



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**DIAGNÓSTICO DE IMPACTO AMBIENTAL
CAUSADO POR LA MINERÍA
EN EL DISTRITO MINERO EL ORO-TLALPUJAHUA
MEDIANTE EL USO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG)**

T E S I S
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN GEOCIENCIAS
Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

**PRESENTA
GEÓG. MÓNICA MARTÍNEZ MEDINA**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. PEDRO CORONA CHÁVEZ**

**CO-ASESOR
DR. GERARDO BOCCO VERDINELLI**

MORELIA, MICHOACÁN.

Agosto 2009

Dedicatoria

Con todo mi amor y agradecimiento dedico esta tesis a mi familia.

A mis Padres:

*Sra. Blanca Medina Torres
y Sr. Jesús Martínez Torres*

A mis hermanos:

Verónica, Sandra, Patricia, Paulina, Jesús y Bibiana

*Sabiendo que no existirá una forma de agradecer su esfuerzo,
con la promesa de seguir siempre
y corresponder al apoyo que tan cariñosamente me han brindado,
quiero que sientan que el objetivo logrado también es de ustedes
y que la fuerza que me ayudo a conseguirlo fue su apoyo y amor.*

Agradecimientos

A través de estas líneas quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han brindado su apoyo científico y humano, en el desarrollo de este trabajo.

Especialmente y en primer lugar a mi Director de Tesis: Dr. Pedro Corona, por su valioso tiempo, asesoramiento científico y estímulo para seguir creciendo intelectual y personalmente.

Al Sr. Gustavo Bernal Navarro Director del Museo Tecnológico Siglo XIX, por su apoyo en distintos momentos en el trabajo de campo.

Al Dr. Jasinto Robles por su confianza, apoyo y valiosas sugerencias en la redacción de mi Tesis.

Al Dr. Gerardo Bocco por sus comentarios y confianza en este trabajo.

A el Dr. Yann R. Ramos por su apoyo y enseñanza, especialmente en el desarrollo del trabajo de campo.

A mis amigos Elizabeth Montaña y Marco Antonio Santoyo por su valiosa colaboración, entusiasmo y buena voluntad en las actividades de campo.

Al Ing. Teodoro Hernández por su apoyo y atención en el proceso de laboratorio.

A mis sinodales: Dr. Víctor Hernández y Dra. Erna M. López por sus aportaciones, comentarios y sugerencias en este trabajo.

A mis amigos que sin saberlo han contribuido en la realización de esta Tesis, porque los amigos son los hermanos que uno elige. Gracias por su apoyo y lealtad.

A CONACYT por el apoyo económico que me brindó para realizar esta Tesis mediante el proyecto FOMIX-Michoacán-2005-1-14.

*Enseñarás a volar,
pero no volarán tu vuelo.
Enseñarás a soñar,
pero no soñarán tu sueño.
Enseñarás a vivir,
pero no vivirán tu vida.
Sin embargo...
en cada vuelo,
en cada vida,
en cada sueño,
perdurará siempre la huella
del camino enseñado.*

Agnes Gonxha

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Justificación	4
1.2 Hipótesis	5
1.3 Objetivos	5
 CAPÍTULO 2	
LA MINERÍA Y EL MEDIO AMBIENTE.....	6
2.1 Contaminación ambiental vs. impacto ambiental	6
2.2 Métodos de estudio de impacto ambiental (IA)	8
2.3 Tipos de impacto ambiental causado por la minería	10
2.4 La minería: la extracción de minerales y la generación de residuos mineros	11
2.4.1 Obras mineras y la generación de residuos mineros	11
2.5 Métodos de estudio de impacto ambiental en zonas mineras	13
2.5.1 La geoquímica y la evaluación de los elementos potencialmente tóxicos	13
2.5.2 La cartografía de las obras mineras y residuos mineros	15
2.5.3 El reciclamiento o uso secundario de los residuos mineros	16
2.6 La minería y su impacto ambiental en México y en el mundo	16
 CAPÍTULO 3	
LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SU POTENCIAL EN EL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL EN ZONAS MINERAS.....	20
3.1 Los Sistemas de Información Geográfica (SIG)	20
3.2 Los componentes de un sistema de información geográfica	21
3.3 La base de datos geográficos: topología y modelos de SIG	24
3.4 Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica	26

3.5 Aplicación de un SIG en el estudio de impacto ambiental en zonas mineras.....	25
CAPÍTULO 4	
EL ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO EN EL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL.....	30
4.1 El análisis de paisaje con un enfoque sistémico	30
4.2 El paisaje geomorfológico en el diagnóstico de impacto ambiental.....	32
4.3 Las unidades de paisaje y la carta geomorfológica	33
4.4 Caracterización morfogénica del paisaje	37
4.5 Las unidades geomorfológicas y su aplicación al impacto ambiental en zonas mineras	38
CAPÍTULO 5	
LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA DEL DISTRITO MINERO EL ORO-TLALPUJAHUA (DMOT).....	40
5.1 Localización y descripción geográfica	40
5.2 Caracterización climática de DMOT.....	41
5.3 Fisiografía y relieve local	44
5.4 Vegetación	44
5.5 Importancia ecológica de la zona de estudio	45
5.6 Diagnóstico socioeconómico	46
CAPÍTULO 6	
GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS MINERALES DEL DMOT.....	51
6.1 Geología y Estructuras tectónicas	51
6.1.1 Secuencia metavolcánica andesítica	51
6.1.2 Secuencia metasedimentaria pelítico-volcánico de Talpujahuilla	53
6.1.3 Secuencia de metacalcáreo-pelítico (El Carmen y Mina Dos Estrellas)	53
6.1.4 Secuencia de calizas masivas Remedios	54
6.1.5 Andesitas del Cerro Somera	54
6.1.6 Estructuras tectónicas	55
6.2 Los yacimientos minerales del DMOT	56
6.2.1 Vetas del Distrito Minero Talpujahuilla	59
6.2.2 Vetas del Distrito Minero El Oro	60

CAPÍTULO 7	
LA HISTORIA DE EXTRACCIÓN MINERA Y LOS PROCESOS DE BENEFICIO PRACTICADOS EN EL DMOT.....	61
7.1 Historia de extracción minera en el DMOT	61
7.1.1 Prehispánica	61
7.1.2 Colonial	62
7.1.3 México Independiente	63
7.1.4 Compañía Minera Dos Estrellas	64
7.1.5 La Cooperativa Minera Dos Estrellas	68
CAPÍTULO 8	
METODOLOGÍA.....	69
CAPÍTULO 9	
RESULTADOS.....	72
9.1 Caracterización física de la cuenca hidrográfica del DMOT	73
9.1.1 Mapa altimétrico del DMOT.....	73
9.1.2 Diferenciación de las pendientes del terreno en el DMOT.....	74
9.2 Caracterización hidrográfica de las subcuencas Río El Carmen y Río El Ocotál	76
9.2.1 Red y orden de drenaje.....	77
9.2.2 Forma, amplitud de relieve y coeficiente de torrencialidad por pétalo.....	79
9.2.3 Densidad de drenaje por unidades geológicas.....	82
9.3 Condiciones climáticas de la región correspondiente al DMOT.....	82
9.3.1 Las estaciones meteorológicas del SMN y la CNA.....	83
9.3.2 Las estaciones meteorológicas FOMIX.....	83
9.4 Cubierta y uso del suelo en el DMOT.....	87
9.5 Cartografía histórico-minera del DMOT.....	89
9.5.1 Localización y distribución de obras mineras del DMOT.....	92
9.6 Localización y distribución de residuos mineros.....	94
9.6.1 Historia metalúrgica del DMOT y la generación de residuos mineros.....	94
9.6.1.1. <i>Método de Fundición</i>	94
9.6.1.2. <i>Método de Patio o Amalgamación (1554 a 1895/1906)</i>	95
9.6.1.3. <i>Procedimiento de Cianuración</i>	96
9.6.1.4. <i>Sistema metalúrgico de Flotación</i>	97
9.6.2 Cartografía histórica de los jales y residuos mineros del DMOT.....	97

9.6.3	Cartografía actual de los jales y residuos mineros.....	98
9.7	Caracterización física y mineralógica de los jales del DMOT.....	100
9.7.1	Propiedades físico-químicas y mineralógicas de los jales del DMOT.....	104
9.7.2	Los jales de El Carmen (E4).....	106
9.7.3.1	Características físico- químicas de la Estación 4.....	106
9.7.3	Los Jales de Los Cedros (E1, E2, E3, E9, E10 Y E11).	107
9.7.3.1	Características físico- químicas de la Estación 1	108
9.7.3.2	Características físico- químicas de la Estación 2	109
9.7.3.3	Características físico- químicas de la Estación 3	109
9.7.3.4	Características físico- químicas de la Estación 9	110
9.7.3.5	Características físico- químicas de la Estación 10.....	111
9.7.3.6	Características físico- químicas de la Estación 11	112
9.7.4	Propiedades físico-químicas de los Jales Dos Estrellas	113
9.7.4.1	Características físico- químicas de la Estación 12.....	113
9.7.5	Propiedades físico-químicas de las presas de jales Tiro México.....	114
9.7.5.1	Propiedades físico- químicas de la Estación 8	114
9.7.5.2	Propiedades físico- químicas de la Estación 7.....	115
9.7.6	Características físico-químicas de la presa de jales CONALEP	116
9.7.6.1	Características físico-químicas de la Estación 14	116
9.7.6.2	Características físico-químicas de la Estación 5	117
9.8	Cartografía geoquímica de sedimentos de arroyo.....	119
CAPÍTULO 10		
DISCUSIÓN.....		
		125
10.1	Las subcuencas hidrográficas del DMOT	125
10.2	Las subcuencas hidrográficas del DMOT y su relación con las obras y residuos mineros	127
10.2.1	Subcuenca hidrográfica de El Carmen (SHEC)	127
10.2.2	Subcuenca hidrográfica El Ocotil (SHEO)	128
10.3	Análisis geomorfológico del DMOT	129
10.3.1	La Carta geomorfológico del DMOT	129
10.3.1.1	Formas de relieve de origen fluviolacustre	131
10.3.1.2	Formas de relieve de origen volcánico	131
10.3.1.3	Formas de relieve de origen denudatorio.....	132
10.3.1.4	Formas de relieve de origen tectónico/denudatorio.	133

10.3.2	Distribución geomorfológica de las anomalías de EPT y EPE en el DMOT	134
10.3.2.1	<i>Anomalías geoquímicas de Elementos Potencialmente Económicos (EPE): Oro (Au) y Plata (Ag)</i>	135
10.3.2.2	<i>Anomalías geoquímicas de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT): Cobre (Cu), Plomo (Pb), Zinc (Zn) y Fierro (Fe)</i>	138
CAPÍTULO 11		
	CONCLUSIONES	143
	BIBLIOGRAFÍA	146
ANEXOS		
ANEXO I		
	LOS MÉTODOS DE EXTRACCIÓN MINERA	153
ANEXO II		
	TIPOS DE IMPACTO AMBIENTAL CAUSADOS POR MINERÍA	155
ANEXO III		
	PARÁMETROS DE CONTROL DE MOVILIDAD DE METALES PESADOS.	160
ANEXO IV		
	LOS ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS Y SUS EFECTOS EN LA SALUD HUMANA	164
ANEXO V		
	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE METALES PESADOS EN MÉXICO.....	169

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	El impacto ambiental según Wathern, P (1988).....	7
Figura 2.	Contaminación ambiental vs impacto ambiental.....	8
Figura 3.	Diagrama de flujo simplificado de las operaciones de tratamiento mineral que llevan a la generación de jales (modificado de Lottermoser, 2003).....	12
Figura 4.	Localización de distritos mineros que presentan trabajos geoquímicos por impacto ambiental/remediación.	19
Figura 5.	Componentes de un Sistema de Información Geográfica (SIG).....	22
Figura 6.	Fases de un proyecto SIG. Modificado de Mancebo-Quintana <i>et al.</i> . (2008).....	24
Figura 7.	Esquema de una cuenca hidrográfica que ilustra en líneas rojas las estructuras mineralizadas de una zona minera (pre-minería), así como las zonas en gris corresponderían al depósito secundario de residuos mineros y alteración antropogénica de de la cuenca (post-minería)	29

Figura 8. Estructuras perceptibles e intangibles de un geo-sistema.....	31
Figura 9. Sistemas Morfoclimáticos de Wilson 1969.....	37
Figura 10. Regiones de meteorización según Peltier 1950.....	38
Figura 11. Localización del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahua.....	40
Figura 12. Mapa climático con localización de estaciones meteorológicas.....	42
Figura 13. Climograma de la estación meteorológica El Oro.....	43
Figura 14. Climograma de la estación meteorológica Presa de Brockman.....	43
Figura 15. Mapa de interés ecológico del DMOT	46
Figura 16. Mapa topográfico del DMOT	47
Figura 17. Población Económicamente Activa en el Municipio de Tlalpujahua, Michoacán	48
Figura 18. Población Económicamente Activa en el Municipio de El Oro, Estado de México	49
Figura 19. Población Económicamente Activa a Nivel Municipal.....	49
Figura 20. Población económicamente activa dentro del área de estudio por sector.....	50
Figura 21. Mapa Geológico del DMOT.....	52
Figura 22. Columna estratigráfica modificada de De la Teja et al, 2000.....	55
Figura 23. Esquema ideal de un depósito de vetas tipo hidrotermal (Mosier <i>et al</i> , 1986) Notar que las vetas hidrotermales del DMOT han sido interpretadas para de tipo epitermal de baja temperatura, es decir en la porción superior vertical del yacimiento.....	57
Figura 24 Mapa geológico y minero de Teodoro Flores (1920), en el cual se observa de las vetas tipo hidrotermal del DMOT.....	58
Figura 25. Acta Constitutiva de la Compañía Minera Las Dos Estrellas.....	64
Figura 26. Imagen que muestra escenas del desastre de 1937.....	67
Figura 27. Diagrama metodológico.....	71
Figura 28. Mapa Altimétrico del DMOT.....	74
Figura 29. Mapa de Pendientes del DMOT.....	76
Figura 30. Mapa de Orden de Drenaje del DMOT.....	78
Figura 31 Mapa que presenta la delimitación por pétalos del DMOT.....	78
Figura 32. Forma de la cuenca calculada por el Coeficiente de Gravelius.....	80
Figura 33. Mapa de amplitud de del relieve por pétalos.....	81
Figura 34. Coeficiente de torrencialidad por pétalos.....	81
Figura 35. Climograma de las estaciones meteorológicas del SMN y CNA.....	83
Figura 36. Climogramas de las estaciones meteorológicas FOMIX.....	85
Figura 37. Precipitación anual de 1972-2002 de la estación meteorológica 15183-El Oro.....	86
Figura 38. Línea del tiempo que muestra los años con registros meteorológicos de la estación 15183-El Oro.....	87
Figura 39. Mapa de cubierta y uso del suelo.....	88
Figura 40. Proyecto para almacenamiento de las jales de la planta de beneficio de “El Cedro”, 1950 Archivo Cartográfico-Histórico del Museo Tecnológico Dos Estrellas.....	90

Figura 41. Plano geológico-minero de los Distritos de El Oro y Tlalpujahua (Flores, 1920).....	90
Figura 42. Plano topográfico, minero y geológico de los minerales de El Oro y Tlalpujahua (Flores, 1920).....	91
Figura 43. Plano general de pertenencias de la Cooperativa Minera Las dos Estrellas en El Oro – Tlalpujahua S C L (izq.) y Bloque diagramático Isométrico Dos Estrella, Mich (der.) Elvir-Aceituno, R (1955).....	93
Figura 44. Plano de estructuras del DMOT (Benítez-Muro, J A, 1976).....	92
Figura 45. Localización y distribución de obras mineras.....	94
Figura 46. Dimensión real del proceso de molienda en el Método de Patio.....	96
Figura 47. Plano general de pertenencias mineras de la Cooperativa Minera Las Dos Estrellas en El Oro y Tlalpujahua 1943 Archivo Cartográfico-Histórico del Museo Tecnológico Dos Estrellas.....	98
Figura 48. Mapa de distribución de residuos mineros.....	99
Figura 49. Esquema del muestreo geoquímico de jales para su correspondiente caracterización física, mineralógica y geoquímica.....	100
Figura 50. Mapa de localización de las estaciones de muestreo de jales del DMOT	102
Figura 51. Estaciones de muestreo en DMOT conforme su localización altitudinal.....	103
Figura 52. Propiedades físico-químicos de la Estación E4.....	107
Figura 53. Propiedades físico-químicos de la Estación E1.....	108
Figura 54. Propiedades físico-químicos de la Estación E2.....	109
Figura 55. Propiedades físico-químicos de la Estación E3.....	110
Figura 56. Propiedades físico-químicos de la Estación E9.....	111
Figura 57. Propiedades físico-químicos de la Estación E10.....	112
Figura 58. Propiedades físico-químicos de la Estación E11.....	113
Figura 59. Propiedades físico-químicos de la Estación E12.....	114
Figura 60. Propiedades físico-químicos de la Estación E7.....	115
Figura 61. Propiedades físico-químicos de la Estación E7.....	116
Figura 62. Propiedades físico-químicos de la Estación E14	117
Figura 63. Propiedades físico-químicos de la Estación E5.....	118
Figura 64. Imágenes que muestran el desarrollo de vegetación sobre los jales en: El Oro (izq) y Tlalpujahua (der).....	118
Figura 65. Fotografía en la que se observan los jales que son arrastrados durante el periodo de lluvias..	119
Figura 66. Mapa de concentración de EPE (Au y Ag) en las muestras de sedimentos de arroyo al interior del DMOT	123
Figura 67. Mapa de de EPT (As, Cu, Pb y Zn) en las muestras de sedimentos de arroyo al interior del DMOT	124
Figura 68. Diagrama de Wilson que muestra los proceso morfoclimáticos predominantes en el DMOT (izq.); Diagrama de Peltier que muestra los proceso de intemperismo predominantes en el DMOT (der.).....	126
Figura 69. Erosión en los jales Tiro México.....	128

Figura 70. Unidades geomorfológicas del DMOT.....	130
Figura 71. Anomalías geoquímicas de Au (ppb) en sedimentos de arroyo.....	137
Figura 72. Anomalías geoquímicas de Ag (ppm) en sedimentos de arroyo.....	138
Figura 73. Anomalías geoquímicas de Cu (ppm) en sedimentos de arroyo.....	141
Figura 74. Anomalías geoquímicas de Pb (ppm) en sedimentos de arroyo.....	141
Figura 75. Anomalías geoquímicas de Zn (ppm) en sedimentos de arroyo.....	142
Figura 76. Anomalías geoquímicas de Fe (%) en sedimentos de arroyo.....	142
Figura 77. Valores de pH.....	162
Figura 78. Condiciones de oxido reducción en las aguas naturales1.....	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los estudios de impacto ambiental según Canter, L y Sadler,	8
Tabla 2. Clasificación de tipos de impacto ambiental de la minería, elaborado a partir de Sánchez (2000) e higuera y Oyarzun (2002).....	10
Tabla 3. Elemento potencialmente tóxicos y su interés en biodisponibilidad, elaborada a partir de los datos de John y Leventhal (1995).....	15
Tabla 4. Estaciones Meteorológicas.....	41
Tabla 5. Localidades que se encuentran dentro del polígono de estudio.....	47
Tabla 6. Leyes del mineral que se procesa en las Haciendas de Beneficio de La Dos Estrellas	65
Tabla 7. Extracción de Au y Ag (1900-1937).....	66
Tabla 8. Producción de la Cooperativa Minera (1938-1946).....	68
Tabla 9. Altitud extrema de las microcuencas Río El Carmen y Río El Ocotal.....	73
Tabla 10. Rangos de pendiente y su correspondencia con el relieve.....	75
Tabla 11. Pendiente por subcuencas según porcentaje de superficie cubierta.....	75
Tabla 12. Forma de la cuenca conforme al índice de compacidad.....	79
Tabla 13. Densidad de drenaje por unidades geológicas.....	82
Tabla 14. Estaciones meteorológicas de FOMIX.....	84
Tabla 15. Precipitación anual para la estación 15183 El Oro, El Oro (1972-2002).....	85
Tabla 16. Distribución de frecuencias.....	85
Tabla 17. Frecuencias y tiempo de retorno.....	86
Tabla 18. Superficie de los tipos de cubierta y uso del suelo	89
Tabla 19. Superficie de las presas de jales cartografiadas.....	99
Tabla 20. Características fisico-químicas de las muestras colectadas del distrito minero El Oro-Tlalpujahu.....	104
Tabla 21. Datos geoquímicos de Sedimentos de Arroyo (SGM).....	120

Tabla 22. Cobertura de la formas de relieve según su origen.....	129
Tabla 23. Superficie cubierta por las formas de relieve de origen fluvio/lacutre	131
Tabla 24. Superficie cubierta por las formas de relieve de origen volcánico.....	132
Tabla 25. Superficie cubierta por las formas de relieve de origen denudatorio.....	113
Tabla 26. Superficie cubierta por las formas de relieve de origen tectónico/denudatorio	134
Tabla 27. Movilidad de algunos elementos en función de pH y Eh.....	163
Tabla 28. Elementos por grado de toxicidad e interés en estudios de Biodisponibilidad.....	164
Tabla 29. Valores de fondo de contenido de arsénico.....	165
Tabla 30. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales NOM-031-ECOL-1993.....	169
Tabla 32. Límites máximos permisibles NOM-001-ECOL-1996.....	170

RESUMEN

El presente trabajo es un diagnóstico de impacto ambiental causado por la minería en el distrito minero El Oro-Tlalpujahua. Se basa en: i) la caracterización física del distrito, especialmente en una base geológica detallada, la carta geomorfológica, las condiciones climáticas y la caracterización meteorológica, la red hidrográfica así como la delimitación de subcuencas; ii) un muestreo de residuos mineros y su correspondiente análisis geoquímico y mineralógico y el tratamiento de datos geoquímicos de sedimentos de arroyo del Servicio Geológico Mexicano; iii) un sistema de información geográfica que permitió integrar y analizar espacialmente la información recopilada y generada.

El distrito minero, en el que ha dejado de practicarse la actividad minera hace más de cincuenta años, presenta en la actualidad un impacto ambiental activo por: la erosión y redistribución de los residuos mineros (jales y terreros) y de las obras mineras (tiros y socavones).

También se identificaron las anomalías geoquímicas de elementos potencialmente económicos (Au y Ag) y elementos potencialmente tóxicos (Cu, Pb, Zn y Fe), cuya principal fuente son las obras mineras, sin embargo también existen anomalías geoquímicas hipogénicas.

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

La actividad minera desde la exploración, extracción, trituración hasta el beneficio del mineral implica modificaciones más o menos intensas sobre el medio ambiente, además pueden tener consecuencias directas o indirectas en el desarrollo de otras actividades económicas (agricultura/ganadería), y en el peor de los casos sobre la salud de grupos de población humana.

En consecuencia, un trabajo referente al impacto ambiental en zonas o distritos mineros tiene por objeto evaluar el nivel de afectación sobre el territorio en donde se ha realizado la actividad extractiva, considerando en general las modificaciones hechas en la biosfera, así como a los asentamientos humanos que históricamente se han desarrollado en la misma región.

En el caso de la minería, como de cualquier otra actividad, la mejor forma de evitar o minimizar el impacto ambiental es aprendiendo de la historia ¿Cómo se ha desarrollado? ¿Qué efectos ha tenido sobre el medio ambiente? ¿Aún persisten dichos efectos? ¿Se han planteado o aplicado métodos o técnicas de saneamiento, mitigación o remediación? ¿Cuáles han sido los resultados de dichos métodos y técnicas de remediación?

La minería y su impacto ambiental han sido estudiados “parcial o localmente”, pero la eficiencia de las propuestas de prevención o saneamiento depende en gran medida del planteamiento de escenarios de impacto ambiental, sin perder de vista las particularidades del medio ambiente natural. No se presentan los mismos procesos en un clima desértico que en una región de clima tropical, ni en una planicie son iguales a los que se presentan en regiones montañosas.

Los residuos mineros (jales o terreros) son rocas pulverizadas con un enriquecimiento anómalo de elementos potencialmente tóxicos (EPT), por lo que son materiales degradados altamente susceptibles de ser afectados por los procesos de meteorización, transporte y erosión; generando posibles cúmulos en zonas aguas abajo de el lugar en que fueron originalmente depositados y propiciando en algunos casos zonas de azolve de cuerpos de agua o la re-concentración de elementos peligrosos. Como se sabe a partir de la historia de México, la minería es una actividad antigua y en nuestro país se ha desarrollado la extracción con mayor intensidad desde 1550, lo que indica que existen millones de toneladas de jales dispersos en ambientes naturales diferentes.

La problemática de estos residuos mineros no sólo se reduce al lugar en dónde se encuentran, también es indispensable considerar sus características geoquímicas y mineralógicas, ya sean heredadas de la roca original o que tengan influencia directa de los métodos de beneficio del que fueron objeto. Su importancia reside en que en el proceso de separación de los elementos con valor económico (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, etc.), se favorece la concentración de otros elementos potencialmente tóxicos (EPT) por ejemplo As, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn. Cabe aclarar que todos los elementos se encuentran en forma natural en la Tierra sin ser considerados tóxicos o contaminantes, por lo que solo se consideran así cuando su concentración rebasa el límite de biodisponibilidad¹ establecido. Además depende del medio en que se encuentran y las especies minerales en que se presentan, puesto que los elementos podrían ser solubilizados, transportados o bien precipitarse.

El conocimiento del espacio físico (paisaje, pendientes, geoformas, clima, cuencas, drenaje, etc.), es de vital importancia en cualquier estudio de impacto ambiental en zonas mineras. En principio, las zonas mineras mostrarán siempre una interacción con zonas urbanas, zonas rurales y una región despoblada con más o menos afectación. Asimismo, un estudio espacial funciona como un evaluador de los procesos exógenos que se registran a través de los procesos modelación de la superficie terrestre: intemperismo o meteorización, denudación o erosión y acumulación.

En suma, el estudio de impacto ambiental de zonas mineras requiere de una metodología integradora y multidisciplinaria que pueda realizar en modo eficaz un diagnóstico, una evaluación y hacer propuestas de intervención ambiental. Por estas razones se propone aquí una metodología geomorfológico holística y sistémica que incluya el análisis espacio temporal de los procesos exógenos incluyendo el análisis de algunas componentes geoquímicas. Se propone la utilización del SIG como herramienta fundamental e integradora en el estudio de los procesos de impacto ambiental en zonas mineras.

La zona de estudio es el Distrito Minero El Oro Tlalpujahuá (DMOT). En esta importante e histórica región la minería se desarrolló a gran escala desde hace más de cuatro siglos y cesó hace apenas 50 años. El DMOT se encuentra ubicado políticamente entre dos estados: Michoacán y Estado de México. El impacto ambiental es un hecho, sin embargo es muy importante conocer el

¹ Se entiende por biodisponibilidad la fracción de metales pesados que está disponible para la absorción por plantas y animales (Acevedo *et al.*, 2005)

estado en que se encuentra actualmente y discutir cualquier riesgo u oportunidad que permita recuperar en lo posible el daño causado la minería en ese lugar.

1.1 Justificación

Aunque en la actualidad aparentemente se puede considerar que en la práctica ninguna actividad económica es posible sin la utilización de los recursos minerales, no necesariamente significa esto que se deban extraer o aprovechar los recursos naturales en forma irracional. Este hecho sin duda ha propiciado una problemática ambiental cada vez más intensa ante la proporcional y creciente demanda de bienes y servicios de la población, y sobretodo ante un sistema político-administrativo cuya prioridad es la de acumular riqueza monetaria, sin considerar los efectos que la sobreexplotación de recursos naturales tenga sobre el medio ambiente o sobre la actividad misma.

En la práctica real es inevitable generar un impacto ambiental durante el desarrollo y explotación de los recursos mineros, sin embargo, si es posible mitigar o remediar dicho impacto, y para ello se han desarrollado numerosos trabajos enfocados al estudio del IA de la minería con diferentes líneas de investigación, como por ejemplo: análisis geoquímico, ponderación del valor económico de explotación, recuperación de minerales, geoquímica y análisis de paisajes entre otros. Sin embargo, la revisión general de los trabajos hechos en otros distritos mineros activos, históricos o en abandono (capítulo 2), muestran que hace falta un desarrollo metodológico con un enfoque multidisciplinario que permita obtener un panorama completo de la problemática para la toma de decisiones más acertadas.

En este trabajo se pretende demostrar que a través del diagnóstico de impacto ambiental con un enfoque holístico es posible tomar medidas reales que puedan ayudar a prevenir, remediar o resarcir un daño de impacto ambiental durante cualquier proceso de extracción y aprovechamiento de los recursos mineros. Así mismo, se presenta un ejemplo de la aplicación Sistemas de Información Geográfica (SIG), como una herramienta que auxilia en la sistematización y desarrollo del trabajo multidisciplinario, aplicado a un caso histórico específico, en el cual ha cesado la actividad minera hace ya más de 50 años, se cuenta con el registro de obras mineras por más de cuatro siglos de extracción en el Distrito Minero El Oro y Tlalpujahuá.

1.2 Hipótesis.

A cincuenta años de haberse suspendido la actividad minera en el Distrito Minero El Oro y Tlalpujahua, el impacto ambiental se mantiene aún dentro del proceso de evolución de un proceso exógeno activo, el cual podría tener implicaciones importantes para la población y podría ser identificada su magnitud mediante una metodología geomorfológica integradora.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Establecer las bases de información geográfica, geológica, geoquímica y geomorfológica del Distrito Minero El Oro y Tlalpujahua con la finalidad de realizar un diagnóstico preliminar del impacto ambiental que han generado las obras mineras y los residuos mineros (jales y terreros) sobre el paisaje y el patrimonio histórico.

Objetivos específicos

- ☑ Generar un SIG con datos de carácter histórico-minero y ambiental.
- ☑ Delimitar y caracterizar de la cuenca hidrográfica que contiene al DMOT.
- ☑ Ponderar la relación de los datos meteorológicos con los procesos exógenos del DMOT con énfasis en la posible distribución de los EPT.
- ☑ Determinar los parámetros físicos, mineralógicos y espacio-temporales de los residuos mineros y su relación con otros elementos geográficos de la cuenca.
- ☑ Realizar el análisis geomorfológico de la región del DMOT para identificar las relaciones entre las unidades geomorfológicas con los atributos geológicos, mineros y ambientales.
- ☑ Identificar algunas posibles anomalías geoquímicas de los EPT y EPE de sedimentos y su relación con los procesos fluviales en el DMOT.

CAPÍTULO 2 LA MINERÍA Y EL MEDIO AMBIENTE

La condición actual de degradación exponencial del medio ambiente es en gran parte una consecuencia de la omisión de políticas económicas y sociales donde prevalezca el uso racional de los recursos naturales antes que un saqueo voraz con una tendencia puramente económica.

La degradación del medio ambiente ha crecido notablemente a partir de los avances tecnológicos e industriales que han facilitado la extracción y transformación de grandes volúmenes de materia prima natural, los cuales han crecido además en forma paralela, a una demanda -cada vez mayor- de bienes y servicios requeridos por los grupos humanos en todo el mundo.

En respuesta a la problemática antes mencionada nace el concepto de “desarrollo sostenible” en el que se hace hincapié en la necesidad de incorporar la variable ambiental para declarar que no puede haber progreso sólido y estable si no existe una preocupación de la sociedad por la conservación ambiental. La protección ambiental no se plantea como un dilema frente al desarrollo, sino como uno de sus elementos fundamentales (García-Leyton, 2004). Entonces el desarrollo económico y la protección del medio ambiente son en realidad complementarios y co-dependientes: sí el medio ambiente se deteriora no hay desarrollo y sin desarrollo las acciones de protección ambiental se congelan. Para plantear propuestas de protección ambiental es necesario identificar el problema, en este caso, mediante un diagnóstico de Impacto Ambiental (DIA) causado por las actividades humanas. En este sentido y para uniformar criterios, dado que de acuerdo con la disciplina o perspectiva de estudio existen numerosas definiciones y acercamientos relacionados al estudio de impacto ambiental, a continuación se presentan una breve revisión de algunos conceptos de impacto ambiental aplicados específicamente a las zonas mineras.

2.1 Contaminación ambiental vs impacto ambiental

Todo ambiente terrestre está en constante evolución, sin embargo las actividades humanas han alterado históricamente este proceso “natural” propiciando de alguna forma el Impacto Ambiental (IA), el cual de acuerdo a Wathern (1988), se entiende como *“el cambio en un parámetro ambiental, en un determinado periodo y área, que resulta de una actividad dada,*

comparada con la situación que ocurriría si esa actividad no hubiera sido iniciada”. En otras palabras dicho cambio puede ser benéfico o no para el medio ambiente y además tiene una connotación espacio temporal (Figura 1).

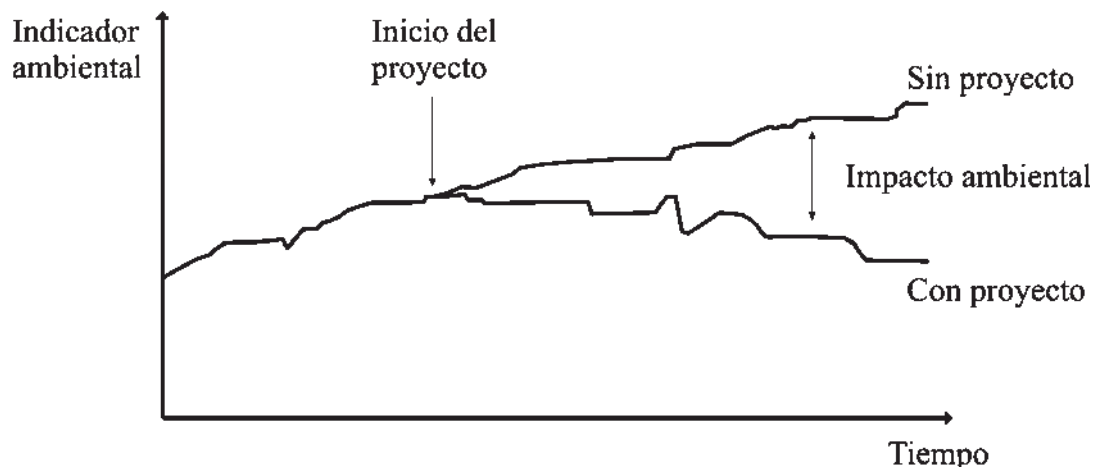


Figura 1. El impacto ambiental según Wathern, P. (1988).

Los términos contaminación ambiental (CA) e impacto ambiental (IA) suelen confundirse ya que ambos tratan sobre los cambios que genera o propicia el hombre sobre el medio ambiente y frecuentemente son utilizados indistintamente. Con objeto de evitar tal confusión, conviene aclarar que tienen diferentes acepciones, mientras que el impacto ambiental podría ser cualquier cambio sobre el medio ambiente, el término contaminación ambiental se refiere únicamente a la “liberación, en aguas, aire o suelo de toda o cualquier forma de materia y energía con intensidad, en cantidad, en concentración, o con características tales que puedan causar daños a la biota, incluyendo los seres humanos” (Sánchez, 2000). En la figura 2 se presentan ambos conceptos, donde se puede observar que la CA tiene necesariamente un valor negativo, su campo de aplicación es reducido y se encuentra totalmente dentro del concepto de Impacto ambiental.

