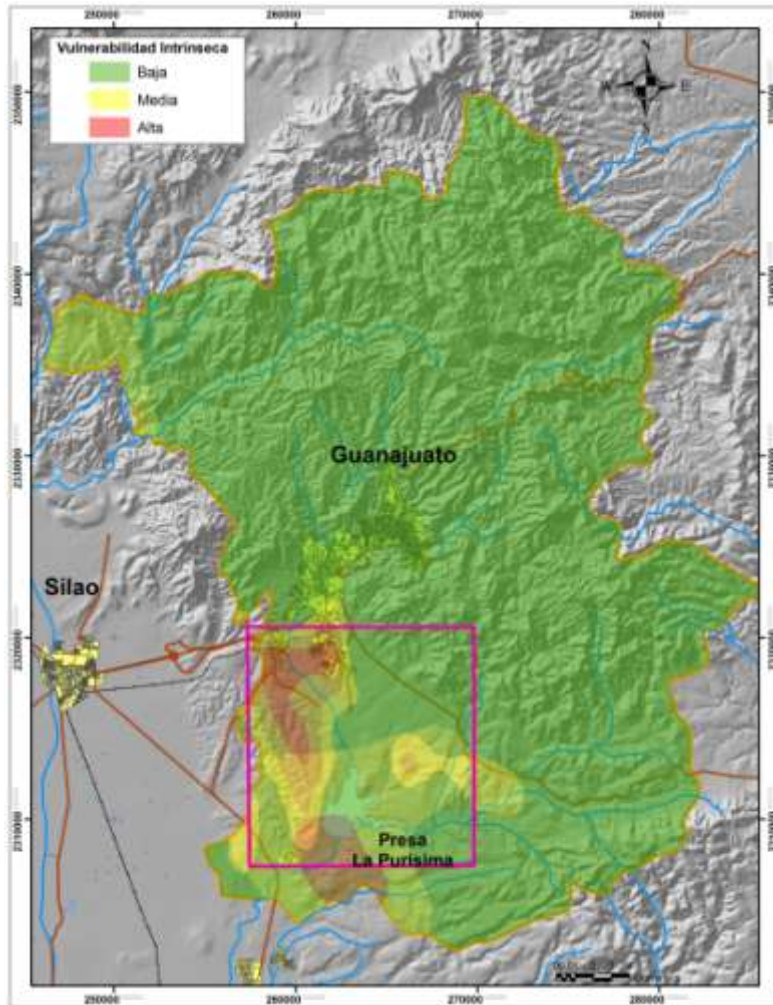


Figura IX-18 . Zona de alta vulnerabilidad intrínseca.

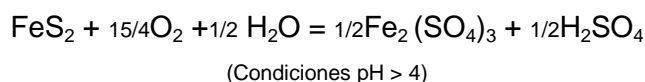
oo) Generación de Escenario.

Una vez determinado el sitio, el escenario planteado utilizó los resultados físico-químicos de las muestras de Pozuelos, donde el ABA (Balance Acido-Base) indicó que este depósito no presenta capacidad de generación de drenaje ácido por su potencial de neutralización y de acidez (13.4) está por encima de 1.2, sin embargo, el pH del residuo fue de 4.5 ligeramente ácido, lo que contrapone la información de la ABA. Esto puede deberse a la geodisponibilidad, como consecuencia directa de la actividad minera, ya que se ponen a disposición elementos que antes no lo estaban o se encontraban de una forma geológica limitada. La geodisponibilidad genera la acumulación de especies químicas de alta solubilidad, que sumando al clima como factor influyente se generan microambientes químicos, es decir, a menor temperatura más lenta será la cinética de las reacciones, lo que significa que los procesos químicos tardan más en completarse. Así en climas muy fríos los procesos de oxidación son en general poco eficaces (Higueras, 2008).

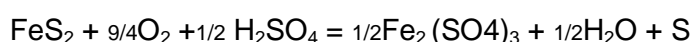
La zona de estudio del depósito de jales de Pozuelos se encuentra en una región de clima semidesértico la cual favorece procesos químicos de oxidación y lixiviación de metales y que se completan en un tiempo corto con respecto a sitios con otros climas.

Con base en lo anterior la generación y liberación de drenaje ácido sería por meteorización de los minerales sulfurosos. Su oxidación puede generar efluentes ácidos y elementos tóxicos a partir de la pirita (FeS_2) dado que es el mineral más abundante en el depósito.

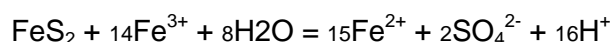
La oxidación de la pirita puede darse de dos maneras en condiciones ácidas. La primera como descomposición compleja expresada en la siguiente reacción (Bigham y Nordstrom, 2002).



Sin embargo, si se limita el oxígeno las condiciones de lixiviación sucede la siguiente reacción.



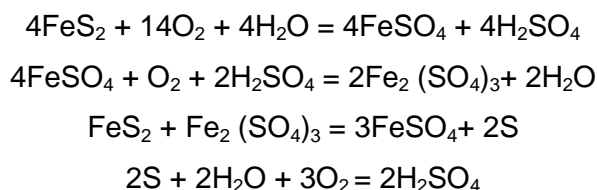
Cabe mencionar que el Fe^{3+} en solución no puede permanecer mucho tiempo en contacto con la pirita ni con el ambiente, porque en medios ácidos ocurre la reacción de Jambor et al. (2002).



Esta oxidación de FeS_2 es considerablemente más rápida que la provocada por O_2 , y es favorecida por las condiciones ácidas de las inmediaciones de los granos de pirita. De hecho el proceso de oxidación de la pirita es muy lento en ausencia de bacterias que aseguren el suministro constante de Fe^{3+} , por ello se considera que la ecuación anterior (Bigham y Nordstrom, 2002) es la limitante en la oxidación de FeS_2 .

Respecto a la actividad microbiológica en depósitos de jales, existen varios tipos de bacterias capaces de derivar energía de los minerales sulfurados (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum*, *ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans organoparus* y *Thiobacillus acidophilus*). La actividad de estos microorganismos es importante en los procesos de oxidación natural de cuerpos mineralizados. En el caso del distrito minero de Guanajuato se ha reportado la presencia y actividad de *Thiobacillus ferrooxidans*

(Camarena-Pozos, 2008), donde su acción biológica descompone los sulfuros, libera metales y acidifica el agua, pues su fuente de energía proviene de la oxidación de los compuestos de azufre, el cual es reducido junto con el ión ferroso. Las reacciones de oxidación que utilizan estas bacterias para descomponer la pirita son las siguientes (Plumlee, 1999).



(Condiciones pH 2-8, temperatura 28 °C a 35°C)

Con todo lo anterior el planteamiento sugerido es la generación de drenaje ácido dadas las condiciones ambientales y microbiológicas presentes en el depósito de jales, ya que dicha interacción está dada por la mineralogía, geoquímica y microbiología del sitio. Se propone que en temporadas de sequía el transporte o la movilización de elementos sulfurados pueden dirigirse a la superficie del depósito vía capilar hacia un ambiente más oxidante, formando sulfatos secundarios en la superficie, mismos que son solubilizados en agua (Dold y Fontboté, 2001). Esto en la lluvia más próxima disolverá y movilizará elementos en su arrastre, así la actividad microbiológica generará y liberará drenaje ácido y/o elementos potencialmente tóxicos.

Una herramienta útil de carácter predictivo del escenario planteado en el párrafo anterior, es conocer de manera general las condiciones de potencial redox y potencial hidrogeno (Eh-pH) en que se encontraran las sustancias solubles en el medio natural. Para lo cual se genero una grafica Eh versus pH (figura IX-19).

Se utilizaron los valores promedios de Eh a condiciones atmosféricas, donde el agente oxidante fue el oxígeno en concentración del 20%. Los valores de Eh promedio fueron de -1 a 1.2 volts, con respecto al pH en una escala de 0 a 14.

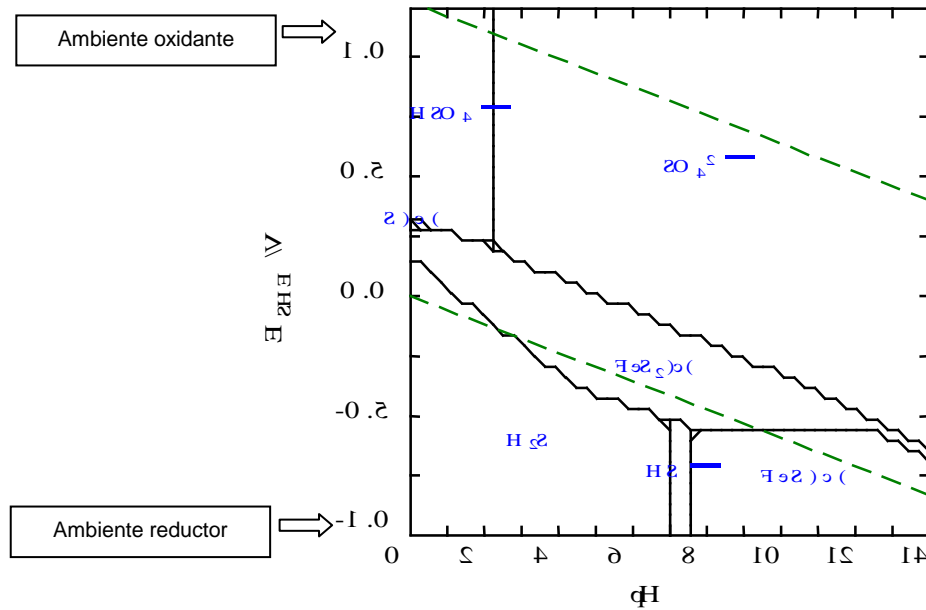


Figura IX-19 Diagrama Pourbaix del sistema pirita para Eh - pH.

La grafica anterior muestra que parte del residuo encontrado en el depósito de Pozuelos está en condiciones de generar drenaje ácido, pues de acuerdo al pH (4.5) y las condiciones del sitio como la vegetación sobre el depósito, es decir presencia de materia orgánica, se favorecerá un ambiente reductor mucho más factible en temporada de lluvias.

pp) Estimación de Residuos Mineros.

La estimación de la superficie actual que cubre el depósito se realizó con un recorrido perimetral de campo y con apoyo de ortofoto 1:10,000 para la delimitación de la zona, la cual representa un área de 2.60 hectáreas (Figura IX-20).



Figura IX-20 Delimitación del depósito de jales de Pozuelos.

La estimación del volumen de jales en Pozuelos, tomó en cuenta el depósito sobre una ladera de aproximadamente unos 45° a lo largo de 400 metros y debido al intemperismo se aprecian 3 escalones (figura IX-21 y 22), con apoyo de ortofoto y tomando una altura promedio de 6, 11 y 4 m de las terrazas basado en los recorridos de campo, se hizo una estimación conservadora considerando los escalones como rectángulos y solo tomando la porción estimada cubierta por el residuo, dando un volumen estimado de cada uno. El resultado fue de aproximadamente 80 mil metros cúbicos del jal minero ahí depositados (ver tabla IX-14).



Figura IX-21 Zonificación del depósito de jales en Pozuelos.

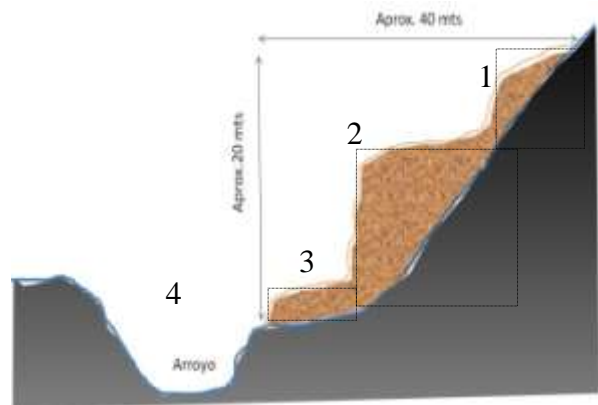


Figura IX-22 Esquema de la sección del depósito.

Tabla IX-14 Estimación del volumen de jales en el depósito de Pozuelos.

Zona	Área (m ²)	Alto (m)	Volumen sección (m ³)	% de la sección	Volumen estimado (m ³)
1	4416.4	6	37,485.3	35	13,119.8
2	7491.8	11	93,570.7	65	51,463.9
3	4242.5	4	14,602.2	100	14,602.2

Una vez determinado el volumen se estimó el peso, para lo cual se utilizó la densidad del jal en promedio de 1.5 ton/m³ (Hernández-Acosta, 2009), dando un estimado de 132,000 toneladas. Sin embargo, Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach (2006) reportaron un estimado de 500,000 toneladas para el mismo sitio.

Calculada la cantidad de residuos en el depósito y con base en la información de la caracterización del jal (concentración, fracción intercambiable y de sulfuros de Fe en las muestras), se hizo una aproximación en el contenido de pirita con potencial de generación de drenaje ácido y de liberación de elementos potencialmente tóxicos de aproximadamente 2,640 toneladas.

qq) Migración de la Fuente Contaminante a la Zona de Alta Vulnerabilidad.

Establecido el escenario de generación de una presunta contaminación y estimada la cantidad de pirita como principal fuente de contaminación, se identifica que existe material suficiente con potencial de generar los procesos de liberación de tóxicos a partir del jal de Pozuelos.

Desde el punto de vista de su localización geográfica, la fuente que se localiza sobre la ladera del cerro, favorece que los residuos sean arrastrados por acciones del intemperismo eólico y lluvia hacia la parte baja, con depósito sobre el afluente del Río Guanajuato. Esto es importante pues el río es el medio de transporte del jal de pozuelos y su conexión con la zona más vulnerable de la Presa La Purísima.

Los elementos tóxicos y efluentes ácidos desde la fuente contaminante arrastrados en el Río Guanajuato se suman a los procesos de mezclado con descargas de aguas urbanas, lixiviados provenientes del relleno sanitario del municipio y residuos mineros de otros depósitos o presas de jales (Figura IX-23), fenómenos que finalmente deben influir sobre el depósito final de la Presa La Purísima.

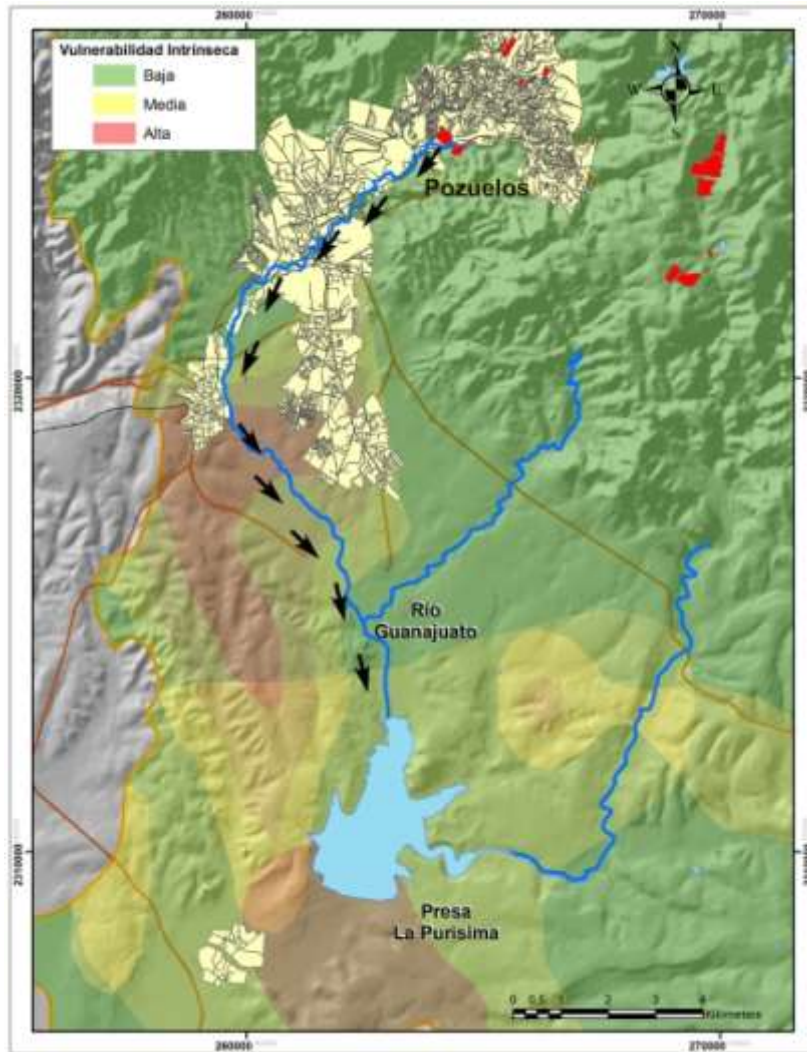


Figura IX-23 Ruta de migración de la fuente contaminante sobre el río Guanajuato.

rr) Modelo Conceptual.

Un conceptual es la simplificación de las condiciones reales para utilizar los aspectos esenciales del sistema de aguas subterráneas en términos de las preguntas planteadas. Siendo el paso clave en la construcción del modelo numérico útil, pues identifica los rasgos de la hidrogeología del sitio. En los capítulos siguientes se desarrollan las características que predominan en la zona de estudio.

29) Climatología.

Considerando el Ordenamiento Ecológico del Estado de Guanajuato (2004), se identifica que el clima en la zona de estudio corresponde a (A)C(w0)(w) en la clasificación de Köppen identificado como semicálido (figura IX-24), el cual cambia drásticamente, por ser esta una zona de transición entre la ladera de la sierra y las planicies del Bajío de Guanajuato. La descripción del clima es la siguiente:

(A)C: Estas dos condiciones lo identifican como un clima semicálido subhúmedo con temperatura media anual superior a los 18°C.

(W0): Régimen de lluvias de verano, el más seco de los semicálidos.

(w): Estación seca en invierno, con porcentaje de precipitación menor a 5.

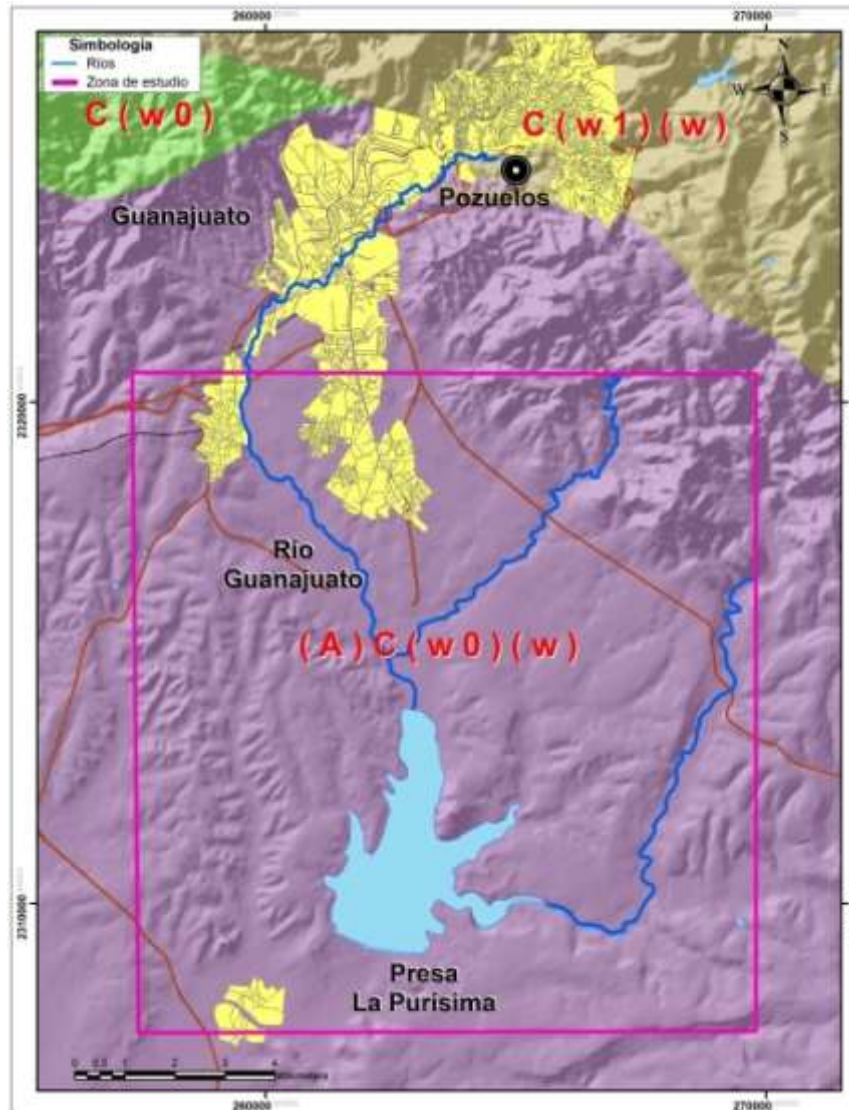


Figura IX-24 Clima presente en la zona de estudio.

En lo que respecta a las variables de temperatura y precipitación la zona de estudio alcanza una temperatura máxima de 36°C en verano y una mínima de 3°C en invierno, dándose una temperatura media anual de 18.5°C (figura IX-26). A su vez la precipitación pluvial varía de 600 a 700 milímetros anuales (figura IX-25), siendo el promedio anual de 697 milímetros. En los meses de julio y agosto se observa una mayor incidencia de lluvias alcanzando un valor de 217 milímetros cada uno.

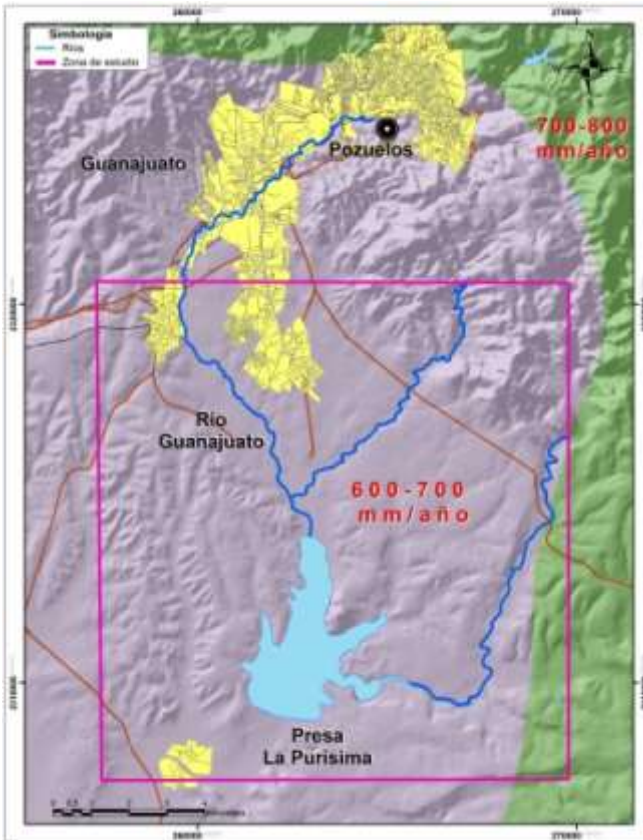


Figura IX-25 Precipitación media anual en la zona de estudio.

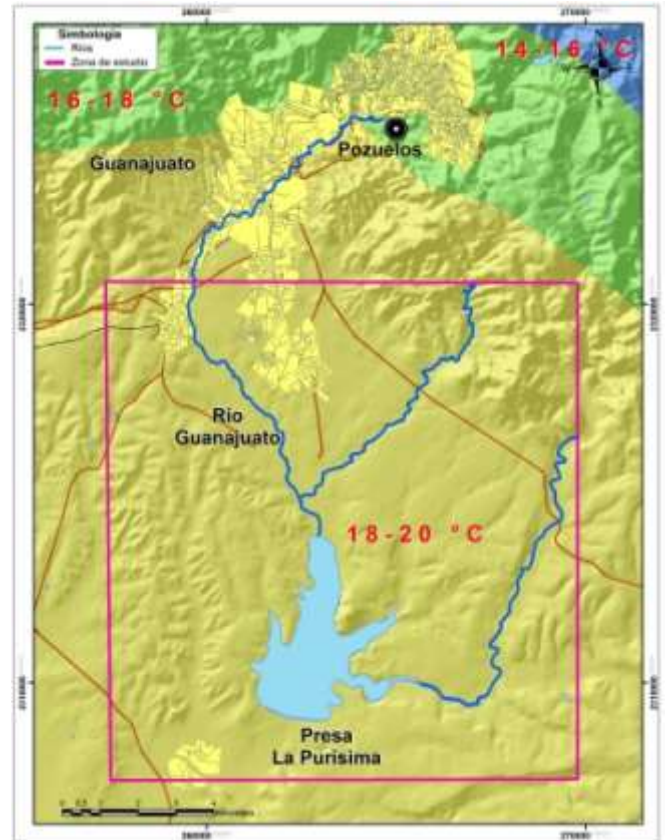


Figura IX-26 Temperatura media anual en la zona de estudio.

30) Topografía.

La zona de estudio se localiza en la provincia denominada Mesa del Centro y se caracteriza por presentar una zona de llanura con lomeríos dispersos y ligeros accidentes topográficos debido a su colindancia con la sierra de Guanajuato.

Para la zona de estudio se desarrolló un modelo digital de elevación a partir de curvas a cada 10 m (figura IX-27), esto para representar la superficie del terreno, la cual varía entre los 2,220 y los 1,780 m.s.n.m. con una diferencia entre ambas de 440 metros, que va a lo largo de la parte Norte en las cercanías del cerro del Trompetero hacia el Sur en lo que corresponde a la presa de La Purísima.

Las pendientes predominan en la zona de valle o llanura son de 8% localizadas al centro de la zona de estudio donde corren los cauces del rio Guanajuato. Otras pendientes entre el 8% y 20% son observadas aunque en menor proporción y corresponden a la zona de lomeríos y faldas de la Sierra en la periferia de la zona de estudio (figura IX-28).

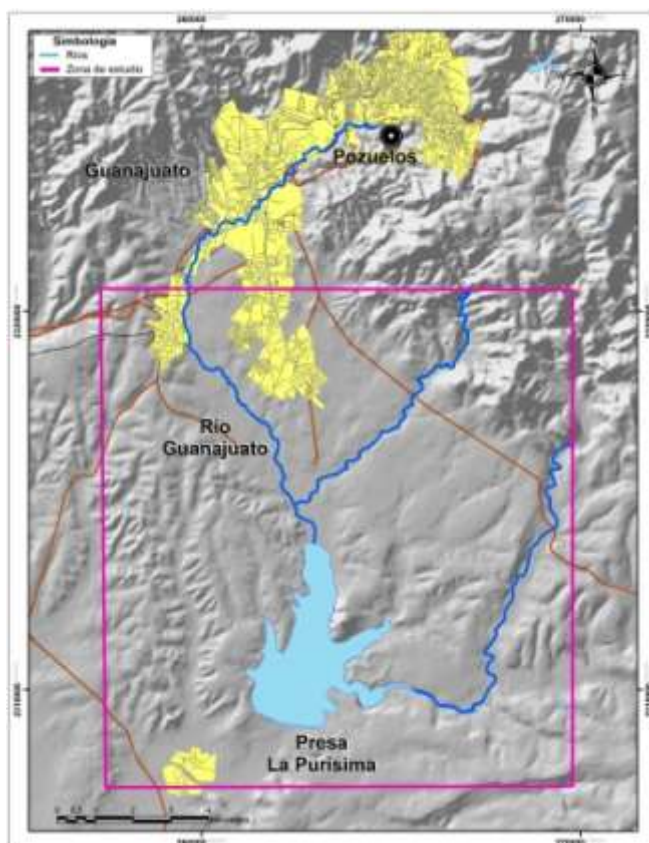


Figura IX-27 Modelo digital de elevación de la zona de estudio.

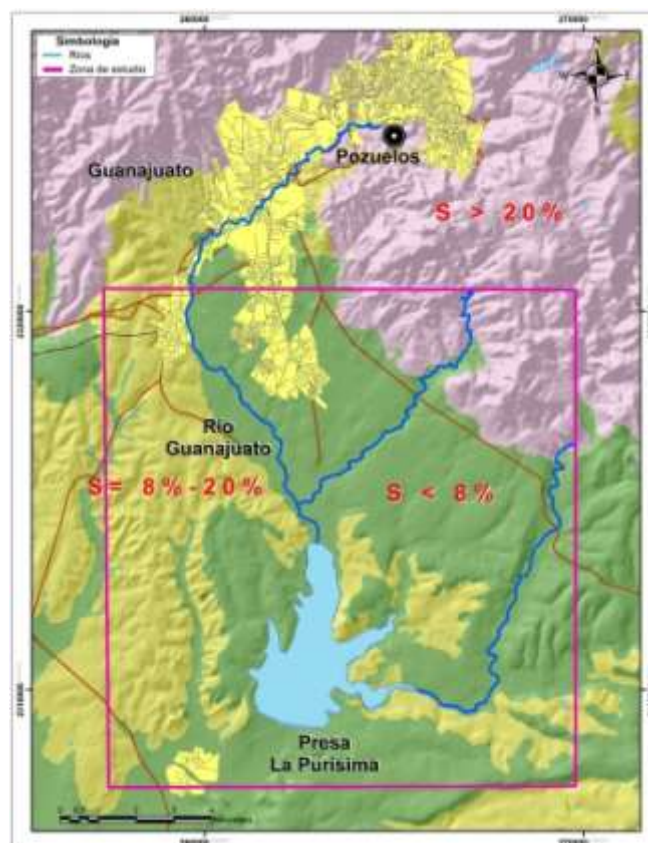


Figura IX-28 Pendientes predominantes en la zona de estudio.

31) Acuífero Silao-Romita.

El acuífero, al encontrarse alojado en depósitos granulares que forman la unidad hidrogeológica Terciario Superior, se recarga por infiltración directa de la precipitación pluvial, así como por flujo lateral proveniente de la infiltración que ocurre en las rocas basálticas que se localizan en las partes altas de las sierras.

Así la recarga vertical reportada es de $202.75 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ (CEAG, 1998), esta ocurre en el contacto de los materiales granulares con los afloramientos de las rocas ígneas, por la infiltración vertical causada por la precipitación pluvial o por los posibles retornos del agua de riego al subsuelo, así como, por el flujo lateral proveniente de la infiltración que se lleva a cabo en las partes altas de la sierra, donde existen rocas de composición basáltica. La descarga ocurre artificialmente en forma general por la explotación de los aprovechamientos subterráneos.

El espesor del acuífero reportado es alrededor de 400 metros, en el cual se identifican 3 horizontes acuíferos, denominados: somero, intermedio y profundo, de los cuales el somero e intermedio fueron sobreexplotados en los últimos 30 años y actualmente (2010)

están prácticamente agotados, siendo el acuífero profundo el que se encuentra en explotación hasta profundidades de más de 100 m.

La principal zona de aprovechamiento de agua subterránea para el municipio es la de Puentecillas que se localiza a 12 kilómetros al Sur de la Ciudad de Guanajuato, sobre la margen izquierda del Río Guanajuato. Reviste especial importancia debido a la localización de un sistema de pozos para el abastecimiento de la capital del Estado, al mismo tiempo se reconoce el flujo subterráneo que circula de Noreste a Suroeste que provienen de las estibaciones de la Sierra de Guanajuato y circula con una dirección similar a los escurrimientos superficiales.

El subsuelo de esta zona constituido por una alternancia de materiales granulares y volcánicos con conglomerados y tobas riolíticas tienen diferentes grados de cementación y compactación.