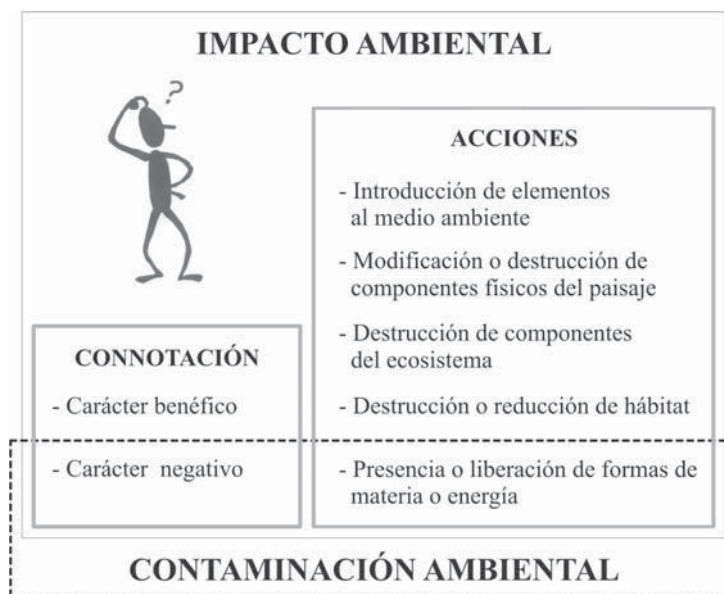


Figura 2. Contaminación ambiental vs impacto ambiental.

2.2 Métodos de estudio de impacto ambiental (IA)

Dada la variedad y tipo de actividades que intervienen en un estudio de IA, ningún método es universal, ni mucho menos puede ser ampliamente aplicado para elaborar un diagnóstico de impacto ambiental (DIA). Es por ello que los métodos hasta ahora desarrollados responden a las necesidades específicas de cada estudio, las cuales imponen las características de su evaluación y/o diagnóstico de impacto ambiental. Como se puede observar en la tabla 1, según Canter y Sadler (1997) en García-Leyton (2004) las metodologías para estudios de impacto ambiental están divididas en 22 grupos entre los que se puede observar diferentes técnicas (laboratorio, campo, gabinete), así como diferentes niveles de observación (profesional y de expertos), se entiende que cualquier método de diagnóstico o evaluación de impacto ambiental puede encontrarse en más de dos grupos a la vez. El presente trabajo se enfoca al impacto causado por la minería, por lo cual no serán discutidos en particular cada uno de ellos, bien si se describe a continuación las características inherentes al IA que podría causar la actividad minera.

Tabla 1. Clasificación de los estudios de impacto ambiental según Canter y Sadler.

GRUPOS	DESCRIPCIÓN
Analógicos	Se remiten a la información de proyectos ya existentes de un tipo similar al que está siendo analizado
Listas de chequeo	Contienen una serie de puntos, que el usuario atenderá o contestará como parte del estudio de impacto
Listas de chequeo enfocadas a decisiones	Son un grupo de métodos inicialmente referidas a comparar alternativas y conducir un análisis de equilibrio
Análisis ambiental	Con atención adicional a los recursos naturales y su valor económico, sus

GRUPOS	DESCRIPCIÓN
costo-beneficio	técnicas de estimación varían en complejidad y alcance sin embargo son considerablemente demandadas por los usuarios
Opinión de expertos (Dictamen profesional)	Se utiliza para señalar los impactos específicos de un proyecto sobre los diferentes componentes medioambientales. Los expertos identifican la información apropiada y elaboran modelos cualitativos/cuantitativos ya sea para predecir impactos ambientales o simular procesos medioambientales
Sistemas expertos	Almacena el conocimiento profesional y el juicio de autoridades en áreas temáticas concretas, es codificado en entorno a sistemas de información computacionales y son amigables al interesado.
Índices o indicadores	Se han desarrollado como una medida de la vulnerabilidad del medio ambiente y los recursos, a la contaminación u otras acciones humanas.
Pruebas de laboratorio y modelos a escala	Aplicadas par conseguir información cualitativa/cuantitativa sobre impactos anticipados de un determinado tipo de proyecto en una localización geográfica dada.
Evaluación de paisajes	Útiles para la valoración de recursos estéticos o visuales.
Revisión Bibliográfica	Consiste en enlazar información sobre los tipos de proyecto y su típico impacto. Por analogías, esta investigación resulta útil para una pronta definición de impactos ambientales.
Cálculos de balance de materias	Basados en inventarios de condiciones existentes para compararlos con los cambios que resultarán de una acción propuesta, son usados en el contexto de emisiones de contaminantes al aire, al agua y la generación de residuos sólidos y peligrosos.
Matrices de interacción	Ampliamente usado en los procesos de EIA, son desarrollados para enfatizar rasgos característicos deseables.
Monitoreo	Son mediciones sistemáticas empleadas para establecer las condiciones existentes de los ambientes afectados, así como dotar una base de datos inicial para interpretar la importancia de cambios anticipados de un proyecto propuesto. Se enfoca a los ambientes fisicoquímicos, biológicos, culturales y socioeconómicos.
Estudios de campo	Son métodos especializados en monitorización y análisis de impactos evidentes, declarados a consecuencia del proyecto,
Redes	Grupo de métodos que definen las conexiones o relaciones entre acciones proyectadas e impactos resultantes.
Sobreposición de mapas	Es un ensamble de mapas que integran características ambientales utilizadas para describir condiciones existentes y desplegar cambios potenciales resultantes de una actividad propuesta.
Fotografías y fotomontajes	Herramientas para desplegar la calidad visual del ambiente seleccionado e identificar los potenciales impactos visuales.
Modelación cualitativa	La información descriptiva es utilizada para relacionar varias acciones con cambios resultantes en los componentes ambientales.
Modelación cuantitativa (matemática)	Usados para prestar anticipadamente atención a los cambios en el medio ambiente como resultado de las acciones propuestas.
Evaluación de riesgo	Para la identificación de los riesgos, con las consideraciones sobre la relación dosis-respuesta, y evaluación de riesgo asociado.
Construcción de escenarios	Involucra consideraciones alternativas futuras como resultado de suposiciones iniciales diferentes.
Extrapolación de tendencias	Involucra consideraciones alternativas futuras como resultado de suposiciones iniciales diferentes.

2.3 Tipos de impacto ambiental causado por la minería

Los tipos de impacto ambiental dependen directamente del tipo de yacimiento, tipo de extracción minera, los métodos de beneficio, el manejo de residuos (*jales y terreros*), y además de las características intrínsecas del medio ambiente sobre el que la minería se desarrolla. Por ejemplo, en un ecosistema desértico no se esperan los mismos resultados que en una región con mayor humedad, o con la presencia de otros elementos como lagos, bosques o asentamientos humanos.

En general, los tipos de IA que causa la minería pueden ser clasificados con base a los principales atributos de sus elementos en: físicos, bióticos y antrópicos; y para dichos atributos se manejan diversos criterios de evaluación: directo o indirecto, a corto o largo plazo, reversible o irreversible, local o externo y evitable o inevitable; por el medio al que modifican se clasifican en: i) físicos, ii) bióticos y iii) antrópicos (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de tipos de impacto ambiental de la minería, elaborado a partir de Sánchez (2000) e Higuera y Oyarzun (2002).

Tipos de Impacto Ambiental	Criterios de Evaluación
Físicos	Directo/indirecto
Bióticos	Corto/largo plazo
Antrópicos	Reversible/irreversible
	Local/externo
	Evitable/inevitable

El IA podría concentrarse también en diversos y específicos elementos del medio físico, desde la atmósfera, el agua, el suelo, la biota; o bien degradar lo que ahora se conoce como el patrimonio intangible del paisaje (Anexo I). Sin embargo, como se verá mas adelante, la línea de investigación más eficiente que sigue la evaluación del IA en zonas mineras, se refiere al conocimiento de los *procesos físico-geoquímicos*:

- i) Destrucción de suelo y cobertura vegetal.
- ii) Acumulación de materiales poco consolidados, susceptibles a movimientos repentinos y a erosión.
- iii) Oxidación de minerales insolubles y formación de sustancias ácidas solubles con alto contenido de metales.
- iv) Acumulación de materiales con niveles altos de elementos potencialmente tóxicos (EPT).

Los diferentes elementos de una zona minera, incluyendo los residuos mineros, son considerados componentes de un Eco-Sistema, el cual puede y/o ha sido transformado y por lo tanto, en un balance de masa y energía pueden ser estimadas las consecuencias del IA.

2.4 La minería: la extracción de minerales y la generación de residuos mineros

Históricamente la minería se ha llevado a cabo sin importar el impacto que pueda o no tener sobre el medio ambiente en que esta actividad se desarrolla. Desde sus inicios no se consideraba el riesgo que representaba a corto, mediano o largo plazo. Recientemente, ante la concientización de la población sobre la importancia del medio ambiente en la calidad de vida del ser humano, el Impacto Ambiental (IA) que genera la minería es considerado con inquietud, no solo por el hecho de que se realice tal actividad, sino por el “abuso” de los volúmenes de material extraído, el impacto sobre el medio ambiente y mal manejo de residuos, entre otros.

Sin embargo, por otra parte la minería, ha sido históricamente un eje importante en el desarrollo económico, político e incluso social y cultural a nivel mundial. Paradójicamente, la intensa explotación del recurso mineral ha propiciado la fundación de diversas poblaciones y ciudades, hoy patrimonio de la humanidad, al mismo tiempo que ha generado diversos tipos de impacto sobre el medio ambiente.

En síntesis, el impacto que la minería genera sobre el medio ambiente y la salud, se relaciona con la forma de extracción, las dimensiones de las operaciones, los procesos de beneficio que se practiquen, la composición del mineral extraído y las características del medio ambiente en que se desarrolla. Sin embargo, destacan sin lugar a dudas las obras mineras (tiros, socavones, instalaciones industriales), los volúmenes y tipos de residuos mineros desechados directa o indirectamente al medio ambiente.

2.4.1 Obras mineras y la generación de residuos mineros

Como ya se mencionó, el IA y la generación de residuos mineros depende en gran parte de los métodos de extracción, los cuales a su vez son muy variables y adecuados al tipo de yacimiento mineral (Anexo II). Sin embargo, en términos generales se pueden agrupar en: minería de superficie, minería subterránea, extracción por dragado y extracción por pozos de perforación. En el DMOT se practicó la minería subterránea.

Una vez extraídos los volúmenes contenedores del elemento de interés (Au, Ag, Pb, etc.), la etapa sucesiva se refiere al tratamiento mineral y las operaciones metalúrgicas, también conocidas como *beneficio del mineral*, las cuales son actividades que producen una enorme cantidad de desechos sólidos, líquidos y gaseosos. Existe una gran diversidad entre los residuos mineros dependiendo de los procesos industriales que les dieron origen. En términos prácticos y de acuerdo a la figura 3 (Lottermoser, 2003), se les puede clasificar como:

- i) *Desechos de minado.*- son todos aquellos residuos mineros que se han generado a partir de la remoción de material rocoso, ya sea en superficie o a profundidad, lo cual ha permitido tener acceso a los minerales de mena. También son conocidos como “*terreros*”.
- ii) *Desechos de tratamiento o metalúrgicos.*- son los que provienen de los procesos de lixiviación, fundición o demás métodos metalúrgicos (metalurgia física). Se considera que dichos residuos ya no pueden ser tratados para obtener algún beneficio de ellos y son conocidos como “*jales*”.
- iii) *Aguas de mina.*- se refiere a toda las *soluciones acuosas* que intervienen en algún tipo de proceso minero; o que se encuentra en la superficie o en el subsuelo de la zona minera.

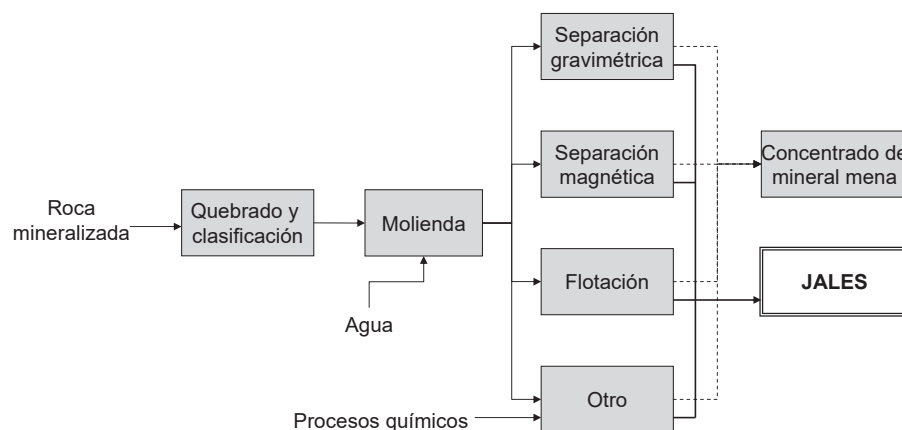


Figura 3. Diagrama de flujo simplificado de las operaciones de tratamiento mineral que llevan a la generación de jales (modificado de Lottermoser, 2003)

Es importante mencionar que el tratamiento mineral de los yacimientos metálicos inicia cuando éstos se encuentran alojados en rocas bien consolidadas, lo cual implica que para su proceso de beneficio se lleve a cabo una reducción de las dimensiones de la roca para facilitar la separación de minerales individuales (metalurgia extractiva).

El grado óptimo de molienda queda determinado por el método de extracción usado para remover y concentrar el producto económico, lo cual constituye la segunda etapa del tratamiento

mineral. Dicha etapa puede incluir varios métodos, que aprovechan las diferentes propiedades químicas, gravimétricas, magnéticas, eléctricas, etc., de las fases de interés (*mena*), para separarlos de aquello que no es de importancia económica (*ganga*).

Durante los procesos de beneficio practicados se agregan sustancias químicas al mineral pulverizado para separar los elementos de interés económico, por ejemplo: en el *método de cianuración* se agrega una concentración de cianuro de sodio o potasio, y en el antiguo *método de amalgamación* se utilizaba el mercurio. Actualmente existen otros métodos modernos como el procedimiento por *flotación física*, que aparentemente supone tener un menor impacto con respecto a los otros métodos.

Para el caso específico de México, el problema más común de los residuos se refiere a la acumulación directa en el medio ambiente de los *jales*, su disposición final ocurre comúnmente en presas construidas especialmente para dicho fin, generalmente son depositados en las cercanías de cada yacimiento mineral explotado y por lo tanto en las cercanías o incluso en el interior de las grandes ciudades mineras (*e. g.* Pachuca, Guanajuato, Taxco, etc.). Adicionalmente a su proximidad, es conveniente señalar que en la minería de los yacimientos metálicos, la recuperación de los metales es realmente mínima (<1%), por lo que la gran mayoría del material minado termina en la superficie bajo forma de *jales* y representa el desecho minero más voluminoso que se genera y que puede contener un porcentaje considerable de elementos potencialmente tóxicos (EPT) para la naturaleza y por supuesto para el ser humano.

Por lo anterior resulta evidente que la contaminación generada en una zona minera será directamente proporcional al volumen de *jales*, a su quimismo intrínseco y potencialmente tóxico, así como en gran medida a la disposición descontrolada de los desechos en esas épocas.

2.5 Métodos de estudio de impacto ambiental en zonas mineras

2.5.1 La Geoquímica y la evaluación de los elementos potencialmente tóxicos (EPT)

Recientemente se han llevado a cabo numerosos trabajos orientados a determinar las características de los *jales*, con el fin de conocer sus posibles implicaciones ambientales. Algunas de las principales preocupaciones en dichos estudios son, por un lado, determinar si los residuos presentan concentraciones altas de elementos potencialmente tóxicos (EPT), así como conocer si los desechos pueden generar drenaje ácido (DA). Asimismo, en otros casos (Dean *et al.*, 1995), han realizado estudios orientados a determinar el contenido de metales en los residuos, con la

finalidad de conocer la factibilidad de recuperar los elementos potencialmente económicos (EPE), para recuperar los valores o utilizar dicho material en algún otro campo de la industria.

En todas las circunstancias la mayor parte de los estudios se basan fundamentalmente en el conocimiento de la composición química y mineralógica del desecho, por lo cual constituyen la base metodológica de cualquier estudio sobre desechos mineros y en particular sobre jales.

Las características físicas y químicas de los jales varían considerablemente dependiendo de la mineralogía del yacimiento y de los procesos fisico-químicos llevados a cabo para extraer el producto económico. Entre las principales características se pueden mencionar: composición mineralógica y geoquímica, peso específico de las partículas, granulometría, permeabilidad, densidad, plasticidad, consolidación, composición química del agua de poro, etc. (Lottermoser, 2003).

Desde el punto de vista metodológico para el estudio de impacto ambiental se inicia en cualquier caso realizando un *muestreo sistemático y representativo* de los residuos mineros o de las aguas de drenaje relacionadas a la zona o distrito minero en estudio. Sin embargo, es importante mencionar que antes de iniciar el muestreo se deben conocer por un lado una expectativa científica de los EPT que podrían estar presentes en la zona, y por el otro, la dinámica hidrológica (drenaje y aguas subterráneas) que se circunscribe dentro del proceso exógeno activo de la cuenca donde se encuentra contenida la zona minera potencialmente contaminadora.

De acuerdo con la Environment Protection Agency (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), los elementos potencialmente tóxicos son: As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sc, Se, Ti, Tl, V y Zn pero además estos elementos se pueden subdividir en: i) metales tóxicos (MT) que están normalmente presentes en el ambiente y que constituyen un peligro para la salud del hombre. ii) metales con toxicidad menor (MTm) respecto al grupo anterior y que se encuentran en ambientes laborales; iii) metales con toxicidad relativa (MTr) y que suelen utilizarse en terapias médicas; y, iv) metales esenciales (ME) para la vida pero que grandes dosis son potencialmente tóxicos.

La EPA también elaboró una lista de los elementos que tienen interés en estudios de biodisponibilidad, los agrupa en mayor y menor susceptibilidad (Tabla 3).

Son varios los elementos potencialmente tóxicos que podrían encontrarse en ambientes naturales, ya sea que su acumulación tenga origen natural o antropogénico. El presente trabajo se ocupa de tres elementos que pertenecen al grupo de metales tóxicos: arsénico (As), mercurio (Hg)

y plomo (Pb); y dos que pertenecen al grupo de metales esenciales: cobre (Cu) y zinc (Zn) y todos ellos aparecen como elementos de interés en estudios de biodisponibilidad.

Tabla 3. Elementos potencialmente tóxicos y su interés en biodisponibilidad, elaborada a partir de los datos de John y Leventhal (1995)

	Elementos potencialmente tóxicos				Elementos con interés en estudios de biodisponibilidad	
	Metales tóxicos	Metales con toxicidad menor	Metales con toxicidad relativa	Metales esenciales	Mayor	Menor
Elementos	As, Be, Cd, Hg y Pb.	Sb, Ag, Ba, In, Sn, Tl, Te, Ti, U y V	Al, Bi, Ga, Li, Au, e Pt	Co, Cr, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Cu, Se, y Zn	Al, As, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se y Sb	Ag, Ba, Co, Mn, Mo, Na, Tl, V y Zn

2.5.2 La cartografía de las obras mineras y residuos mineros

Como se indico en párrafos anteriores los diversos estudios de IA en zonas mineras generalmente han seguido una metodología geoquímica para ponderar los efectos de los EPT en las diversas esferas del medio ambiente. Sin embargo, es importante mencionar que en la etapa de interpretación de los datos geoquímicas resulta extremadamente importante tener una máxima aproximación de la distribución espacio temporal de los residuos mineros y del significado de las muestras hidrogeoquímicas (Ramos y Siebe, 1998 y Spadoni, 2006). En consecuencia, es importante contar con una plataforma cartográfica integrada a una metodología para el estudio de impacto ambiental. Esto sólo es posible desde una visión interdisciplinar y holística, donde se aporten constantemente datos al estudio de un Eco-sistema, el cual está constituido por una gran diversidad de elementos, interrelacionados por diferentes fenómenos o procesos, tanto sociales como naturales.

En las últimas décadas se ha revelado un importante y alternativo papel de las geociencias, en especial el de la cartografía asistida por los sistemas de información geográfica, la cual representa una potente herramienta de análisis del medio ambiente. Su aplicación propone cartas temáticas, que *per se* obliguen a una interdisciplinariedad relacionada fundamentalmente con la concepción sistémica del entorno natural. De este modo, la plataforma cartográfica parte de una descripción generada a partir de datos geográficos, históricos y geológicos obtenidos por medio de procesamiento riguroso para ser georeferenciadas.

En suma, la Cartografía no se propone como una simple base de datos geo-ambientales, bien si como una herramienta indispensable inherente a un método holístico y sistémico para entender, anticipar, minimizar y eventualmente remediar los efectos que pueda generar en el medio ambiente un depósito mineral y el desarrollo de la minería.

2.5.3 El reciclamiento o uso secundario de los residuos mineros.

La reutilización de los jales puede llevarse a cabo en distintas áreas de la industria y su aplicación depende de las características de cada residuo (Dean *et al.*, 1996). Aunque los residuos mineros no son considerados valiosos mientras se lleva a cabo la explotación de un yacimiento, algunos de ellos pueden ser útiles si están enriquecidos en algún producto económico. Esto puede ser debido a las técnicas de procesamiento mineral ineficientes y las pobres recuperaciones que en el pasado produjeron desechos con concentraciones remanentes de metales relativamente altas. En algunos casos los jales y terreros antiguos, que fueron considerados sin valor años atrás, son ahora son aprovechados haciendo uso de operaciones mineras modernas (Lottermoser, 2003).

Hoy en día, los adelantos tecnológicos y los avances en la investigación del uso de materiales alternativos, ofrecen un nuevo panorama para considerar los desechos mineros como un material capaz de transformarse en un producto útil. Si cada depósito de jales o de cualquier residuo minero es estudiado para conocer su potencial de contaminación, como de uso, éste podría ser utilizado como materia prima y entonces su aprovechamiento podría representar una ventaja en cualquier proceso de intervención y/o remediación de los residuos mineros en el medio ambiente.

2.6 La minería y su impacto ambiental en México y en el mundo

El impacto ambiental ocasionado por los residuos mineros es elocuente aún con un mínimo de observación; sin embargo, su estudio se inicia con la “posibilidad” del reciclamiento de los residuos, el cual comenzó en el siglo XX (Jambor y Blowes, 1998 y Lottermoser, 2003). Este hecho se explica por la simultaneidad del avance tecnológico en los procesos metalúrgicos que prometían recuperar los “bajos” valores de metales. Sin embargo, los estudios aplicados al diagnóstico del impacto al medio ambiente y su relación con el ser humano han iniciado tres décadas atrás, no sólo en México sino en todo el mundo.

Las consecuencias de esta “tardía” reacción al estudio de su verdadero impacto han implicado que solo recientemente se cuente con las primeras bases metodológicas (Lottermoser, 2003), las cuales han sido depuradas paralelamente con el reporte de diversos casos de estudio. Por mencionar algunos, se tiene el denominado “desastre ecológico de Doña Ana” en España, localidad en donde los jales almacenados en presas se desbordaron en abril de 1998 esparciéndose a lo largo de más de 40 km, (Simón, *et al.*, 1998). Este accidente precipitó su estudio con todos los alcances tecnológicos, de manera que las muestras fueron tomadas 10 días posteriores al accidente. Con base en el estudio geoquímico de los jales y las aguas se encontró que las concentraciones de As, Cd, Co, Se y Cu superaban las normas permitidas para riego (Crook y Bastian, 1992).

Otra línea de investigación se refiere a la biodisponibilidad de elementos nocivos para el ser humano: Pb, Cd y As (Navarro *et al.*, 2005), los cuales han demostrado que el Cd es el metal con mayores propiedades de biodisponibilidad, seguido por el Pb y As. Sin embargo, es importante señalar que la actividad de cada elemento puede variar con el pH, de acuerdo a una *matriz de correlación de Pearson*.

Recientemente, se ha desarrollado en Portugal un trabajo referente cuyo objetivo fue estudiar los efectos tóxicos que han tenido los jales de minas sobre los suelos (Loureiro *et al.*, 2005). Estos autores consideran que el suelo es un medio por el cual se transportan los contaminantes hacia los ríos, cuerpos de agua y agua subterránea. La contaminación se movería bajo forma de una fracción biodisponible de compuestos químicos en el suelo. La relevancia de este trabajo consiste en que por primera vez se pone en evidencia la importancia del estudio detallado del drenaje superficial, la generación de sedimentos (Hancock y Wilgoose, 2004), y en consecuencia los parámetros geomorfológicos (Spadoni, 2006). En otras palabras, emerge la importancia de estudio de la evolución de una cuenca como el “espacio físico” que ha sido afectado por una anomalía geoquímica primaria y sucesivamente por los residuos mineros (Langedal, 1997).

Los yacimientos minerales que se han explotado y se explotan en México son de varios tipos, máxime los de tipo hidrotermal, sin embargo son igualmente importantes los yacimientos tipo skarn, pórfido de cobre y de sulfuros masivos vulcanosedimentarios. Así mismo, el método de beneficio usado, ha sido diferente en cada época y en cada lugar. Los principales métodos de

beneficio aplicados en México han sido: fundición, amalgamación hasta el siglo XIX, así como cianuración y flotación durante el siglo XX.

Después de una revisión bibliográfica, se observa que en México los trabajos referentes al impacto ambiental que ocasiona la minería son recientes y en general han sido abordados desde el un punto de vista geoquímico. Como se puede observar los distritos mineros son: Santa Rosalía (BCN; Volke, *et al.*, 2003), Matehuala (SLP), Taxco (Gro.) Pachuca y Zimapan (Hgo.), Guanajuato (Gto.), por su simple distribución resulta evidente que no tienen una cobertura mínimamente comparable o que pudiera ser representativa en relación con los numerosos y diversos tipos de distritos mineros en México (Figura 4).. Esta observación es importante, en cuanto la diversidad de yacimientos minerales que se han explotado en nuestro país, así como los diferentes métodos de beneficio utilizados y la variedad de climas y condiciones fisiográficas del territorio que plantean *a priori* una heterogeneidad la cual que puede cambiar drásticamente el impacto ambiental de los desechos mineros en cada región.

En general, a través de los trabajos de impacto ambiental realizados en México se ha determinado el nivel de afectación ambiental y en algunos casos ya se han tomado algunas medidas para la remediación (Monrroy *et al.*, 2002; Armienta *et al.*, 2003; Razo *et al.*, 2004a, Razo *et al.*, 2004b, Razo *et al.*, 2005). En otros, se ha concluido que los jales aparentemente no representan peligro ambiental (Carrillo-Chávez *et al.*, 2003). Sin embargo, aún existen cientos de millones de toneladas de jales dispersos, de los cuales no se conocen sus condiciones y sus potenciales afectaciones al ambiente (Ramos y Siebe, 2006).



Figura 4. Localización de distritos mineros que presentan trabajos geoquímicos por impacto ambiental/remediación.

En años recientes se han realizado estudios de jales en muchos distritos mineros de México, los cuales han contribuido a generar una estrategia metodológica general para la evaluación de la peligrosidad de jales mineros e identificar el potencial de riesgo ambiental (Armienta *et al.*, 2005; Ramos y Siebe, 2006).

Finalmente, es importante mencionar que los trabajos realizados con el fin de aprovechar los jales, son mucho más antiguos. Existe registro de estudios realizados en varios distritos mineros históricos de México desde principios del siglo XX. Sin embargo, no son artículos publicados, bien sí, son informes internos de los distritos de Pachuca-Real del Monte, El Oro-Talpujahuá, Fresnillo y Guanajuato, realizados por empresas mineras privadas o por la antigua Comisión de Fomento Minero (www.coremisgm.gob.mx).

CAPÍTULO 3

LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SU POTENCIAL EN EL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL EN ZONAS MINERAS

Todo trabajo realizado mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) se basa en cinco conceptos fundamentales de naturaleza espacial: localización, distribución, asociación, interacción y evolución espacial (Buzai, 2007). En este trabajo se considera al SIG como un instrumento técnico y una herramienta teórica que facilita pensar y actuar espacialmente en un sistema geográfico natural. Con el desarrollo de un SIG se agiliza un trabajo multidisciplinario, en el que los diversos campos del conocimiento se conjuntan e interrelacionan para desarrollar un estudio concreto. En este capítulo se presenta una breve revisión sobre la importancia de la aplicación de los sistemas de información geográfica en el diagnóstico de impacto ambiental en zonas mineras.

3.1. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

La necesidad de agilizar el análisis del espacio geográfico impulsa la aparición de programas útiles en la gestión de datos espaciales georeferenciados con el desarrollo de la informática en los años setentas, facilitando análisis de datos geográficos en grandes volúmenes. En la actualidad los trabajos sobre Sistemas de Información Geográfica (SIG) son muy abundantes y con aplicaciones en diversas ramas de las ciencias naturales, dicha diversidad ha dado origen a numerosas definiciones:

- ☑ Conjunto de programas y equipos de computación que permite el acopio, manipulación y transformación de datos espaciales (mapas, imágenes de satélite) y no espaciales (atributos) provenientes de varias fuentes, temporal y espacialmente diferentes (Bocco *et al.*, 1991).
- ☑ Sistema basado o asistido por computadora que ocupándose de datos georeferenciados proporciona los siguientes cuatro puntos: 1) Entrada de datos; 2) Manejo de datos (almacenamiento y recuperación); 3) Manipulación y análisis; 4) Salida de datos (Aronoff, 1989).

Con base a lo anterior se puede decir que un SIG es una herramienta de análisis integrada por un conjunto de programa y equipos de computo (hardware y software) que alimentada con información espacio-temporal permite identificar relaciones entre variables espaciales y no espaciales; dicha información es almacenada en bases de datos.

3.2. Los componentes de un Sistema de Información Geográfica

Para que un SIG pueda ofrecer las ventajas antes mencionadas deben considerarse sus componentes: hardware, software, base de datos geográficos y el recurso humano (Figura 5).

- ☑ El **hardware** es el elemento físico del sistema que se compone de una plataforma de ordenador (estación de trabajo, PC, etc.) y una serie de periféricos englobados en dos grupos fundamentales: de entrada (mesas digitalizadoras, scanner, teclado), y de salida (Plotter o trazador, impresora).
- ☑ El **software** es el encargado de realizar las operaciones y la manipulación de los datos, por ejemplo: Arcinfo, Idrisi, Mapinfo y ArcGis. Estos varían según las empresas que los desarrollan. Para definir el software más conveniente se requiere partir de las necesidades de un trabajo específico, considerando: accesibilidad, capacidad de almacenamiento y procesamiento, así como las posibilidades de realizar análisis complejos y desde luego, los costos de operación.
- ☑ Los **datos geográficos** constituyen la base de trabajo de un SIG. La dificultad que se presenta en la recopilación de algunos datos, la compatibilidad de región a región de esos datos y la necesidad de una posible actualización, hacen que este elemento pueda ser costoso.
- ☑ El **recurso humano** cuya función es conceptualizar y seleccionar las bases de datos con la aplicación de varios criterios para el análisis de la información. La capacitación y actualización es un factor fundamental para la versatilidad y capacidad de resolución de problemas.
- ☑ **Salida de Información** que puede ser en varias formas como: informes, mapas, gráficas, cuadros, datos para otros SIG, datos para otra base digital, datos para modelos.



Figura 5. Componentes de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

3.3. La base de datos geográficos: topología y modelos de SIG

La construcción de una base de datos geográfica representa el trabajo conceptual más importante en un SIG. El objetivo es lograr una gestión de datos cuya información geográfica esté contenida en “capas”, generalmente compuestas por tablas o archivos, el número y tipología de dichas capas son variables según el formato o programa.

Puesto que en el desarrollo de un proyecto de SIG se generan numerosas capas, es conveniente ser sistemático y ordenado al momento de nombrarlas y guardarlas de forma tal que se logre contener en una base de datos la mayor cantidad de información relacionada a un sistema espacial real y complejo. Por lo tanto, a partir de una compilación de datos se busca obtener una representación simplificada generada a partir de la asistencia de un sistema de cómputo.

La representación simplificada de un espacio “real” se subdivide en niveles de información, los cuales se manejan conceptualmente como “capas” de información que incluyen atributos (puntos, líneas o polígonos) asignados y definidos por el investigador. El número y las subdivisiones de estas capas dependen, ya sea de la complejidad de los mismos datos e información, como de la problemática o hipótesis de trabajo donde se pretende aplicar el sistema de información geográfica. Generalmente estas capas o niveles de información pueden contener una *base* de datos puramente geográficos (topografía, hidrografía, toponimia, asentamientos

humanos, etc.), o bien *temáticas diversas* (geología, edafología, vegetación, áreas protegidas, etc.), las cuales se consideran indispensables para sobreponerse (traslapar) entre sí, o bien para complementarse con las geográficas de base en un análisis espacial, que debe ser el objetivo final de la aplicación de un SIG.

El proceso de captura de información se conforma por la digitalización, escaneo, georeferenciación, edición y tratamiento de imágenes y datos, en este proceso es indispensable la topología un SIG que se entiende como: el método matemático-lógico usado para definir las relaciones espaciales entre los objetos geográficos (puntos, líneas y polígonos), los cuales generalmente son expresados bajo forma de vectores. La interacción, correlación, extrapolación e interpolación se refieren generalmente a la topología de un SIG, la cual se reduce a funciones matemáticas entre los mismos vectores. Estas operaciones nos permiten, por ejemplo, identificar rápidamente los atributos de un polígono (o polígonos) a los que pertenece una determinada línea, o bien saber a qué agrupación de líneas pertenece un objeto conocido (e. g. carretera, unidad cartográfica). Así, la oportunidad de manejar en forma sistemática (rápida y automática) algunos cálculos (área, volumen, etc.) o la distribución espacial de algunos atributos es uno de los mayores potenciales de un SIG. La topología en un SIG es una herramienta que permite mantener ciertas relaciones espaciales entre los elementos geográficos de tal forma que no existan huecos en entre dos fronteras, no se solapen dos superficies, etc.

Por último, otra de las aplicaciones con mayor potencial es la modelación. Es decir el comportamiento de los mismos datos realizando una simulación, una idealización o una predicción teórica en diversos escenarios espaciales hipotéticos e ideales. Sin embargo, es importante señalar que para validar cualquier modelación (georeferencia), se debe usar una base de datos espaciales reales, que contengan al menos >4 puntos de coordenadas conocidas, y sobretodo que se asuma su aplicación con la mayor aproximación numérica en relación con la distribución espacial real del terreno en estudio.