De acuerdo a datos de la Comisión Estatal del Agua del Estado el acuífero de Puentecillas no está conectado con el acuífero de Silao. Los niveles tanto estáticos como dinámicos son variables de un pozo a otro, por ello se consideran pozos alimentados por varios horizontes acuíferos aislados así como a probables fracturas que, en su conjunto, alimentan a los pozos con caudales y niveles variables. Así la parte topográficamente alta de Puentecillas presenta bajo rendimiento hacia la presa de la Purísima.

32) Geología.

La zona de estudio presenta dos tipos de formaciones geológicas (POET, 1998), las cuales definen el funcionamiento del acuífero y aporta elementos importantes para el desarrollo de modelo conceptual (figura IX-29). A continuación se describen estos elementos.

Arenisca, Conglomerado Polimítico (T_{pl}QAr-C_{gp}): Esta unidad cubre la mayoría de la zona de estudio, ocupando principalmente la zona de lomeríos. Litológicamente consiste de una serie de rocas sedimentarias, originadas por el relleno de sistemas de fosas tectónicas, constituidas principalmente por arenisca, conglomerado y toba, depositadas en medio acuoso, ocasionalmente contaminadas con sedimentos arcillo-calcáreos. El espesor de la unidad es variable y está en función de la profundidad del paleorelieve en el tiempo del depósito, pero por los desniveles topográficos actuales y por la profundidad de los tajos de los que se ha extraído material para la construcción de las carreteras,

como es el caso de la localidad La Trinidad, se estima que el espesor de este paquete es superior a los 300 m.

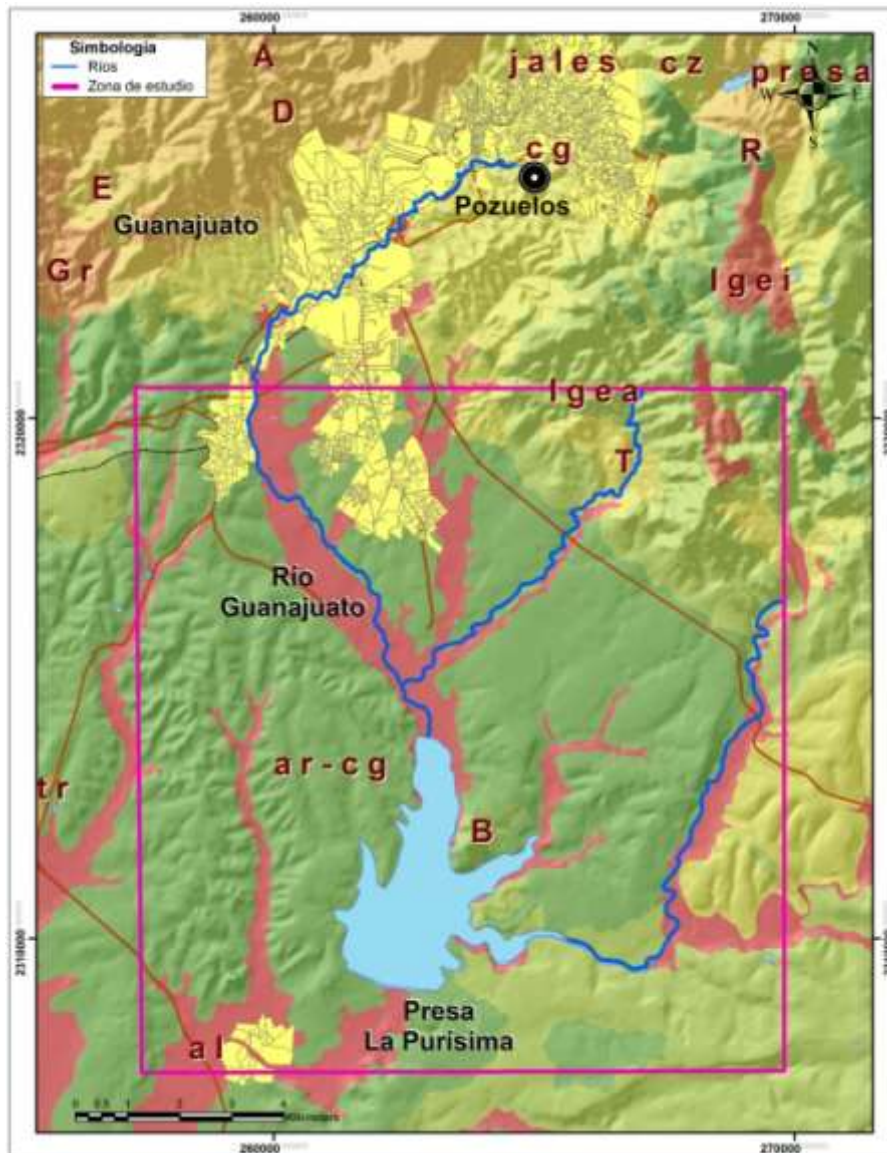


Figura IX-29 Geología presente en la zona de estudio.

Depósitos de Aluvión (Qal): se presentan de material no consolidado, producto de la desintegración de las rocas preexistentes, en forma de cantos rodados de forma subredondeados a redondeados, grava, arena, limo y arcilla, estos están depositados en los márgenes de los arroyos y en las partes bajas de la zona de estudio, como es el valle de Puentecillas, San José de Llanos y Santa Teresa, también forman parte del Bajío Guanajuatense, donde estas localidades presentan espesores de varios metros y son utilizadas como excelentes tierras de cultivo.

33) Hidrogeología.

Para el sitio de interés este presenta rocas sedimentarias clásticas, donde su porosidad puede variar entre un 5 y un 30%. La permeabilidad de las areniscas suele ser del orden de una a tres menor que la permeabilidad de los sedimentos no consolidados ni cementados; así por ejemplo, la arena de grano medio posee generalmente una permeabilidad comprendida entre 1 y 30 m/día, mientras que los valores para areniscas de grano medio varían entre 0.01 y 0.5 m/día.

De acuerdo a la carta hidrogeológica del estado de Guanajuato (CEAG, 1999), la zona de estudio presenta un permeabilidad considerada en el rango de Alta a Media, ya que la conductividad hidráulica se encuentra entre 3.0×10^{-4} a 2.8×10^{-3} , por lo que es considerada como zona de recarga del acuífero Silao-Romita.

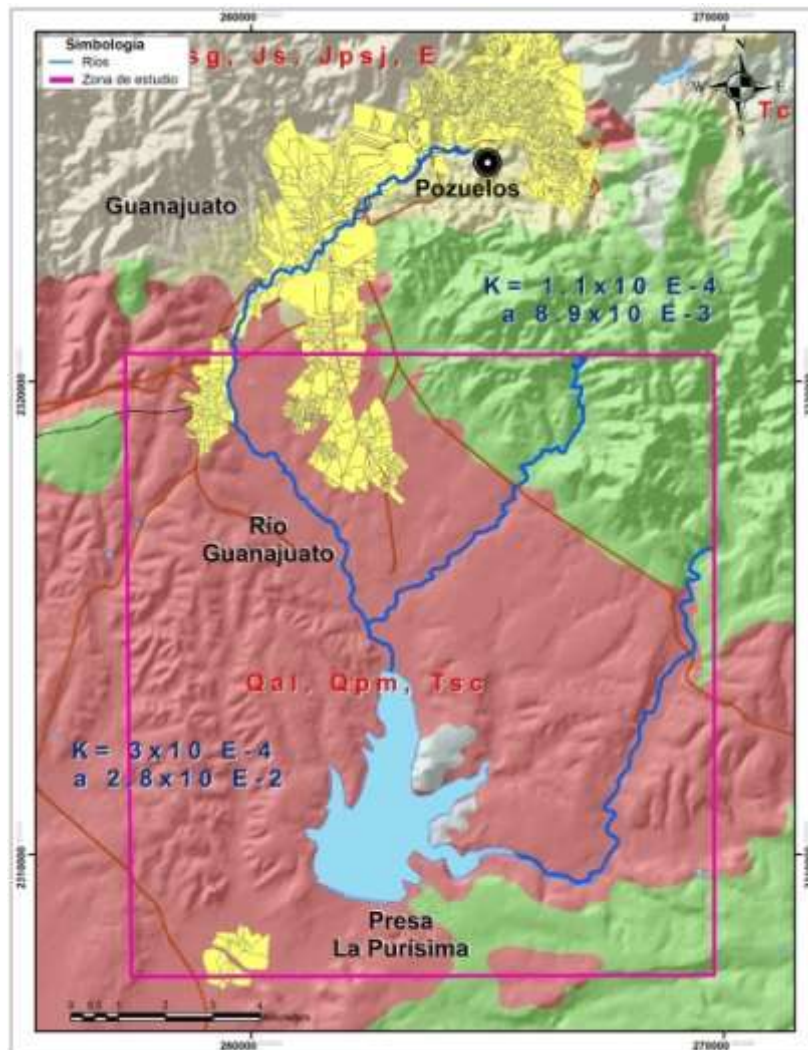


Figura IX-30 Hidrogeología presente en la zona de estudio.

34) Hidroestratigrafía.

En lo que respecta al acuífero donde se encuentra el área de estudio y basados en cortes litológicos del valle de la presa La Purísima, el modelo conceptual está formado por material granular en la parte superior y rocas fracturadas en la base.

La Comisión Estatal del Agua (CEAG, 2003) menciona que las rocas y materiales cuaternarios correspondientes a los basaltos y los espesores superficiales de gravas, arenas y arcillas que se encuentran sobre los valles, se clasifican como permeables y se encuentran en la parte superficial generalmente a alrededor de 30 metros de profundidad. Mediante cortes litológicos de pozos, se reporta que en muchos sitios se encuentran sobreyaciendo a una capa de materiales arcillosos que ocasionan la formación de un nivel de aguas superficiales. Este efecto fue reportado (Lesser, 1998) con base a la profundidad de los pozos en la zona, así como en la posición del nivel estático. Debido a lo anterior, se tiene identificado dentro de esta capa a un horizonte acuífero denominado *acuífero somero*.

Entre los materiales de Terciario Superior Continental predominan los sedimentos lacustres y se les detecta en muchos sitios sobreyaciendo a basaltos compactos y/o arcillas que se comportan como impermeables. Estos materiales lacustres presentan baja permeabilidad y constituyen una zona acuífera denominada acuífero *intermedio*.

La parte basal del Terciario continental se encuentra constituida por basaltos fracturados y materiales granulares lacustres, ambos permeables. Estos, sobreyacen tanto a riolitas como a otros sedimentos lacustres arcillosos y que en su conjunto constituyen un horizonte acuífero, denominado como acuífero profundo.

35) Hidrología Superficial.

La zona de estudio se encuentra dentro de la región hidrológica RH12 “Lerma-Chapala-Santiago” y a su vez en la cuenca Río Lerma-Salamanca y de la subcuenca del Río Guanajuato.

La principal corriente de agua superficial en el área de estudio es el Río Guanajuato el cual nace en las cercanías del Cerro Pelón localizado a unos 8 km al norte del área urbana de la capital, su longitud total es de 72 km y su pendiente media de 0.14, en general la dirección del flujo es hacia el sur del municipio hasta confluir con el río Chapín

a la altura de la presa la Purísima, sus principales afluentes son los arroyos El Arco, Paso del Padre, El Pulque, que forman el río del Cubo cerca de la comunidad del Zangarro.

En lo que refiere a cuerpos de agua la presa La Purísima, es la más grande del municipio de Guanajuato, con capacidad de 195.70 millones de metros cúbicos y su función es la de riego y control de avenidas.

ss) Construcción del Modelo de Flujo.

En la construcción del modelo se realizaron varios pasos como la definición de parámetros que a continuación se mencionan.

36) Selección de Unidades.

El sistema utilizado fue en base a sistema métrico para la definición de las unidades de entrada.

Parámetro	Unidades
Longitud	metros
Tiempo	días
Conductividad	m /seg
Caudal	m ³ /día
Recarga	mm/año
masa	kg

37) Los Parámetros de Entrada del Modelo de Flujo.

Se utilizó el USGS Modflow 2000 from WHI en estado estacionario (Steady-State Flow).

38) Tiempo de Simulación.

20 años (7300 días).

39) Definición del Dominio del Sistema.

Para esta etapa se consideraron tres aspectos importantes, el primero y más obvio fue cubrir el área de interés de la zona de alta vulnerabilidad del acuífero Silao-Romita con superficie de 10,000 has. Cabe mencionar que en este polígono se encuentran los pozos de sondeo donde se ha detectado contaminación.

El segundo aspecto considerado, fue la selección de un dominio suficientemente grande para que las condiciones de frontera seleccionados no influyan de manera significativa en los resultados. Considerando la ubicación del principal foco o medio de transporte del contaminante y la dirección de flujo se determinó una área de influencia o de dominio de 16,500 ha (figura IX-31).

El tercer aspecto consideró el aprovechamiento de las condiciones de bordes naturales, como aguas superficiales (ríos y presa) ubicando así el Río Guanajuato y la presa La Purísima.

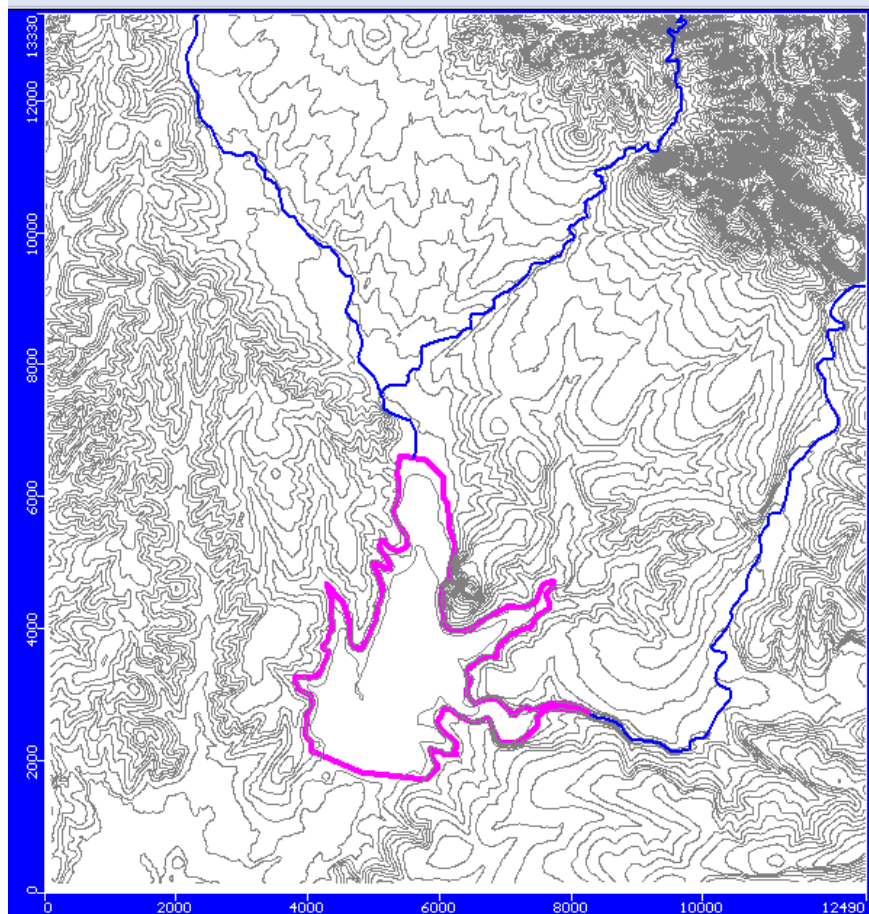


Figura IX-31 Dominio del sistema.

40) Discretización o Malla del Modelo.

Una vez definido el dominio, la siguiente fase fue diseñar la malla del modelo, para lo cual se tomó en cuenta las recomendaciones de Spitz y Moreno (1996):

- 1.- Garantizar la estabilidad de la solución del modelo.
- 2.- Incrementar la resolución.
- 3.- Minimizar la dispersión numérica.

4.- Minimizar los requerimientos de computación.