Existen varias formas de modelar las relaciones entre los objetos geográficos o topológicos, sin embargo, mediante una efectiva interrelación de datos de entrada y salida se pueden obtener productos de SIG en formato vectorial y/o raster. Los sistemas de información geográfica en formato raster basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los objetos geográficos por medio de la agrupación en una retícula o malla regular de pequeñas celdas o píxeles y cada uno se le atribuye un valor numérico. El tamaño del píxel puede

ser reducido en función de la escala confiriendo una resolución alta a la malla, de forma tal que a mayor número de filas y columnas mayor resolución. Sin embargo, también implica mayor esfuerzo en el proceso de captura de la información y mayor costo computacional a la hora de procesar la información.

El modelo de datos raster es útil cuando se deben describir objetos geográficos con límites difusos, por ejemplo: la dispersión de una nube de contaminantes, o los niveles de contaminación de un acuífero subterráneo donde los contornos no son absolutamente nítidos; en esos casos, el modelo raster es más apropiado que el vectorial.

En resumen, la gestión de datos en un proyecto SIG se compone de 5 fases principales: recopilación, captura e integración de la información, análisis alfanumérico y análisis espacial, que nos llevan al diseño final del mapa que refleje la información requerida para el diagnóstico de impacto ambiental (Figura 6)

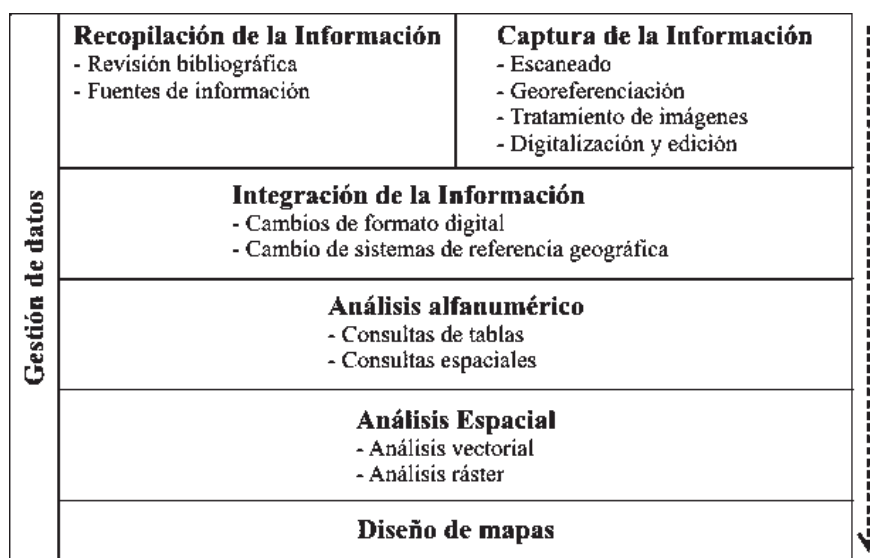


Figura 6. Fases de un proyecto SIG. Modificado de Mancebo-Quintana *et al.* (2008).

3.4. Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica

Si se considera a un SIG como la herramienta que facilita la gestión y toma de decisiones tanto en organismos de gobierno como en el sector privado, sus aplicaciones son numerosas y variadas, por ejemplo:

- En la **construcción de modelos** a partir de las bases de datos digitales para simular los efectos que un proceso natural o antrópico pudieran tener en el paisaje. Muchos fenómenos

naturales y espaciales no pueden ser observados detenidamente en la realidad, por lo que los modelos resultan sumamente útiles ya que además se pueden repetir cuantas veces sea necesario y modificar algunos factores en la base de datos para observar las variaciones que se presenten o bien el simple hecho de tener una visión espacial de distribución de los fenómenos para identificar su comportamiento general y asociarlo a otros.

- ☑ En los **inventarios, atlas cartográficos y mapas ambientales**, cuya función es realizar un inventario de los recursos ambientales de un territorio concreto o la realización de la cartografía básica topográfica o temática. En este punto se puede decir que la información tiene un carácter estático, ya que la información recopilada y representada se refiere a un tiempo bien definido.
- ☑ En los **estudios ambientales y análisis del paisaje**, que tienen como objetivo final conocer y analizar algún aspecto ambiental o paisajístico determinado. En este caso se estudian los fenómenos o procesos exógenos (erosión, degradación, formación de suelo, etc.), de tipo local, regional o global, estableciendo una interrelación de factores y parámetros numéricos, gráficos o espaciales.
- ☑ Trabajos **integradores relacionados a la planificación o gestión de recursos naturales**. En este tipo de trabajo se incluyen los temas de distribución de diversos elementos, aún cualquier tipo de especies biológicas.
- ☑ En análisis de **riesgo e impacto ambiental** para identificar, estudiar y predecir los factores de riesgo ambiental. Resulta interesante la aplicación del SIG, dado que la modelación de los fenómenos requiere que la información con la que se está alimentando la base de datos sea verídica y adecuada; si se introducen errores se generan errores. Por mencionar algunos ejemplos se tienen los análisis de peligro sísmico, riesgos de inundación, vulcanismo, derrumbes, incendios forestales y contaminación en sus formas heterogéneas.

3.5. Aplicación de un SIG en el estudio de impacto ambiental en zonas mineras

Un SIG es una herramienta fundamental de análisis en estudios del medio ambiente y su aplicación es tan diversa como lo son dichos estudios, que pueden variar desde un sencillo inventario hasta un estudio de impacto ambiental; se han desarrollado numerosas metodologías para estudios con un interés ambientalista y responden a las necesidades de un trabajo en

específico de lugar y tiempo, por lo que, si son indicadas para un trabajo de impacto por agricultura no para una investigación de impacto causado por algún tipo de industria.

Otra particularidad es la diversidad de ambientes en los que puede desarrollarse un mismo tipo de actividad, por ejemplo: la agricultura en zonas sujetas a inundaciones no tiene el mismo impacto que la agricultura que se practica en zonas de climas tropicales o en climas áridos; lo mismo es para la minería, no se manifiestan los mismos procesos exógenos en climas templados que en climas secos.

De esta manera, el análisis del paisaje enriquece el diagnóstico del impacto ambiental que se ha generado o se podría generar por causa de la actividad minera sobre el medio ambiente. En esta tarea, un SIG facilita su identificación y análisis, significa además un importante ahorro de tiempo y dinero. Aún cuando han sido numerosos los trabajos de SIG sobre impacto ambiental, son menos aquellos que consideran el tema de minería y casi nulos los que además consideran el análisis del paisaje.

Un análisis espacial que utilice los SIG permite responder cuestiones primordiales relacionadas a: i) la descripción general de la zona; ii) a poner en evidencia lo que sucede; iii) lo que ha cambiado y, iv) la predicción de lo que podría suceder en un planteamiento hipotético que analice las variables que afectan el medio ambiente. En otras palabras facilita describir las variaciones del medio ambiente en espacio y tiempo.

Para la aplicación de un SIG en el estudio de impacto ambiental en zonas mineras es importante considerar lo expuesto en el capítulo anterior, así como hacer énfasis en definir conceptualmente las implicaciones ambientales primarias que involucran *per se* la existencia de un depósito mineral, sin la intervención del hombre y desde ahora denominadas aquí como condiciones de *pre-minería*; así como la transformación antropogénica de ese mismo medio ambiente para dar lugar a la formación de una *zona minera* o *distrito minero*, o en otras palabras las condiciones ambientales *pos-minería*.

Los *depósitos minerales* son concentraciones de elementos químicos que representan un interés económico importante para el hombre. Aunque generalmente se conocen mejor los yacimientos minerales metálicos (oro, plata, plomo, etc.), existen muchos otros tipos de yacimientos no-metálicos que podrían incluso ser materiales usados más comúnmente por el hombre, tales como el cemento, el carbón e incluso los yacimientos petrolíferos. Los depósitos

minerales representan una verdadera anomalía geoquímica² en la naturaleza y son formados por medio de una serie de procesos geoquímicos y biogeoquímicos.

Por su parte, una *zona minera* es aquella región de la superficie de la Tierra en donde ha sido bien identificada la presencia de uno o varios depósitos minerales y que por su valor económico ha sido aprovechada (o explotada) por medio de laboríos mineros (caminos, socavones, perforaciones, etc.) y posiblemente hayan sido instaladas plantas metalúrgicas para obtener la completa transformación de la materia prima para el uso del ser humano.

El resultado de la actividad minera en sus diferentes etapas, desde la construcción de caminos, las obras de tiros, socavones o apertura de tajos para acceder a los depósitos minerales, así como por la construcción de plantas de separación de minerales y beneficio-fundición de los mismos, ocasiona una segunda re-concentración anómala de elementos químicos (una nueva anomalía geoquímica), bajo forma de sistemas de drenaje de minas, de residuos mineros, de deforestación y erosión acelerada, lixiviación y la formación de nuevos minerales que pueden tener un valor tóxico en la biosfera. A este efecto se le conoce como el impacto ambiental *postminería* (Figura. 7).

Finalmente, un *Distrito Minero* representa una zona mineralizada, que debido a una clara tendencia de contener altas concentraciones de metales y por lo tanto de gran riqueza, ha sido explotado por muchos años, a veces siglos, dando como consecuencia que las alteraciones de pos-minería hayan sido acumuladas en forma masiva hasta el agotamiento del recurso mineral. En general la afectación del medio ambiente en un *distrito minero* se relaciona en forma paradójica, por un lado, con una extrema posibilidad de alto riesgo de impacto ambiental causado por la actividad minera o intervención del hombre (Plumlee y Nash, 1995) y, por el otro, con el desarrollo de asentamientos humanos históricos que en muchos casos son ciudades designadas *patrimonio cultural* de la humanidad.

En síntesis, estudiar el potencial de impacto ambiental de una zona mineralizada implica analizar una anomalía geoquímica; sin embargo, estudiar esta zona con obras mineras, en un Distrito Minero implica una dicotomía congénita con las ciudades históricas, con una identidad del pueblo, con un símbolo de la nación, es decir, significa evaluar el impacto ambiental dentro de un paisaje devastado o en “convalecencia”, dígase en recuperación de un *patrimonio cultural*.

² Los yacimientos o depósitos minerales son concentraciones anómalas de elementos metálicos o no-metálicos que se consideran una anomalía geoquímica, desde el punto de vista de un caso de quimismo “raro” en la superficie de la Tierra.

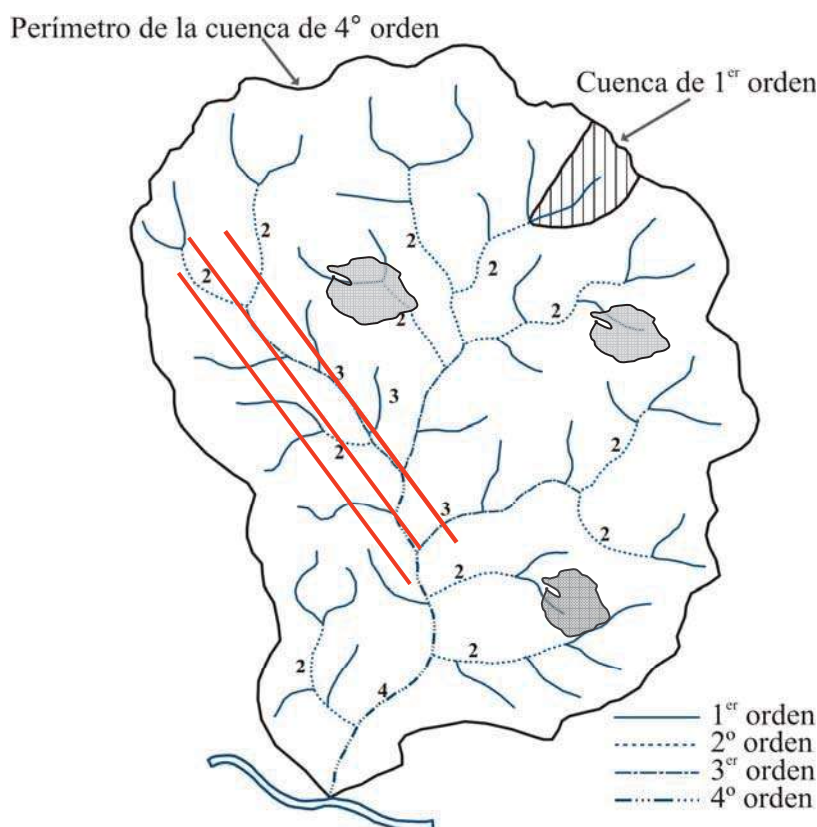


Figura 7. Esquema de una cuenca hidrográfica que ilustra en líneas rojas las estructuras mineralizadas de una zona minera (pre-minería), así como las zonas en gris corresponderían al depósito secundario de residuos mineros y alteración antropogénica de la cuenca (post-minería).

Ante un escenario de alto riesgo de impacto ambiental, en las últimas décadas se ha revelado un importante y alternativo papel de las geociencias, en especial el de la cartografía asistida por los SIG, la cual representa una potente herramienta de análisis del medio ambiente. Su aplicación propone cartas temáticas, que *per se* obligan a una interdisciplinariedad relacionada fundamentalmente con la concepción *sistémica* del entorno natural. En términos de estudio del patrimonio histórico y minero, la metodología que se propone con el uso de la cartografía, se refiere a la revaloración de algunos elementos del medio geológico como parte del patrimonio natural, los cuales son indispensables para preservar y transmitir a las generaciones venideras la geo-conservación integral de un *sistema patrimonial*.

Desde esta plataforma, es decir desde los beneficios de una descripción de base y otras temáticas ad hoc se propone presentar los datos geográficos, históricos y geológicos obtenidos

por medio de procesamiento simple pero riguroso, sometidos a una Geo-referencia única: los mapas. De este modo, se propone la cartografía no como una simple base de datos geo-ambientales sino como una herramienta indispensable inherente a un método holístico y sistémico para entender, anticipar, minimizar y eventualmente remediar los efectos que pueda generar en el medio ambiente un depósito mineral y el desarrollo de la minería.

CAPÍTULO 4 EL ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO EN EL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

4.1 El análisis de paisaje con un enfoque sistémico

El paisaje puede ser definido de diversas formas en función del área o de la disciplina que lo trate. Básicamente se pueden considerar tres corrientes de estudio de unidades de paisaje: la primera es “perceptiva” y se basa en métodos visuales y de evaluación paisajística con un enfoque estético; la segunda es “sistémica” o “de paisaje total” que lo fusiona con el medio e interrelaciona con los elementos físico-geográficos, es decir, se piensa como un conjunto de elementos interrelacionados y modificados por factores que conforman una estructura sistémica (geo-ecosistema + hombre), los cuales pueden ser estudiados por una serie de métodos mixtos y gráficos, que responden a demandas inmediatas y con ágiles resultados que tienden a ser cualitativos (González, 2004; Sotelo, 1992).

El paisaje como escenario de la actividad humana (Lapesa, 1972 en Sotelo 1992); por su apreciación con fines estéticos-artísticos de una porción de la superficie terrestre; o como objeto de estudio en las ciencias naturales donde se define como el resultado de la interacción espacial y temporal de los factores formadores del ecosistema, es decir factores bióticos, abióticos y antrópicos (Etter, 1991). Esta última es la definición de paisaje que se considera en el presente trabajo, en cuanto lo que nos interesa es estudiar los efectos e impacto del medio ambiente y las relaciones o causas genéticas del mismo.

La concepción de sistema y de paisaje geomorfológico ha conferido importantes progresos y aportación a las ciencias naturales, y particularmente a los estudios ambientales. Sin embargo, antes de definir el concepto sistémico del paisaje, es conveniente partir del concepto general de *un sistema* como el conjunto de elementos que se interrelacionan con un cierto carácter de totalidad organizada en donde la alteración, cambio o pérdida de uno o varios de sus componentes tendría un mayor o menor grado de impacto sobre el resto de sus elementos. El sistema se caracteriza por: *los elementos* que los componen, las relaciones entre sus elementos y por la clara definición de los límites del sistema. La teoría general de sistemas se aplica al estudio de paisajes por primera vez en 1951 por Bertalanffy quien considera al paisaje como un sistema territorial compuesto por una serie de elementos que se interrelacionan e interactúan entre sí,

cuyo resultado origina una estructura morfológica y una dinámica propia diferenciable (González-Trueba, 2006). Asimismo, con la teoría general de sistemas se introduce el concepto de geo-sistema, el cual se entiende como un sistema de reacciones geográficas caracterizada por un conjunto de formas externas que estructuran y describen un sector de la superficie terrestre cuyos elementos bióticos, abióticos y socio-económicos interactúan en un espacio y tiempo determinados (Bonilla, 1994 en Santana-Rodríguez, *et al.* 2004; Ibarra, 1993 en González, 2004).

Un geo-sistema se compone por un fenosistema y un criptosistema, entendiéndose el primero como el conjunto de elementos perceptibles del paisaje y el segundo como un sistema oculto pero indefectible del fenosistema. Dentro del fenosistema se contempla por ejemplo: la litología, el relieve, el suelo, la cubierta del suelo y el agua; al criptosistema lo constituye el factor climático, el factor geológico, el factor antrópico, la radiación solar, la orogenia, la fuerza de gravedad y la energía exosomática (Figura.8).



Figura 8. Estructura perceptible e intangible de un geo-sistema.

Es importante mencionar que el enfoque sistémico es también un concepto que maneja los elementos de manera jerárquica, en relación a la ponderación o valoración de cada unidad de paisaje que pueden ser consideradas subunidades o subsistemas. Este planteamiento ha sido ampliamente aplicado en estudios de ecología, en donde su análisis se conoce como “ecología del paisaje”, el cual se maneja como un análisis integral del paisaje que “aporta una dimensión espacial y temporal al estudio de las peculiaridades estructurales y fisonómicas de los ecosistemas, reconociendo además las actividades desarrolladas por el hombre como uno de sus elementos formadores, así como el estudio genético de la transformación y la dinámica de los paisajes” (Andrade *et al.*, 1994 en Salomón *et al.*, 2005). En este contexto, partiendo de una

visión integral, se realizan análisis de correlación/integración durante el proceso, es decir de lo general a lo particular.

Finalmente, las “unidades de paisaje” se entienden como una porción de la superficie terrestre homogénea e integrada por un conjunto de subsistemas (roca, clima, suelo, agua, plantas, animales, hombre), y es reconocido y diferenciado de otras unidades colindantes que además pueden ser similares. La percepción del paisaje en este sentido es útil para proyectar la situación actual de una unidad de paisaje conocida y estudiada a otras unidades que presentan propiedades o características similares. Por estas razones y debido a que las unidades de paisaje también son consideradas como sistemas donde la interacción sociedad-medioambiente modifica el sistema preexistente, resulta apropiada la aplicación de un enfoque sistémico/holístico en estudios de impacto ambiental causado por la minería, considerando que el impacto ambiental es una consecuencia de dicha interacción.

4.2 El paisaje geomorfológico en el diagnóstico de impacto ambiental

La geomorfología local en conjunto con la geología e hidrología definen procesos de estabilidad e inestabilidad del terreno; si se modifica alguna de estas condiciones por un cambio de uso del suelo, se activan movimientos de terreno, en un principio lentos e imperceptibles y que aumentan la vulnerabilidad en una determinada superficie, posteriormente factores como sismicidad o intensas precipitaciones pluviales juegan el papel de detonantes para que se originen los movimientos en masa del terreno (Soeteres y Westwn., 1996 en Aristizábal y Yocota, 2005). Sin embargo, para que un movimiento en masa se presente, por ejemplo en las presas de jales, deben existir condiciones geomorfológicas que los identifican, por lo que para prevenir un evento tal, la caracterización de las condiciones geomorfológicas es esencial. La minería también ha modificado las geoformas naturales dando origen a unidades que rompen con el equilibrio entre los procesos exógenos formadores del relieve y el paisaje mismo, por ejemplo: la acumulación de residuos mineros (jales/terreros), los socavones, respiraderos e instalaciones y construcciones propias de la minería.

El paisaje geomorfológico es una porción de la superficie de la Tierra caracterizada por una asociación de tipos de relieve similares o diversos entre sí, los cuales pueden ser separados bajo forma de una unidad cartográfica distinta y a la vez pueden mostrar una interrelación morfogenética específica (Zinc, 1989 en Santana-Rodríguez *et al.* 2004). Los diferentes tipos de

relieve pueden ser bien definidos y delimitados mediante el trazo colindante de las “unidades de paisaje”, las cuales se entienden como una porción de la superficie terrestre homogénea que muestra una forma de relieve bien definida, formada a través del tiempo por el efecto de diversos factores o procesos exógenos (clima, intemperismo, erosión, transporte de sedimentos, etc.), que han interactuado sobre una serie de elementos o componentes primarios de la superficie de la Tierra (litología, suelo, vegetación, fauna, hombre). Es conveniente mencionar que a pesar de que se ha incluido al “hombre” dentro de los componentes, también juega un papel importante como factor de afectación al paisaje.

El análisis del paisaje o paisaje geomorfológico, desde un punto de vista sistémico/holístico plantea metodológicamente el estudio por separado de cada uno los elementos (o componentes) y procesos (factores exógenos) que dan origen a una unidad de paisaje determinada. En la práctica, la separación de los componentes o factores genéticos de una unidad de paisaje geomorfológico, en cualquier caso de estudio, puede llevarse a cabo por medio del traslape físico o analógico de información espacial y/o de cartas temáticas de una zona en estudio. Naturalmente que en la sobre-posición de información geográfica y cartográfica, los SIG juegan un papel fundamental para establecer bases comparativas homogéneas, precisas y naturalmente con una adecuada georeferenciación.

Debido a la cantidad de información que contiene y en particular a la información que se requiere para conformar una carta geomorfológica, el análisis de las unidades de paisaje geomorfológico es considerado como la aplicación sistémica y holística de cualquier análisis espacial del territorio. De hecho, actualmente se considera también una base indispensable para el desarrollo exitoso de planes de ordenamiento y planeación territorial, análisis de riesgo, regionalización y restauración ecológica.

4.3 Las unidades de paisaje y la carta geomorfológica

Una carta geomorfológica es una carta analítica e interpretativa que incluye elementos esenciales de tipo litológico, estructurales (deformación de las rocas; fallas y pliegues), y suelos que pueden ser integrados con otros elementos para la evaluación física del paisaje de una región. Las unidades geomorfológicas por su parte son unidades espaciales que por su naturaleza integradora de factores del relieve y de elementos estables o de su sustrato, permiten evaluar las relaciones de erosión del suelo, de variación de vegetación y en consecuencia es indicadora de la

degradación territorial y ecológica de una zona. Aunque una carta geomorfológica puede tener diversas aplicaciones, su fin último es servir como un mapa integrador que permita identificar los niveles de degradación/modificación del paisaje en tiempo y espacio; siempre relacionados a una serie de causas para que puedan ser consideradas en un plan de manejo territorial.

Es importante mencionar que las unidades de paisaje geomorfológico son unidades netamente interpretativas, las cuales se construyen a partir de la utilización y de la ponderación de otros componentes y factores sistémicos. Esto implica que una carta geomorfológica si bien es integradora también guarda un carácter meteorológico explicativo, por lo que a continuación se presenta brevemente algunas consideraciones relacionadas al material cartográfico que se utilizará para su construcción en este trabajo.

La carta geológica

Las unidades geológicas no sólo representan la litología, sino que expresan conceptualmente la composición y evolución de las rocas de una región. En consecuencia, además de describir físicamente el sustrato de un terreno, permite contextualizar su territorio en una historia geológica del país y en el mundo. Sus aplicaciones y potencial son directamente proporcionales al conocimiento y disciplina de su usuario. En general una carta geológica es útil para conocer las características de los recursos naturales mineros, de agua y de la biósfera que están contenidas en las unidades geológicas. Por lo tanto deben ser un elemento fundamental para cualquier decisión relacionada con el uso sustentable de los recursos naturales que esta posee.

El mapa de pendientes

Es un mapa temático que, mediante cualquier sistema gráfico o realizado a mano, representa los diferentes grados de pendiente del relieve terrestre. Para un Sistema de Información Geográfica (SIG) es considerado como un Modelo Digital de Terreno (MDT)³. Los valores de la pendiente del terreno se consideran una herramienta fundamental para la elaboración de los más variados mapas que tratan acerca de los riesgos de erosión. Entre otras aplicaciones, la agronomía utiliza este tipo de herramientas para el reconocimiento y evaluación

³ Un MDT se define como “una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua” mientras que, un MDE se define como “un modelo digital de elevaciones en una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno” (<http://www6.uniovi.es/~feli>)

territorial de zonas propicias para diferentes tipos de cultivo. La diferencia de altura tiene una influencia directa en el escurrimiento fluvial y se refleja a través del sistema de pendientes (Bruniard, 1992 en Ángeles y Gil, 2006). El grado de pendiente también influye en las características hidrológicas del suelo, a mayor pendiente menor infiltración y retención de humedad y a menor pendiente mayor infiltración y humedad en el suelo. Entonces, los valores de la pendiente pueden ser correlacionados a procesos de geoquímica ambiental, puesto que la humedad presente en los depósitos de jales es un factor determinante en dichos procesos, particularmente en cuanto a los parámetros de movilidad de los elementos pesados (Anexo III).

La información de pendientes del terreno, es fundamental en lo referente a la elaboración de los mapas que abordan los riesgos de erosión (Pereira-Neto y Limberger, 2004), a mayor pendiente mayor riesgo de erosión y a menor pendiente menor riesgo de erosión. La definición de los rangos de pendientes se agrupan en intervalos de grados, de manera que para cada caso permita asociar cada grupo o intervalo de pendientes a la susceptibilidad de erosión (Bocco, 1989). Por ejemplo:

- 0-2 = Plana o casi plana
- 2-4 = Suave
- 4 – 8 = Moderada
- 8 – 16 = Moderadamente fuerte
- >de 16 = Fuerte

El mapa hidrográfico y el orden de drenaje

En un mapa hidrográfico se delimitan las fronteras de la cuenca hidrológica, la cual es definida como el espacio o el territorio donde las aguas fluyen a través de una red de cauces secundarios que convergen en uno principal. La cuenca puede ser diferenciada de otras como una unidad autónoma, y se caracteriza por integrarse con otras cuencas a una desembocadura regional de mayor dimensión o en el mar. Las cuencas son las unidades mínimas de manejo del agua y son útiles en la gestión de los recursos naturales incluidos en ellas.

En este trabajo la delimitación de cuencas hidrográficas define un subsistema de energía, el cual es particularmente relevante, por tratarse de unidades dinámicas naturales por excelencia y cuya superficie de terreno delimitada por un parteaguas permite definir y/o predecir la trayectoria superficial de la precipitación al drenar hacia un cauce determinado. Sin embargo, existen otras variables a considerar como: la precipitación, evaporación, transpiración, las cuales tienen un

efecto variable en relación con otros parámetros de la cuenca (área, perímetro, factor de forma, pendiente de laderas).

El uso de una carta hidrográfica en el DIA por minería, permite estudiar la relación del sustrato con los diferentes cuerpos de agua y, específicamente, el orden de drenaje para analizar los procesos de erosión y contribuir en la toma de decisiones sobre el manejo integrado y sustentable del recurso hídrico. La red de drenaje es un indicador del estado evolutivo de la cuenca, puesto que responde a diversos factores como: la litología, pendiente, suelos, historia erosiva, clima, por su topología se clasifica en: dendrítico, paralelo, dendrítico rectangular, rectangular, radial, anular, multicuenas e irregular.

La caracterización climática

La información climática de una región se presenta generalmente por grupos, subgrupos, tipos y subtipos de clima, los cuales son representados mediante fórmulas climáticas. La diversidad de los factores del clima incluyen además de datos específicos del terreno, como la complejidad topográfica del territorio, la variación de los vientos, la temperatura y precipitación relacionadas a las masas polares que se presentan en el país durante el otoño e invierno. Desde el punto de vista sistémico la carta de climas representa un factor del criptosistema que afecta directamente la formación del paisaje. El uso de esta información es indispensable para muchos estudios y puede correlacionarse con diversas características del paisaje, ya que la clasificación y delimitación de zonas climáticas parte del supuesto de la existencia de regiones con tipo de clima semejante, con límites discernibles que comparten características comunes, especialmente en lo que se refiere a vegetación y suelo.

La carta de vegetación y usos de suelo

El crecimiento de las zonas urbanas y rurales, el cambio de uso del suelo para actividades productivas (principalmente agricultura, ganadería y forestal,) y el crecimiento de la infraestructura (caminos y carreteras, tendidos eléctricos y presas, entre otros) son los principales impulsores de cambios de la vegetación primaria y del uso de suelo de un territorio. Por lo tanto el objetivo de una carta de uso del suelo y vegetación es definir los cambios en el uso del suelo y la evaluación y pronóstico de la situación de los recursos naturales; representa también un apoyo en programas académicos y de protección ambiental, en la planeación de actividades de reforestación, en los programas de conservación del hábitat de las especies animales, así como

todo lo concerniente a las políticas de aprovechamiento y conservación de los recursos naturales en el contexto del desarrollo sustentable de cualquier país o región.

4.4 Caracterización morfogenética del paisaje

Una vez identificadas las características geológicas y climáticas de la zona, se identifica en cada caso los principales factores que modelan el paisaje para realizar la caracterización morfogenética del relieve. Es importante mencionar que aunque en general el clima es un importante factor formador de paisaje, en algunos casos las unidades geológicas juegan un papel preponderante debido a su resistencia a la erosión o al factor “guía” que pueda representar la actividad tectónica de algunas estructuras (fallas o pliegues). Para la caracterización morfogenética del paisaje se aplica preferentemente el método propuesto por Wilson en 1969 (Lozano-Valencia y Lozano-Valencia, 2002); se basa en el análisis de la precipitación pluvial y las temperaturas medias anuales registradas en el área de estudio. Con base en esta información define seis sistemas de procesos morfoclimáticos: árido, semiárido, templado-húmedo, tropical-húmedo, periglaciario y glaciario (Figura 9).

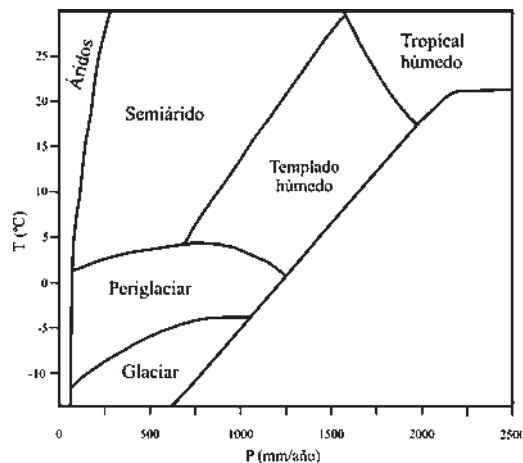


Figura 9. Sistemas Morfoclimáticos de Wilson 1969, tomado de Lozano-Valencia y Lozano Valencia, 2002.

Por otro lado, para especificar la intensidad de los procesos de erosión en relación con los procesos de intemperismo, Peltier 1950 (en Lozano-Valencia y Lozano-Valencia, 2002 y Maioli *et al.* 2004) propone con la misma información siete regiones generales de meteorización: procesos débiles, intemperismo químico moderado, intemperismo químico intenso, procesos

moderados con acción de helada, intemperismo físico débil, intemperismo físico moderado e intemperismo físico fuerte (Figura 10).

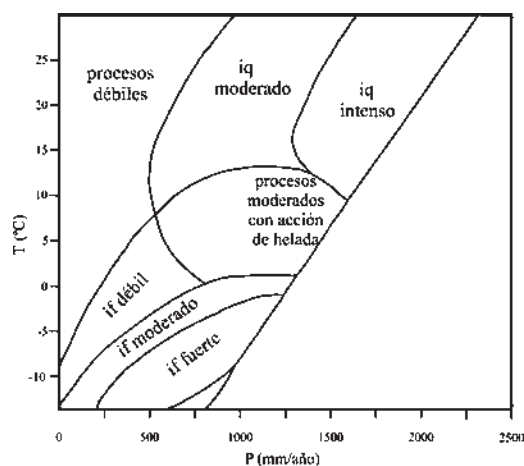


Figura 10. Regiones de meteorización según Peltier (1950), tomado de Lozano-Valencia y Lozano-Valencia, 2002 y Maioli *et al.* 2004.

Con estos métodos se puede identificar esencialmente cuáles pudieron ser los factores climáticos que han actuado principalmente en el modelado del paisaje o relieve de terreno en una determinada área de estudio. Sin embargo, es conveniente tener presente que en algunos casos el principal agente puede ser el viento y en cualquier caso, dichos procesos guardan una estrecha relación con las características litológicas de la zona.

Por otro lado, es conveniente señalar que aunque no serán abordados en este trabajo, existen una serie de técnicas de estudio de morfometría que permiten realizar cálculos y estadística relacionada a la distribución de una o diversas unidades de paisaje, estimaciones de erodabilidad, incisión de drenaje, etc. Los cuales por medio de los SIG permiten en muchos casos establecer su posible relación con otros factores y componentes del relieve.

4.5 Las unidades geomorfológicas y su aplicación al impacto ambiental en zonas mineras

En el capítulo 2 se ha abordado el impacto ambiental que genera la minería sobre el medio ambiente, así como la potencialidad que tiene los SIG para el estudio, evaluación y diagnóstico del impacto ambiental que ha tenido una zona minera. En el estudio del paisaje desde el punto de vista sistémico/holístico, la minería representa un subsistema en el que la transferencia e intercambio de energía esta definida por la actividad humana. En este contexto se considera que

el subsistema que defina la actividad minera deberá estar constituida por algunos componentes específicos: los métodos de extracción, los métodos de beneficio, distribución espacial de obras y residuos mineros (jales y terreros) y la temporalidad de la actividad minera.

La minería como actor o criptosistema antrópico es un agente modificador de las geoformas naturales, lo cual da origen a la interrupción o alteración del equilibrio entre los procesos exógenos formadores del relieve y el paisaje mismo, por ejemplo: la acumulación de jales y terreros, los socavones, respiraderos e instalaciones, y construcciones propias de la minería. Por lo tanto, la concepción sistémica del paisaje favorece el estudio de su interacción sociedad-medioambiente, el cual ha resultado ser un enfoque muy apropiado a los estudios de impacto ambiental causado por la minería, por considerar que el impacto ambiental es una consecuencia de dicha interacción.

Además, como se mencionó antes, el estudio ambiental de zonas mineras, implica que deba darse una atención particular a los efectos y cambios geoquímicas que se puedan verificar durante la actividad minera. En este sentido, considerar las unidades de paisaje desde un punto de vista sistémico, es relevante en el “intercambio de energía”, al igual que las unidades edáficas, las cuales fungen como un amortiguador o medio de transporte de sedimentos y elementos potencialmente tóxicos (EPT).

El análisis geomorfológico es indispensable en los estudios de impacto ambiental, ordenamiento territorial y del análisis de riesgo y planeación territorial, y especialmente en el caso específico de zonas mineras, puesto que, permite enmarcar los diferentes y diversos ambientes en donde se propician, intensifican o amortiguan las reacciones geoquímicas que liberan o capturan los EPT, que podrían causar efectos importantes para la formación y uso de suelos y por lo tanto en forma directa a la biosfera.

Por último, es conveniente mencionar que el uso de las unidades geomorfológicas para el estudio de impacto ambiental se puede traslapar con las cartas de vegetación y usos de suelo, en las cuales se asume que las actividades humanas y en particular la extracción y beneficio de los minerales han modificado sustancialmente la vegetación natural de cualquier distrito minero. La desaparición de la cubierta natural o su alteración son los signos más evidentes.

CAPÍTULO 5 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA DEL DISTRITO MINERO EL ORO-TLALPUJAHUA (DMOT)

5.1 Localización y descripción geográfica

El Distrito Minero El Oro-Tlalpujahuá (DMOT) se ubica al noreste del estado de Michoacán y noroeste del Estado de México. Sus coordenadas centrales son 19° 18' latitud norte y 100° 09' longitud oeste, tiene acceso desde la ciudad de Toluca, por la carretera federal No 55 Toluca-Atlacomulco hasta el entronque Atlacomulco-El Oro que conduce al Distrito Minero El Oro-Tlalpujahuá, recorriendo una distancia de 68 km.

El DMOT se encuentra localizada en la región hidrológica Número 12 Lerma-Santiago que se compone a su vez de doce cuencas: Río Lerma-Salamanca, Río Lerma- Chapala, Lago de Chapala, Río Santiago-Guadalajara, Río Santiago-Aguamilpa, Lago de Pátzcuaro-Cuitzeo y Laguna de Yuriria, Río la Laja, Río Verde Grande, Río Juchipila, Río Bolaños, Río Huaynamota y **Río Lerma-Toluca**. Es en ésta última que se localiza la Subcuenca Tlalpujahuá (RH12Ag) en donde se encuentra la zona de estudio (Figura 11)

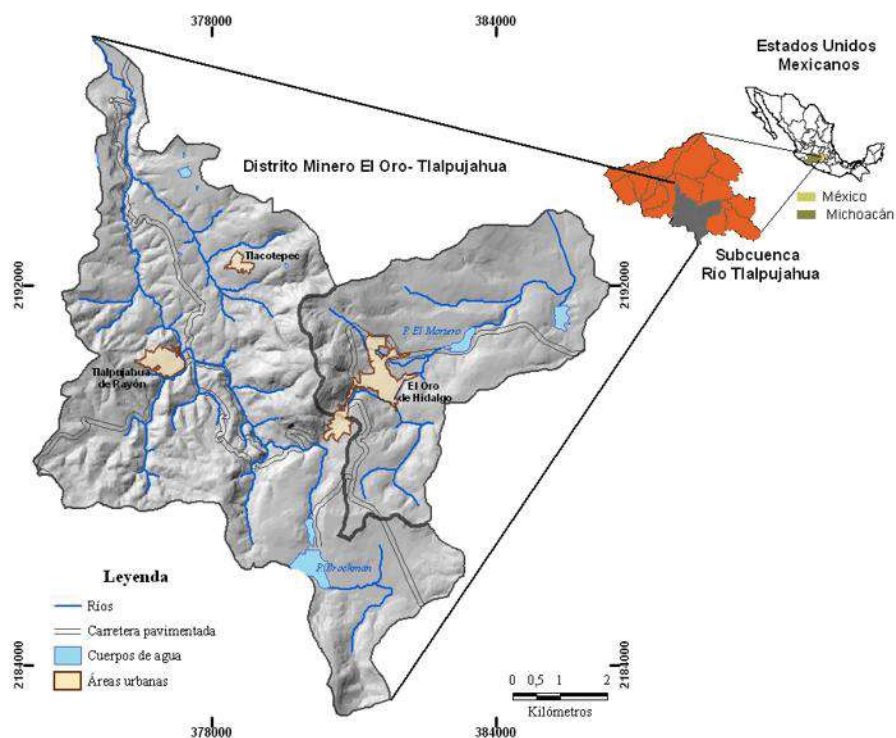


Figura 11. Localización del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahuá.

5.2 Caracterización climática del DMOT

De acuerdo con el mapa climático de García y CONABIO (1998), el cual a su vez se basa en la clasificación climática de Köppen modificada por García (1987), el clima que se presentan en la zona de estudio es C (w₂), templado subhúmedo con lluvias en verano se caracteriza por presentar un índice P/T >55 mm, siendo la precipitación del mes más seco <40 mm y un porcentaje de lluvia invernal que va de 5 a 10.2% del total anual. En cuanto al régimen térmico su temperatura media anual varía entre 12°C y 18°C, la temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y la temperatura del mes más caliente entre 6.5 °C y 22 °C.

La densidad de estaciones climatológicas en la zona de estudio es la deseada para el trabajo, con la finalidad de complementar los datos se compilaron y reprocesaron los datos de otras 9 estaciones climatológicas cercanas al área de trabajo (Tabla 4).

Tabla 4. Estaciones Meteorológicas.
Datos del Servicio Meteorológico Nacional y comisión Nacional del Agua

Nombre	Clave	Coordenadas		Clima	Temperatura Media (°C)	Precipitación (mm)
		Longitud	Latitud			
Chincua, Senguio	16033	100°17'18"	19°46'21"	C(w1)	14,8	824,2
San José, Maravatio	16111	100°19'09"	19°54'27"	C(w1)	17,8	883,8
Tepuxtepec, Contepec	16129	100°13'49"	19°59'48"	C(w1)	15,5	835,3
Irimbo, Irimbo	16213	100°29'00"	19°42'00"	C(w1)	15,2	793,1
Tultenango, El Oro	15128	100°04'53"	19°48'43"	C(w2)	13,8	779,1
Senguio, Senguio	16121	100°22'00"	19°44'00"	C(w2)	16,1	885,8
Brockman, El Oro	15070	100°08'25"	19°46'09"	C(w2)	11.4	960.0
El Oro, El Oro	15186	100°07'46"	19°48'33"	C(w2)	11.5	883.0
Chichilpa, San Felipe del Progreso	15267	100°02'31"	19°43'10"	Cb'(w2)	6,4	858,3

Únicamente dos estaciones: Brockman, El Oro-15070, y El Oro, El Oro-15186, se localizan dentro de la zona de estudio, y en vistas de ofrecer un mejor detalle y precisión de su comportamiento se describen ambas estaciones, y por su temperatura media anual 11.4°C y 11.5 °C respectivamente, les corresponde el clima semifrío subhúmedo (Figura 12).

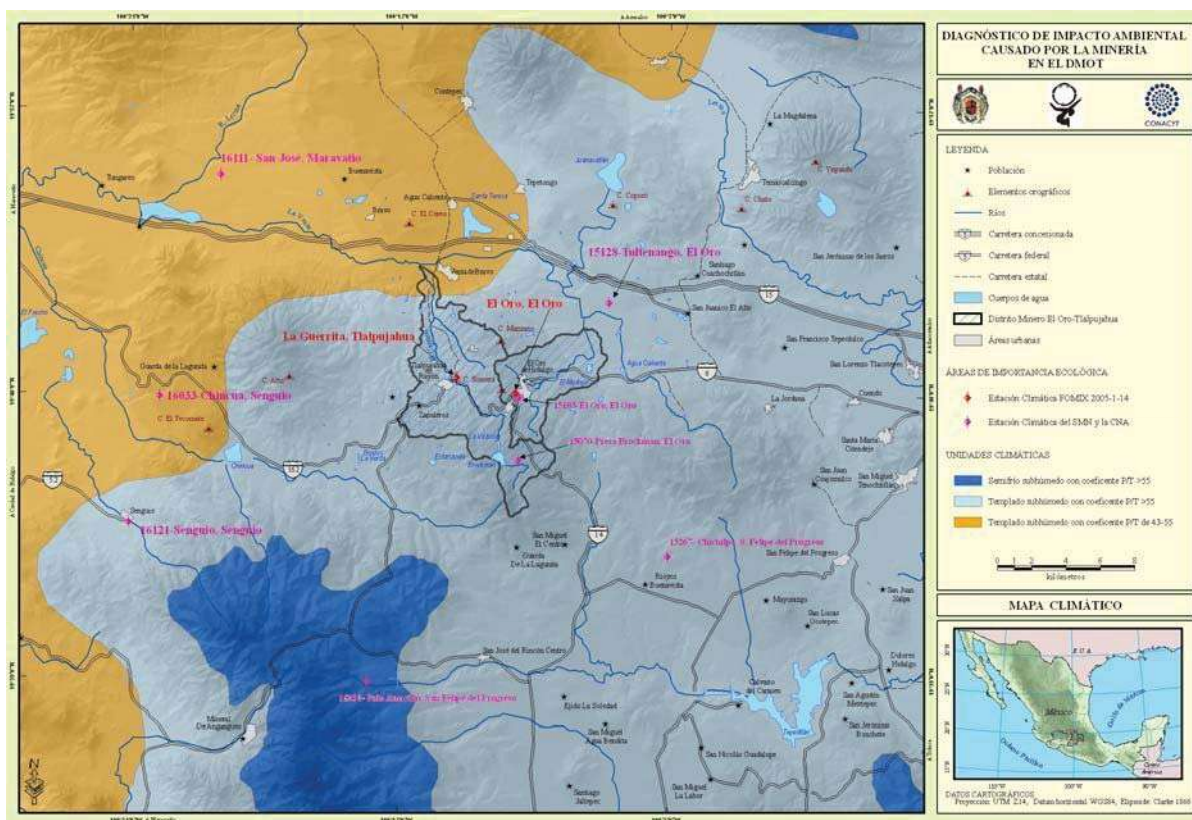


Figura 12. Mapa climático con localización de estaciones meteorológicas.

La estación meteorológica El Oro-15183 (Figura 13) presenta un precipitación media anual de 883.8 mm, y se observa que el periodo de lluvias va de junio a septiembre siendo el mes más lluvioso agosto (210.7 mm), y marzo el mes más seco. En cuanto al régimen de temperaturas, el periodo máximo precede a la temporada de lluvias y corresponde a los meses de marzo a junio con el registro máximo en mayo (21.7 °C) y el mes más frío es enero. Además se pueden observar dos periodos de aridez: el primero en noviembre y un segundo de febrero a abril.

En la estación meteorológica Presa Brockman clave 15070 en la CNA la precipitación anual es de 960 (mm), se observa que el periodo de precipitaciones del mes de junio a septiembre, siendo junio el mes más lluvioso (220.9 mm), mientras que el mes más seco es marzo. En cuanto al régimen de temperaturas, el periodo máximo precede a la temporada de lluvias y corresponde a los meses de marzo a junio con un máximo en mayo (21 °C) y el mes más frío es diciembre. Además se pueden observar dos periodos de aridez: el primero en noviembre-diciembre y un segundo de febrero a abril (Figura 14).

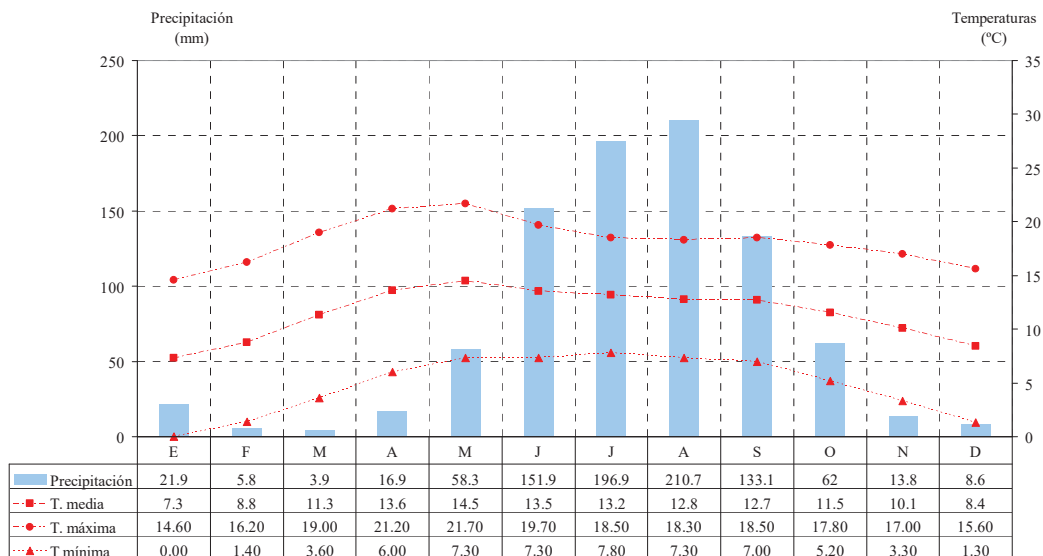


Figura 13. Climograma de la estación meteorológica El Oro. Datos del Servicio Meteorológico Nacional y La Comisión Nacional del Agua.

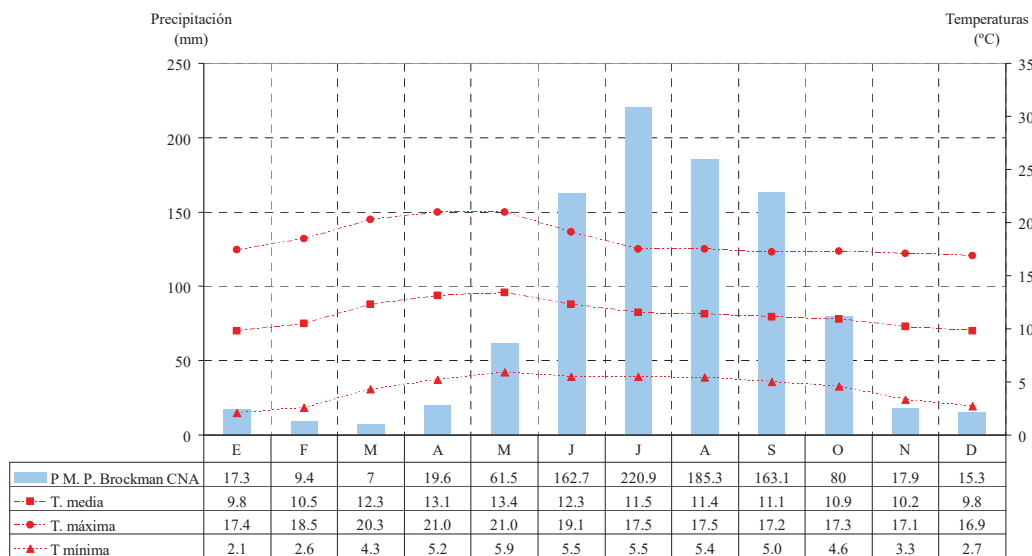


Figura 14- Climograma de la estación meteorológica Presa de Brockman. Datos del Servicio Meteorológico Nacional y La Comisión Nacional del Agua-

5.3 Fisiografía y relieve local

Según Garduño-Monroy (1999), en Michoacán se observan seis dominios morfoestructurales: D. de la sierra Madre del Sur, D. de la Depresión del Balsas, Dominio del Complejo Volcánico Inferior, D. de Cuencas Lacustres y D. del Cinturón Volcánico Mexicano. La zona de estudio se encuentra localizada en la última unidad, además el Distrito Minero de El Oro-Tlalpujahua se ubica en la región septentrional de la Sierra de Mil Cumbres y está asociada a la Sierra del Rosario (>3700 msnm) que es colindante con una serie de domos volcánicos de la región de Zitácuaro.

La región del DMOT es netamente montañosa (>3900 msnm), se corta abruptamente al norte por la falla tectónica activa del Graben Acambay-Morelia, colinda hacia el este, en la zona de El Oro, con una región en que coexisten diferentes aparatos volcánico monogenéticos y una serie de cuencas lacustres de baja profundidad hasta humedales.

Desde el punto de vista geomorfológico la región ha sido estudiado por Bocco (1986) y Bocco (1990) utilizando sensores remotos y SIG para identificar procesos de erosión, dicho trabajo cubre toda la cuenca del Río Tlalpujahua. Este autor hizo importantes contribuciones en la formación de canales de erosión y renovación del relieve. Sus resultados serán comentados en el apartado de la carta geomorfológica del DMOT:

5.4 Vegetación

No existe un inventario florístico o faunístico que trate únicamente de la zona de trabajo (DMOT), sin embargo en la colección “Flora del Bajío y regiones adyacentes” para el municipio de Tlalpujahua se reportan especies como: *Cupressus lusitanica* (Cedro o Cedro blanco), *Juniperus blancoi* (Cedro o tascate), *Juniperus deppeana* (Cedro negro, cedro prieto, sabino); También se mencionan algunas plantas herbáceas, arbustivas y plantas acuáticas como: *Glandularia teucrifolia* (Estafiatillo o moradilla), *Priva mexicana* (Espinosa grande o pegajosa), *Verbena gracilis* (Verbena), *Juncus ebracteatus* (Junco), *Linum orizabae* Planch., *Cornus excelsa* (carindapás, hierbabuenilla, mimbre prieto, quirindapás), *Abutilon ellipticum* (colotagüe), *Allowissadula floribunda*, *Allowissadula*, *Bastardia bivalvis*, *Meximalva venusta*, *Smilax moranensis* (salsaparrilla, salsaparrilla blanca, sierrita), *Lilaea scilloides* (cebolleja), *Ribes microphyllum* (Rzedowski y Calderón, 1992; Calderón y Rzedowsk, 1994; Rzedowski y

Calderón, 2002; Galván-Villanueva, 2002; Novelo, 2003; Pérez-Caix, 2005; Samudio y Carranza, 1994).

De las 12 comunidades vegetales que se reportan para el estado de Michoacán sólo esta presente en Tlalpujahua la denominada “bosque de cedro blanco” que se caracteriza por la dominancia de *Cupressus lusitánica* (cedro blanco), asociado con pinos o encinos, El cedro blanco alcanza alturas de 15-20 metros con una precipitación de 1000 anuales y se ubican en altitudes alrededor de 3000 msnm (Carranza-González, 2005).

Las comunidades vegetales dentro de la superficie de trabajo se encuentran ya muy alteradas respecto de las condiciones naturales, ya sea por la presencia de áreas urbanas, la agricultura, la ganadería y la minería.

5.5 Importancia ecológica de la zona de estudio

La importancia ecológica del DMOT, además de su valor intrínseco, se debe que se encuentra entre los polígonos de la zona de amortiguamiento del Área Natural Protegida (ANP) “Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca”, que fue decretada en noviembre del año 2000 en el Diario Oficial de la Federación por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

En el plan de manejo de dicha ANP elaborado por la SEMARNAT (2001) se observa una variedad de vegetación desde bosque de oyamel, pino-oyamel, pino, encino y cedro, en donde se han registrando 493 especies de plantas vasculares y 49 especies de hongos; en cuanto a fauna silvestre se reportan 198 especies de vertebrados: 4 anfibios, 6 reptiles, 56 mamíferos, 132 aves. Como especies endémicas se mencionan: *Acernegundo var. Mexicanum*, *Pinus martinezii*, *Ambystoma ordinarium*, *Pseudoeurycea belli* y *P. robertsi*, notese que se refiere a toda la superficie que cubre el ANP.

Otro aspecto importante es el hecho de que el cerro Campo del Gallo localizado dentro de la zona de estudio y perteneciente al municipio de Tlalpujahua, fue declarado en 1952 como Parque Nacional⁴ Rayón, esta zona presenta bosque cedro *Cupressus lindleyi* y *Cupressus benthami*, ésta última según Vargas-Márquez (1997) es una especie endémica.

Además, la mayor porción de la superficie de estudio, conforme a CIPAMEX–CONABIO (1999) se encuentra dentro del Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA)

⁴ Los Parques Nacionales son destinados para uso público, siempre y cuando se realicen actividades relacionadas con la protección de sus recursos naturales, el incremento de su flora y fauna y en general, actividades orientadas a la reservación de los sistemas que albergan.

denominada “Sierra de Chincua”, misma que cuenta con un listado de 79 especies de aves de las cuales 56 son residentes, 10 migratorias, 2 residentes en invierno y el resto ocasionales (Figura 15).

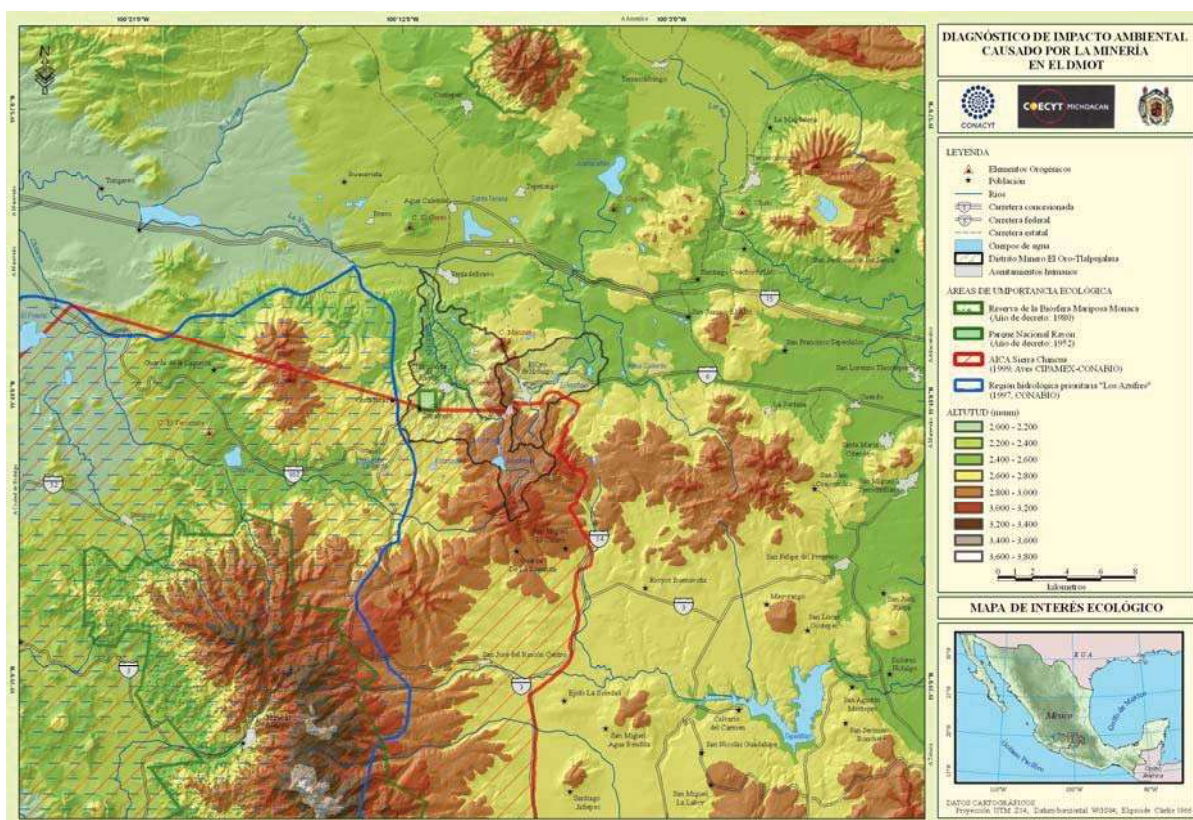


Figura 15. Mapa de interés ecológico del DMOT.

5.6 Diagnóstico socioeconómico

Aún cuando el aspecto económico no es considerado como principal objeto de estudio, es importante analizar algunos indicadores socioeconómicos, puesto que el impacto ambiental es causado por la minería (actividad humana), pero además se trata de la población que pudiera ser afectada por el impacto causado por dicha actividad.

La zona de estudio, como se mencionó anteriormente, políticamente se comparte por dos municipios: Tlalpujahuá (Mich.) y El Oro (EdoMex.); el primero según el censo de población y vivienda 2000 contaba con un total de 25,392 habitantes en un total de 77 localidades y el segundo 30,411 habitantes en 62 localidades.

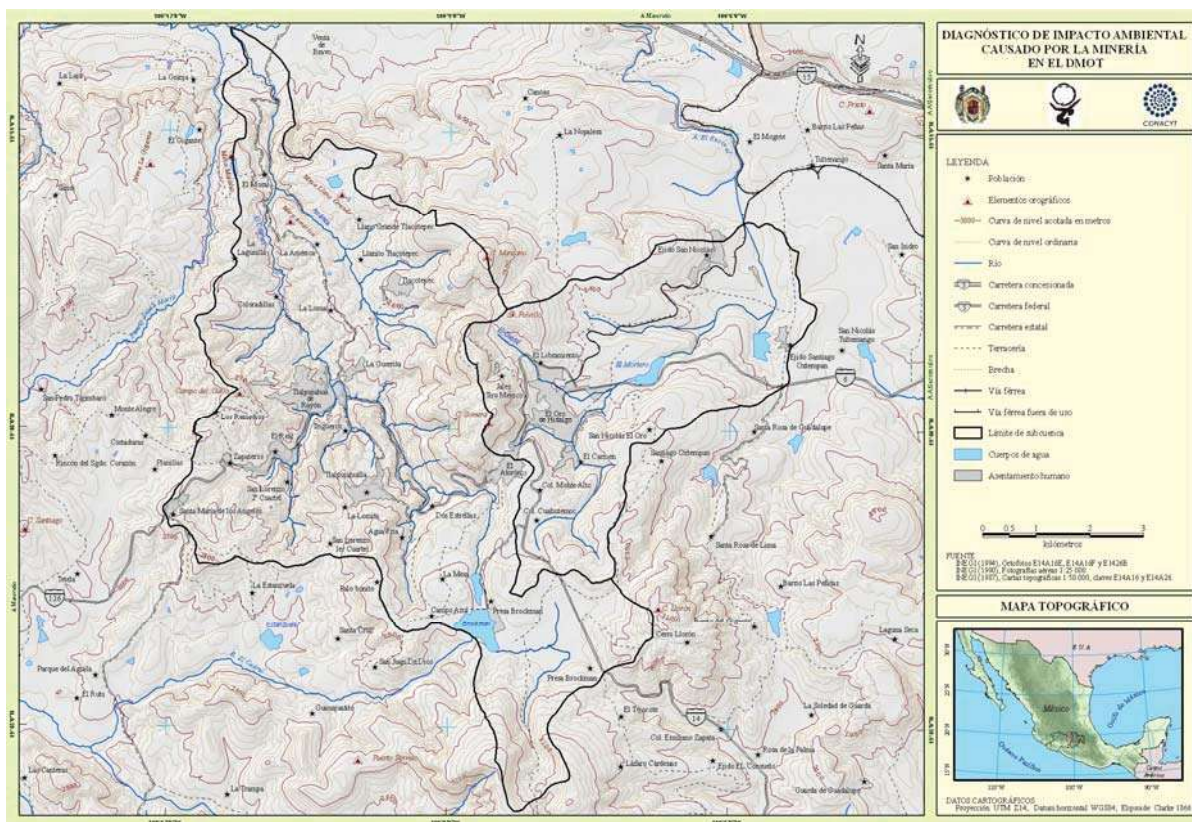


Figura 16. Mapa Topográfico del DMOT.

Solo 22 de las 77 localidades del municipio de Tlalpujahua se encuentran dentro de la zona de trabajo y representan el 44.19 % del total de la población municipal (11,222 habitantes); entre estas localidades destacan por mayor número de habitantes: Tlalpujahua de Rayón, Santa Maria de Los Ángeles y Tlalpujahuilla. Por su parte el municipio de El Oro tiene 11 localidades dentro del área y suman 10,760 habitantes (35.38 % del total municipal) donde destacan por mayor población: El Oro de Hidalgo y San Nicolás El Oro (Figura 16 y tabla 5).

Tabla 5. Localidades que se encuentran dentro del polígono de estudio INEGI (2000).

Localidades del mpio de Tlalpujahua	Habitantes	Localidades del mpio. El Oro	Habitantes
Tlalpujahua de Rayón	3,332	El Oro de Hidalgo	6,114
Santa Maria De Los Angeles	1,620	San Nicolás El Oro	1,188
Tlalpujahuilla	1,049	Colonia Cuauhtemoc	910
Los Remedios	786	La Presa Brockman	520
La Mesa	724	Ejido San Nicolás El Oro	513
San Lorenzo Segundo Cuartel	470	Santa Rosa De Guadalupe	423
Tlacotepec	462	La Loma de la Cima	383
La Lomita	338	Jales Tiro México	284
El Real De Arriba	337	El Libramiento (Cerro De Estrellita)	272
Campo Azul (La Presa)	290	Colonia Monte Alto	104

Localidades del mpio de Tlalpujahua	Habitantes	Localidades del mpio. El Oro	Habitantes
Zapateros	262	El Carmen	49
La Loma	214		
Coloradillas	209		
Llano Grande Tlacotepec (Col.Hidalgo)	194		
Dos Estrellas	189		
La América	176		
Llanito Tlacotepec (Cuartel 3ro.)	119		
El Moral	111		
Agua Fría (La Cañada)	104		
La Lagunilla	90		
Trigueros	88		
San Lorenzo Primer Cuartel (Los Mirtos)	58		
TOTAL	11,222	TOTAL	10,760

En el municipio de Tlalpujahua para el año 2000, se tenían 16,894 habitantes con edad para trabajar, de los que 61% es económicamente inactiva (PEI) y solo 39 % (6,639 habitantes) es activa (PEA). Las 22 localidades del área de estudio representan el 49% de la población económicamente activa como se observa en la figura 17. Del total de la población municipal de El Oro, para el año 2000 se tienen más de 18, 000 habitantes en edad de trabajar pero la mayor proporción (66%) está censada como económicamente inactiva y el 41% (6,639 hab.) es activa. Las 11 localidades del área de estudio representan el 46% de la población económicamente activa del municipio como se observa en la figura 18.

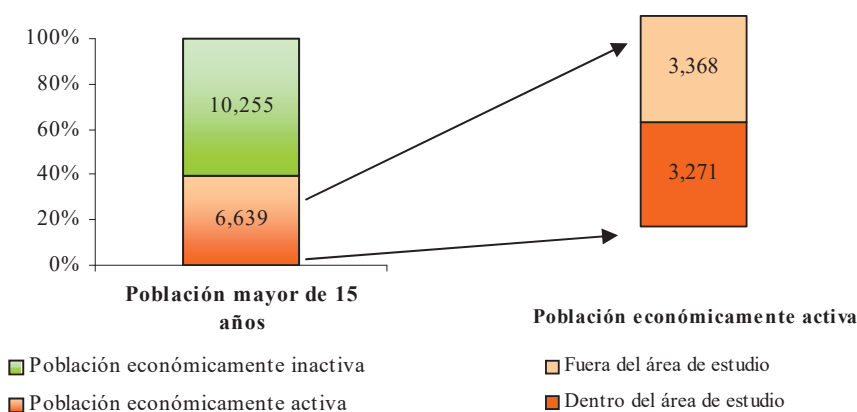


Figura 17. Población Económicamente Activa en el Municipio de Tlalpujahua, Michoacán.

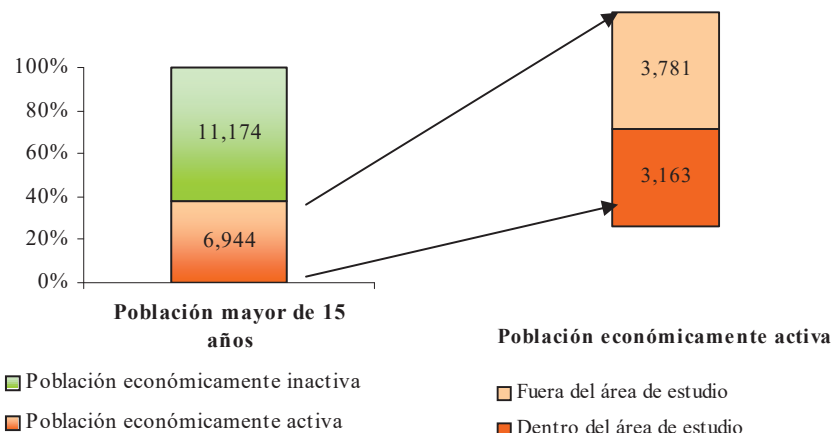


Figura 18. Población Económicamente Activa en el Municipio de El Oro, Estado de México.

Haciendo una comparación de la población económicamente activa de ambos municipios, se observa que el sector primario tiene la proporción de 22% en Tlalpujahua y 20% en El Oro; no así para el sector secundario en donde El municipio de Tlalpujahua tiene su mayor población con un 47% y El municipio de El Oro en el sector terciario con un 45% (Figura. 19).

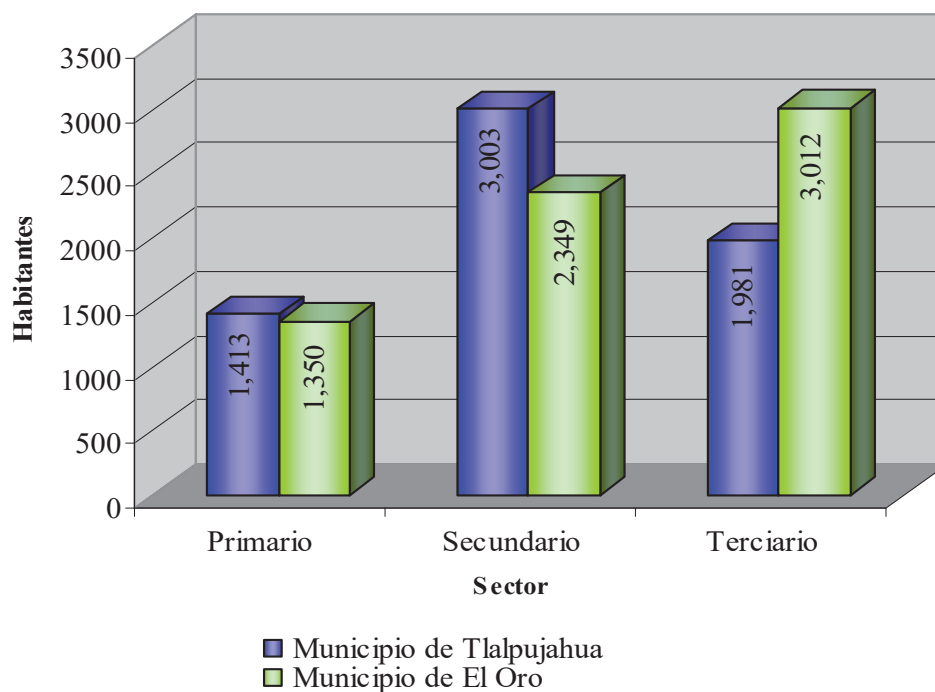


Figura 19. Población Económicamente Activa a Nivel Municipal.

Del total de población económicamente activa en las 33 localidades de ambos municipios ubicadas dentro del área de estudio, la mayoría se concentra en el sector secundario y terciario siendo una minoría el sector primario (Figura 20).