En cumplimiento de la primera recomendación se realizaron espaciamentos uniformes en la malla, creando celdas de 200x200 metros y teniendo en cuenta las dimensiones del dominio, se establecieron 66 columnas y 63 filas lo que hace 4,158 celdas.

Siguiendo la segunda recomendación se realizó un refinamiento por un factor de 3 de la malla para que fuera suficientemente pequeña para representar las variaciones puntuales de las características del suelo respecto a la carga y conductividad hidráulica. Este refinamiento permite incrementar la resolución del modelo en la zona crítica y de interés para valorar la influencia de la contaminación (figura IX-32).

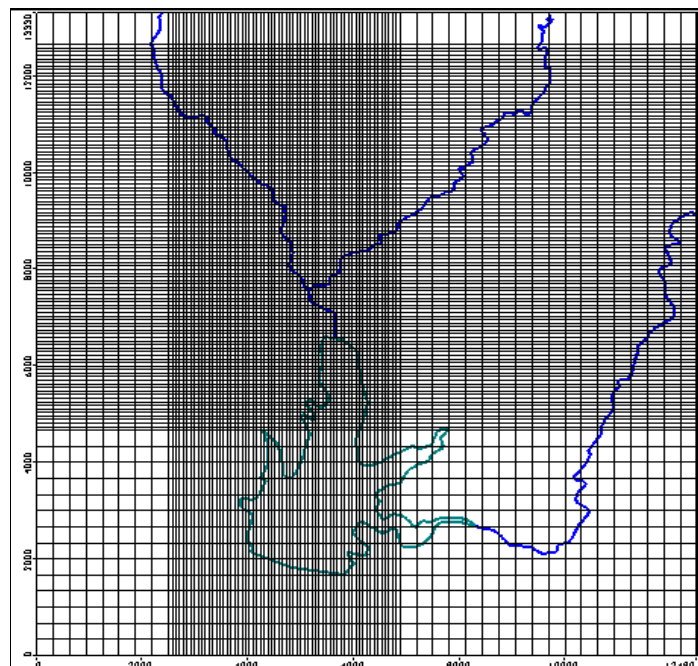


Figura IX-32 Discretización del dominio del área de estudio.

Con el mallado, el número de filas y columnas fue 89x123, lo que hace un total de 10,947 celdas. No se procedió a un mayor refinado de la malla, a menos que fuera necesario en la etapa de simulación partículas del modelo, hay que recordar que a mayor resolución mayor capacidad de memoria y tiempo computacional, lo que hace que se cumpla la cuarta recomendación.

Para minimizar la dispersión numérica de la tercera recomendación, se orientó el mapa base con respecto al flujo del agua, ya que la dispersión numérica se produce

cuando la velocidad del agua se divide en las componentes paralelas a los ejes de la malla. A partir de la información proporcionada por los pozos de muestreo, el nivel estático del acuífero se deduce con flujo hidráulico de Norte a Sur dentro de la zona de alta vulnerabilidad con ligera orientación al Poniente.

La última etapa de la discretización fue el establecimiento de distintas capas, donde de manera preliminar se establecieron tres estratos, con la capa superior como el medio granular, la intermedia el medio fracturado y la tercera el conglomerado o zona impermeable.

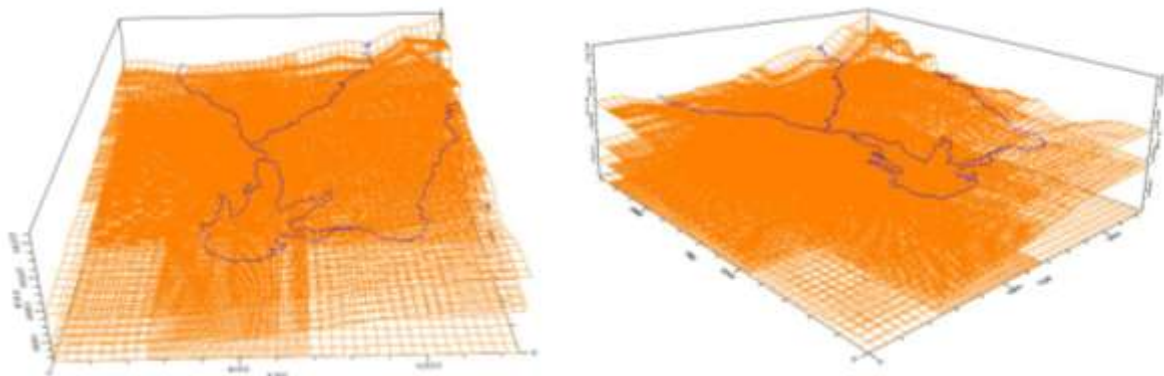


Figura IX-33 Vista 3D de la malla en la zona de estudio.

41) Numero de Niveles o Capas a Considerar.

Desde el punto de vista de la estratigrafía del suelo, en este trabajo se considera la existencia de tres capas, las cuales se determinaron con base a la información estratigráfica de 9 pozos de la CEAG (2006). Ver figura IX-34 y IX 35.

En la revisión de la información litológica de los pozos se realizó la generalización de los tres estratos. La capa superior, que constituye el acuífero en sí mismo, está formada por boleos, gravas, arenas y arcillas, a esta capa se le denominó medio granular, el segundo estrato está definido por rocas volcánicas (riolitas, tobas y andesitas) y se le consideró como medio fracturado. Por último la zona impermeable compuesta principalmente por conglomerado, es propuesta como la base para el modelo (figura IX-36).

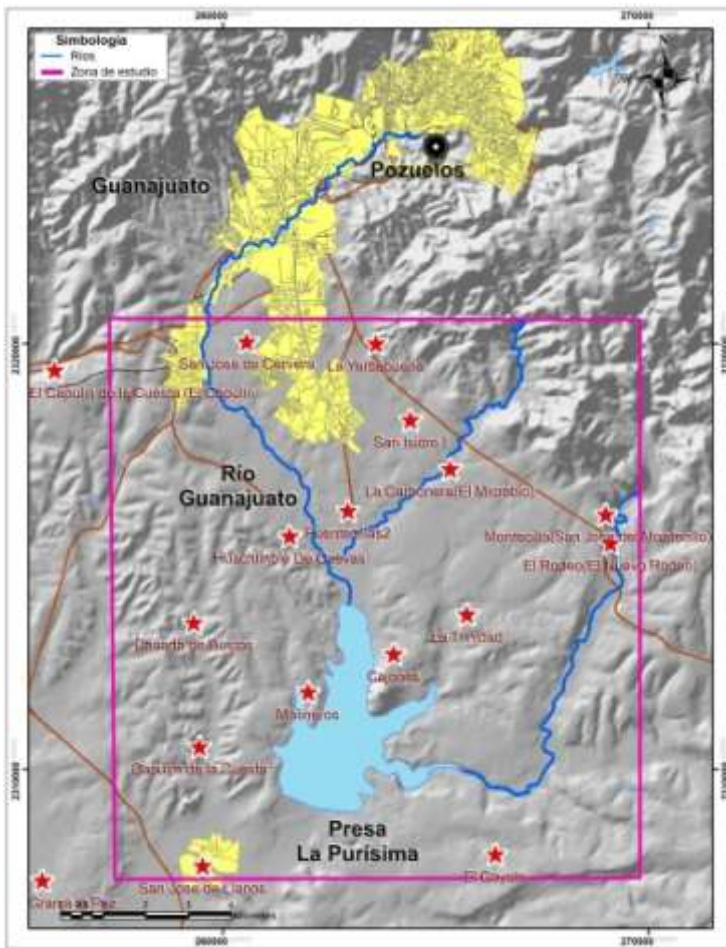
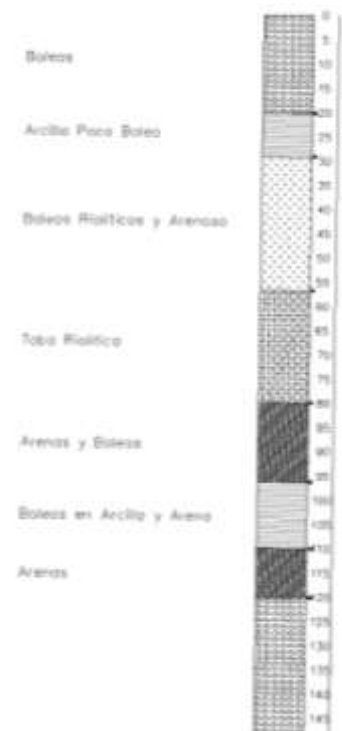


Figura IX-34 Localización de pozos.

Figura IX-35 Corte litológico.



Es importante mencionar que la cima de la capa superior (medio granular) está definida por la topografía del terreno, para lo cual se utilizaron las curvas de nivel a cada 10 mt de la carta topográfica del INEGI (1999).

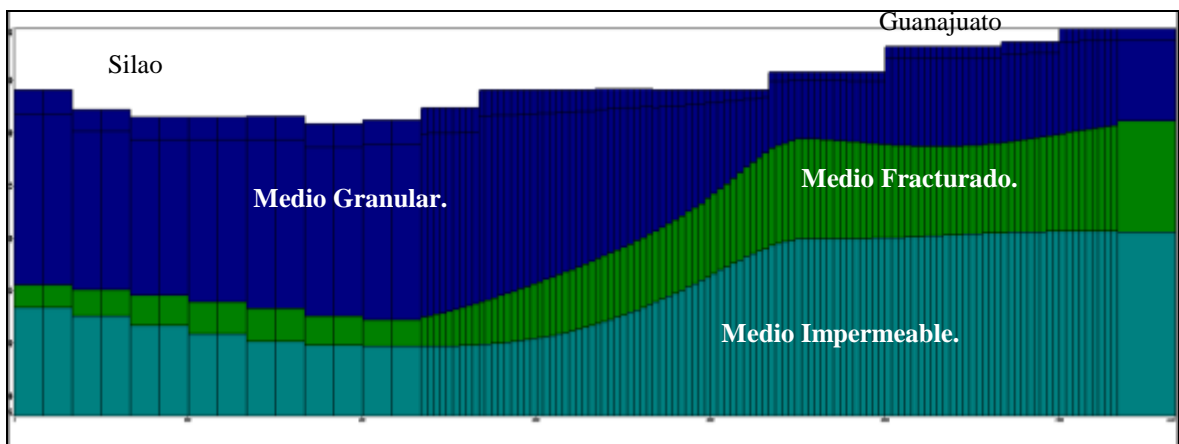


Figura IX-36 Perfil estratigráfico del área de estudio generado en ModFlow.

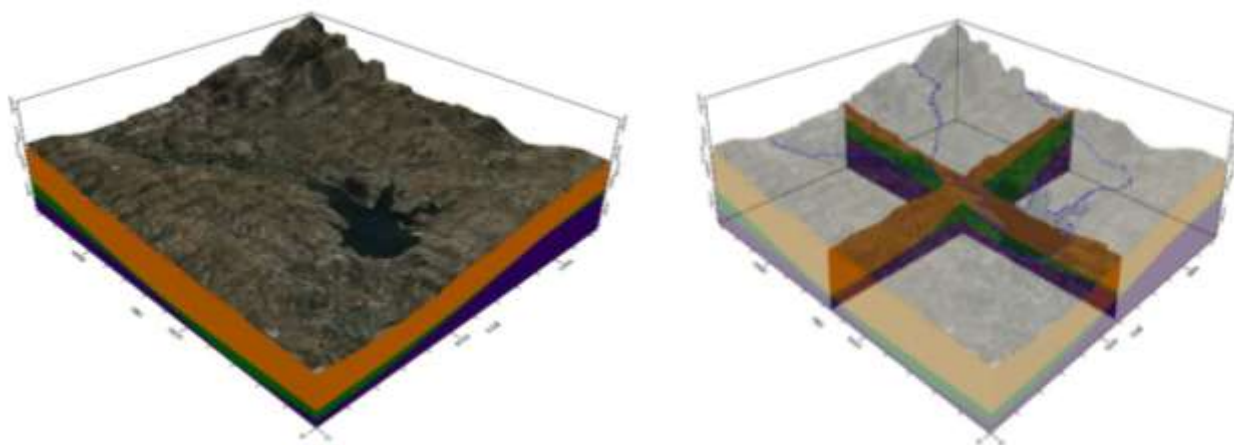


Figura IX-37 Vista 3D secciones o capas en la zona de estudio.

42) Asignación de Propiedades del Acuífero.

Una vez realizada la discretización del sistema fue posible asignar a cada grupo de celdas las propiedades básicas para el control del flujo y transporte de los contaminantes, para la asignación de las propiedades se utilizó información de pruebas de bombeo de los pozos más cercanos a la zona de estudio y que fueron repostados en el estudio de la CEAG (1998) del acuífero Silao-Romita.

43) Conductividad Hidráulica.

Se definió la conductividad tomando en cuenta las características hidrogeológicas del sistema, este parámetro fue estimado desde la carta hidrogeológica del estado de Guanajuato (CEAG, 2002), donde un rango promedio es de 3.0×10^{-4} a 2.8×10^{-3} m/s y fue verificada con valores promedio de Freeze y Cherry (1979) para diferentes materiales, estos valores también fueron utilizados para la el medio fracturado (tabla IX-15).

Tabla IX-15 Rangos de conductividad hidráulica para diferentes materiales.

Material	Rango de K (m/s)
Grava	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-2}$
Arena	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-5}$
Limo	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-8}$
Lutita /pizarra	$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-12}$
Roca ígnea	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-12}$
Arenisca	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-8}$
Caliza / Dolomita	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-7}$
Roca fracturada	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-6}$

Fuente: Freeze y Cherry ,1979.

Es importante mencionar que la versión del software (Visual ModFlow 2009.v1) utilizada en este trabajo, incluye las modificaciones desarrolladas por Geraghty y Miller (2007) que permite que más de una razón de anisotropía sea especificada en una sola capa.

44) Coeficiente de Almacenamiento.

El coeficiente de almacenamiento del acuífero fue tomado del estudio geohidrológico del acuífero Silao-Romita (CEAG, 1998), donde en promedio, después de seis pruebas de bombeo, resultó un coeficiente de almacenamiento para el acuífero libre entre 0.03 a 0.11 y, para el acuífero semiconfinado de 0.00002 a 0.00003. Para este trabajo se utilizaron los valores de los pozos más cercanos a la zona de estudio (pozo 1384-Obs y 1407-Obs), donde el valores reportados son de 0.00002 y 0.00003 respectivamente.

45) Rendimiento Específico.

Al igual que el parámetro anterior, este se retomó del mismo documento, donde el rendimiento específico (S_y) es igual a la porosidad efectiva en los acuíferos libre y el acuífero semiconfinado utilizando el coeficiente específico (S_s).

En este caso se reporta para el acuífero libre un valor promedio de S_y para el acuífero libre de 0.05 a 0.10 y para el semiconfinado un valor de S_s de entre 0.00003 a 0.005. Por lo anterior para este trabajo tomo el valor de 0.10 que corresponde para el acuífero libre.

46) Porosidad.

Con base a lo recomendado por Lesser (1998) en el estudio del acuífero Silao-Romita, el valor que se utilizó para la porosidad efectiva fue de 0.1 que es igual al valor de rendimiento específico dado que se va a modelar sobre el acuífero libre.

47) Condiciones de Frontera.

La siguiente etapa en la construcción del modelo matemático es la asignación de las condiciones de frontera, que establecen las entradas y salidas de agua del sistema. A partir del modelo conceptual. Se han definido condiciones de frontera del tipo: carga constante, ríos, presa y recarga.

Al asignar estas condiciones al modelo matemático, fue necesario especificar una variable fundamental: el tiempo, hasta el momento se han integrado las variables no dependientes del tiempo, pero tanto en la asignación de las condiciones de frontera como en la variación del transporte de partículas en el modelo de transporte, fue necesario establecer la escala de tiempo para la simulación.