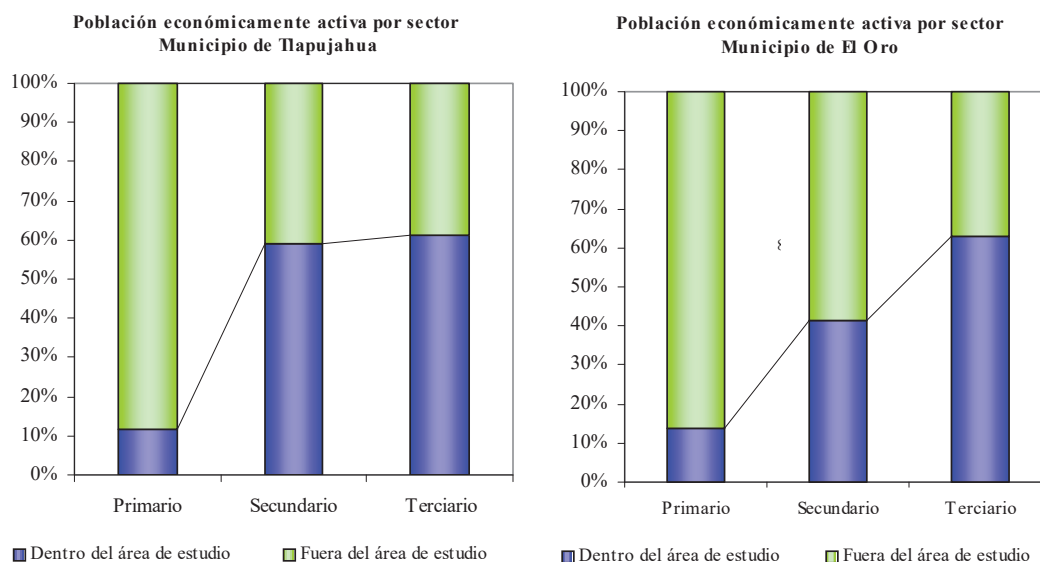


Figura 20. Población económicamente activa dentro del área de estudio por sector

Dentro de las actividades primarias se puede mencionar la agricultura de temporal por cultivo de maíz y avena. La extracción de madera es actualmente para uso doméstico; en cuanto a minería es principalmente de materiales no metálicos extrayendo bloques de cantera (ignimbrita) que se usan en la construcción y ornato por la variedad de colores que presenta en la zona; en cuanto a industria se fabrican adornos navideños (esferas). En Tlalpujahua, esta actividad es una fuente importante de empleo. La cabecera municipal de Tlalpujahua tiene el título de Pueblo Mágico Patrimonio de la Humanidad por su arquitectura histórica y en la actualidad ha recibido un importante impulso siendo el turismo también una fuente generadora de empleo significativa.

CAPÍTULO 6

GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS MINERALES DEL DMOT

6.1 Geología y estructuras tectónicas

La distribución de las unidades geológicas de la región de Tlalpujahua es compleja, en cuanto que presenta un basamento caracterizado por una secuencia volcánico-sedimentaria del Mesozoico (Silva y Salgado, 1988; Corona, 1999); seguido de conglomerados continentales del Eoceno (De la Teja-Segura *et al.*, 2000) y una serie de unidades volcánicas félsicas (Fries *et al.*, 1965) y basálticas del Mioceno-Plioceno. Las zonas donde se ubican los residuos mineros o presas de jales del Distrito Minero de Tlalpujahua fueron esencialmente depositadas sobre las secuencias mesozoicas, en cuanto representan la roca encajonante de los depósitos auro-argentíferos; mientras que las presas de jales del Distrito Minero de El Oro se encuentran depositadas principalmente sobre andesitas miocénicas del Cerro Somera.

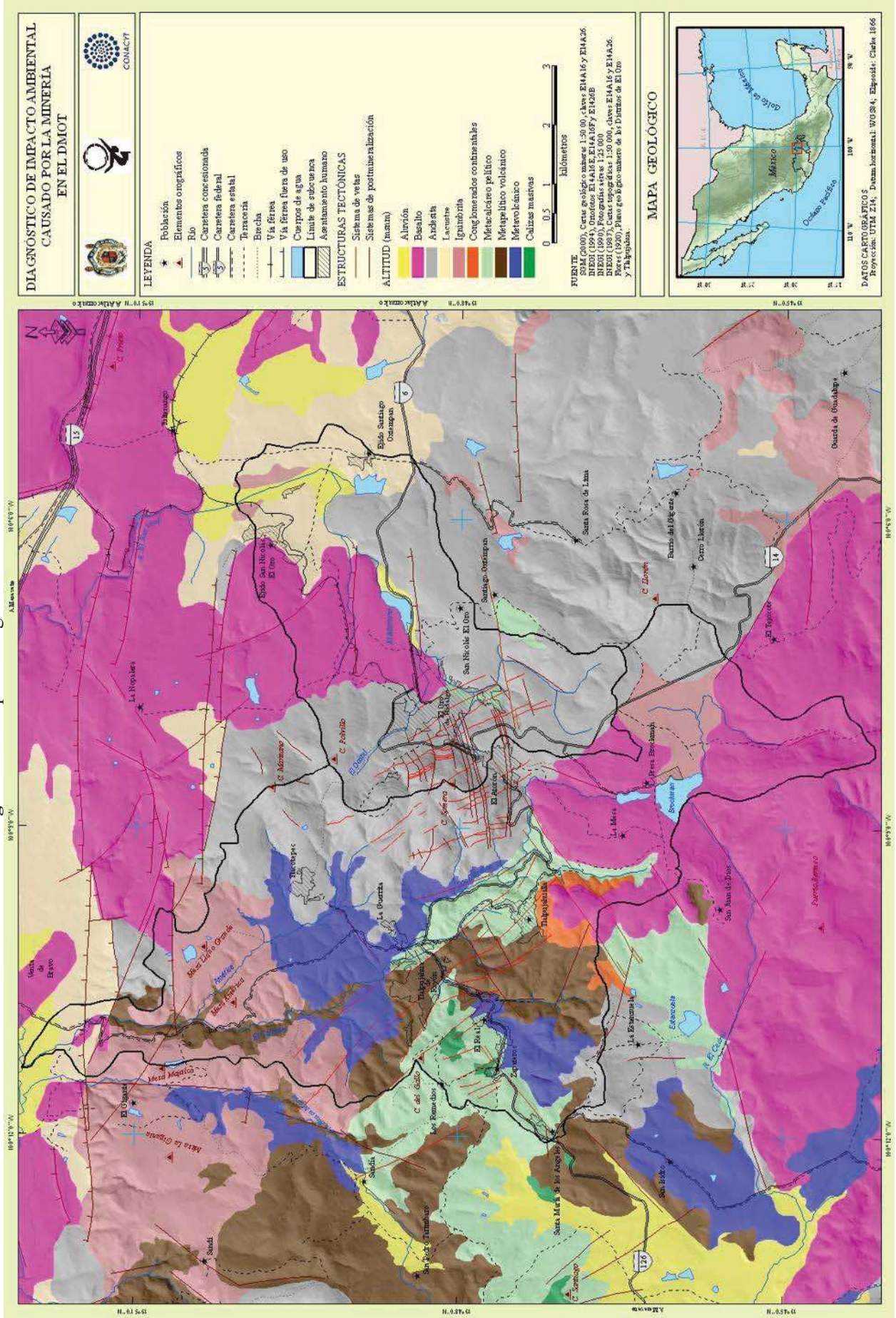
La cartografía geológica en el DMOT cuenta con antecedentes desde el siglo XIX por Burkart, (1828) en El Archivo Cartográfico-Histórico del museo Tecnológico Dos Estrellas, sin embargo la carta de base más importante fue realizada por Flores (1920), misma que permaneció vigente hasta que en los años ochentas y noventas se hicieron algunas actualizaciones (Silva y Salgado, 1988; De la Teja-Segura, 2000); en particular se mapearon las unidades volcánico-sedimentarias. La carta que aquí se presenta (Figura 21), es inédita y corresponde a los trabajos de cartografía realizados en los albores de este siglo por Corona y González (información inédita).

A continuación se presenta una breve descripción de las unidades geológicas del DMOT, con la finalidad de contextualizar el depósito mineral, así como las diferentes obras mineras incluyendo los depósitos de jales.

6.1.1 Secuencia Metavolcánica Andesítica

La secuencia metavolcánica muestra una estructura pseudos-estratificada asociada a areniscas volcanoclásticas, pero también se presenta ocasionalmente una estructura masiva de almoadillas, y asociado a alternancias de metatobas. Toda la secuencia se encuentra metamorfozada y alterada a cloritas, sericita. Petrológicamente la secuencia es predominantemente andesítica con derrames de lava (*e. g.* Sandi), porfírica con fenocristales de plagioclasa y relictos de clinopiroxenos.

Figura 21. Mapa Geológico del DMOT.



Las metatobas son de matriz vítrea muy fina con abundancia de cristales corroídos y líticos de andesita. Es común encontrar deformación intensa que alcanza a foliar la roca. Es posible encontrar algunos cuerpos de filones de gabro-dioritas con características serpentinizadas y actinolizadas. El contacto inferior no aflora, sin embargo el contacto superior en algunos lugares se considera transicional con la Secuencia Metasedimentaria Pelítica y Volcánica.

6.1.2 Secuencia Metasedimentaria Pelítico-Volcánico de Tlalpujahuilla

Secuencia de intercalación de metalimolitas, metacalizas, calcarenitas, litarenitas de matriz silícea de grano fino en estratos delgados de 1-5 cm, intercalados con algunos horizontes de pedernal con mas o menos radiolarios (radiolaritas). La secuencia presenta una foliación subparalela, así como una foliación generada por esquistosidad de crenulación. Las calizas pueden ser altamente recrystalizadas. Asimismo presenta un plegamiento isoclinal, zonas de cizalla donde se incrementa la deformación y en algunos casos paralela a la foliación principal se llevan a cabo desplazamientos inversos. Su contacto inferior es transicional con la Secuencia Metavolcánica, aunque en la mayoría de los casos el contacto es tectónico; el contacto superior también es transicional con la Secuencia de Metacalizas del Carmen. Aunque han sido identificados algunos radiolarios, la edad de esta unidad no ha sido establecida y se considera relativamente pre-Aptiano.

6.1.3 Secuencia de Metacalcáreo-Pelítico (El Carmen y Mina Dos Estrellas)

Esta secuencia se caracteriza por calizas carbonosas en estratos muy delgados, de textura también muy fina, color oscuro debido a las variaciones de abundancia materia carbonosa. Es posible encontrar intercalaciones de calizas de dimensiones centimétricas de color gris a oscuro en forma rítmica con las calizas carbonosas. En este caso se observa una variación rítmica con un espesor variable de 30-60 m, los cuales son homogéneos.

Esta secuencia petrográficamente está constituida esencialmente por micritas, biomicritas, las cuales pueden estar parcialmente o altamente recrystalizadas, y por lo tanto estar asociadas a segregaciones de calcita que ocurren como vetillas paralelas o semi-discordantes a la estratificación. Su contacto inferior es transicional con la Secuencia Metasedimentaria pelítica y al sur de Tlalpujahuilla está cubierto discordantemente por el Conglomerado Balsas y las unidades volcánicas del Terciario. La edad de esta unidad ha sido recientemente bien establecida con base

en nannoplancton fósil y foraminíferos planctónicos como del Tithoniano-Aptiano (González-Fabián *et al.*, 2006).

6.1.4 Secuencia de Calizas Masivas Remedios

Secuencia de calizas en estratos de 1-3 m intercalados con horizontes delgados de algunos cm de calcarenitas, metalimolitas calcáreas y en algunos raros casos horizontes de material silíceo muy fino. Presenta un alto grado de homogeneidad de color gris como afloramiento, sin embargo petrográficamente pueden variar desde biomicritas, bio-esparitas a esparitas asociadas a clastos principalmente de calizas, pero invariablemente es posible identificar fragmentos de rocas volcánicas y plagioclasas dispersos en una matriz.

Es evidente la estructura isoclinal con una vergencia al NE y la presencia de zonas de hasta metros de amplitud que muestran una deformación intensa de cizalla, las cuales señalan una sobreposición directa con la secuencia metacalcárea-metaterrígena (1 y 2) similar al de Tlalpujahuilla.

La Secuencia de Metacalizas presenta también excelentes afloramientos a lo largo de la brecha a San Miguel el Alto. Sin embargo, en esta zona se presentan una serie de intercalaciones de calizas en estratos delgados y de tonalidad variable de carbonosa a gris. Se encuentran intercalados estratos de calizas más potentes (metros), así como metalimolias calcáreas, calcarenitas con fragmentos volcánicos y en algunos casos más raros biomicritas. Presenta un plegamiento intenso en chevrón y las capas se encuentran inclinadas generalmente al sur.

6.1.5 Andesitas del Cerro Somera

Se refiere a una estructura semicircular de origen volcánico de composición andesítica, visible aún con imagen de satélite, la cual muestra todavía la forma relictiva de haber sido un vulcanismo en escudo o en semi-escudo probablemente emplazado durante el Mioceno. La textura en campo y en sección delgada muestra un pórfido andesítico con fenocristales abundantes de anfíbol y escasos clinopiroxenos. Sin embargo la matriz es extremadamente afanítica, rosada y en sección delgada es microlítica pilotáxica.

Esta unidad sobreyace todas las unidades de basamento antes descritas y sella de alguna manera el sistema de vetas de todo el Distrito Minero El Oro-Tlalpujahuilla. De hecho, en los

mapas se puede observar que las obras mineras seguidas por Fournier a principios del Siglo XX, se introducen en la base y al límite del emplazamiento de las andesitas del Cerro Somera.

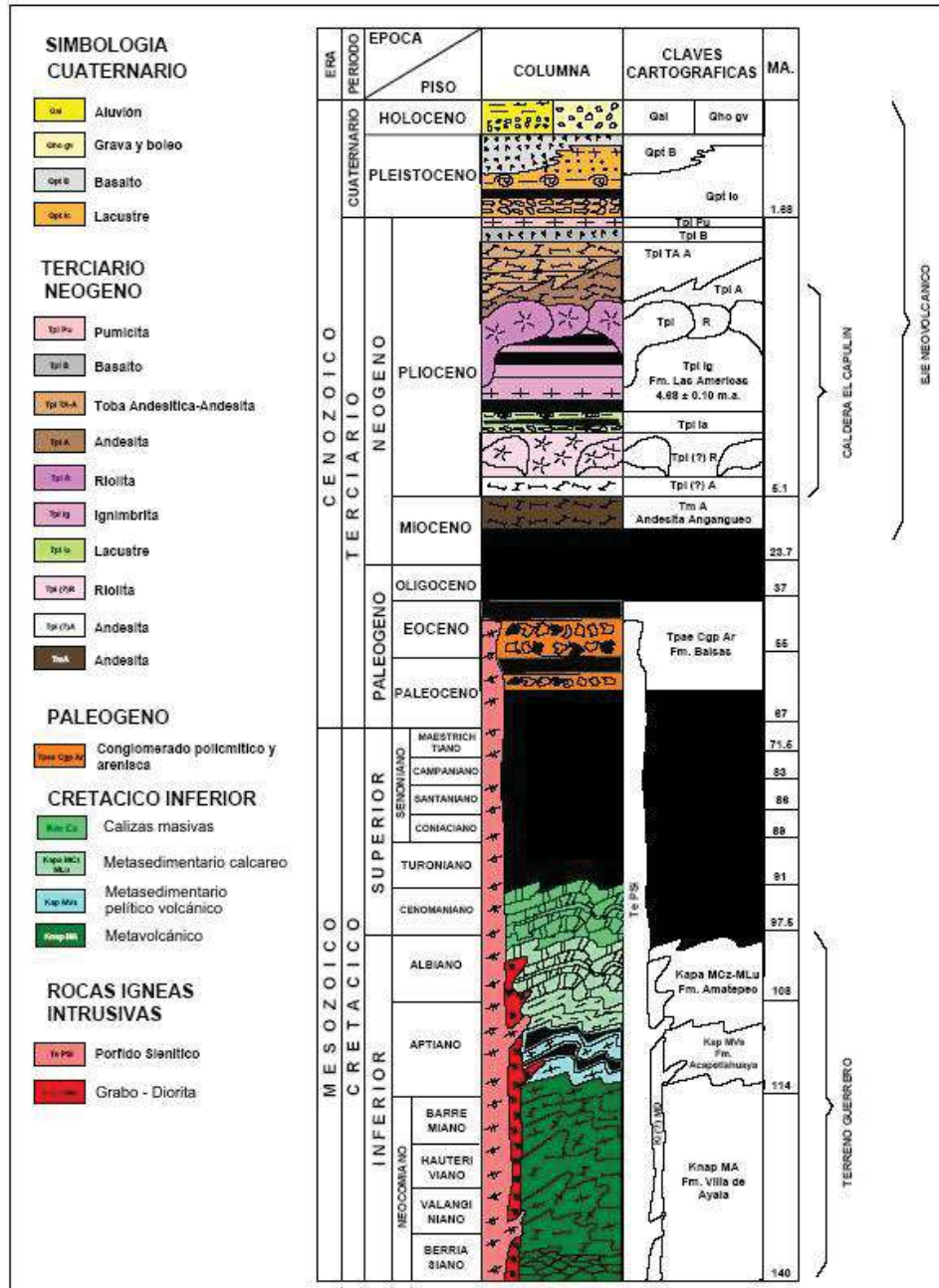


Figura 22. Columna estratigráfica modificada de De la Teja et al., 2000.

6.1.6 Estructuras tectónicas

El DMOT se encuentra en dentro del sistema de Fallas Morelia-Acambay y se pueden observar varias fases de deformación, Silva-Ortiz y Salgado-Soto (1988) señalan cuatro: una primera de compresión con dirección NO-SE que origina ejes de pliegues y crenulaciones en la unidad metamórfica, y es la que aloja las vetas mineralizadas; una segunda fase compresiva con dirección NE-SO que da origen a eje de pliegues y fallas inversas que también distorsionan a la unidad metamórfica; una tercera fase distensiva con dirección NE-SE que se confirma con la presencia de fallas normales; y finalmente una cuarta fase también distensiva E-O en la porción norte del área.

6.2 Los yacimientos minerales del DMOT

La región minera El Oro–Tlalpujahuá presenta relaciones de textura y paragénesis mineral que dan testimonio de un depósito mineral de vetas hidrotermales de tipo epitermal (Flores, 1920; De la Teja-Segura, 2000). Los yacimientos hidrotermales son concentraciones minerales originadas por la precipitación diferencial de soluciones gaseoso-líquidas calientes (Lunar y Oyarzun, 1991; Park y MacDiarmid, 1981) de origen magmático, que circulan bajo la superficie a profundidades < 1 km.

Las estructuras mineralizadas en el DMOT corresponden a vetas-falla (Figuras 23 y 24), las cuales se han alojado en las secuencias de basamento mesozoico, generalmente en rocas metacalcáreo-pelíticas, las cuales han sido delimitadas y selladas por la andesita que forma el Cerro Somera.

Las especies minerales de mena o paragénesis mineral que se encuentran del DMOT son el oro y plata nativas, así como sulfuros, sulfoantimoniuros y sulfoarseniuros de plata y oro, tales como la argentita, pirargirita, estefanita, polibasita y tetrahedrita (Referencias en De la Teja, 2000). Es común encontrar la pirita aurífera y excepcionalmente argentífera, así como la marcansita y calcopirita en pequeñas proporciones. Los minerales de mena se encuentran alojados en una matriz de ganga generalmente constituida por cuarzo, calcita y otros carbonatos. El aspecto externo de las vetas se refiere a la alteración, en donde se presenta oxidación y los minerales más comunes son hematita, limonita y óxidos de manganeso, y en menor grado fragmentos de cuarzo.

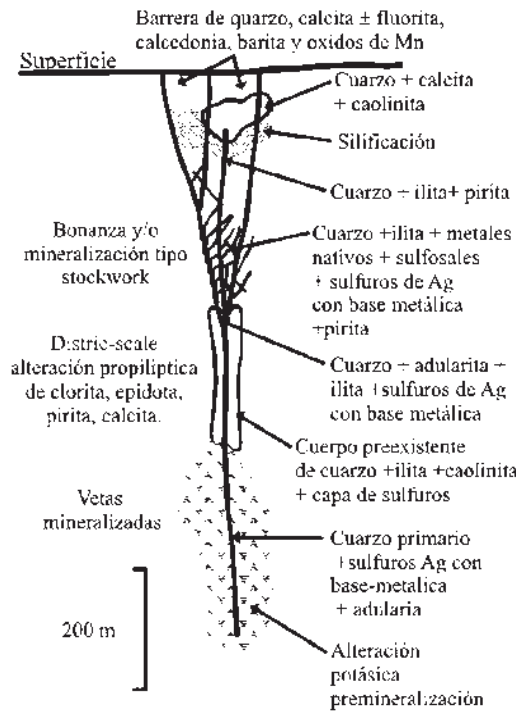
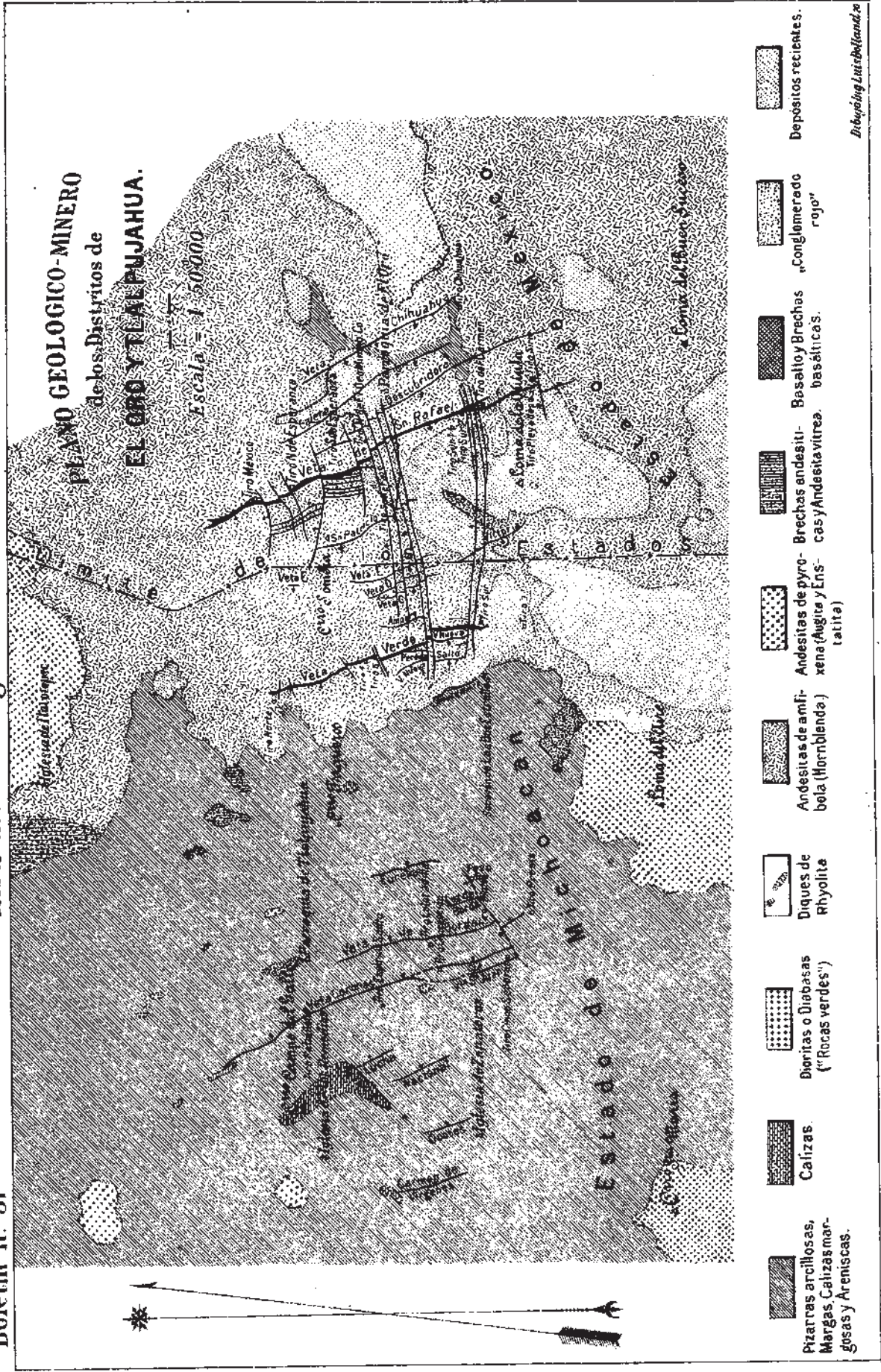


Figura 23. Que muestra un esquema ideal de un depósito de vetas tipo hidrotermal (Mosier *et al.*, 1986). Notar que las vetas hidrotermales del DMOT han sido interpretadas para de tipo epitermal de baja temperatura, es decir en la porción superior vertical del yacimiento.

Boletín nº 37 Instituto Geológico de México. Lámina I.
 Mapa geológico y minero de Teodoro Flores (1920), en el cual se observan las vetas tipo hidrotermal del DMOT.



6.2.1 Vetas del Distrito Minero Tlalpujahua

Por su importancia a continuación se presenta la distribución de las vetas del DMOT. Es importante señalar que la mayor parte de las vetas están expuestas a la superficie y por lo tanto representan junto con la distribución de las unidades litológicas, las condiciones *pre-minería* de las cuencas del DMOT. Por otro lado, se describen además las obras mineras que fueron construidas por las diferentes empresas mineras.

Veta Coronas: Se emplaza en pizarras negras arcillosas bastante bituminosa de la secuencia metasedimentaria y es controlada por las siguientes obras mineras: Tiro San Esteban, Tiro San Diego, Tiro San Sebastián, Socavón Joselino, Tiro Coloradillas y Socavón El Carmen.

Veta Borda: el cuerpo principal y sus diferentes ramales están constituidos por cuarzo. Se emplaza en pizarras y tobas finas de la secuencia metavolcánica.

Veta La Nacional: el cuerpo principal y sus diferentes ramales están constituidos por cuarzo blanco ferruginoso, pirita, los minerales argentíferos son sulfoantimoniuros y sulfoarseniuros de plata diseminados en la masa del relleno de cuarzo en pequeños ojos o en filos paralelos a los respaldos (Flores, 1920). Se emplaza en pizarras y tobas finas de la secuencia metavolcánica y metasedimentaria.

Veta Carmen de Vírgenes: la mineralización está formada en su totalidad por cuarzo lechoso a translúcido, y el mineral útil está constituido por oro nativo y sulfuros de plata (Flores op. cit). Se emplaza en pizarras bituminosas de la de la secuencia metasedimentaria.

Veta El Pirul: la mineralización se concentra al alto y bajo de la veta, la mena está constituida por argentita, proustita y oro posiblemente asociado con pirita; los minerales de ganga son el cuarzo y en menor proporción calcita. (Bravo, 1980). Se emplaza en pizarras negras que cambian gradualmente a esquistos de la secuencia metavolcánica y metasedimentaria.

Veta La Barranca: los minerales argentíferos son sulfoantimoniuros y sulfoarseniuros de plata que vienen diseminados en la masa del relleno de cuarzo en pequeños ojos o en filos paralelos a los respaldos (Flores op. cit.). Presenta oxidación y los minerales más comunes son hematita, limonita y óxidos de manganeso y en menor grado fragmentos de cuarzo. Se emplaza en pizarras negras de la secuencia metasedimentaria.

Veta Luz de Borda: es una de las vetas más antiguas. El cuerpo principal está constituido por cuarzo blando. Presenta oxidación y los minerales más comunes son hematita, limonita y

óxidos de manganeso y en menor grado fragmentos de cuarzo, está emplazada en metalutitas de la secuencia metasedimentaria.

6.2.2 Vetas del Distrito Minero El Oro

Veta San Rafael: Se emplaza en pizarras negras arcillosas bastante bituminosas. La minas labradas en ella son: México, Notan, Esperanza, El Oro, El Carmen y El Sirio

Veta La Verde: el principal mineral contenido en esta veta es el oro el cual se encuentra en mayor proporción en la zona de oxidación. Los minerales más comunes son hematita, limonita y óxidos de manganeso, y en menor grado fragmentos de cuarzo. Constituye parte del sistema de vetas Dos Estrellas y encajona en la secuencia plegada de pizarra interestratificada con lutita negra y delgados horizontes de caliza.

Veta La Descubridora: el principal metal contenido es el oro, el cual se encuentra en mayores cantidades en la zona de oxidación, la estructura es compacta y maciza. Se emplaza en pizarras negras arcillosas bastante bituminosas y encajona en la secuencia plegada de pizarra interestratificada con lutita negra y delgados horizontes de caliza.

Veta San Patricio: veta de cuarzo el principal metal contenido en esta veta es el oro el cual se encuentra en mayores cantidades en la zona de oxidación. Encajona en la secuencia plegada de pizarra interestratificada con lutita negra y delgados horizontes de caliza.

Veta La Victoria y Veta Chihuahua la mena la constituyen sulfuros de plata y galena, la ganga la conforman cuarzo blanco lechoso con intercalaciones de calcita y principal metal contenido en esta veta es el oro, el cual se encuentra en mayores cantidades en la zona de oxidación. Se emplaza en metalutitas de forma tabular de la secuencia metasedimentaria pelítico-arcillosa.

CAPÍTULO 7

LA HISTORIA DE EXTRACCIÓN MINERA Y LOS PROCESOS DE BENEFICIO PRACTICADOS EN EL DMOT

7.1 Historia de extracción minera en el DMOT

Cada distrito minero ha aplicado diferentes métodos de extracción y beneficio, desarrollando una historia propia y podría decirse independiente, el impacto ambiental que cada uno genera a través del tiempo (historia de extracción) difiere por tanto de los demás, por lo que es necesario considerar cada distrito minero como un caso de estudio particular.

La importancia que tiene la historia de extracción de un distrito minero radica en la cantidad de mineral extraído además de los métodos de beneficio practicados, puesto que tienen gran influencia en las condiciones geoquímicas posteriores a la extracción. En éste capítulo se presenta un recuento histórico de la actividad minera en el DMOT, con el objeto de identificar la intensidad de extracción y los métodos de beneficio ejercidos durante los más de cuatro siglos en que se llevó a cabo la actividad minera.

La historia de extracción en el DMOT se puede resumir en cuatro etapas: i) Prehispánica; ii) Colonial; iii) México Independiente; iv) Compañía Minera Dos Estrellas y finalmente; v) Cooperativa Minera Dos estrellas.

7.1.1 Prehispánica

La extracción de mineral en Tlalpujahua ya era practicada por los indígenas aún antes de la llegada de los españoles, según Saucedo-Ocaña (2005) antes de 1517. No existe información sobre la forma de extracción en el DMOT, algunos historiadores sugieren que al no utilizar herramientas de metal una técnica era llenar las grietas con agua que al congelarse por la noche hacía saltar la roca, una técnica muy rudimentaria que de ser practicable sólo era posible en la parte más superficial de los yacimientos minerales, es decir en las zonas de oxidación y básicamente en invierno.

Sin embargo, hay registros de otras culturas prehispánicas extraían el mineral mediante el sistema de horadación por calicatas, que practicaban un sistema de minería conocido como “Sistema de Rato” y de que la civilización Maya, conocía el principio de amalgamación por azogue. El Sistema de Rato consistía en pulverizar el mineral a mano sobre una piedra lisa y

dura, valiéndose de otra piedra, se cernía con azogue (mercurio) hasta que se obtenía una amalgama y el residuo se exprimía en una pequeña bolsa de lienzo crudo hasta que se formaba una pelotilla del tamaño de una nuez (Southworth, 1905).

7.1.2 Colonial

A la llegada de los españoles, como mencionan los historiadores, el objetivo era reunir la mayor cantidad de oro que fuese posible, por lo que echaron mano de los tesoros de los indígenas, y como indica Uribe (2006), una vez agotados los lavaderos de los ríos se inicia la búsqueda de yacimientos metalíferos. El primer gran circuito minero en la Nueva España lo integraron: Taxco, Zacualpan, Sultepec, Zumpango del Río, Temascaltepec, Espíritu Santo y **Tlalpujahuá** entre 1530-1532 conformando la denominada Provincia de la Plata, (Cue-Canóvas, 1982 en Saucedo, 2005).

Los primeros yacimientos argentíferos en el Distrito Minero de Tlalpujahuá de esta época fueron descubiertos en el año de 1558 denominando a la primera mina San Juan (hoy conocida como Real de Arriba). Unos años más tarde se descubre el Real de Minas de San Pedro y San Pablo de Tlalpujahuá (Saucedo-Ocaña, 2005). Este distrito alcanza una importante bonanza entre 1570 y 1610 con el descubrimiento y explotación de la *Veta Coronas*. Su explotación generó una población española que era tres veces mayor que la de Pátzcuaro y Guayangareo, ahora Morelia (Uribe-Salas, 1994 y Saucedo-Ocaña 2005). Las minas ya presentaban el problema de inundación, por lo que se utilizó el malacate para desaguarlas más que para sacar el mineral. El mineral era acarreado por los indígenas del interior de la mina con costales de manta y sacos de cuero, y de las minas a las haciendas de beneficio por animales de carga.

Después de algunos años de inactividad, la misma mina de San Juan fue reactivada por Felipe Gracia Rubio en 1655, logrando un nuevo auge y para 1689 una docena de familias españolas se convirtieron en las más ricas de la región (Uribe-Salas, 1994). De 1630 a 1733 las minas: del Monte y San Juan Real de Arriba (descubierta en Tlalpujahuá desde 1558, Saucedo-Ocaña, 2005), fueron muy productivas en oro y plata. Asimismo durante la primera mitad del siglo XVIII la *Veta Coronas* es rehabilitada por Don Sebastián de Clavería y además Don José de la Borda extrae mineral de la veta que lleva su nombre. En esta etapa no se cuenta con datos sobre la ley de Ag y Au, sin embargo según Flores (1920) de ambas vetas se obtuvieron

33,000,000 de pesos. Conviene destacar que El Distrito Minero del Oro fue descubierto hasta este periodo en 1787, año en el que se funda el pueblo (200 años más tarde que Tlalpujahua).

Finalmente la minería del distrito entra en decadencia en la segunda mitad del siglo XVIII, en parte por la guerra de la independencia, pero especialmente por problemas financieros que limitaban la construcción de tiros y socavones y por la incapacidad técnica para desaguar las antiguas minas que ya habían agotado los “ojos y clavos” más ricos y accesibles de las vetas.

En esta etapa colonial que duro tres siglos se fundaron pueblos como: San Lorenzo, San Francisco, Los Remedios, Santa María, Talcotepec y Tlalpujahuilla. Además de la actividad minera se desarrollaron otros oficios como los de: herrero, carpintero, sastre y zapatero (Uribe-Salas, 1994). El método de beneficio practicado fue el “Método de Patio” y los colonizadores obviamente nunca aceptaron el daño que este causaba a la población que se empleaba, por ejemplo Sonneschmidt (1825) escribe “*bien notorio es que el beneficio por patio no es ninguna operación dañosa para los peones que en ella se emplean*” calificando de falsa la opinión de médicos de la época que publicaron escritos en donde se decía que “*la amalgamación en la América española, era muy dañosa para los operarios*” su único argumento era el haber recorrido las minas de la Nueva España haber encontrado “*ancianos que trabajaron en las minas durante 30 años cuyos achaque provenían de otras causas*”.

7.1.3 México Independiente

Entre 1825 y 1827 las compañías inglesas *United Mexican Mining Association* y la *Tlalpujahua Company* iniciaron trabajos para limpiar y desaguar las minas principales de las vetas: *Chihuahua, San Acacio, Descubridora* y *San Rafael* en EL Oro; *Virgenes, Borda* y *Coronas* en Tlalpujahua. En esta etapa el oro se recogía aún en los arrastres por amalgamación directa, y la *plata* por el método de patio. La primera compañía en retirarse fue la Tlalpujahua Company y la *United Mexican Mining Association* que existió hasta la década de 1840.

En 1852 a 1855 la *Compañía restauradora del Mineral del Oro* inicia *algunos* trabajos en los tiros: *Pinto* y *San Cristóbal*, instalando por primera vez una bomba eléctrica para desaguar, sin resultados favorables. En el mineral de El Oro se construyó una hacienda de beneficio y en Tlalpujahua llegaron a maniobrar seis haciendas de beneficio, de las que se mencionan los nombres de El Chiminal y La Guadalupe donde se optó por combinar el antiguo sistema de patio con el de toneles por amalgamación. Los socavones que fueron abiertos en Tlalpujahua fueron:

La Casa, San Juan, Santa Isabel, El Carmen, San Cristóbal, Las Ánimas, El Boleo; y en El Oro: San Juan y La Providencia.

Después de algunas décadas, la dirección empresarial de los ingleses se presentó una problemática debida a los insostenidos gastos por azogue, pólvora, madera, herramientas, forraje para las bestias, salarios y costos de transporte mineral a las haciendas de beneficio, por lo que a finales del siglo XIX, la minería era practicada solo por pequeños mineros y gambusinos, sin una técnica de extracción.

7.1.4 Compañía Minera Dos Estrellas



Figura 25. Acta Constitutiva de la Compañía Minera Las Dos Estrellas.

Los españoles habían detenido sus trabajos mineros en la capa andesítica del Cerro Somera, sin saber que precisamente debajo de esta se descubrirían los yacimientos más ricos a fines de la década de 1890, cuando el francés Francisco J. Fournier, ingeniero de minas identificó por medio de algunos elementos geológicos la continuación del sistema de vetas del mineral de El Oro (la *Veta San Rafael*). A partir de ese momento Fournier buscó inversionistas en México y Europa, logrando constituir legalmente, con un fuerte capital francés La Compañía Minera Las Dos Estrellas en diciembre de 1889 (Figura 25).

Años después, en 1900, fueron cortadas por primera vez en el mineral de El Oro la *Veta Negra* y en Tlalpujahua la *Veta Verde* y la *Veta Nueva*, lo cual representaba la mayor bonanza de esta empresa que entre 1907 y 1912 obtuvo fácilmente grandes volúmenes con leyes elevadas de oro y plata, lo que sumado con la demanda mundial de oro, sus acciones aumentaron de valor rápidamente, incrementando las ganancias que invirtió en la instalación de nuevo equipo con tecnología de punta.

A partir de 1912, ya con una empresa económicamente estable y con el problema del desagüe resuelto, se emprenden trabajos de exploración y explotación a grande escala en otras vetas como: *Coronas* y *Borda*, suceso que vinculado con la introducción del proceso de cianuración y las nuevas políticas mineras produjeron las más grandes bonanza (Flores, 1920; Uribe-Salas, 2006).

Después de 1914-1916 el objetivo de la empresa era maximizar ganancias y reducir pérdidas, por lo que se puso en práctica el sistema de beneficio por cianuración que disminuía costos y tiempos de producción, construyéndose en Tlalpujahua la Hacienda de Beneficio Numero 1 (HBN^o1)⁵ y más tarde con el rápido aumento de producción se construye la Hacienda de Beneficio Número 2 (HBN^o2) o El Cedro (Tabla 6).

Tabla 6. Leyes del mineral que se procesaba en las haciendas de beneficio de Las Dos Estrellas.

Haciendas de Beneficio	Ag	Au
HBN ^o 1	209.6 gr/ton	12.9 gr/ton
HBN ^o 2 (El Cedro)	197.9 gr/ton	11.29 gr/ton

Por su parte en la región de El Oro, otras tres compañías mineras: *The Oro Mining and Railways Company Ltd.*, *La Esperanza Mining Ltd.* y la *Mexican Mining of El Oro Ltd.*, todas de origen inglés, operaron con sus propias haciendas de beneficio (2 la primera, 1 la segunda y 1 la tercera), de modo que las cuatro llegaron a beneficiar 71,000 toneladas mensuales de mineral. Sin embargo con la depresión de 1928-1930, estas tres empresas inglesas se vieron obligadas a liquidar y a rematar en el mercado nacional parte de su aparato industrial, y en 1931 el molino Los Cedros de Tlalpujahua era el único del DMOT que se mantenía activo beneficiando más del 98% del mineral extraído del DMOT (Uribe-Salas, 2006). De 1900 a 1937, la empresa Dos Estrellas logró extraer un total de 17,520,343 toneladas de mineral, mismas que fueron beneficiados y de las que se extrajeron 1,369,718 kilos de plata y 107,818 kilos de oro. Lo que indica que se generaron 17,518,865 toneladas de jales (Tabla 7).

⁵ La HBN^o1 operó de 1902 a 1920 posteriormente los trabajos de beneficio se concentraron únicamente en El Cedro.

Tabla 7. Extracción de Au y Ag de 1900-1937, tomado de Uribe-Salas 2006

Año	Mineral Extraído (ton)	Plata (kilos)	Oro (kilos)	Jales (ton)	Año	Mineral Extraído (ton)	Plata (kilos)	Oro (kilos)	Jales (ton)
1900					1919	509770	45444	4000	509721
1901	22435	2000	0	22433	1920	504789	45000	3300	504741
1902	52722	4700	1000	52716	1921	503533	44888	3000	503485
1903	67305	6000	1500	67298	1922	473313	46675	2750	473264
1904	75157	6700	2000	75148	1923	493857	41966	2699	493812
1905	89740	8000	2000	89730	1924	533772	35428	2548	533734
1906	131133	11690	2321	131119	1925	665316	37024	2805	665276
1907	325309	29000	3227	325277	1926	632056	45627	2096	632008
1908	432000	28127	3075	431969	1927	752198	51132	2351	752145
1909	341111	35000	5000	341071	1928	693460	55850	2328	693402
1910	424198	47685	6530	424144	1929	693257	64461	1914	693191
1911	479723	62627	6775	479654	1930	676962	76425	2034	676884
1912	505000	63000	6000	504931	1931	593835	46447	1856	593787
1913	673053	60000	4000	672989	1932	786936	38385	1812	786896
1914	245664	21900	1000	245641	1933	821645	31702	1585	821612
1915	191820	17100	4000	191799	1934	829663	40111	2416	829620
1916	229959	20500	4300	229934	1935	777759	46339	2138	777711
1917	463655	41333	5200	463608	1936	717755	40000	2000	717713
1918	482354	43000	5000	482306	1937	628129	28452	1258	628099
					Total	17,520,343	1,369,718	107,818	17,518,865

Para 1935 la empresa entró en un periodo de decadencia, los minerales estaban agotándose y en 1937 la empresa intentó reducir sueldos, salarios y la plantilla laboral en un 90% con intención de evitar el cierre. El sindicato no aceptó y se llegó a un convenio provisional en el que se reajustaban los sueldos y salarios.



Figura 26. Recorte de periódico en donde se observan escenas del “Desastre de Tlalpujahua” de 1937.

La empresa Las Dos Estrellas se había mantenido en operación durante 40 años pero en coincidencia con este periodo de decadencia no logró superar “la catástrofe de 1937”, en la que el 7 de Mayo a las 5:20 a.m. la presa de jales se desbordó dejando escapar cerca de 30 millones de toneladas de “lamas” destruyendo los barrios El Carmen y La Cuadrilla, se perdieron cientos de vidas humanas y muchos quedaron inválidos o imposibilitados para el trabajo. La empresa también sufrió pérdidas económicas quedaron destruidos los departamentos del molino y de beneficio N°2 de El Cedro, las eléctricas, y minas activas quedaron bloqueadas, inundadas o destruidas (Figura.26). Uribe-Salas (2006) menciona que este evento fue precedido por una “lluvia persistente”.

Los reclamos no se hicieron esperar, los habitantes vecinos de Tlalpujahua que fueron afectados y los obreros de la compañía demandaron indemnización por daños y perjuicio, los primeros por la cantidad de \$ 416,722 y los segundos \$ 175,579. La compañía indemnizó a la población únicamente con \$ 50, 000, y con otro tanto a los obreros, con la condición de reconocer “que el derrumbe se debió a un caso fortuito o fuerza mayor no imputable a esta empresa” (Uribe-Salas, 2006). Para 1938 la Compañía Minera Dos Estrellas no puede sostenerse, y ante la amenaza de que los mineros pierdan su empleo y con la creciente fuerza sindical de los mineros apoyados en los cambios nacionalistas del entonces presidente Lázaro Cárdena, se forma la “Cooperativa Minera Dos Estrellas”, propiedad de los mineros.

7.1.5 La Cooperativa Minera Dos Estrellas

La Cooperativa Minera Dos Estrellas no logró nunca repuntar la tendencia de pérdidas que ya tenía la empresa francesa. A pesar de haber recibido importantes créditos financieros por parte del gobierno nacionalista de Cárdenas, con lo cual se logró incluso construir una planta de beneficio con el sistema de flotación selectivo, apropiado para beneficiar bajos valores de oro en minerales. La producción sólo tuvo un repunte en 1939, al pasar de 589,279 toneladas a 761,431 y la estabilidad lograda entre 1940 y 1943, que fluctuó entre las 761 431 y 744 709, toneladas anuales, cayó estrepitosamente a partir del bienio 1944-1945. En 1946 la producción se redujo a 800 toneladas diarias, con ley de 2.8 grs. de oro y 45 grs. de plata por tonelada (Tabla 8). Sin embargo, a pesar de la tendencia en casi diez años (1938-1946) se beneficiaron más de seis millones de toneladas de mineral, del que apenas se recuperaron 11,740.826 kilos de oro y 283, 396 kilos de plata.

En marzo de 1947 la cooperativa transfirió su administración a la Comisión de Fomento Minero y que subsistió hasta 1959, año en que se liquida (Uribe-Salas, 2006).

Tabla 8. Producción de la Cooperativa Minera de 1938 a 1946, datos de Uribe-Salas (2006).

Año	Mineral extraído	Ley media		Plata (kilos)	Oro (kilos)	Jales (ton)
		Au	Ag			
1938	589,275	2.250	58.371	34,397	1,326	589,275
1939	761,431	2.181	58.317	44,404	1,661	761,431
1940	772,083	2.228	62.218	48,037	1,720	772,083
1941	759,148	2.142	57.696	43,800	1,626	759,148
1942	759,625	2.111	53.174	40,392	1,604	759,625
1943	744,709	2.393	48.068	35,797	1,782	744,709
1944	614,713	2.976	51.699	31,780	1,829	614,713
1945	379,183	3.140	50.107	19,000	1,326	379,183
1946	266,073					266,073
Totales	6,008,296			12,739	297,607	5,646,240

De 1938 a 1946, la cooperativa minera Dos Estrellas extrajo un total de 6,008,296 toneladas de mineral, mismas que al ser beneficiadas produjeron 12,739 kilos de plata y 297,607 kilos de oro. Lo que indica que se generaron 5,646,240 toneladas de jales. En total, de 1900 a 1946, se tendrían **23,165,105** toneladas de jales.

CAPÍTULO 8 METODOLOGÍA

En este trabajo se aplicó una metodología integral basada en términos conceptuales de impacto ambiental producido por residuos mineros, geomorfología-geoquímica ambiental y sistemas de información geográfica. El trabajo se realizó en 12 etapas:

A) Recopilación bibliográfica, obtención y selección de datos de carácter físico (topográfica, fotos aéreas, ortofotos y geología), relacionado a la delimitación y descripción de la cuenca del DMOT.

B) Recopilación bibliográfica acerca de la historia de la minería correspondiente al Distrito Minero El Oro-Tlalpujahuá. Considerando especialmente la localización de las obras mineras (socavones, tiros, plantas industriales, etc.), así como la información bibliográfico-cartográfica de los depósitos de los residuos mineros (jales, terreros), con la finalidad de reconocer su origen y distribución actual en el DMOT.

C) Recopilar datos bibliográficos, bases de datos y cartográfica relacionada a la caracterización climática del DMOT. Para este caso se consideran las bases de datos históricas del Servicio Meteorológico Nacional. Para la depuración de la caracterización climatológica es conveniente mencionar que se participó en la instalación de 2 estaciones meteorológicas automáticas y digitales instaladas previamente para la realización del análisis del balance hídrico del DMOT, el cual ha sido realizado por estudiantes de la Universidad de Guanajuato.

D) Elaboración de una serie de mapas preliminares temáticos y de la distribución de los residuos mineros contenidos en la cuenca del DMOT, por medio de carta topográfica, ortofotos, bases de datos y la fotointerpretación, así como la comparación con los mapas históricos de las vetas, obras y residuos mineras.

E) Verificación en campo de las unidades cartográficas de los diferentes mapas temáticos compilados y elaborados (procesados) y realización de correcciones y delimitación de la distribución de los residuos mineros del DMOT

F) Colecta de muestras representativas de los residuos mineros así como su descripción y caracterización físico-química. La Caracterización físico-química en campo de los jales aplicando la metodología de Siebe *et. al.* (1996) corregida y validada en Ramos-Arroyo (2004a) y Ramos-Arroyo *et. al.* (2004b), misma que se resume en forma breve en los siguientes pasos: **i)** Ubicación y factores ambientales del sitio: localidad, municipio, estado del tiempo, uso del suelo y vegetación, exposición y pendiente; **ii)** Características de los horizontes: en cuanto a: profundidad, espesor, textura, pedregosidad o granulometría, color, valor del pH, contenido de carbonatos, humedad actual, estructura, estabilidad de agregados, poros, profundidad y densidad de raíces.

G) Procesamiento de muestras de jales en laboratorio. Las muestras colectadas fueron colocadas en estufa para su secado a una temperatura menor de 30°C, con el fin de homogeneizarlas, fueron mezcladas por el método de cuarteo separando una porción para análisis geoquímico, una para caracterización mineralógica y una tercera como muestra-testigo. La caracterización mineralógica fue realizada por Elizabeth Montaña Cisneros asesorada por el Dr. Jasinto Robles Camacho.

H) La caracterización geoquímica de los jales del DMOT se realizó desde su preparación en Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) de la UNAM, utilizando los métodos de fluorescencia de Rayos X e ICP de Masas para la cuantificación de los contenidos de los Elementos Potencialmente Económicos (EPE) y Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT). Es conveniente precisar que los resultados obtenidos de los análisis geoquímicos para este trabajo solo han sido considerados en forma general para su comparación con los resultados de la caracterización mineralógica, con la finalidad de comprender su comportamiento físico, mecánico y químico (erodabilidad, infiltración, humedad etc.) ante los procesos exógenos actuales en la cuenca hidrográfica del DMOT.

I) Con base en la captura y reprocesamiento de los datos de análisis geoquímicos de sedimentos de arroyo realizados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), se ha pretendido evaluar la distribución de Elementos Potencialmente Económicos (EPE) y Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) en relación con el sistema de drenaje del DMOT.

J) Elaboración del mapa Geomorfológico del DMOT con la finalidad de integrar las características geológicas, reconocer su relación con la evolución del paisaje y su correspondencia con las obras mineras, los residuos mineros y la distribución de los Elementos Potencialmente Económicos (EPE) y Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT).

K) Identificación preliminar de anomalías geoquímicas e integración espacio-temporal de la base de datos y resultados cartográficos con la finalidad de realizar el diagnostico de impacto ambiental del DMOT.

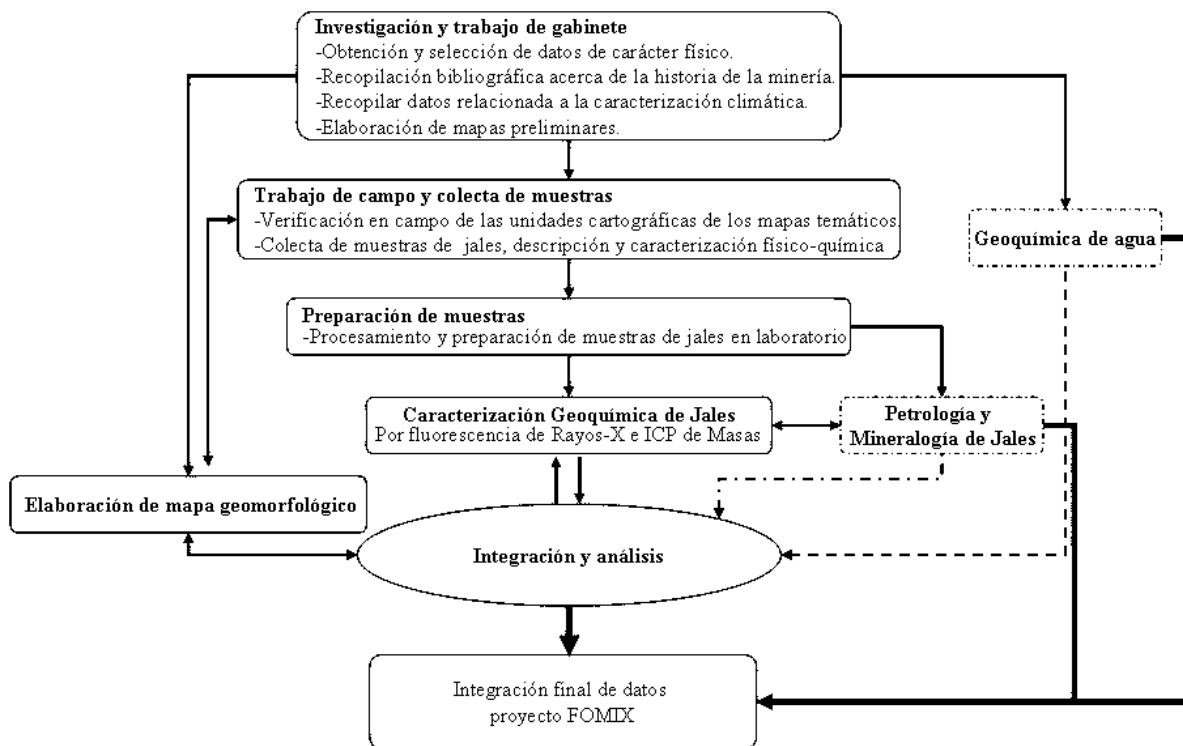


Figura 27. Diagrama metodológico

CAPÍTULO 9 RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos, para cada punto, se realiza a manera de introducción, la forma en que se llega a los resultados presentados. En este trabajo, que han sido divididos en cinco partes:

- i) En la primera parte se presenta la caracterización físico-geográfica del DMOT: altimetría, pendiente del terreno, condiciones climáticas, caracterización hidrográficas, y cobertura y uso del suelo;
- ii) Los resultados de la investigación histórico-cartográfica de las obras mineras y residuos mineros del DMOT;
- iii) Los resultados de la caracterización físico-geoquímica de las muestras colectadas en campo
- iv) Los resultados del procesamiento geoquímico de las muestras de jales en laboratorio y un resumen de la caracterización mineralógica
- v) El procesamiento de los datos geoquímicos de sedimentos de arroyo.

Los resultados de la investigación histórico-cartográfica han sido conformados por medio de un conjunto de bases de datos históricos, estadísticos-geográficos y documentos considerados de mayor aporte sobre las condiciones actuales del medio ambiente del DMOT. Se integran intercalados en el texto de este apartado y en la discusión, diversos mapas históricos y nuevos, editados con información valiosa para cualquier toma de decisiones futuras en relación al medio ambiente del DMOT.

El conjunto de mapas del presente trabajo fueron elaborados con base en los siguientes metadatos.

Proyección cartográfica: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona: 14 Hemisferio Norte (-102°W -96°W)
Longitud del meridiano central: -99
Latitud del origen de la proyección: 0
Falso este: 500000
Falso norte: 0
Unidades de distancias planas: metros
Nombre del datum horizontal: WGS84 (World Geodetic System 1984)
Semieje Mayor a: 6 378 137 m

Semieje Menor b: 6 356 752.3142 m

Achatamiento f: 1/298.257223563

Fuentes: cartas topográficas 1:50,000 y datos vectoriales, claves E14a16 y E14A26 (INEGI, 1987), las ortofotos E14A16E, E14A16F y E1426B (INEGI, 1994); las fotografías aéreas 1:25,000 (INEGI, 1990) y además las imágenes de satélite en línea de *Google Earth* (2006).

9.1 Caracterización física de la cuenca hidrográfica del DMOT

Desde un punto de vista hidrográfico el DMOT pertenece a la región hidrológica Número 12 Lerma-Santiago en la subcuenca “Río Tlalpujahuá” delimitada previamente por Bocco (1986a), para obtener un mayor detalle y eficacia en el estudio hidrográfico la subcuenca “Río Tlalpujahuá”. Con base en las cartas topográficas hojas E14A16 y E14A26, ortofotos y fotografías aéreas, se ha subdividido en 16 microcuencas, dos de las cuales acogen el DMOT y a las que se asignaron los nombres de “El Carmen” y “El Ocotál”. Se aplicaron técnicas de fotointerpretación para lograr mayor detalle en ambas microcuencas, por lo que se subdividieron en pétalos obteniéndose un total de 29.

9.1.1 Mapa altimétrico del DMOT

El mapa altimétrico presenta las diferentes altitudes que caracterizan el terreno así como las variaciones del relieve. El mapa altimétrico del DMOT (Figura 28) se elaboró con base en las curvas de nivel de cartas topográficas. Se proponen 12 rangos de alturas utilizando cotas a cada 200 m y representando las alturas del terreno dando tonos verdes a las zonas bajas y tonos grises a las zonas elevadas.

La porción de mayor altitud de la zona de estudio se encuentra al sur alcanzando 3220 msnm y las porciones más bajas se encuentran al norte. La desembocadura de El Carmen se encuentra a menor altitud que la de El Ocotál. Se puede observar que en la zona mineralizada predominan altitudes de 2600 a 3000 msnm. También se observa que en El Oro es considerablemente mayor que en Tlalpujahuá (200 m). La diferencia de altitud en ambas microcuencas es clara, El Carmen presenta una variación de casi mil metros entre el punto máximo y mínimo, mientras que El Ocotál no logra superar los 500 metros (Tabla 9).

Tabla 9. Altitud extrema de las microcuencas Río El Carmen y Río El Ocotál.

Subcuencas	Altitud máxima (msnm)	Altitud Mínima (msnm)
Río El Carmen	3220	2260
Río El Ocotál	3000	2540

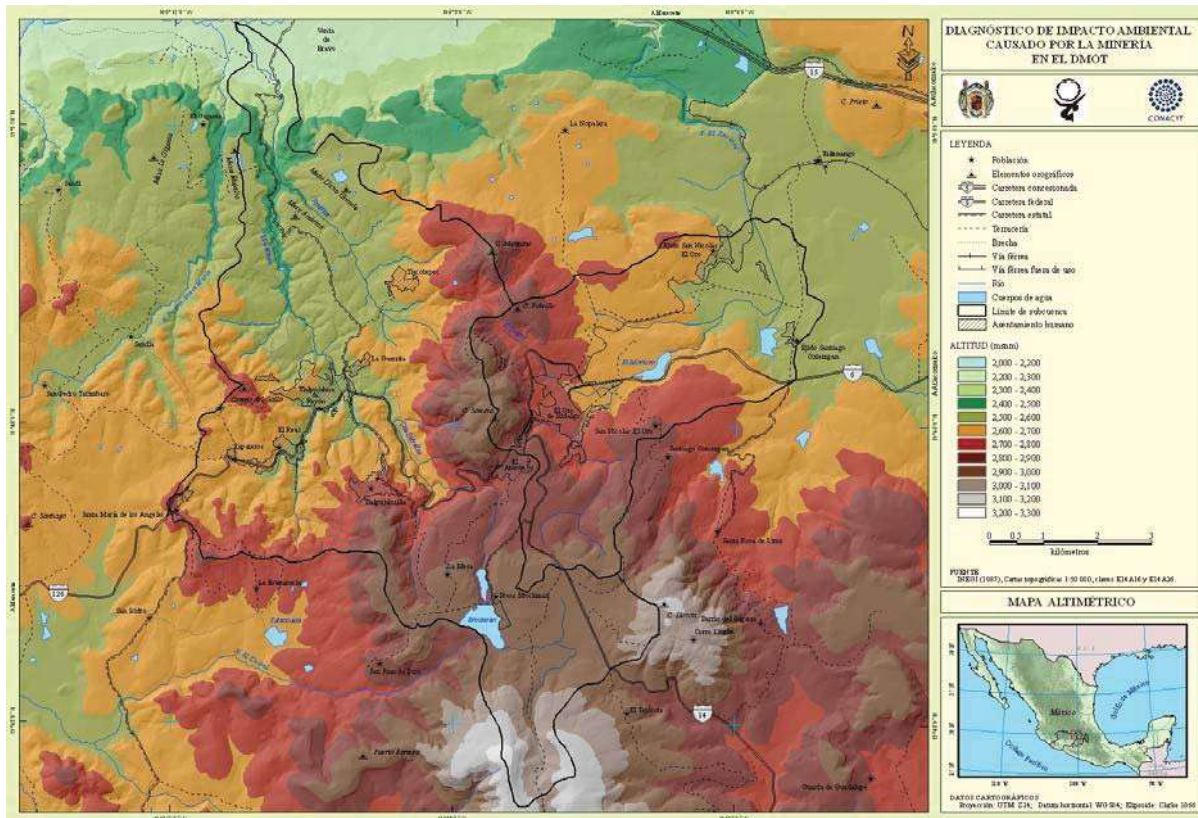


Figura28. Mapa altimétrico del DMOT.

9.1.2 Diferenciación de las pendientes del terreno en el DMOT

Un mapa de pendientes puede tener diversas aplicaciones en el análisis espacial de terreno y en el estudio de los procesos exógenos, tales como la erosión, estabilidad de terreno y la remoción en masa. Por otro lado, las fuertes pendientes suelen poner en evidencia estructuras geológicas (*e. g.* fallas, fracturas), que juegan un papel relevante en la distribución y redistribución de los residuos minero.

En el mapa de pendientes del DMOT (Figura 29) se representaron las superficies con pendiente semejante mediante colores. El valor de las pendientes se expresa en grados a partir de la horizontal calculada con la herramienta “Spatial Analyst” del programa ArcGIS 9.1, tomando como base las curvas de nivel a cada 20 metros de las cartas topográficas escala 1:50,000 claves E14A16 y E145A26 del INEGI (1987). En cuanto a su representación, se hace uso de los rangos establecidos por Bocco (1987), mismos que se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Rangos de pendiente y su correspondencia con el relieve.

Pendiente (°)	Rango de pendiente (Clase)
0-2	Plana o casi plana
2-4	Suave
4-8	Moderada
8-16	Moderadamente fuerte
16-35	Fuerte
> 35	Muy fuerte

En general el DMOT predominan de las pendientes moderadamente fuertes cubriendo el 31.7% de la superficie, en segundo lugar las moderadas con 22.8% y en tercero con 21.4% las moderadamente fuertes. Las pendientes con menor superficie cubierta son: plana con 14.1%, moderada con 8.7% y muy fuerte apenas el 1.2%.

Comparando la pendiente que presentan las subcuencas, se obtiene que en El Carmen predominan las pendientes de moderadamente fuertes a fuertes cubriendo el 63.3% de su superficie, mientras que en El Ocotil predominan pendientes de moderadas a moderadamente fuertes con una superficie de 59.5%. Las pendientes que van de planas o casi planas a suaves se encuentran mayormente distribuidas en El Ocotil con 26.6% en comparación con El Carmen donde la superficie cubierta es de 18.2 % (Tabla 11).

Tabla 11. Pendiente por subcuencas según porcentaje de superficie cubierta.

Rango de Pendientes (°)	Subcuenca El Carmen		Subcuenca El Ocotil	
	Área (m2)	Área (%)	Área (m2)	Área (%)
0-2	6,194,020	12.3	3,665,237	16.0
2-4	2,970,971	5.9	2,650,438	11.6
4-8	8,262,119	16.4	6,696,538	29.2
8-16	16,672,381	33.1	6,946,944	30.3
16-35	15,211,076	30.2	2,895,150	12.6
>35	1,020,385	2.0	80,643	0.4
Total	50,330,951	100	22,934,950	100

Las superficies escarpadas (mayores de 35°) son evidentes en las laderas del Cerro Somera, en la ladera NW del Cerro del Gallo y en las laderas de las Mesas Majalco, América y Llano Grande.

En cuanto a la relación existente entre unidades geológicas y grado de pendiente en el DMOT se observa que en aluvión predominan las pendientes planas o casi planas (65%), en basaltos las pendientes que van de moderadas a moderadamente fuertes cubren el 54%, en las andesitas las pendientes fuertes cubren el 38%, en unidades lacustres predominan las pendientes

moderadas (40%), en unidades ignimbríticas se observa un dominio de pendientes planas o casi planas (29%) seguido de pendientes moderadamente fuertes (22%), En conglomerado continental y metapelítico volcánicas se observa un amplio dominio de pendientes fuertes con 49% y 50% respectivamente, y finalmente las pendientes dominantes en las unidades: metacalcáreo pelítica, metavolcánica y calizas masivas son moderadamente fuertes con: 40%, 44% y 49% respectivamente.

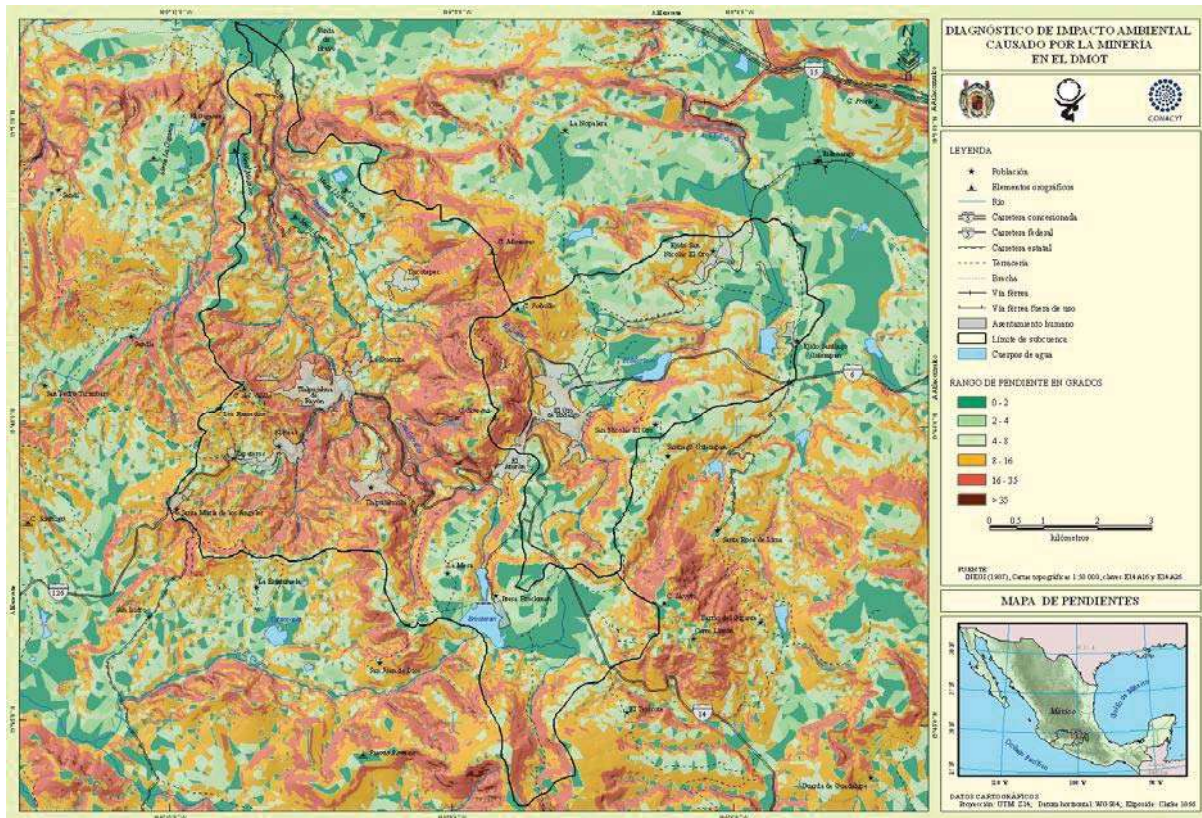


Figura 29. Mapa de pendientes del terreno del DMOT.

9.2 Caracterización hidrográfica del DMOT

Con base a métodos y técnicas cartográficas y de fotointerpretación se infirieron y digitalizaron todos los cauces del DMOT, con esta información hidrográfica detallada se definió el orden de drenaje, delimitación de pétalos, tipología de drenaje, área y perímetro de irrigación, densidad de drenaje, energía del relieve y coeficiente de torrencialidad.

9.2.1 Red y orden de drenaje del DMOT

En la nomenclatura del mapa de orden de drenaje (Figura 30) se siguieron las reglas básicas de Horton-Strahler:

- ☑ Los segmentos de primer orden no tienen tributarios.
- ☑ Cuando se unen dos segmentos de orden N , se crea una corriente de orden $N+1$.
- ☑ Cuando se unen dos corrientes de orden distinta, la corriente aguas abajo conserva el orden máximo de las corrientes que le preceden.

Considerando que en el Diagnóstico de Impacto Ambiental (DIA) se requiere un mayor nivel de detalle en la delimitación de cuencas por lo que se realizó el mapa de hidrográfico (Figura 31), el cual presenta la delimitación de 21 pétalos (o microcuencas) de la subcuenca Río El Carmen y 8 de la subcuenca del Río El Ocotál.

El orden de drenaje que presenta la subcuenca El Carmen (6° orden) es mayor que en la subcuenca El Ocotál (5° orden). En cuanto a la tipología de drenaje en la subcuenca Río El Carmen es predominantemente dendrítico-subdendrítico con excepción del P-01 que presentan una variante de drenaje anastomosado o retorcido, dicho pétalo se encuentran en la parte más alta de la subcuenca Río El Carmen. El tipo de drenaje dendrítico se caracteriza por no tener una orientación definida, las ramas que conforma la red no guardan preferencia y además presentan curvas suaves, no hay evidencia de control estructural y se desarrollan en zonas de pendientes suaves a diferencia del subdendrítico que se desarrolla en áreas en donde el curso principal fluye en una zona en la cual la pendiente y el control estructural son distintos a los de la zona por la que se desarrollan los tributarios como es el caso del P-04.