Al seleccionar el periodo de tiempo para la simulación, se tomó en cuenta la información relativa a los años que tiene el depósito de jales de Pozuelos, que según los antecedentes data de hace 70 años (Ramos-Arroyo, 2006). Otro punto importante es la estimación de la evolución de la contaminación en el futuro o en su caso hacer una retrospectiva. Por lo tanto y dado los estudios previos y las propiedades en ModFlow se valoró un tiempo de simulación de 20 años (7300 días), dato que se puede cambiar en cualquier momento de la simulación como una ventaja de la versión de este software pudiendo simular el tiempo anterior y a futuro para el sistema.

48) Carga Constante.

Para la definición de esta carga se utilizó la información piezométrica (nivel estático) del 2000, con los datos reportados por el estudio hidrogeológico del acuífero Silao-Romita (CEAG, 1998). Se observó una carga constante del lado Noreste de la zona de estudio, provenientes de las partes altas de la Sierra de Guanajuato con una cota entre los 1,750 y 1,749 m.s.n.m., además de otro punto de carga se localiza al Norte proveniente de la zona de influencia del Río Guanajuato con niveles piezométricos semejantes al anterior (figuras IX-38 y 39).

Concerniente a la carga de cada celda que se estableció a partir del mapa piezométrico obtenido de los pozos de la CEAG (2000), este a lo largo del proceso de calibración del modelo de flujo, fue necesario hacer ajustes sobre los valores inicialmente propuestos.

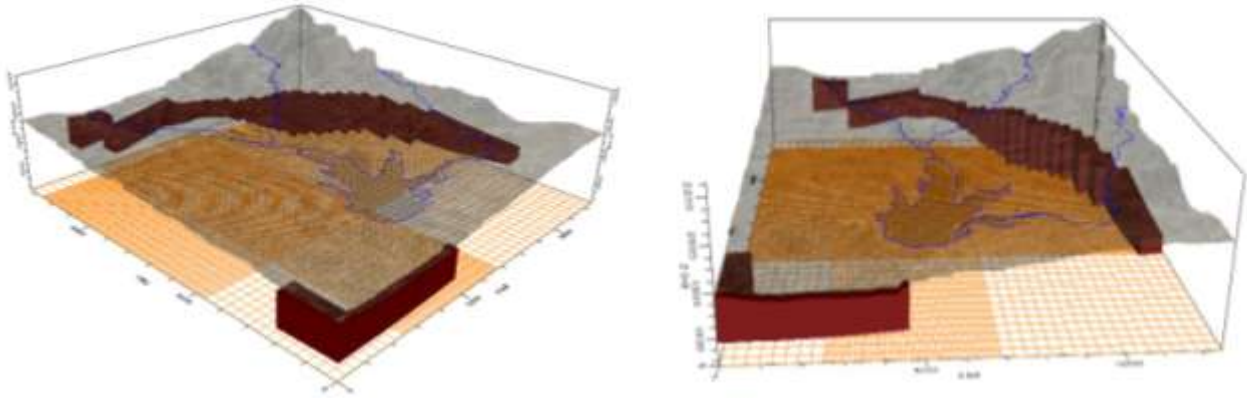


Figura IX-38 Vista 3D de recarga en la zona de estudio.

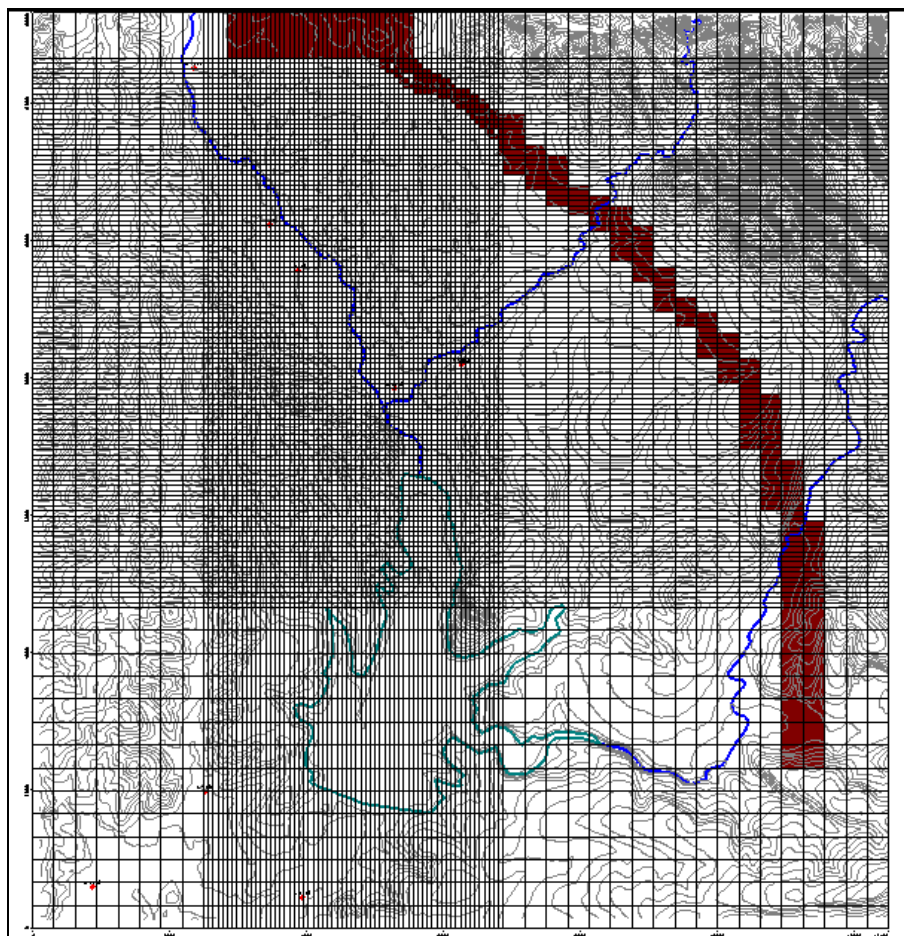


Figura IX-39 Determinación de carga constante en el área de estudio.

49) Ríos.

En la zona de estudio se identifican 2 ríos; el Guanajuato con un afluente, desde el Norte de la zona de estudio y desembocan hacia el sur en la presa de La Purísima y

otro río proveniente del oriente desde la comunidad del Cubo y corre hacia la presa La Purísima.

Para asignar esta condición al modelo se establecieron celdas tipo río, en función del nivel piezométrico del acuífero y del nivel de la superficie del río, pudiendo funcionar como elemento que aporte o retire agua del sistema. Por ello cada una de las celdas se asume del tipo río, usando los valores correspondientes a la elevación de la superficie del río ($H_{río}$), elevación ($B_{río}$), espesor (M) y conductividad hidráulica (k_z) del lecho del río, así como su anchura (W). Ver figura IX-40.

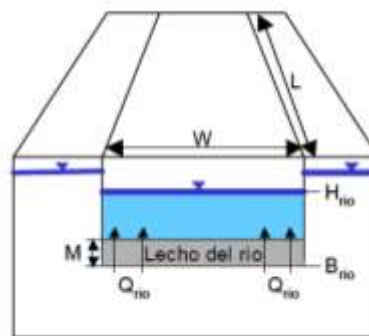


Figura IX-40 Esquema de una celda tipo río.

Los valores de la anchura y elevación de la superficie de los ríos, así como del lecho, se estimaron por medio de fotografía aérea 1:10,000 y con apoyo de modelo digital de elevación generado con base a las curvas de nivel a cada 10 mt del INEGI (figura IX-41 y 42). Los valores estimados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla IX-16 Características de los ríos en la zona de estudio.

Río	Ancho	Carga	K_z
Guanajuato	Entre 10 mts y 20 mts al final	Al inicio 0.5 mt y al final 2 mt	1×10^{-5}
Afluente del Guanajuato	Entre 5 y 15 mt al final	Al inicio 0.5 mt y al final 1.5 mt	1×10^{-5}
El Cubo	Entre 5 y 15 mt al final	Al inicio 0.5 mt y al final 1.5 mt	1×10^{-5}

Las estimaciones mencionadas en la tabla anterior toman en cuenta los materiales que constituyen el lecho del río y el tamaño del mismo.

A partir de esta información alimentada al Visual ModFlow se estima el valor de la conductancia (c), el cual es un parámetro que representa la resistencia al intercambio de flujo entre el agua del río y el agua del acuífero a través del lecho del río.

$$C = \frac{K \cdot L \cdot W}{M}$$

Donde:

L= longitud del río (en cada celda equivale a la longitud de la celda).

M= Lecho del río.

W= Ancho del río.

K= Conductividad hidráulica.

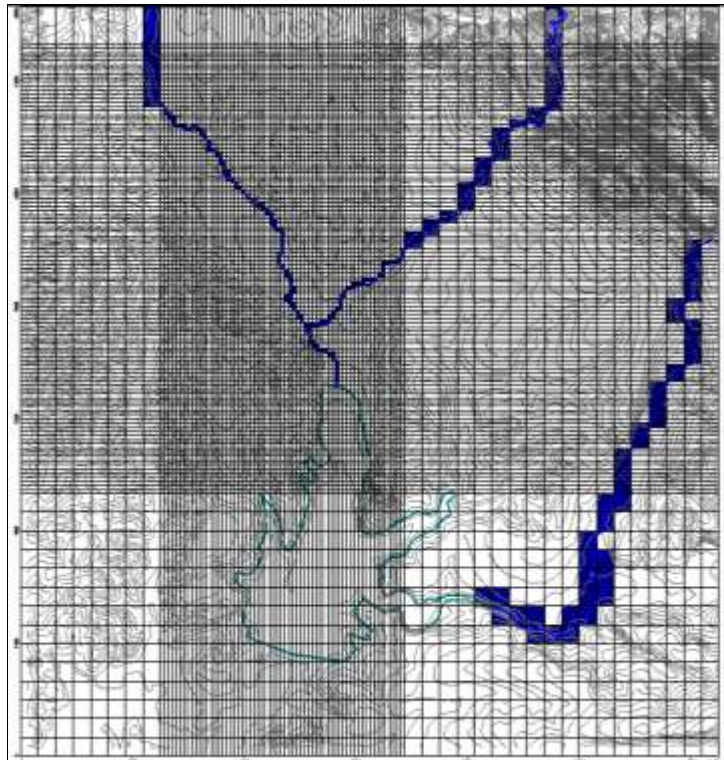


Figura IX-41 Celdas tipo río del área de estudio.

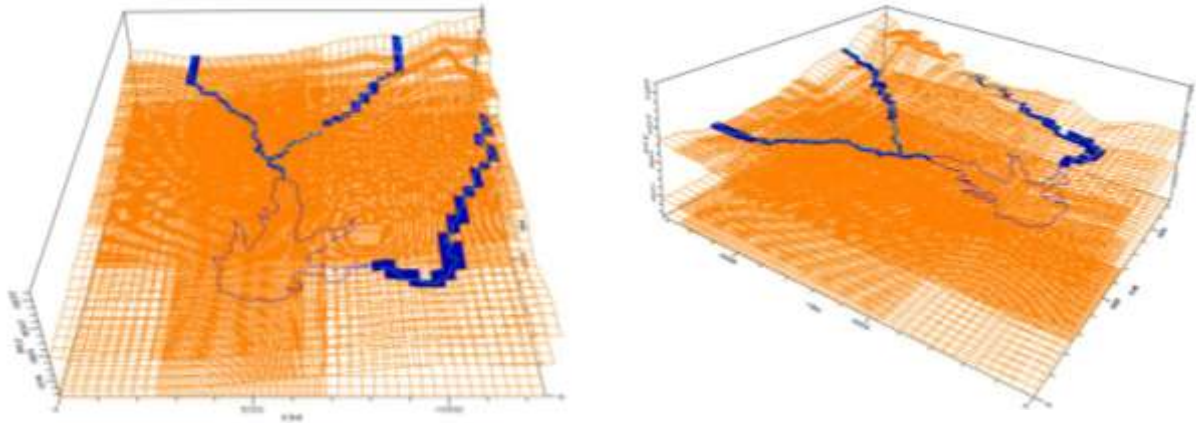


Figura IX-42 Vista 3D de celdas tipo rio para la zona de estudio.

50) Presa La Purísima

Esta presa cubre una superficie de 800 hectáreas aproximadamente, con una carga o tirante hidráulico de entre los 20 y 30 mts de elevación de la cortina a la base (figura IX-43 y 44). En el modelo se integraron estos datos agregando una conductividad de 1×10^{-6} .

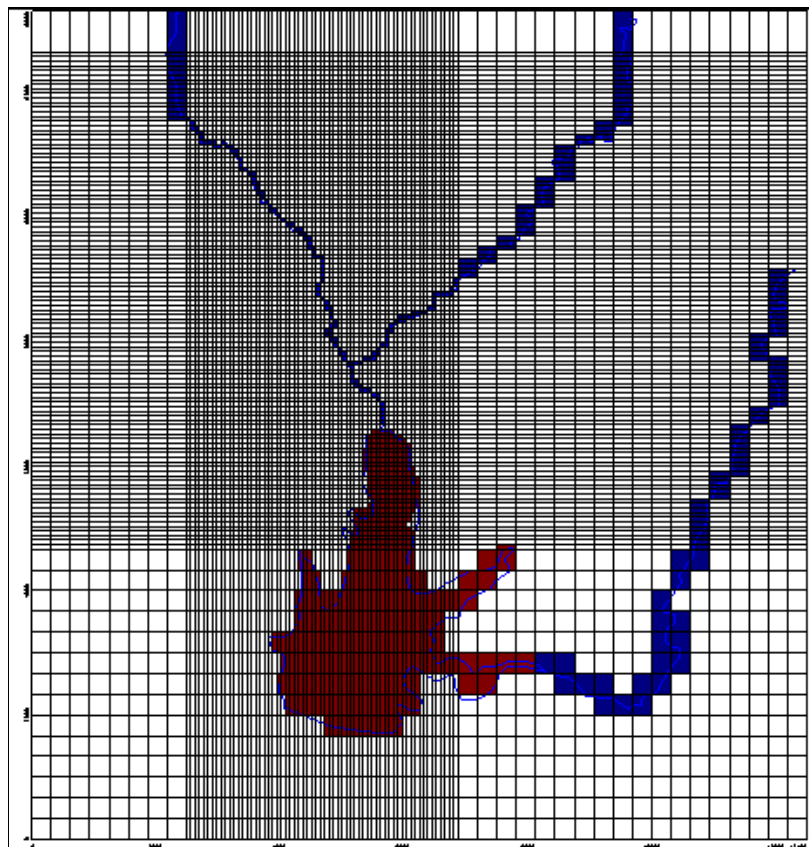


Figura IX-43 Presa La Purísima.

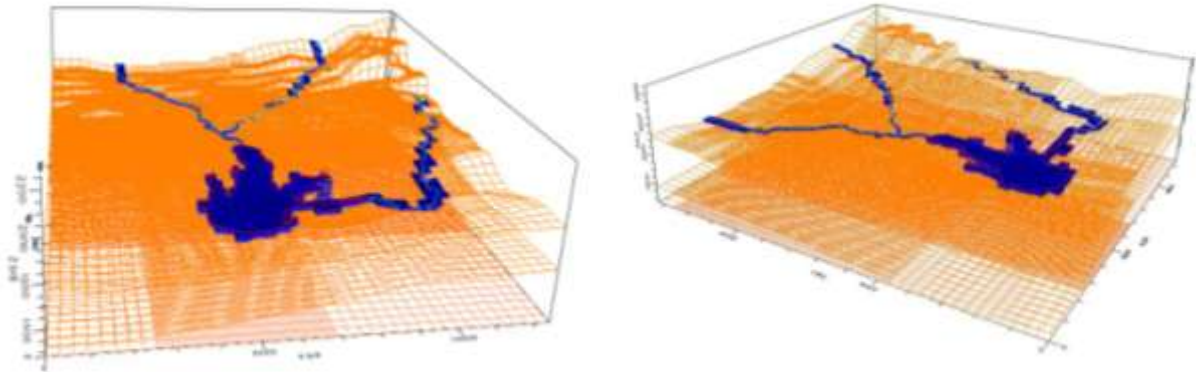


Figura IX-44 Vista 3D de la presa La Purísima.