9.2.2 Forma, amplitud de relieve y coeficiente de torrencialidad por pétalos.

La forma de una cuenca es un índice de duración de los escurrimientos. Por ejemplo, en una cuenca de forma alargada el agua escurre en general por un solo cauce principal, mientras que en una forma ovalada los escurrimientos recorren cauces secundarios hasta llegar a uno principal, por el que la duración del escurrimiento es superior. Los parámetros de forma son: perímetro “P”, área de drenaje “A” y coeficiente de compacidad “K”. El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius es la relación existente entre la cuenca y el perímetro de una circunferencia con área igual a la de la misma cuenca, cuanto más cercano sea el valor a 1 la forma resultante será más redondeada y cuanto más se aleje de dicho valor será oblonga (Tabla 12).

Tabla 12. Forma de la cuenca conforme al índice de compacidad, datos tomados de FAO, (1985).

Clase	Rango	Forma
Kc1	1.00-1.25	Redonda a oval redonda
Kc2	1.26-1.50	Oval redonda a oval oblonga
Kc3	> 1.51	Oval oblonga a rectangular

Ambas microcuencas (El Carmen y El Ocotal) fueron subdivididas en veintinueve pétalos, de los cuales se calculó el coeficiente de compacidad, que además está relacionado fuertemente con el tiempo de concentración del sistema hidrológico. Se aprecia que diez pétalos con una forma general de redonda a oval (**P-03, P-06, P-07, P-09, P-10, P-11, P-12, P-13, P-20 Y P-24**), poseen tiempos de concentración cortos con gastos en ápices intensos y recesiones rápidas. Sólo dos presentan una forma que va de oval-oblonga a rectangular (**P-01 y P-21**) que poseen gastos pico atenuados y recesiones prolongadas. Los diecisiete pétalos restantes tienen una forma intermedia que va de oval a oblonga (Figura 32).

La amplitud del relieve en una cuenca hidrográfica se refiere a la diferencia máxima de alturas en una superficie determinada. Los cambios de altitud extremos pueden tener relación con movimientos geotectónicos, con la erosión o con ambos (Lugo-Hubp et. al., 1992). Asimismo, la tendencia a un gradiente alto de pendiente, corresponderá a una menor duración de concentración de las aguas de escurrimiento en la red de drenaje y afluentes al cauce principal.

En el caso del DMOT las relaciones de relieve y pendiente se han obtenido tomando la altitud máxima y la altitud mínima de cada pétalo con base en el mapa altimétrico, el resultado varía de 110 hasta 470 m de altura, los pétalos con mayor energía del relieve (más propensos a la

erosión hídrica) fueron: P-04, P-05 y P-22 y los que presentaron menor amplitud del relieve fueron: P-10, P-12, P-14, P-15, P-17, P-20, P-27 y P-29 (Figura 33).

Por su parte, el coeficiente de torrencialidad se obtuvo mediante la división del número total de cursos de primer orden de la cuenca entre la superficie, y se relaciona con la densidad de drenaje. Para obtener el coeficiente de torrencialidad se utilizó la siguiente ecuación:

$$Ct = \text{Densidad de drenaje} * \frac{\text{número de cauces de primer orden}}{\text{Superficie}}$$

Los pétalos con un coeficiente mayor de torrencialidad fueron: P-05, P-13 y P-14 (Figura 34).

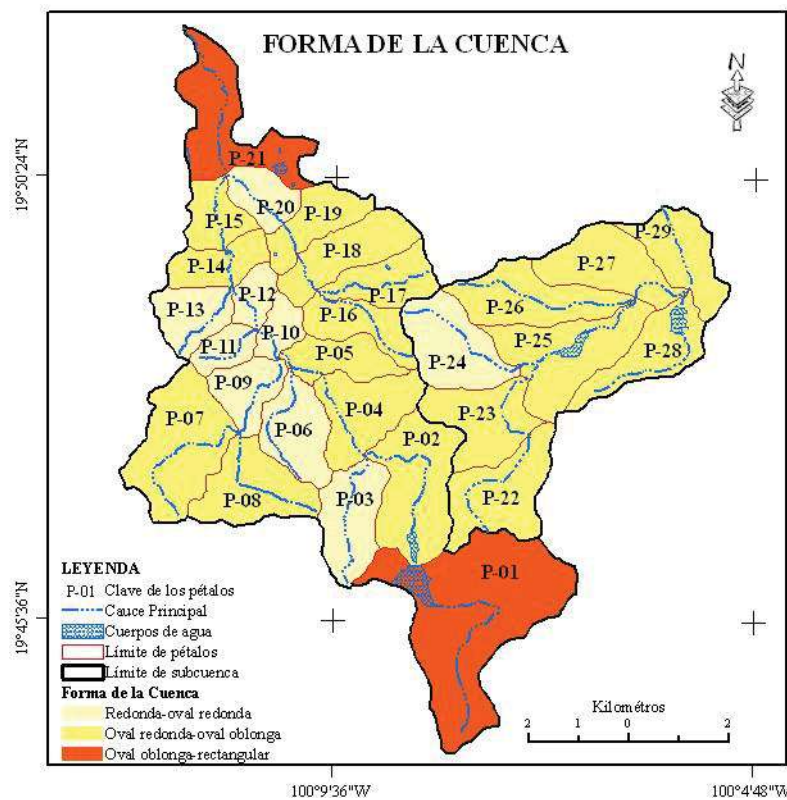


Figura 32. Forma de los pétalos calculada por el Coeficiente de Gravelius.

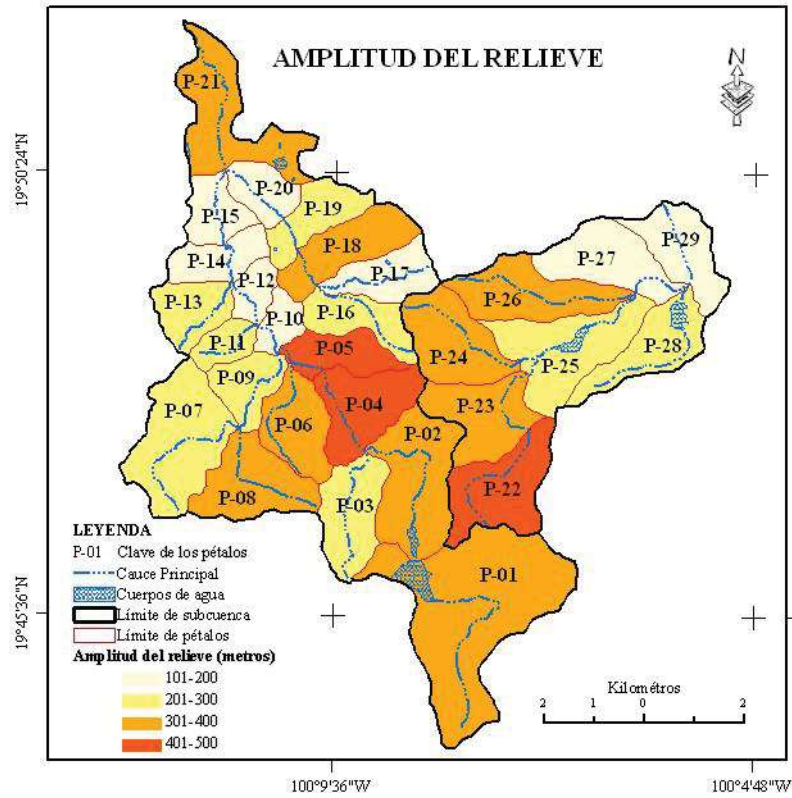


Figura 33. Mapa de amplitud de del relieve por pétalos.

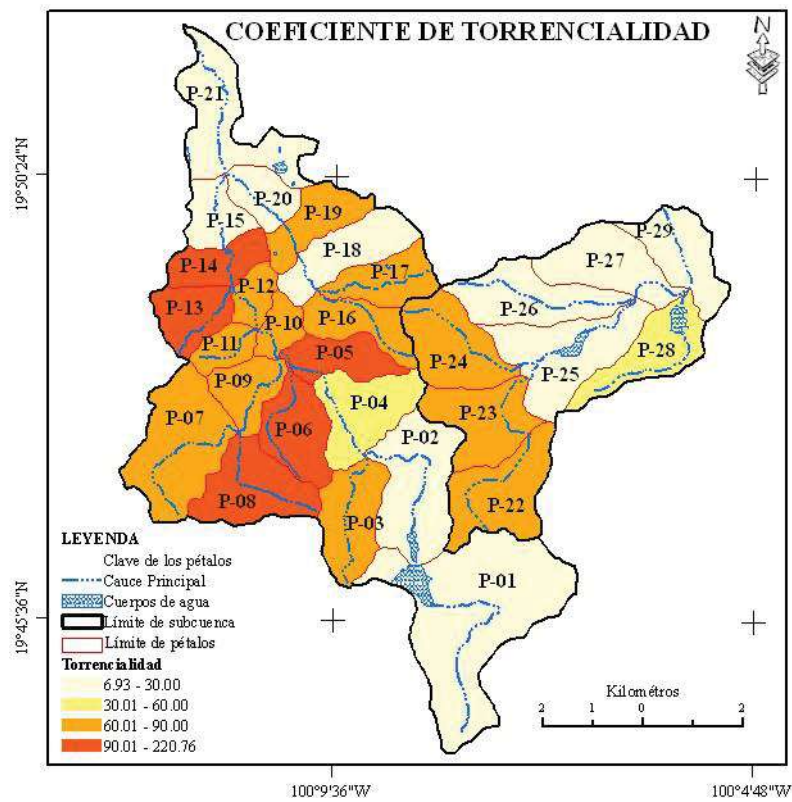


Figura 34. Coeficiente de torrencialidad por pétalos.

9.2.3 Densidad de drenaje por unidades geológicas

En principio, observa una relación directa entre las unidades geológicas y la densidad de drenaje. Las unidades metamórficas: metacalcárea pelítica, metapelítica volcánica y metavolcánica refleja una mayor susceptibilidad a la erosión fluvial puesto que su densidad de drenaje oscila entre 6.4 y 6.5 km/km², en las calizas masivas la densidad es de 5.7 km/km², en conglomerados continentales 5.0 km/km² y en andesitas 4.4 km/km². Las unidades lacustres, de aluvión, ignimbríticas y basaltos poseen menor densidad de disección 3.8, 3.6, 3.4 y 3.0 km/km² respectivamente (Tabla 13).

Tabla 13. Densidad de drenaje por unidades geológicas

Unidad Geológica	Densidad de drenaje (km/km ²).
Aluvión	3.6
Andesita	4.4
Basalto	3.0
Calizas masivas	5.7
Conglomerados continentales	5.0
Ignimbríta	3.4
Lacustre	3.8
Metacalcáreo pelítico	6.5
Metapelítico volcánico	6.4
Metavolcánico	6.4

9.3 Condiciones climáticas de la región correspondiente al DMOT

El tipo de clima del DMOT para las dos subcuencas es *Templado subhúmedo*. Para definir mejor las características meteorológicas de estos climas, se procedió a la construcción de los climogramas correspondientes, los cuales se realizaron por medio de una revisión de los datos disponible para las estaciones meteorológicas registradas por la Comisión Nacional del Agua (CNA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), así como por datos obtenidos de la instalación de dos estaciones instaladas durante el desarrollo del proyecto FOMIX del cuál forma parte esta tesis.

Para el caso de las estaciones del SMN y CNA se cuenta con datos hasta el año 2002 y, se procedió en este caso a procesar todos los datos promedio semanales y mensuales, con la finalidad de contraponer los resultados con las estaciones meteorológicas FOMIX. Sin embargo, paralela a esta tesis Martínez-Arredondo (2008), realizó un balance hídrico de Tlalpujahuá cuyos resultados serán retomados en la discusión.

9.3.1 Las estaciones meteorológicas del SMN y la CNA

En relación a las estaciones de la CNA, se encontró que únicamente cuenta con dos estaciones meteorológicas dentro de la cuenca: El Oro-15183 y Presa Brockman1-5070, (Tabla 4; Figura 23).

Ambas estaciones El Oro-15183 y la Presa Brockman-15070 reflejan una precipitación media anual abundante: 883.8 mm y 960 mm respectivamente con una distribución bastante regular. La temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre teniendo su pico máximo en julio.

En la estación de El Oro-15183 la temperatura media anual es de 11.5 °C, cuya amplitud térmica es de 7.2 (muy baja), el verano es fresco y el invierno moderado. En la estación Presa Brockman-15070 la temperatura media anual es de 11.4 °C y su amplitud térmica de 3.6 (muy baja), el verano es fresco y el invierno moderado (Figura 35).

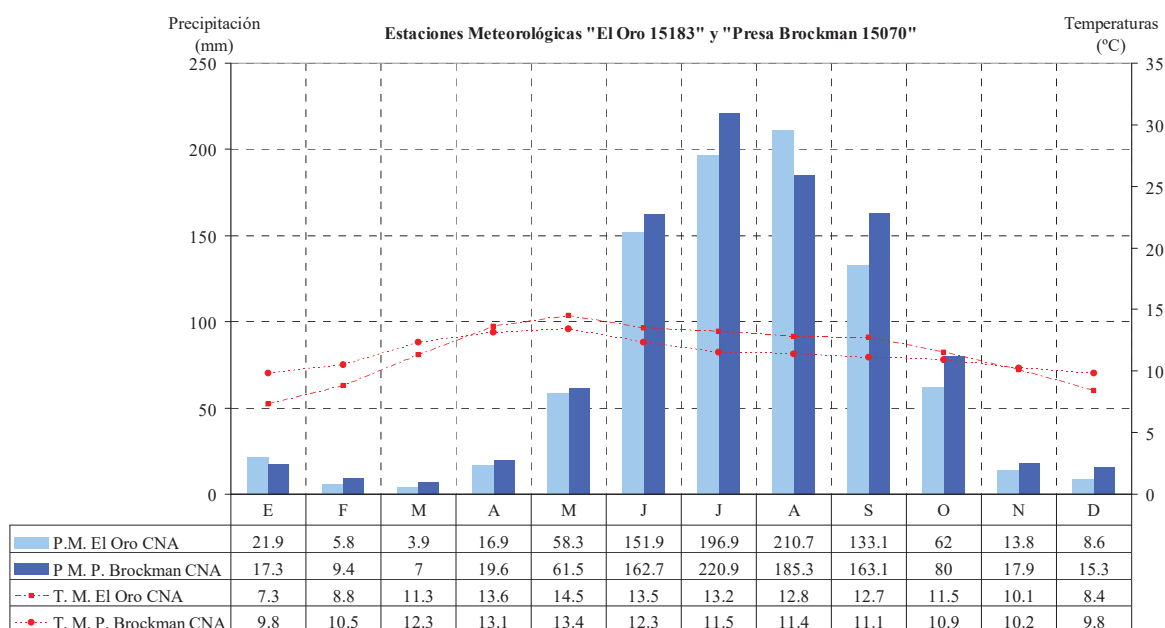


Figura 35. Climograma de las estaciones meteorológicas del SMN y la CNA.

9.3.2 Las estaciones meteorológicas FOMIX

En relación a los datos de las dos estaciones meteorológicas que fueron instaladas dentro del DMOT durante el proyecto FOMIX 2005-1-14: La Guerrita-FOMIX en Tlalpujahuá, Michoacán y El Oro-FOMIX en El Oro de Hidalgo, EdoMex. (Tabla 14)

Tabla 14. Estaciones meteorológicas de FOMIX.

Tiempo de registro	Estado	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Junio 2007 -Junio 2008	Michoacán	La Guerrita-FOMIX	19° 48' 33" N	100° 10' 04" W	2,619
Junio 2007 -Junio 2008	México	El Oro-FOMIX	19° 48' 04" N	100° 08' 07" W	2,750

Los datos de FOMIX muestran una disminución en la precipitación con respecto a los datos de la CNA y el SMN, siendo de 618.2 en El Oro-FOMIX y 608.4 en La Guerrita-FOMIX, ambas se clasifican como de escasa precipitación y de distribución regular. La temporada de lluvias es de junio a septiembre, también presentan su pico máximo en julio.

En la estación de El Oro-FOMIX la temperatura media anual fue de 16.7 °C; también presenta un aumento de amplitud térmica de hasta 5.3, el verano es fresco y el invierno moderado. En la estación La Guerrita-FOMIX la temperatura media anual es de 13.3 °C y de amplitud térmica de 6.0, el verano es fresco y el invierno moderado (Figura 36).

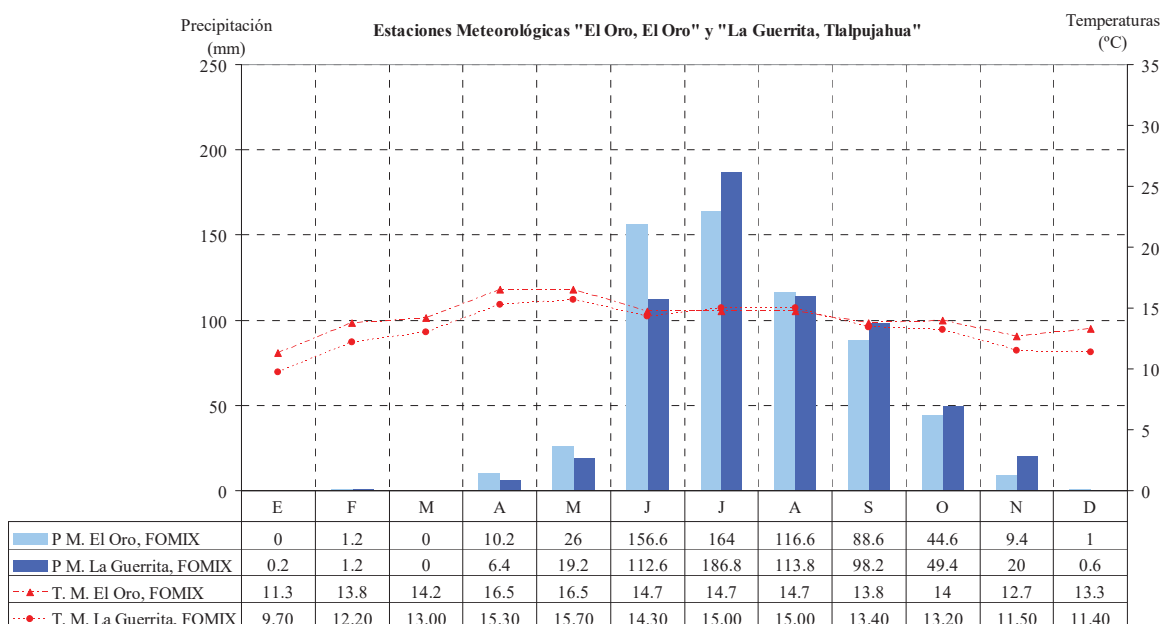


Figura 36. Climogramas de las estaciones meteorológicas FOMIX.

Al parecer el año de 1937, en que se presentó “La Catástrofe de Tlalpujahua”, se caracterizó por presentar lluvias más intensas de lo normal, sin embargo de estas fechas no existen datos meteorológicos. La estación meteorológica 15183-El Oro, El Oro es la más cercana a la presa de

Jales los Cedros y se cuentan con registros diarios desde 1972 a 2002 excepto 1988,1993 y 1994, es decir un total de veintiocho años (Tabla 15).

Tabla 15. Precipitación anual para la estación 15183 El Oro, El Oro (1972-2002).

AÑO	Precipitación anual (mm)	AÑO	Precipitación anual (mm)	AÑO	Precipitación anual (mm)
1972	979	1982	592	1995	715
1973	1,007	1983	977	1996	860
1974	977	1984	1,186	1997	554
1975	1,036	1985	1,369	1998	848
1976	1,163	1986	2,058	1999	731
1977	875	1987	462	2000	629
1978	771	1989	1,252	2001	1,019
1979	476	1990	635	2002	1,085
1980	1,062	1991	370		
1981	793	1992	1,014		

Utilizando los métodos estadísticos descriptivos se determinaron: número de clase (k) y amplitud de clase (a), para finalmente establecer los rangos cuya amplitud de clase es de 300 mm, posteriormente se construyó la tabla de distribución de frecuencias (Tabla 16).

Tabla 16. Distribución de frecuencias.

Rangos de precipitación (mm)	Frecuencia absoluta f_i	Marca de clase k	Frecuencia relativa h_i	Frecuencia acumulada F_i
1800-2100	1	1,950	0.04	1
1200-1500	2	1,350	0.07	3
900-1200	11	1,050	0.39	14
600-900	9	750	0.32	23
300-600	5	450	0.18	28
Total	28			

Conforme a los datos y procedimientos estadísticos, la Estación meteorológica 15183-El Oro tiene una media de 900, una Mediana de 34 y una moda de 904.

En la figura 37 se observa tres años sobrepasan los 1200 mm y un registro que supera los 2000 mm (en 1986), en principio se puede decir que efectivamente en la zona de estudio se presentan periodos de lluvias anómalos.

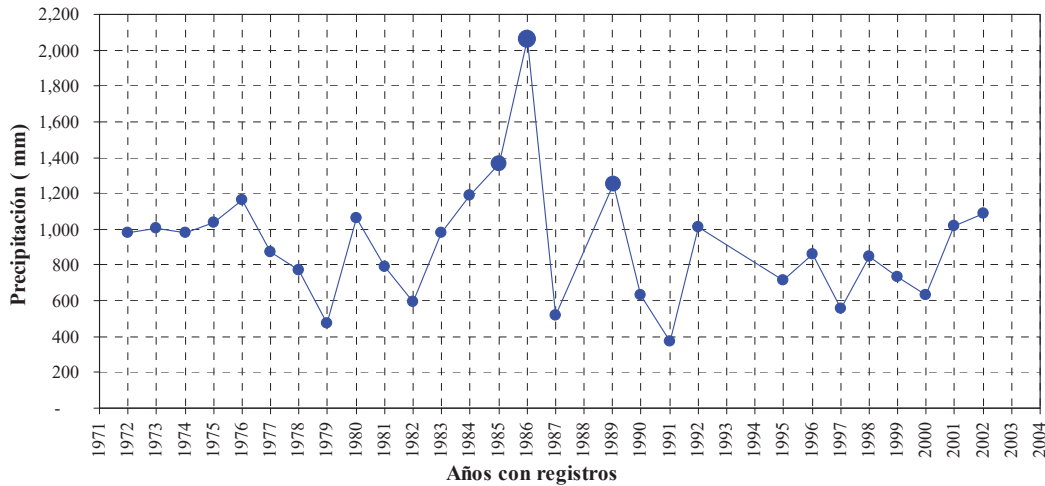


Figura 37. Precipitación anual de 1972 al 2002 de la estación meteorológica 15183-El Oro.

Para finalmente obtener el intervalo de recurrencia (**IR**) que se entiende como el tiempo de retorno de un evento con una precipitación dada. El tiempo de retorno se calculó con la siguiente formula:

$$IR = \frac{n+1}{m}$$

Donde *n* es el número de años de registro y *m* es el numero de veces que una magnitud ha sido igualada o excedida (frecuencia acumulada) por lo que se presenta la Tabla de frecuencias y tiempo de retorno (Tabla 17) en dónde se obtiene que para que se presente un año con precipitación entre 1800 y 2100 mm transcurriría un periodo de 29 años, esto por ser un evento único en el total de registros.

Tabla 17. Frecuencias y tiempo de retorno.

Rango de precipitación (mm)	Frecuencia absoluta <i>f_i</i>	Frecuencia acumulada <i>F_i</i>	Tiempo de retorno <i>IR</i>
1800-2100	1	1	29
1200-1500	2	3	10
900-1200	11	14	2
600-900	9	23	1
300-600	5	28	1

Considerando: que el derrumbe de la presa de jales Los Cedros fue en 1937 y los registros meteorológicos inician hasta 1972 y que el registro de mayor valor es en 1986, el periodo de recurrencia es de 49 años como máximo (Figura 38)



Figura 38. Línea del tiempo que muestra los con registros meteorológicos de la estación 15183-El Oro en donde se marcan el año del derrumbe de la presa de jales Los Cedros y al año en que se tiene el registro máximo de precipitación.

9.4 Cubierta y uso del suelo en el DMOT

La cobertura y uso del suelo es un elemento importante del paisaje y por consiguiente es fundamental en el DIA causado por minería. Según Ramírez-Ramírez (2001) la cubierta del suelo se refiere a la naturaleza o forma física de la superficie del terreno, que puede ser identificada visualmente en campo o a través de medios de percepción remota mientras que “uso del suelo” expresa el aprovechamiento o los fines económicos de esas cubiertas. Algunas cubiertas llevan implícito un uso como cultivos/uso agrícola a diferencia de los bosques que pueden ser de uso silvícola, recreación o conservación.

El mapa de cubierta uso del suelo del DMOT (Figura 39) se creó sobre la base topográfica INEGI (1987) escala 1:50,000. Se rodalizaron las unidades aplicando técnicas de fotointerpretación haciendo uso de ortofotos, fotografías aéreas 1:25,000 y las imágenes de satélite Google Herat (2006) disponible en red. Además la delimitación cartográfica de los polígonos y definición de unidades fue respaldada con trabajos de campo durante el año 2006 .

En el mapa de cubierta y uso de suelo del DMOT se definieron diez clases (Tabla 19). Las clases relacionadas a la cubierta forestal se definieron por medio de la fotointerpretación según sus condiciones apreciables del arbolado conforme al criterio utilizado en Ramírez-Ramírez (2001): i) bosques densos, formados por árboles cuyas copas se tocan; ii) bosques abiertos, árboles cuyas copas no se tocan entre si pero que cubren por lo menos 40% de la superficie, pudiendo existir una *sinusia herbácea*; iii) bosques fragmentados, aquéllos que se encuentran afectados por actividades agropecuarias al grado de quedar sólo manchones de la vegetación

forestal, distribuidos de manera homogénea sobre el terreno, a modo de mosaicos, a partir de los cuales se puede recuperar la vegetación.

En el DMOT predomina el uso agrícola con 45.6 %, del cual sólo el 3.1 % es de riego y el restante 42.5 % de temporal. La cubierta de bosque suma un 36.2 % pero sólo el 17.9 % es bosque denso y el restante 16.9 % es bosque abierto o se encuentra fragmentado. En el 1.4% de la superficie se ha practicado la reforestación con objeto de detener o disminuir los procesos de erosión del suelo, sin embargo durante el trabajo de campo se observó que dichos procesos siguen vigentes. Finalmente, la vegetación arbustiva, pastizal inducido, asentamientos humanos y cuerpos de agua cubren 6.5%, 5.9%, 4.8% y 1.1% respectivamente (Tabla 18).

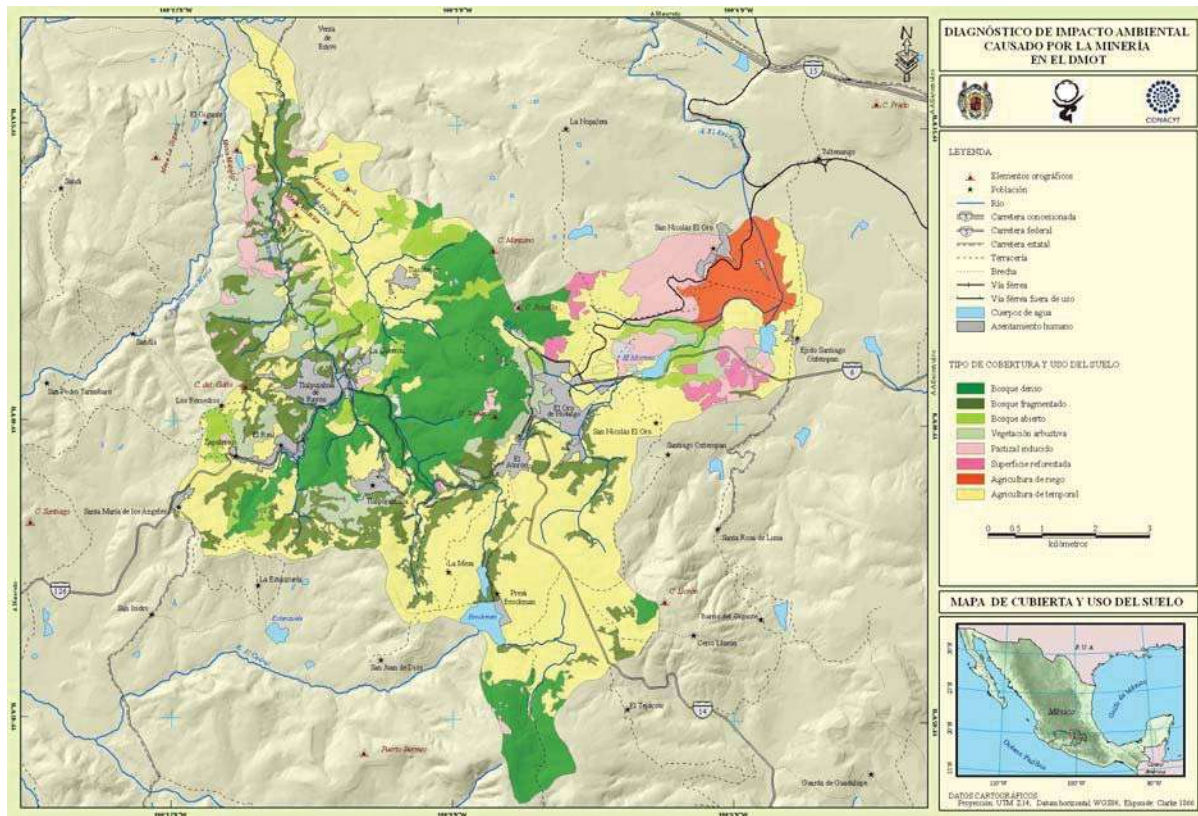


Figura 39. Mapa de cubierta y uso del suelo.

Tabla 18. Superficie de los tipos de cubierta y uso del suelo.

Tipo de cubierta y uso del suelo	Hectáreas	%
Asentamiento humano	351.7	4.8
Cuerpo de agua	77.3	1.1
Agricultura de temporal	3116.4	42.5
Agricultura de riego	227.7	3.1
Superficie reforestada	99.0	1.4
Pastizal inducido	431.8	5.9
Vegetación arbustiva	473.4	6.5
Bosque denso	1310.6	17.9
Bosque abierto	382.7	5.2
Bosque fragmentado	855.1	11.7
Total	7325.8	100.0

9.5 Cartografía histórico-minera del DMOT

La variedad de métodos de extracción y beneficio en cada distrito, según su propia historia minera, genera diferencias en tipos de impacto ambiental relacionados a las obras mineras de ingeniería (*e. g.* tiros, socavones, oficinas, plantas metalúrgicas), y la distribución de los desechos mineros a lo largo del distrito.

En los siguientes apartados 9.5.1 y 9.5.2 se presentan los resultados de una investigación cartográfica de las obras mineras y de la distribución de los residuos, respectivamente.

La revisión cartográfica se basó en la consulta del Archivo Cartográfico-Histórico del Museo Tecnológico Dos Estrellas que consta de 266 ejemplares entre planos de pertenencias, secciones y planos geológicos en papel que corresponden al período 1905-1956 (Figura 40); la revisión de mapas geológico-históricos como los elaborados por Teodoro Flores, 1920 (Figura 41 y 42) y Elvir-Aceituno, 1955 (Figura 43); y además la revisión de mapas y planos de 39 informes técnicos del Servicio Geológico Mexicano (Figura 44). Desafortunadamente, estos planos y mapas histórico-geológicos no cuentan con una referenciación geográfica, por lo que en los casos que se consideró pertinente, fue necesario georeferenciar y escalar las imágenes (por puntos GPS conocidos y por rasgos topográficos).

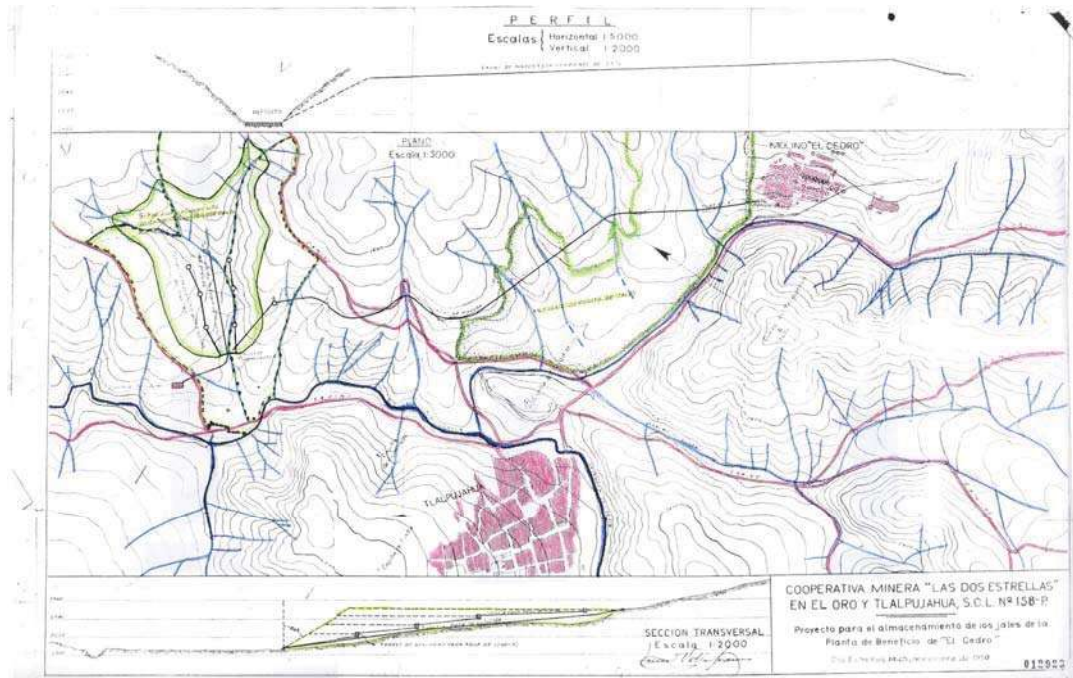


Figura 40. Proyecto para almacenamiento de las jales de la planta de beneficio de “El Cedro”, 1950, en el que se resalta en color verde las presas de jales, en azul los ríos y en rosa los caminos y poblaciones. Archivo Cartográfico-Histórico del Museo Tecnológico Dos Estrellas.