51) Recarga.

La recarga representa la entrada de agua al sistema desde las precipitaciones que percolan a través del suelo y se incorporan al agua subterránea.

La recarga natural del acuífero proveniente de lluvia y los escurrimientos superficiales de los macizos montañosos, se presume la infiltración del agua hasta los mantos freáticos y circula hacia las partes bajas de la cuenca donde tiene lugar la descarga natural. En forma gradual, conforme progresó el desarrollo y la producción agrícola, se fueron modificando las condiciones de recarga y extracción del agua subterránea.

Para estimar la recarga en la zona estudio, no se realizaron mediciones en campo, solo se asumió un porcentaje de la precipitación media anual (697 mm), teniendo en cuenta diferentes factores como el uso predominante del suelo (agrícola, urbano, pastizal, etc), la topografía (pendiente del terreno) y la geología (Ramos-Leal, 2010). Como resultado de lo anterior, la mayor parte de la zona de estudio resulta con vocación agrícola con pendientes moderadas entre 8% y 20%, por lo que se propuso un porcentaje de recarga entre el 10% y 7% (70 a 50 mm por año) de la precipitación media anual, con el fin de tener un margen de maniobra en la calibración del modelo, y que esta recarga únicamente se asignó a la capa superior del modelo.

52) Celdas Inactivas.

Cuando se define el mallado del modelo, Visual ModFlow considera que todas las celdas incluidas en el dominio son activas desde el punto de vista de flujo, de manera que el modelo intenta calcular la altura piezométrica en todas ellas, aunque estas se encuentren fuera del dominio establecido por las condiciones de frontera.

Tomando en consideración todo lo anterior y las características geológicas y piezométricas del área de estudio, se asignó la condición de celdas inactivas o de no-flujo solo a la capa superior, específicamente en la zona Noroeste correspondiente a los lomeríos donde se localizan las comunidades Cañada de Bustos y el Capulín y al Sureste que pertenece a la parte baja de la Sierra de Guanajuato entre las comunidades del Zangarro y El Coyote (figuras IX-45 y 46).

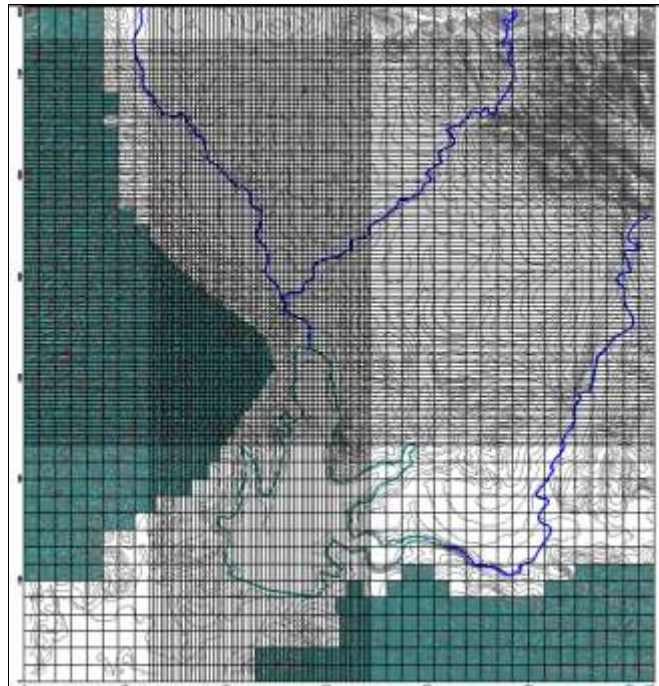


Figura IX-45 Celdas inactivas o de no-flujo (color verde) del área de estudio.

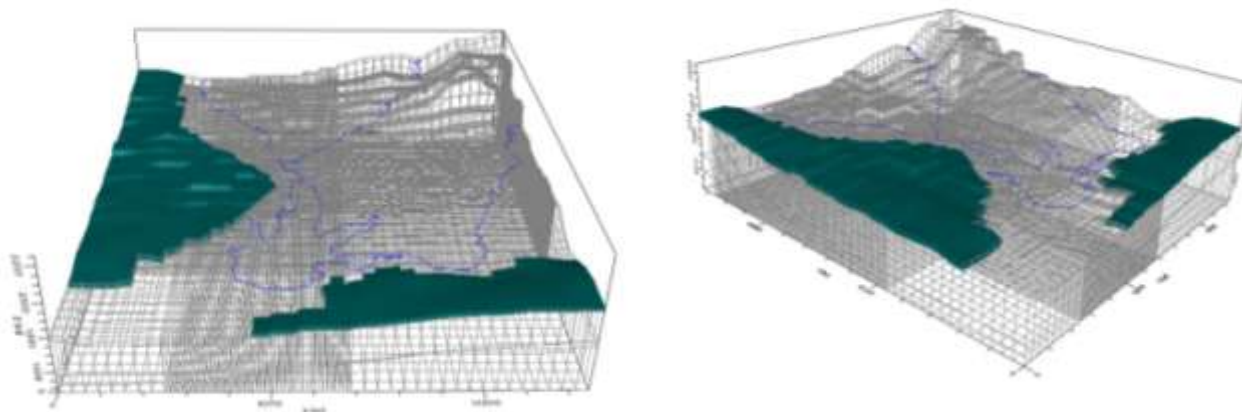


Figura IX-46 Vista 3D de la presa La Purísima.

tt) Calibración del Modelo de Flujo.

La calibración es el proceso de modificación o validación de los parámetros de entrada del modelo hasta que los resultados del mismo corresponden razonablemente con las condiciones reales (Waterloo Hydrogeologic, 2003).

En este trabajo, los niveles piezométrico fueron obtenidos de la red de monitoreo de la calidad del agua subterránea de la CEAG (2000), junto con curvas piezométricas del 97 de la misma Comisión Estatal del Agua del Estado de Guanajuato (figura IX-47).

Antes de la primera ejecución o corrida del modelo de flujo, Visual ModFlow requiere la selección de los niveles o cargas iniciales, para este trabajo se emplearon como niveles iniciales los datos puntuales de nueve pozos (tabla VIII-16).

Tabla IX-17 Parámetros de los pozos del CEAG.

Pozo	Clave	Coordenadas UTM		Nivel Freático (m.s.n.m.)	Cota Descarga (m.s.n.m.)
		X	Y		
1	SIRO 1260	263361.0	2313852.0	1745	1840
2	SIRO 1258	264178.0	2316209.0	1745	1880
3	SIRO 1309	259700.0	2319788.0	1745	1890
4	SIRO 1310	260809.7	2317526.6	1744	1870
5	SIRO 1311	262631.8	2315133.4	1745	1845
6	SIRO 1312	259830.6	2311570.8	1745	1830
7	SIRO 1313	258226.1	2307872.2	1738	1800
8	SIRO 1314	261272.0	2307736.2	1739	1790
9	SIRO 1315	259857.8	2309259.2	1740	1800

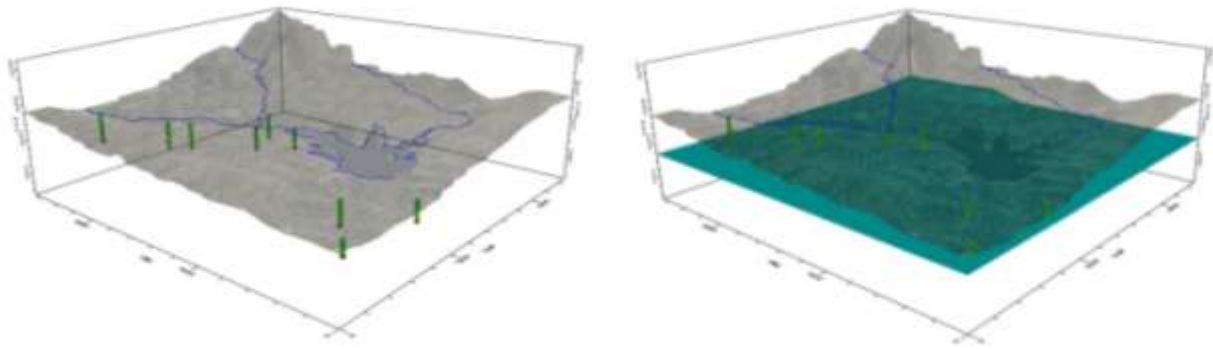


Figura IX-47 Vista 3D de los pozos de observación y el nivel freático.

uu) Condiciones de Ejecución del Modelo de Flujo.

La simulación se realizó en estado estacionario, utilizando las cargas o niveles freáticos de los nueve pozos como solucionador numérico de las ecuaciones de flujo, el método VHS Solver (Waterloo Hydrogeologic, 2002) el cual aproximó la solución de un gran número de ecuaciones de derivadas parciales de forma iterativa que se muestran a continuación:

- Número máximo de iteraciones externas: 100.
- Número máximo de iteraciones internas: 25.
- Criterio de convergencia de las iteraciones externas: 0.01
- Criterio de convergencia de las iteraciones internas: 0.01
- Factor de variación para las iteraciones externas: 1

Uno de los principales problemas que surgieron en la simulación del modelo de flujo y que también se presentó en este trabajo, fue la aparición de celdas secas las denominadas como zona no saturada como consecuencia de la profundidad del nivel freático. Cuando una celda en cualquiera de las capas se queda seca y que se produce con frecuencia en el curso de la simulación o durante el proceso iterativo, esto ocasiona oscilaciones que complican la modelación y solución del modelo (Waterloo Hydrogeologic, 2002).

Para solucionar el problema de celda seca Visual ModFlow contiene una herramienta que rehidrata o restaura (Rewettin) estas celdas bajo ciertos criterios. Las especificaciones manejadas fueron por defecto, donde viene especificado que la restauración se realice a cada iteración (wetting interval=1), empleando un umbral de

rehidratación de 0.1 metros (wetting threshold=0.1). Este umbral indica que para restaurar una celda seca, la altura en las celdas adyacentes inmediata inferior debe ser mayor que la elevación del fondo de la celda seca mas 0.1 metros.

Tras el establecimiento de las condiciones anteriores se ejecutó el modelo de flujo. En la primera ejecución, la convergencia del modelo no se produjo, y se procedió de manera sistemática a la modificación de los parámetros de entrada, con el objeto de avanzar o lograr la convergencia y por lo tanto la solución al modelo de flujo. Esto significó jugar con los valores de conductividad y de recarga del acuífero para lograr una solución aceptable del modelo.

La revisión de los parámetros de recarga del acuífero se actualizaron por lo que se propusieron varios valores en el rango antes mencionado (50 a 70 mm/año), así como cambios en los valores de conductividad, llegando a converger bajo los siguientes parámetros (tabla IX-17), lo cuales están dentro los reportados por el estudio de la CEAG (1998) para el acuífero Silao-Romita.

Tabla IX-18 Parámetros finales de calibración.

Capa	Descripción	Conductividad Hidráulica	Parámetros del acuífero	Recarga
1	Medio Granular	Kx= 1x10 ⁻⁴ , Ky= 1x10 ⁻⁴ , Kz= 1x10 ⁻⁵	Ss=0.11 Sy=0.1 Eff.Por= 0.1 Tot. Por= 0.14	50 mm/año
2	Medio Fracturado	Kx= 1x10 ⁻³ , Ky= 1x10 ⁻³ , Kz= 1x10 ⁻⁴		
3	Medio Impermeable	Kx= 1x10 ⁻¹⁰ , Ky= 1x10 ⁻¹⁰ , Kz= 1x10 ⁻¹¹		

Los estimadores utilizados para validar la convergencia del modelo fueron el RMS (Root Mean Squared) y el coeficiente de correlación, los cuales fueron de 5.071% y 0.992 respectivamente. Estos estimadores son representados gráficamente en la figura IX-48 donde se muestran las cargas piezométricas observadas con las calculadas, observándose un buen ajuste entre ambas cargas, lo cual es un indicador de la calibración del modelo.

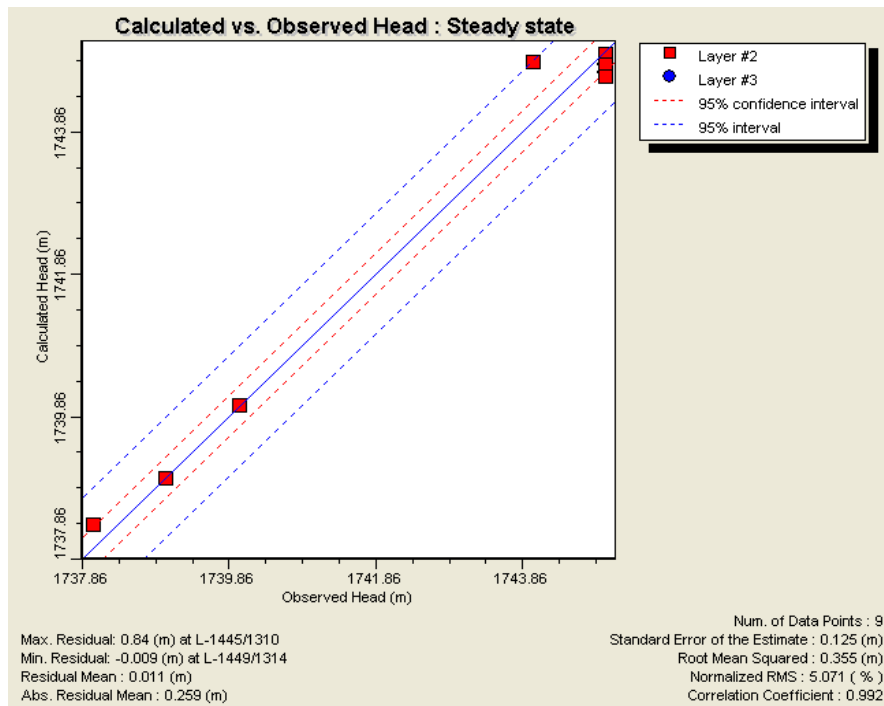


Figura IX-48 Grafica de calibración del modelo de flujo.

Otro indicador de la calibración del modelo es el histograma de residuales (figura IX-49), en el cual presenta estadísticamente una distribución normal.

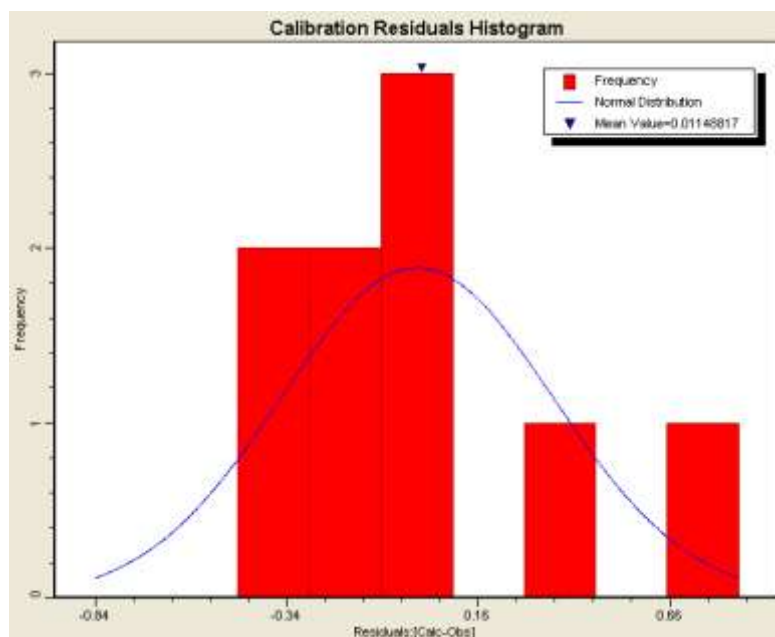


Figura IX-49 Histograma de calibración del modelo de flujo.

Por último se revisó las equipotenciales (figura IX-50) para confirmar que se comportan de acuerdo a las cargas observadas en los pozos de la CEAG y la carga constante asignada en las condiciones de frontera, lo cual efectivamente resulto positivo de acuerdo a los datos asignados al modelo.

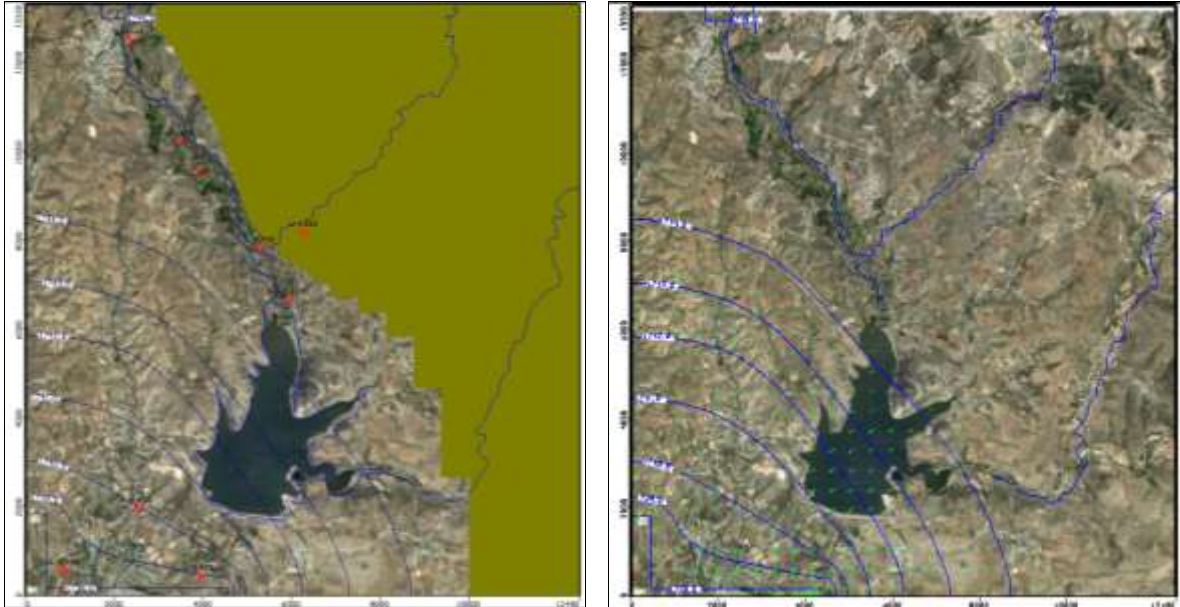


Figura IX-50 Equipotenciales y vectores de dirección del modelo de flujo.

vv) Reporte Estadístico de Visual ModFlow.

Calibration Statistics Report

Model: ModeloIPICyT24112010

Parameter: Head [m]

Time: Steady state

Num. of Data Points: 9

Max. Residual: 0.84 (m) at L-1445/1310

Min. Residual: -0.009 (m) at L-1449/1314

Residual Mean: 0.011 (m)

Abs. Residual Mean: 0.259 (m)

Standard Error of the Estimate: 0.125 (m)

Root Mean Squared: 0.355 (m)

Normalized RMS: 5.071 (%)

Correlation Coefficient: 0.992

ww) Trazado de Partículas.

Una vez calibrado el modelo de flujo, se procedió a la simulación del trazado de las partículas, la cual valoró la respuesta del acuífero ante un evento puntual en un periodo determinado de presunta contaminación.

La simulación tomó en cuenta varios factores: la fuente de contaminación (deposito de jales Pozuelos), el medio de transporte en que migran los contaminantes (Río Guanajuato) y los pozos de monitoreo de la calidad del agua donde se ha reportado contaminación (figura IX-51).

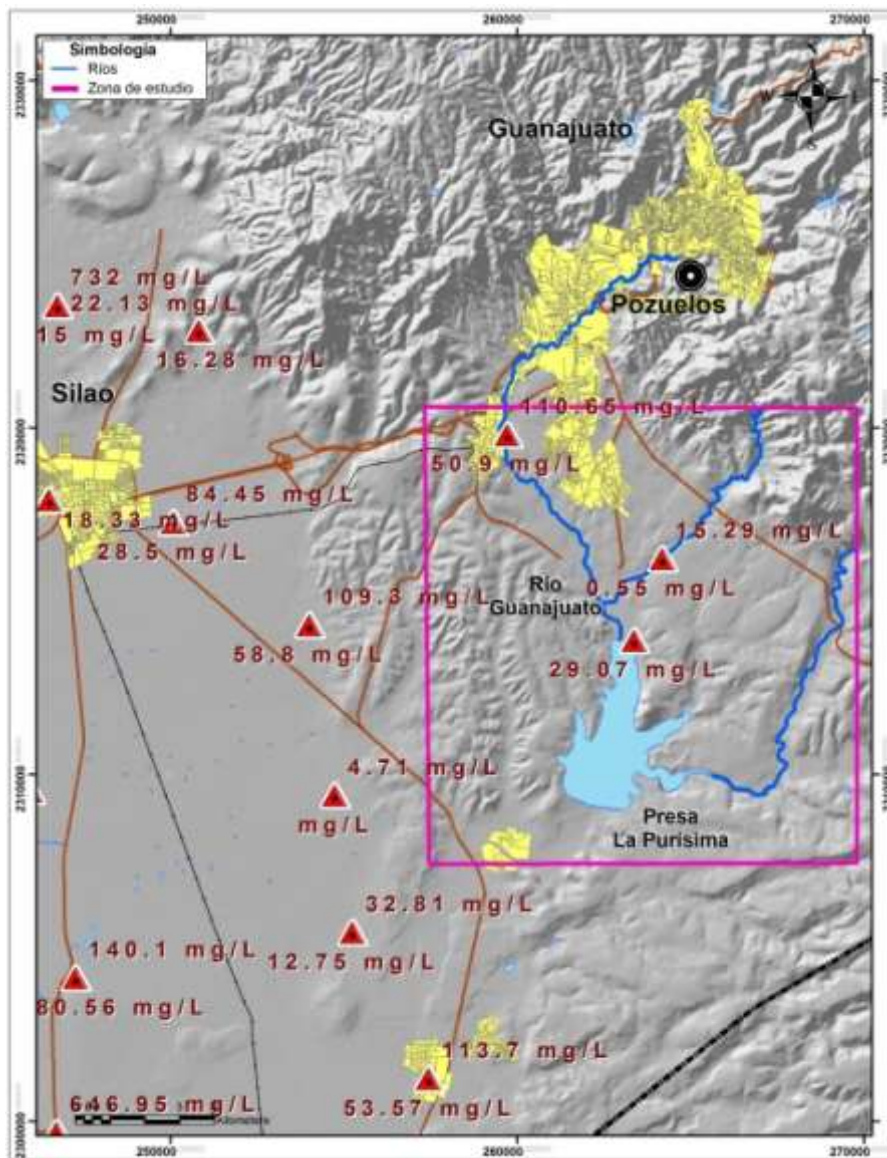


Figura IX-51 Pozos donde se detectaron concentraciones de sulfatos.

Bajo estos criterios y el objetivo de este trabajo, se seleccionó un evento representativo en la zona de estudio, a partir del cual fuera posible la evaluación del modelo del acuífero. Este evento consistió en agregar a lo largo del Río Guanajuato hasta la entrada con la presa La Purísima una serie de 13 partículas en distribución equidistante y utilizando el solucionador MODPATH, para la predicción de las rutas de transporte y zonas de captación de las partículas agregadas al modelo (figura IX-52).

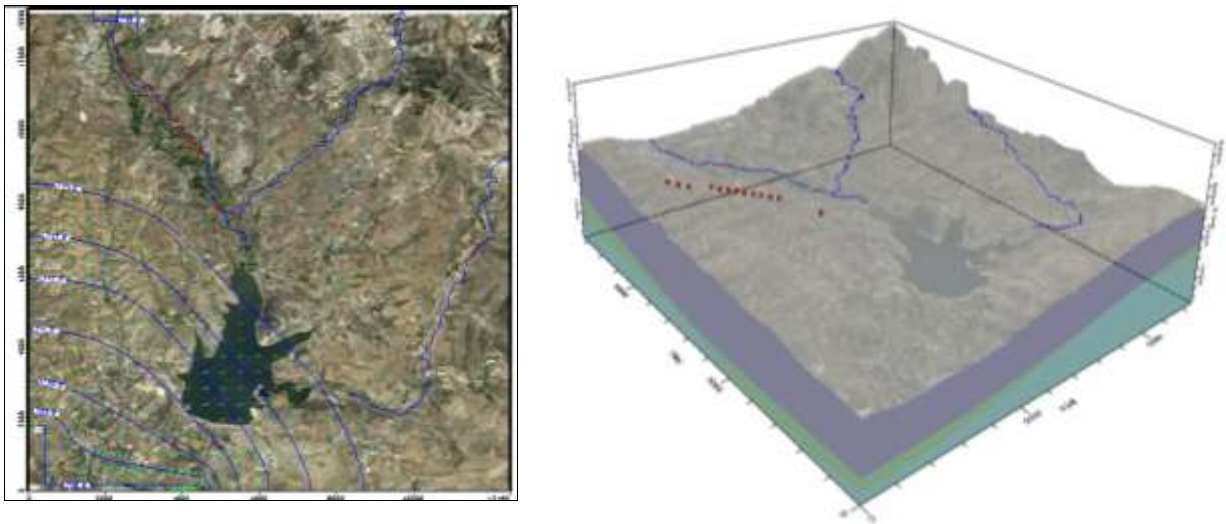


Figura IX-52 Equipotenciales y vectores de dirección del modelo de flujo.

Los resultados de la simulación indican que el transporte de las partículas es en dirección Suroeste perpendicular a las equipotenciales, con velocidad máxima de traslado de 5.3×10^{-6} m/seg (0.45 m/día) en estado estacionario, es decir un transporte lento, sin embargo, hay que considerar que las partículas no siguen una línea recta, sino más bien tortuoso y como consecuencia aún más lento su movimiento a través del dominio o zona de estudio (figura IX-53).

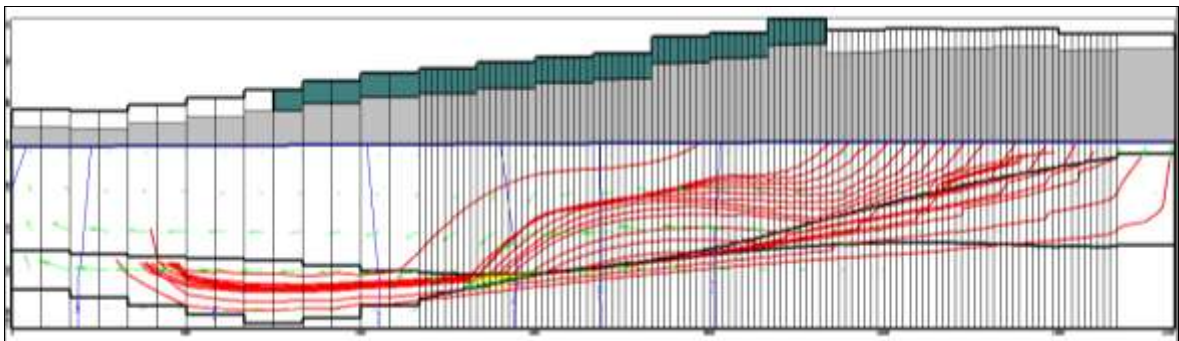


Figura IX-53 Equipotenciales (azul), vectores de dirección de flujo (verde) y traslado de partículas (rojo).

Una de las aportaciones de este trabajo fue demostrar el comportamiento espacio-temporal de las partículas, es decir, el tiempo que llevaría una partícula para que salga del dominio (zona de estudio), así como determinar el sitio del sistema donde se depositan. Los datos indican un avance lento para salir del dominio, pues tardaría hasta 450 años (figuras IX-54 a 57). Esto sugiere que, si hubiera una presunta contaminación desde el depósito de Pozuelos se podrían encontrar evidencias de contaminación por metales en las cercanías del río Guanajuato a la altura de las comunidades de Cañada de Bustos y el Capulín, recordando que se estimó para el depósito de jales un abandono de 70 años.

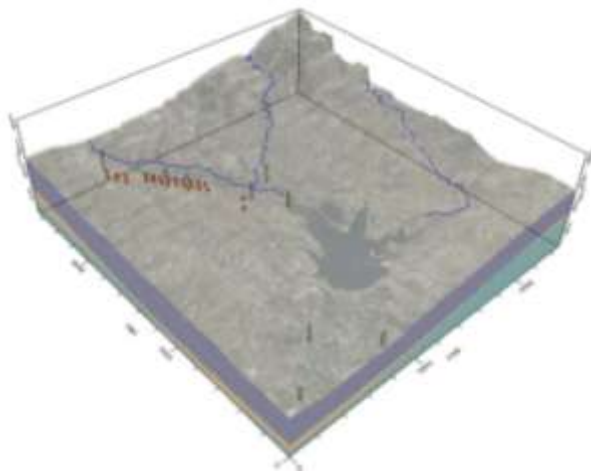


Figura IX-54 Trazado de partículas para 50 años.

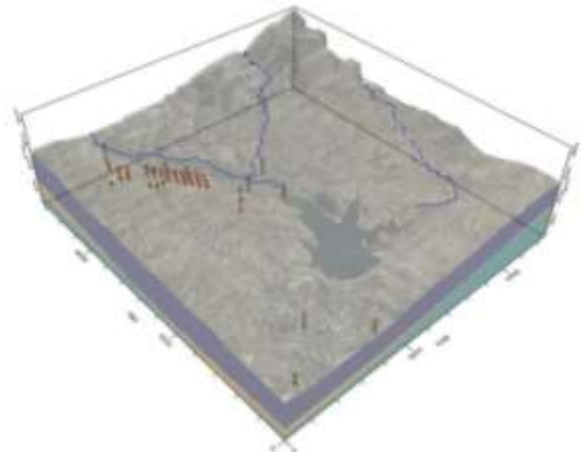


Figura IX-55 Trazado de partículas para 100 años.

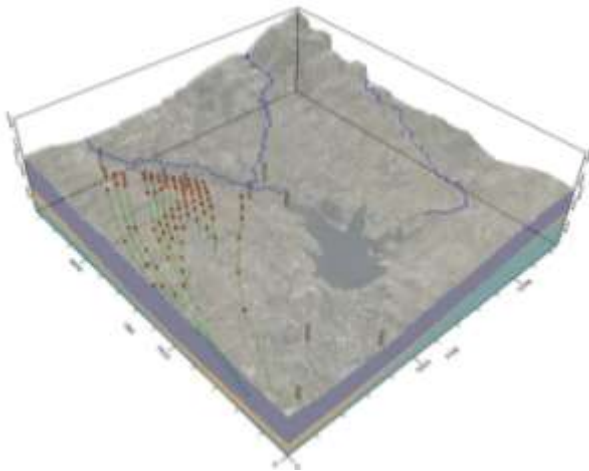


Figura IX-56 Trazado de partículas para 300 años.

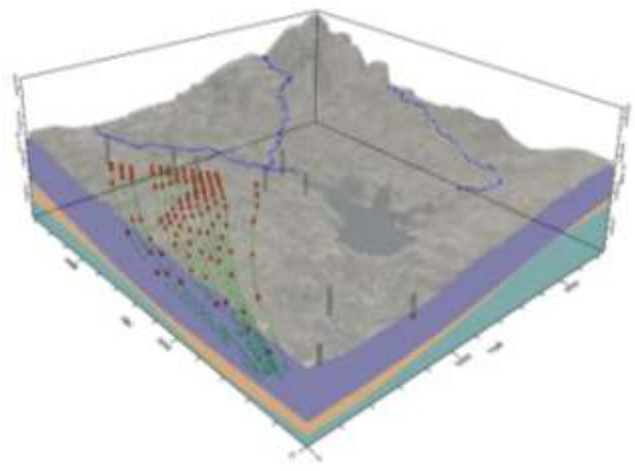


Figura IX-57 Trazado de partículas para 450 años.

Cabe señalar que de este trabajo derivan aspectos que requieren evaluarse en un futuro para corroborar si las rutas trazadas por las partículas depositadas en el modelo coinciden con los sitios donde se ha detectado la presencia de contaminación por sulfatos reportada por CEAG o en su caso si la procedencia de las concentraciones reportadas es de origen natural dada la geología del sitio.

X. CONCLUSIONES.

De los sitios muestreados y de acuerdo a la norma NOM-052-SEMARNAT-2005, solo la muestra líquida de la minera Las Torres sobre paso los límites máximos permisibles en Arsénico, Cromo, Plomo. Sin embargo, con respecto a la NOM-141-SEMARNAT-2003 ninguno de los cinco sitios analizados presentó potencial de generación de drenaje ácido.

Actualmente las presas muestreadas y con base en las normas anteriores los depósitos de jales no presentaron un riesgo de contaminación. Sin embargo las cantidades de metales potencialmente tóxicos se encuentran en cantidades considerables.

El jal de Pozuelos con características de pH (4.5) ácido suponía ser un sitio generador de drenaje ácido y lixiviados, sin embargo, su caracterización química y especiación indicaron que es un jal estabilizado de compuestos de sulfuro de fierro (Pirita) con un mínimo de fracción reactiva.

El modelado de los contaminantes para el acuífero Silao-Romita es complejo debido a la necesidad de incluir todas las posibles fuentes de contaminación de origen minero aunado a los diversos elementos que componen estos residuos.

Los elementos incluidos en el Modelo Base fueron: topografía y estratigrafía del sitio, parámetros del acuífero (coeficiente de almacenamientos, recarga, entradas, salidas, etc.) y el marcado de partículas, factores que indican que los posibles elementos de arrastre desde jales de Pozuelos tienen una dirección Surponiente, diferente de la que se esperaba (Sur) de acuerdo a lo reportado por los pozos de monitoreo de la CEAG. Esto indica que el depósito de Pozuelos no es un aporte de contaminantes para el acuífero Silao-Romita, lo anterior con base en los reportes de los pozos de monitoreo de calidad del agua de la CEAG.

El modelo generado a partir del software Visual ModFlow permitió integrar elementos derivados de jales mineros y modelar sus rutas de distribución hacia el acuífero de estudio.

La simulación del modelo de transporte de partículas permitió evaluar escenarios de contaminación a diferentes tiempos y su posible zona de afectación, así como determinar que el movimiento de los contaminantes no es tan rápido como se podría pensar.

Este trabajo nos permitió valorar un escenario real de presunta contaminación a través de una herramienta informática como Visual ModFlow, para poder determinar si un sitio (Pozuelos) es responsable o tiene afectación sobre el ambiente (Acuífero) o en su caso descartarlo. Otra de los puntos importantes fue que permitió valorar los tiempos y rutas de transporte de un contaminante disuelto en el acuífero, ya que este tipo de fenómeno no es tan rápido, más bien es un proceso lento debido a las características y propiedades físicas del acuífero.

Lo anterior permite mencionar que este tipo de herramientas son un instrumento útil para la toma de decisiones para la prevención y mitigación de una posible afectación por una actividad antropogénica hacia un acuífero, así como para la posible planeación de actividades permitidas en zonas vulnerables.

XI. PERSPECTIVAS.

Es necesario realizar una caracterización de los jales mineros más amplia, desde el punto de vista de especiación a través de todo el perfil de los depósitos, ya que dadas las condiciones ambientales y microbiológicas estos pueden ser factores importantes en la activación de los jales mineros.

Es necesario la ampliación de la zona de estudio en el modelo para determinar o descartar la relación de posibles fuentes de contaminación (presas y depósitos de jales mineros) con las concentraciones de sulfuros en los pozos de monitoreo de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG).

Deberá plantearse una ampliación del modelo pues el distrito minero de Guanajuato incluye más de 30 presas y/o depósitos de jales y en este estudio solo se consideró la aportación de 1 sitio de los 5 muestreados, valorando específicamente el depósito de Pozuelos con el mayor contenido en sulfuros, esto quiere decir, que seguramente otros sitios podrían aportar al elementos tóxicos al acuífero Silao-Romita que no fueron considerados en este estudio.

El problema resulta muy complejo de resolver o entender a escala regional y a nivel del acuífero, requiriendo así de análisis químicos directos y de modelado matemático en las presas o depósitos de jales como puntos de alta contaminación para determinar la dispersión de sus componentes dentro de su dimensión inmediata, pues en este estudio no fue posible hacerlo dada las restricciones por parte de los propietarios.

XII. BIBLIOGRAFÍA.

- A. Medel-Reyes, 2009, Caracterización Físico-Química de Jales Mineros y Evaluación del Uso de Biosólidos como Propuesta de Remedición, Tesis de Maestría, CIDETEQ, Querétaro, Querétaro, México.
- A. Millares-Valenzuela, 2006, Estudio Hidrológico para la Gestión Integrada de la Cuenca del Río Guadalfeo (Granada), Tesis de doctorado, Granada, España, pp 15-16.
- Aller, L.; Bennet, T.; et al (1987): DRASTIC, a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA, Report 600/2-87-035; 1-455.
- Baez, V. A. 2001. Validación de mapas de Vulnerabilidad en Medios Urbanos. Instituto de Geofísica - Universidad Nacional Autónoma de México, Toluca, México.
- Bigham, J.M., Nordstrom, D.K., 2002, Iron and Aluminum Hydroxysulfates from Acid Sulfate Waters, en Alpers, C.N., Jambor, J.L., Nordstrom, D.K. (eds.) Sulfate Minerals – Crystallography,
- Blandford, T. N. and P. S. Huyakorn, 1991, WHPA 2.0 Code-A Modular Semi-Analytical Model for the delineation of Wellhead Protection Areas. U.S. EPA Office of ground-Water Protection, Washington, D.C.
- Carrillo-Chavez Morton-Bermea, 2003. Environmental Geochemistry of the Guanajuato Mining District, México, Ore Geology Reviews, 23,277-297.
- CEAG, 1999, Carta Hidrogeológica del Estado de Guanajuato, Escala 1:250,000, Comisión Estatal del Agua del Estado de Guanajuato, Guanajuato, México.
- CEAG, 2000, Resultados de la Calidad del Agua de la Red de Monitoreo del Acuífero Silao-Romita, Comisión Estatal del Agua del estado de Guanajuato, México.
- CEAG, 2003, Un Modelo Hidrológico del Subsistema Acuífero de Silao-Romita, Estado de Guanajuato, Comisión Estatal del Agua del Estado de Guanajuato, Aquaforum, México.
- CEAG, 2006. Información Litológica de Pozos del Acuífero Silao-Romita, Gerencia de Administración de la Información de la Comisión estatal del Agua, Guanajuato, México.
- Clark and G.A. Salas-P., (eds.), A Special Issue devoted to the Geology and Mineral Deposits of Mexico: Economic Geology, v. 83, p. 1856-1885.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2002, Incidentes importantes de presas de jales reportados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) como emergencias atendidas debidas a derrames de residuos mineros, SEMARNAT, México.
- Custodio E., Llamas M. R., 1996, Hidrología Subterránea, Volumen I, Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Custodio, E; Llamas, M.R. (1996). Hidrología Subterránea. Omega, Barcelona.
- D. Camarena- Pozos, 2008, Reducción Microbiológica de Hg+2 en suelos asociados a la actividad minera, CINESTAV-Irapuato, México, pp64-70.
- Dold B. y Fontbote L. (2001). Element cycling and sec-ondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. J. Geochem. Explor. 74, 3-55.
- E. Hernández-Acosta, E. Mondragón, D. Cristóbal-Acevedo, J. E. Rubiños-Panta, E. Robledo-Santoyo, 2009, Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo. Revista Chapingo, Series ciencias forestales y del Ambiente , v. 15 núm. 2, pp109-112.
- Freeze, R. A., and J. A. Cherry, 1979, Groundwater, Prentice- Hall, Englewood Clifts, 1979. 604 pp.
- Geochemistry and Environmental Significance: Washington, Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 40, 305-350.

Geochemistry and Environmental Significance: Washington, Mineralogical Society of America.

González-Reyna, J., 1956. Riqueza minera y yacimientos minerales de México. 3rd edición, Banco de México, México, D.F.

GUYSA, 1999, Desarrollo de un modelo integral coordinado de las aguas subterráneas y superficiales en las subcuencas de los ríos Turbio y Guanajuato, Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, México.

Harbaugh, A.W., and McDonald, M.G. (1996). Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model. 96-486. U.S. Geological Survey.

http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/35/los_residuos.html

I. Cano Rodríguez, F. Gómez Vallejo, A.F. Aguilera Alvarado, G.de la Rosa, J. Gardea Torresdey, 2004, Transporte y destino final del fosforo en el acuífero de Puentecillas de Guanajuato, Revista Mexicana de Ingeniería Química, v. 3 num. 002. Pp 201-208.

IEE, 1998, Plan de ordenamiento ecológico del estado de Guanajuato, Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, Gobierno del Estado de Guanajuato, México.

IHOBE, 2000, Investigación de la contaminación del suelo, Guía metodológica de análisis de riesgos: migración y seguimiento de contaminantes en el suelo y en las aguas subterráneas, IHOBE, S.A. Sociedad pública de gestión medioambiental del departamento de ordenación del territorio del gobierno vasco.

INEGI, 1970, Carta edafológica serie I, Escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, México.

INEGI, 1999, Conjunto de Datos Vectoriales de la Carta Topográfica Escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, Ags., México.

INEGI, 2000, Marco geoestadístico del estado de Guanajuato y sus municipios, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, México.

INEGI-INE 2000. Indicadores de Desarrollo Sustentable en México. INEGI, México.

Jambor, J.L., Nordstrom, D.K., Alpers, C.N., 2002, Metal-sulfate salts from sulfide mineral oxidation, en Alpers, C.N., Jambor, J.L., Nordstrom, D.K. (eds.), Sulfate Minerals – rystallography,

Lesser y Asoc., 1998. Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de Silao-Romita, Gto. Contrato CEAS-APA-GTO-97-025. Reporte Técnico.

Liu, D.H.F., Lipták, B.G., 2000, Groundwater and surface water pollution, Lewis Publishers, New York, 2000.

M. A. Fernández-Torroba, 2004, Estudio y Modelización de la Contaminación del Acuífero del Río Najerilla, Tesis Doctoral, Universidad de la Rioja.

M. Romero Limón, Lacalle, B., Fernández del Pino, González García, 2002, Diferencias en la biodisponibilidad de metales pesados entre suelos naturales y suelos contaminados, Edafología, 7, 251-265.

McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W.,1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6. U.S. Geological Survey. <http://pubs.usgs.gov/twri/twri6a1/>.

McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988, Techniques of water-resources investigation of the United States Geological Survey, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey Open File Report 83-875, Reston, Virginia.

Mendoza-Améquita, E., Armienta- Hernandez. M.A., Ayora, C., Soler, 2006. Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el distrito Minero de Guanajuato, México, *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*. México.

N. Guiguer, 2007, *Modelación aplicada al flujo y transporte de contaminantes en aguas subterráneas*, Schlumberger water services, D.F. México.

Nordstrom, D.K, Jenne, E.A., Ball, J.W., 1979, Redox equilibria of iron in acid mine waters, en Jenne, E.A., *Chemical Modeling in Aqueous Systems, Speciation, Sorption, Solubility, and Kinetics*, Washington, D.C., American Chemical Society Symposium Series, 93, 51-79.

Nordstrom, D.K. Alpers, C.N., 1999, *Geochemistry of acid mine waste*, en Plumlee, G.S, Logson, M.J. (eds), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A, Processes, Techniques, and Health Issues*: Littleton, CO, Society of Economic Geologists, *Reviews in Economic Geology*, 6A, 133-160.
P. Higuera y R. Oyarzum, 2008, *Mineralogía y geoquímica ambiental*, Facultad de ciencias geológicas, Universidad Complutense, Madrid España.

Plumlee, G.S., 1999, *The environmental geology of mineral deposits*, in Plumlee, G.S., Logsdon, M.J. (eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits; Part A: Processes, Techniques, and Health Issues*: Colorado, Society of Economic Geologists, *Reviews in Economic Geology*, 6A, 71-116.

Pollock, Jean-Yves . 1994. *Checking Theory and Bare Verbs*. In Cinque,Guillermo et al. (eds.), *Paths towards Universal Grammar*, 293–310.

Pollock, Jean-Yves, 1989. *Verb Movement, Universal Grammar and the Structure of IP*. *Linguistic Inquiry* 20, 365-424.

Ramos Arroyo Yann René et al., 2009. *Afectaciones en la calidad del agua de abasto a la población por drenajes de minas abandonadas en una zona natural protegida de Guanajuato*, Gto. Departamento de Geomática e Hidráulica, Universidad de Guanajuato. Guanajuato, Gto.

Ramos-Arroyo, 2004, *Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato*, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros. Universidad Autónoma de Guanajuato. Instituto de Geología, *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 21, núm. 2.

Sánchez González, 2004, *Inventario físico de los recursos minerales en el municipio de Guanajuato*, Gto., Consejo de Recursos Minerales, Dirección de Minas de Guanajuato.

Schlumberger water services, 2007, *Modelación aplicada al flujo y transporte de contaminantes en aguas subterráneas*, Schlumberger water services, D.F. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 1993, *Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993*, Establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente ,México, D.F., *Diario Oficial de la Federación*, 22 de octubre de 1993.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2003, *Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003*, que establece el procedimiento para caracterizar los jales así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y pos-operación de presas de jales: México, D.F., *Diario Oficial de la Federación*, 13 de septiembre de 2004.

SGME, 1084, *Hidrología y propiedades de los acuíferos*, Guías y manuales. ISBN: 84-7840-465-1, pp316.

- Spitz K., Moreno J.; "A practical guide to groundwater and solute transport modelling"; John Wiley & Sons, Inc., NY, U.S., 1996, 461 pp..
- Tessier A., 1979, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, *Analitical*, v.51, num.7.
- Turc, L. (1955) 'Le bilan d' eau des sols. Relations entre les precipitations, l' evaporation, et al'ecoulement', *Ann. Agr.*, 6, 5-131.
- Universidad de Morelos, 2004, Actualización del programa de ordenamiento ecológico del estado de Guanajuato, Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, Gobierno del Estado de Guanajuato, México.
- Universidad Iberoamericana de León, 1999, Estructuración de mapas temáticos de índices de vulnerabilidad de las aguas subterráneas de las subcuencas de los ríos Turbio y Guanajuato, Gto., Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.
- Van Stempvoort D., L. Evert and L. Wassenaar. Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Can. Wat. Res. J.* 18:25-37, 1993.
- Verónica Fuentes Hernández, Verguinia Petkova Simeonova. 2004. Factores hidrodinámicos fundamentales para una red regional de monitoreo de la calidad del agua subterránea. Caso de estudio Silao-Romita, Guanajuato. Comisión Estatal del Agua del Estado de Guanajuato.
- Waterloo Hydrogeologic, 2002, Visual ModFlow user's manual, Waterloo Hydrogeologic Inc, waterloo, Ontario.
- Waterloo Hydrogeologic, 2002, Visual ModFlow user's manual, Waterloo Hydrogeologic Inc, waterloo, Ontario.
- Weaver, T. R. and J.M. Bahr, 1991, Geochemical evolution in the Cambrian-Ordovician sandstone aquifer, eastern Wisconsin. i. Major ion and radionuclide distribution, *Ground water*, v.9, num. 3 pp350-356.
- WHI. (2003). Visual-Modflow v.3.1. 3-D Groundwater Flow and Transport Modeling. Waterloo. Ontario. Canada.
- Y.R. Ramos Arroyo y Siebe Grabach, 2006, Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*. México.