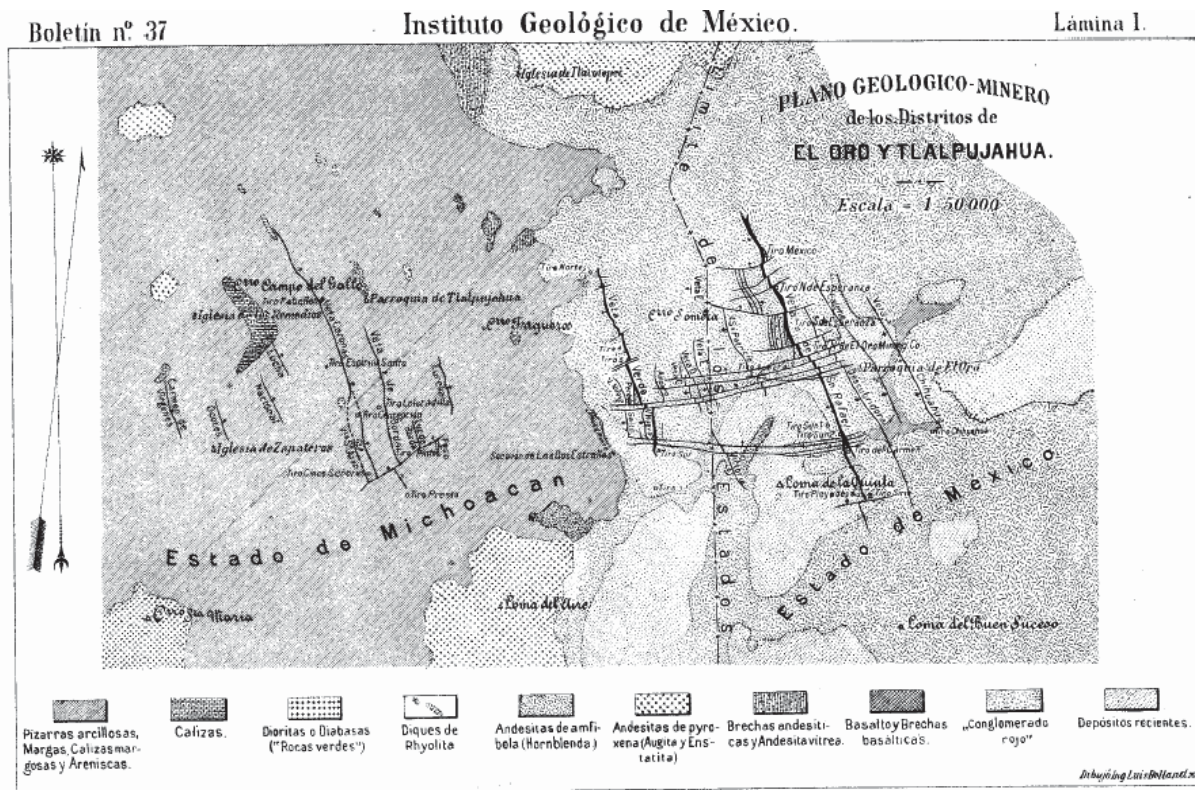


Figura 41. Plano geológico-minero de los Distritos de El Oro y Tlalpujahua (Flores, 1920).

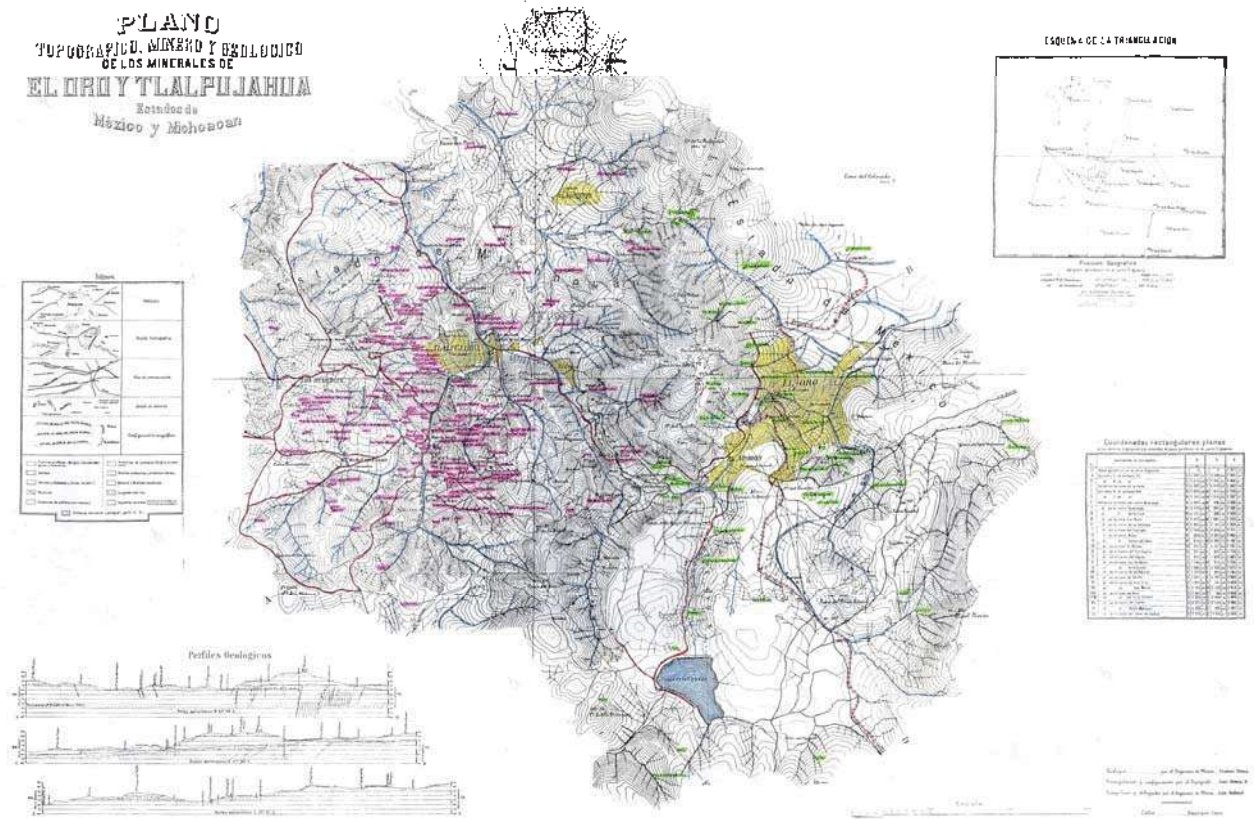


Figura 42. Plano topográfico, minero y geológico de los minerales de El Oro y Tlalpujahua (Flores, 1920). En color rosa los socavones y en verde los tiros.

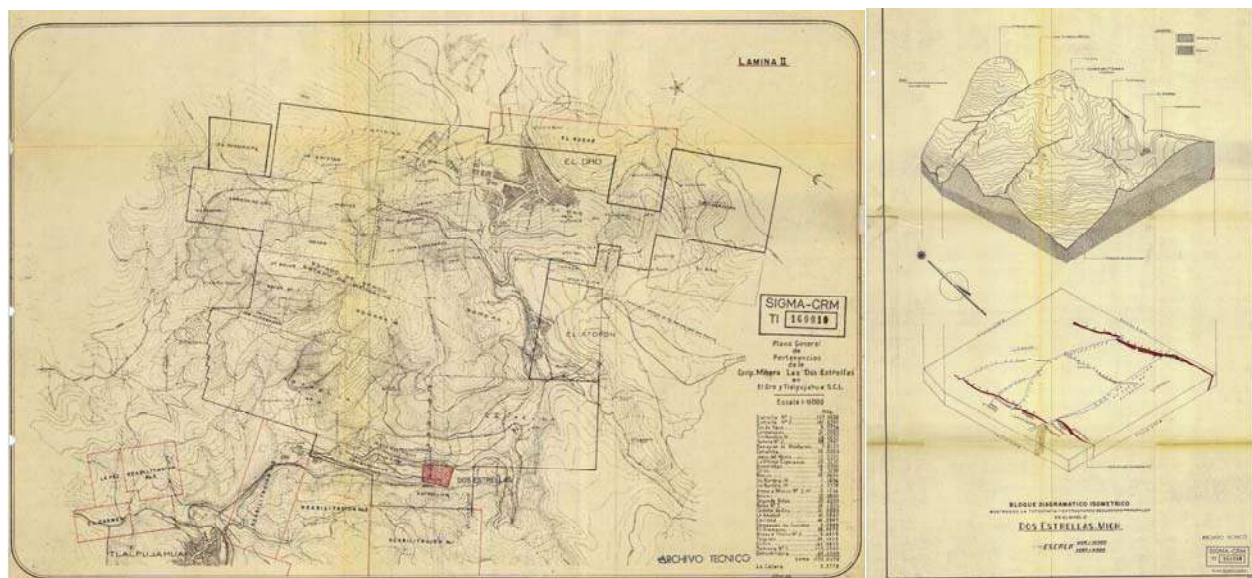


Figura 43. Plano general de pertenencias de la Cooperativa Minera Las dos Estrellas en El Oro – Tlalpujahua S. C. L. (izq.) y Bloque diagramático Isométrico Dos Estrella, Mich. (der.). Elvir-Accituno, (1955).

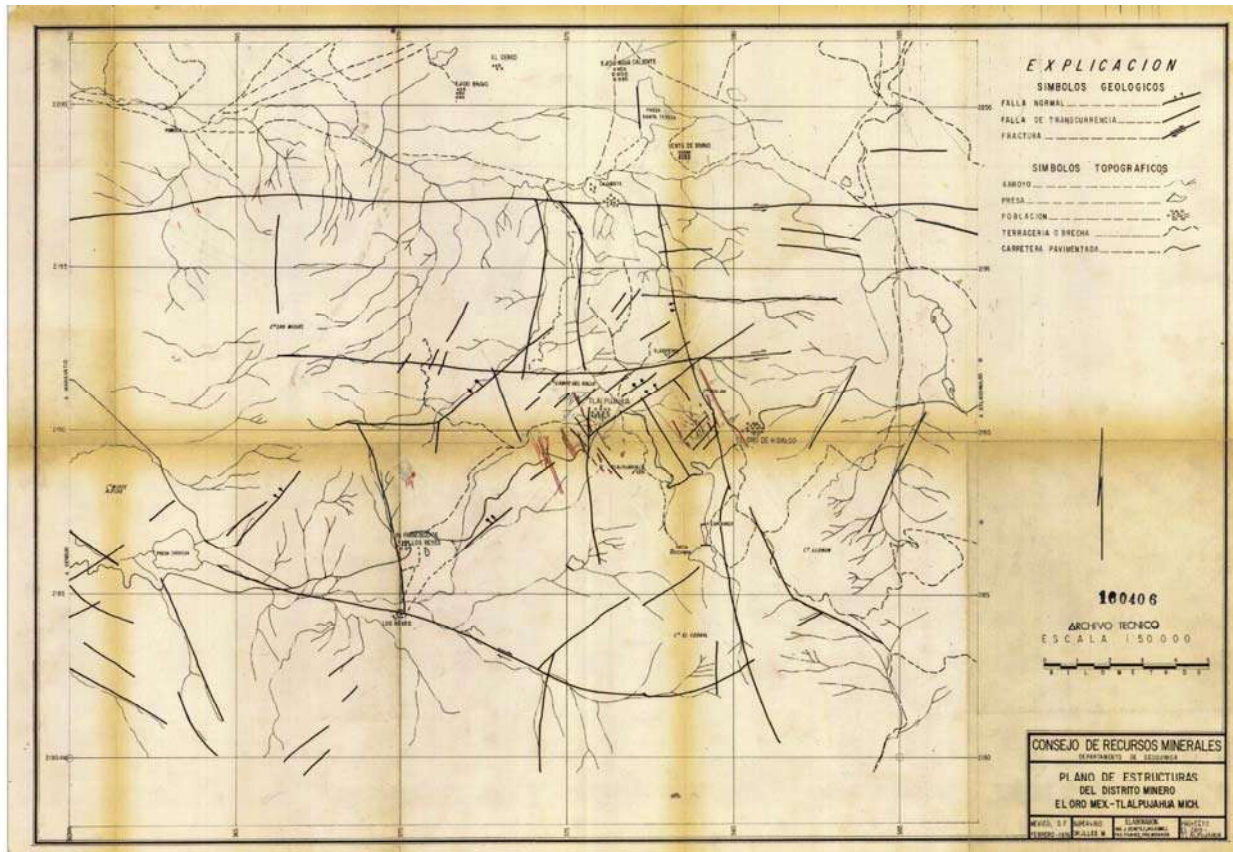


Figura 44. Plano de estructuras del DMOT (Benítez-Muro, J. A., 1976).

9.5.1 Localización y distribución de obras mineras del DMOT

La integración y comparación de la cartografía histórico-minera se realizó mediante la implementación de un SIG, que tomó como base: las cartas topográficas 1:50,000, claves E14a16 y E14A26 (INEGI, 1987), las ortofotos E14A16E, E14A16F y E1426B (INEGI, 1994); las fotografías aéreas 1:25,000 (INEGI, 1990) y además las imágenes de satélite Google Earth en línea (2006). Sucesivamente, con el uso de fotografías aéreas escala 1:25,000 (INEGI, 1990) y haciendo uso de técnicas de fotointerpretación se verificaron y detallaron rasgos geológico-mineros. Finalmente, por medio de trabajo de campo se llevó a cabo la verificación de la información obtenida de los mapas, planos históricos y de la fotointerpretación. En particular se dio atención a dos aspectos: i) la localización puntual de tiros, galerías y obras de beneficio por medio del uso de un GPS *Garmin GPS III plus*. (Figura 27) ii) límites actuales de las presas de jales y e identificación de antiguos terreros.

En la figura 45 se representa la localización y distribución de obras mineras incluyendo las estructuras de vetas de los yacimientos tanto metálicos como no metálico. En los primeros se

representan las estructuras geológicas, destacando en color rojo las vetas mineralizadas, mismas que se encuentran entre los poblados: Tlalpujahua, Los Remedios, Zapateros, Tlalpujahuilla, El Atorón, El Oro de Hidalgo y El C. Somera; así como socavones y tiros de obra minera. Por su parte los depósitos no-metálicos se han dividido en extracción de cantera (ignimbrita), grava y arena.

Como se puede observar, la concentración de tiros de mina es mayor en el cerro Somera mientras que en la zona de Tlalpujahua predominan los socavones. Esto se puede explicar debido a que la extensión de las vetas en El Oro fue identificada hasta 1898 por J. Fournier, quien dio la instrucción de explotar los niveles profundos por medio de obras costosas como los tiros. De hecho, en la porción occidental del DMOT, en la región de Tlalpujahua, las vetas están parcialmente expuestas y los socavones son la obra directa para su aprovechamiento.

Desde el punto de vista puramente descriptivo, las vetas explotadas en el DMOT se dividen espacialmente en dos grupos:

- El primer grupo se localiza al oeste del Río Dos Estrellas y lo componen las siguientes: V, Ocotes, V. Nacional, V. La Lucha, V. Coronas, V. Borda y V. Eureka.
- El segundo grupo se localiza al este del Río Dos Estrellas y esta compuesto por V. Nueva, V. Verde, V. Amparo, V. C, V. D, V. E, V. Victoria, V. San Patricio, V. San Rafael, V. Descubridora, V. Calera y V. Chihuahua.

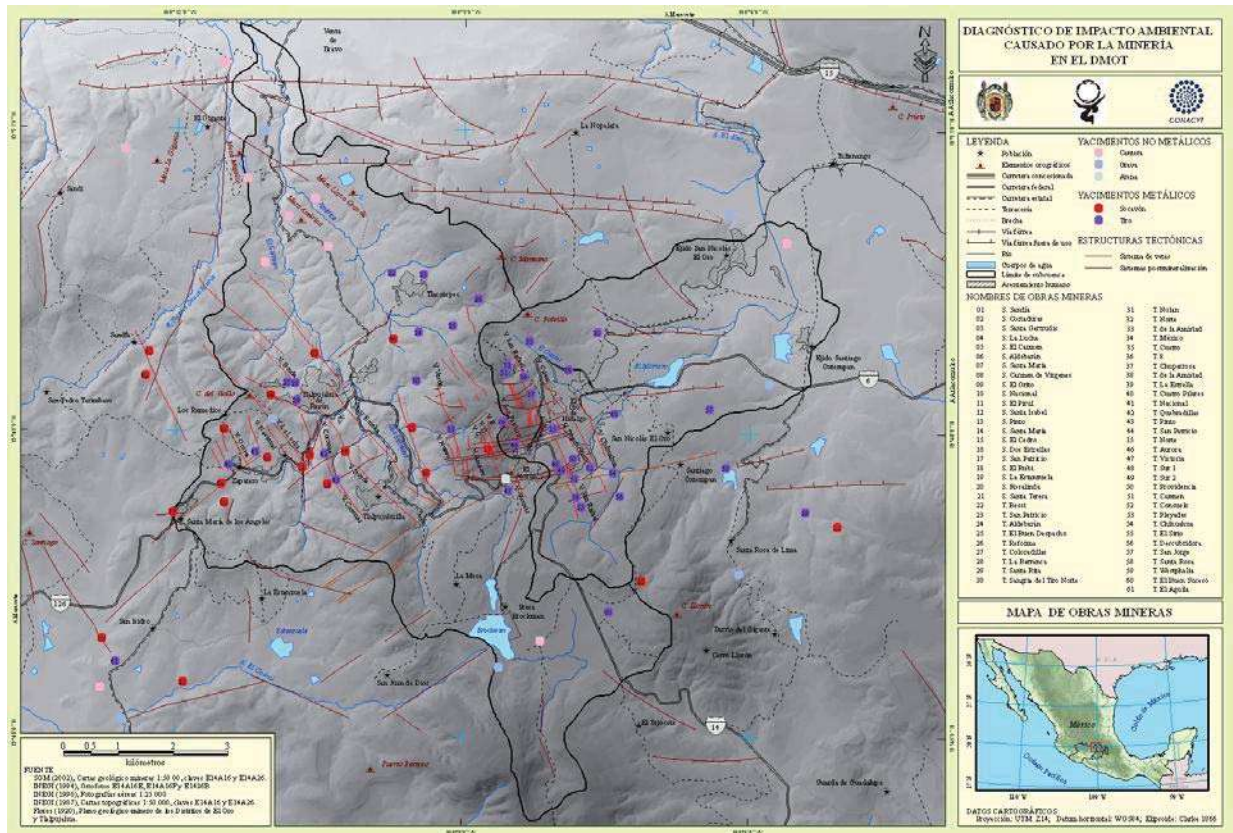


Figura 45. Mapa de localización y distribución de obras mineras.

9.6 Localización y distribución de residuos mineros

9.6.1 Historia metalúrgica del DMOT y la generación de residuos mineros

La Metalurgia es un proceso o conjunto de procesos por los cuales se extrae el metal de un mineral metálico y juega un papel importante en el presente trabajo, ya que es un factor que determina la concentración o empobrecimiento de algunos elementos, así como la redistribución de algunos elementos potencialmente tóxicos. Los procesos de beneficio que se han practicado históricamente en el DMOT son: Método de Fundición, Método de Patio o Amalgamación, y el Procedimiento de Cianuración; de los cuales se resaltan brevemente algunos aspectos que se consideran importantes.

9.6.1.1. Método de fundición

El método de fundición se practicó hasta 1554 cuando Fray Bartolomé de Medina introdujo el método de Patio o Amalgamación.

El método de fundición era apropiado para mineral nativo o sulfuro de plata que se encuentra en zonas superficiales o de oxidación, los indígenas fundían el mineral, agregando

óxido de plomo, los hornos de fundición eran de piedra o barro y el proceso duraba 24 hrs. Además no requería de grandes inversiones o infraestructura, sin embargo, un inconveniente fue el consumo de combustible dado que este método necesitaba de fuertes cantidades de madera, misma que se extraía de los bosques de los alrededores o bien aumentaba el costo de producción al traerla de fuera, causando en cualquiera de los dos casos la degradación del suelo y bosques, y en consecuencia, un fuerte impacto visual.

9.6.1.2. Método de Patio o Amalgamación (1554 a 1906)

Este método, fue el primero de importancia tecnológica e introducido en Pachuca, Hidalgo. Este utilizaba el mercurio para amalgamamiento de plata. Se requería como materia prima sal común y mercurio (por su capacidad para fusionarse con la Plata). Este proceso se puede resumir en cuatro etapas (Ramírez-Ramos, 1998).

Molienda: trituración del mineral extraído de la mina.

Amasado o incorporo: al mineral molido se le añadía agua, la sal común, pirita con cobre⁶ y el mercurio, mezclándose constantemente para dar tiempo a que la plata y el mercurio se incorporarán, tiempo que dependía directamente del mineral y el estado del tiempo.

Lavado de amalgama: en este proceso se separaba la amalgama (Ag y Hg) de la lama (jales).

Desazogado: la amalgama se filtraba para perder humedad, la masa sólida era sometida al calor, siendo el mercurio vaporizado y quedando la plata pura. Cabe mencionar que el mercurio, aunque no en su totalidad, era reciclado nuevamente mediante campanas y enfriamiento.

Con la ventaja de ser un método sencillo, puesto que no requería edificios, maquinaria o combustible y se operaba con fuerza motriz de animales, este método fue practicado hasta mediados del siglo XIX. Su principal problema era básicamente la pérdida de azogue y los gastos de forraje para los animales utilizados (Figura 46). El método fue perfeccionado por Ignas Von Börn en 1786 y es conocido ahora como “método de toneles”. El procedimiento era el siguiente, después de moler y tamizar el mineral, se sometía a altas temperaturas en hornos en donde se agregaba sal marina para descomponer los sulfuros de plata y convertir ese metal en cloruro. Posteriormente se introducía en barriles, se agregaba agua y se giraban los toneles para formar un lodo al que se agregaba hierro y azogue (mercurio); el primero para separar la plata del cloruro, y

⁶ Sulfuros de Fe y cu.

el segundo para recogerla al estado de “pella⁷”. La pella se separa de la lama por destilación (Uribe-Salas, 2006). Dicho procedimiento aunque aumentaba los costos de producción reducía el tiempo de beneficio a 24 horas, lo que anteriormente tomaba meses. Con este procedimiento también se hacía mayor la demanda de combustible.

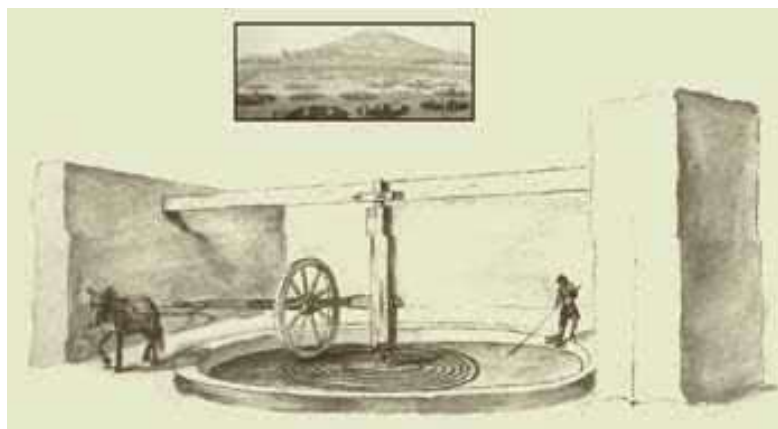


Figura 46. Dimensión real del proceso de molienda en el Método de Patio.

9.6.1.3. Procedimiento de Cianuración

El procedimiento de Cianuración de Mac Arthur Forrest fue implantado en México entre los años 1891-1895. En el Distrito de El Oro-Tlalpujahuá se aplicó hasta 1897 por la empresa minera Las Dos Estrellas, en un principio para reciclar los residuos mineros hasta que este sustituye totalmente los procedimientos de amalgamación (Flores, 1920).

Este procedimiento se aplicó luego de descubrir que el oro se disuelve en una solución de cianuro de potasio y aún cuando requiere de fuertes inversiones económicas la recuperación de Au y Ag es mayor que con el viejo método de patio y permite beneficiar minerales de baja ley (Uribe-Salas, 2005). Además de cianuro de potasio también eran requeridos: acetato de plomo, zinc, y cal.

Al introducir el procedimiento de cianuración, los jales, provenientes de la primera planta de beneficio, fueron arrojados en el curso del Río Tlalpujahuá, lo que se convirtió en un grave problema, puesto que las sustancias químicas como el cianuro, comenzaron a contaminar las tierras y a envenenar a los animales. Los campesinos y agricultores se mostraron disgustados y La Dos Estrellas comenzó a depositar y a concentrar los residuos mineros en la primera “presa de jales” para lo que se construyó un dique de madera y mampostería “para evitar su desbordamiento”, el sitio seleccionado para dicha construcción fue en una cañada conocida como

⁷ La pella es el resultado de la aglomeración del mineral finamente molido.

La Sangría, la presa cubría una superficie de 18 hectáreas alcanzando hasta 35 m sobre el nivel del río (Uribe-Salas, 2006).

9.6.1.4. Sistema Metalúrgico de Flotación

El sistema de flotación se aplicó durante la etapa que corresponde a la Cooperativa Minera Las Dos Estrellas, durante la década de los 1940 y 1950 (Elvir-Aceituno, 1955). La flotación se logra haciendo que las partículas del mineral reaccionen únicamente en su superficie con sustancias que no son afines al agua (hidrofóbicas), mientras que los materiales sin valor se unen a otros reactivos que son afines con el agua (hidrofilicos), para lograr que, con ayuda de aire y detergentes, los minerales con valor floten y el resto del material que está muy mojado se vaya al fondo.

Como se puede observar, el tiempo de operación fue muy corto y es conveniente señalar que desafortunadamente ante la quiebra de la Cooperativa, gran parte del equipo comprado con financiamiento de la Comisión de Fomento Minero, incluyendo la “innovadora” planta de flotación, fue desmantelada y rematada a bajo costo, dejando marcado el fin de la operación minera del DMOT con volúmenes industriales.

9.6.2 Cartografía histórica de los jales y residuos mineros del DMOT

De acuerdo a la crónica de extracción y beneficio de los minerales del DMOT, se puede resumir que antes del siglo XX y de la aplicación del método de cianuración, los métodos de beneficio aplicados nunca representaron volúmenes industriales, y fueron gradualmente desechados a los ríos vecinos a las haciendas de beneficio. En consecuencia, gran parte de los residuos remanentes de estas épocas se reducen a zonas de terreros. En consecuencia, es importante señalar que la acumulación de los jales en un “solo” sitio coincide con la implementación, en El Oro y Tlalpujahua de las conocidas presas de jales. Afortunadamente, durante la investigación cartográfica minera se localizó el plano general de pertenencias mineras de La Cooperativa Minera Las Dos Estrellas (Figura 47), en donde se aprecia la localización y distribución de los residuos mineros (jales) en color amarillo para el año de 1943. De hecho, considerando que la producción del DMOT estaba en decadencia, se puede considerar que este mapa representa una distribución areal, más cercana, que ocuparon los jales y terreros del DMOT.

tercerera que comunica las localidades de Tlacotepec y El Oro, El tercero en la ladera noroeste del C. Somera y el cuarto se ubica al noroeste de Tlalpujahuilla.

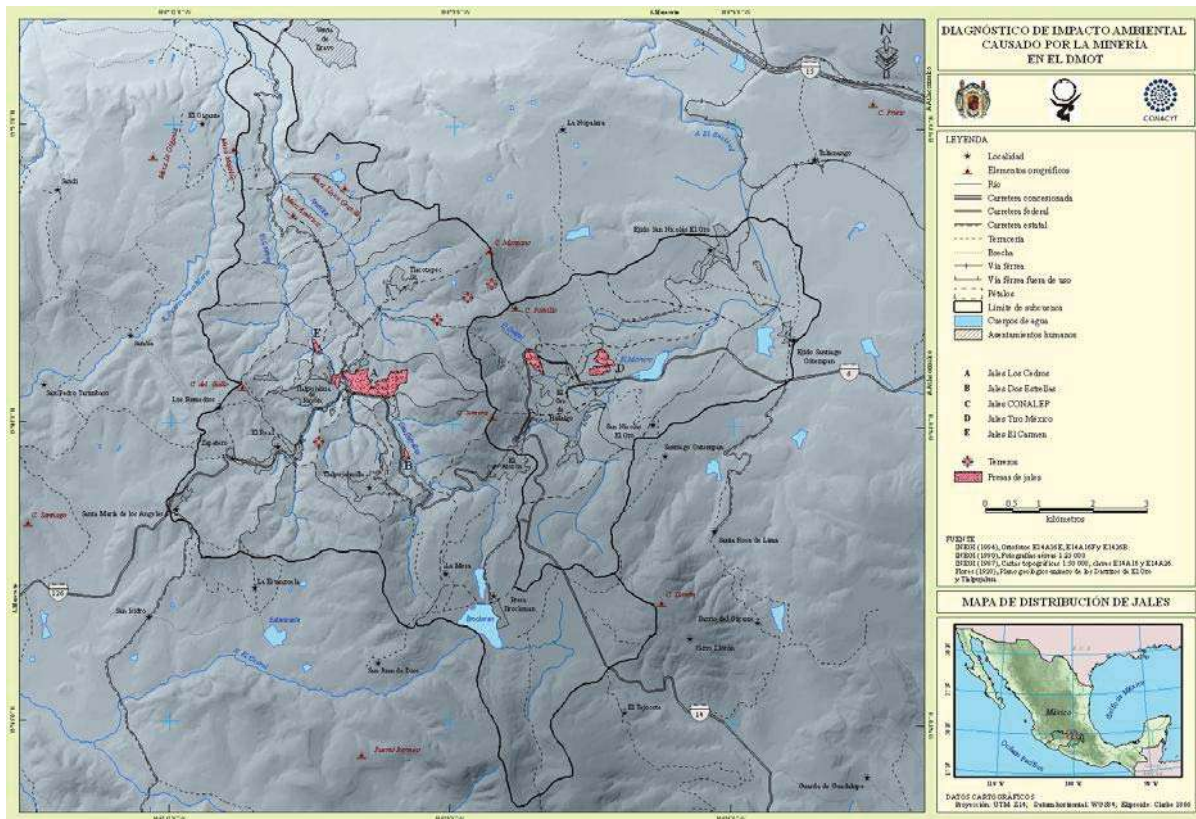


Figura 48. Mapa de Distribución de Residuos Mineros (jales y terreros).

Se delimitaron las cinco presas de jales históricas: las tres primeras denominadas Jales el Carmen, Jales Los Cedro y Jales Dos Estrellas en Tlalpujahuilla; las dos últimas llamadas Jales Tiro México y Jales CONALEP en El Oro. La de mayor superficie es la denominada “Jales Los Cedros”, presa que se caracteriza por ser la zona donde la Empresa Minera Las Dos Estrellas depositó los residuos mineros generados por la Planta de Beneficio “El Cedro”. La presa se desbordó en el año de 1937, los residuos llegaron hasta el lugar en donde se encontraba la iglesia del pueblo; a esta unidad se denominó Jales El Carmen (Tabla 19).

Tabla 19. Superficie de las presas de jales cartografiadas.

Presa de Jales	Área (m ²)	Acres	Hectárea
Jales Los Cedros	394,152.81	97.40	39.42
Jales Dos Estrellas	14,866.47	3.67	1.49
Jales Tiro México	77,682.10	19.20	7.77
Jales CONALEP	113,898.82	28.15	11.39
Jales El Carmen	22,164.02	5.48	2.22

Aunque será abordado con mayor detalle en la discusión, es conveniente señalar que aún sin cálculo o estimación alguna, es evidente la reducción de volumen y área de la distribución de los jales. Este hecho, como se verá, es de extrema importancia para evaluar la re-distribución de los elementos potencialmente tóxicos y en algunos casos de material que podría tener algunos componentes metálicos de importancia económica.

9.7 Caracterización física y mineralógica de los jales del DMOT

Una vez identificadas y cartografiadas las presas o depósitos de jales en el DMOT, se realizó un reconocimiento general de campo para definir las zonas y criterio de muestreo. El criterio general de muestreo consistió en obtener muestras representativas, con una distribución tanto vertical como horizontal en los depósitos de jales: en sentido vertical se tomaron muestras en la base, parte media y cima de las presas de jales; en sentido horizontal se establecieron puntos representativos seleccionados en campo. Estos puntos se definieron como estaciones de muestreo y en algunos casos fueron tomadas muestras aisladas, considerando una representatividad general de los jales y en algunos otros por sus relaciones en los procesos de lixiviación (Figura 49).

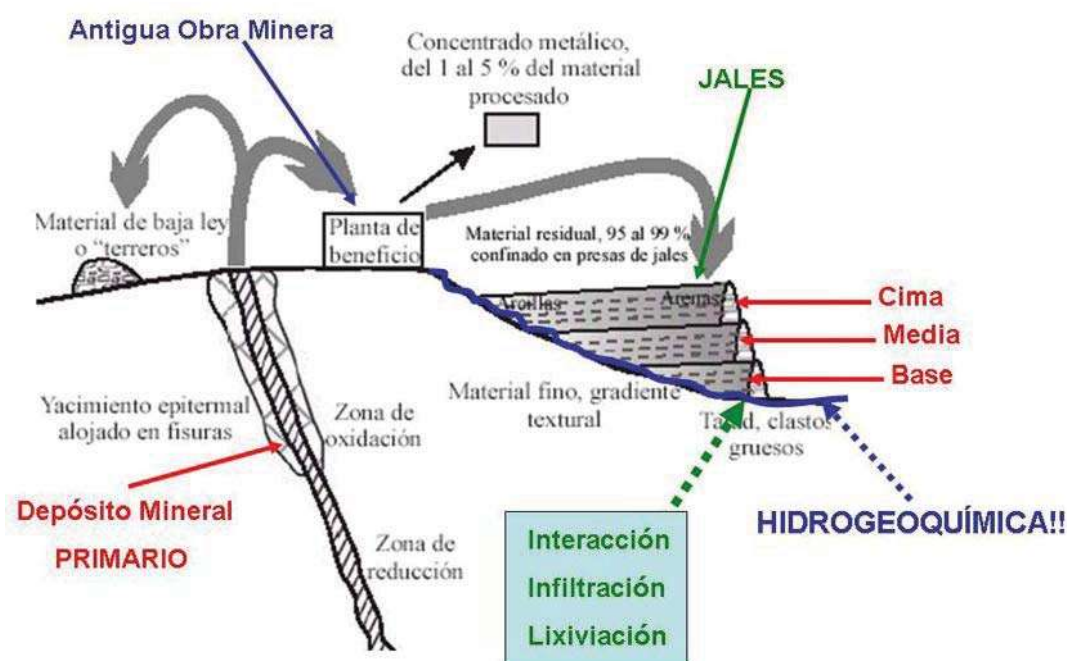


Figura 49. Esquema del muestreo de jales para su correspondiente caracterización física, mineralógica y geoquímica.

Las estaciones de muestreo fueron descritas en campo conforme la metodología establecida por Siebe *et al.* (1996), la cual fue creada originalmente para levantamientos edafológicos, sin embargo como ha sido bien señalado por (Ramos-Arroyo *et al.* 2004 y Ramos-Arroyo 2006), en este caso se considera que el comportamiento de las presas de jales puede ser analizada en forma similar al de los suelos (en horizontes). La descripción de Siebe *et al.* (1996) contempla la descripción megascópica del material (granulometría, color, plasticidad), así como la medición de las propiedades físicas (pH, conductividad, temperatura) para cada horizonte en cada estación. Una vez que se lleva a cabo la descripción se colecta una proporción de > 1 kg de muestra, con la finalidad de analizar su composición mineralógica y/o geoquímica si se considera necesario. Se describieron doce estaciones en el DMOT (Figura 50):

- En los jales de El Carmen la estación: **E4**
- En los jales Los Cedros las estaciones: **E1, E2, E3, E9, E10 y E11**
- En los jales Dos Estrellas la estación: **E12**
- En los jales CONALEP las estaciones: **E5 y E14**
- En los jales Tiro México las estaciones: **E7 y E8**

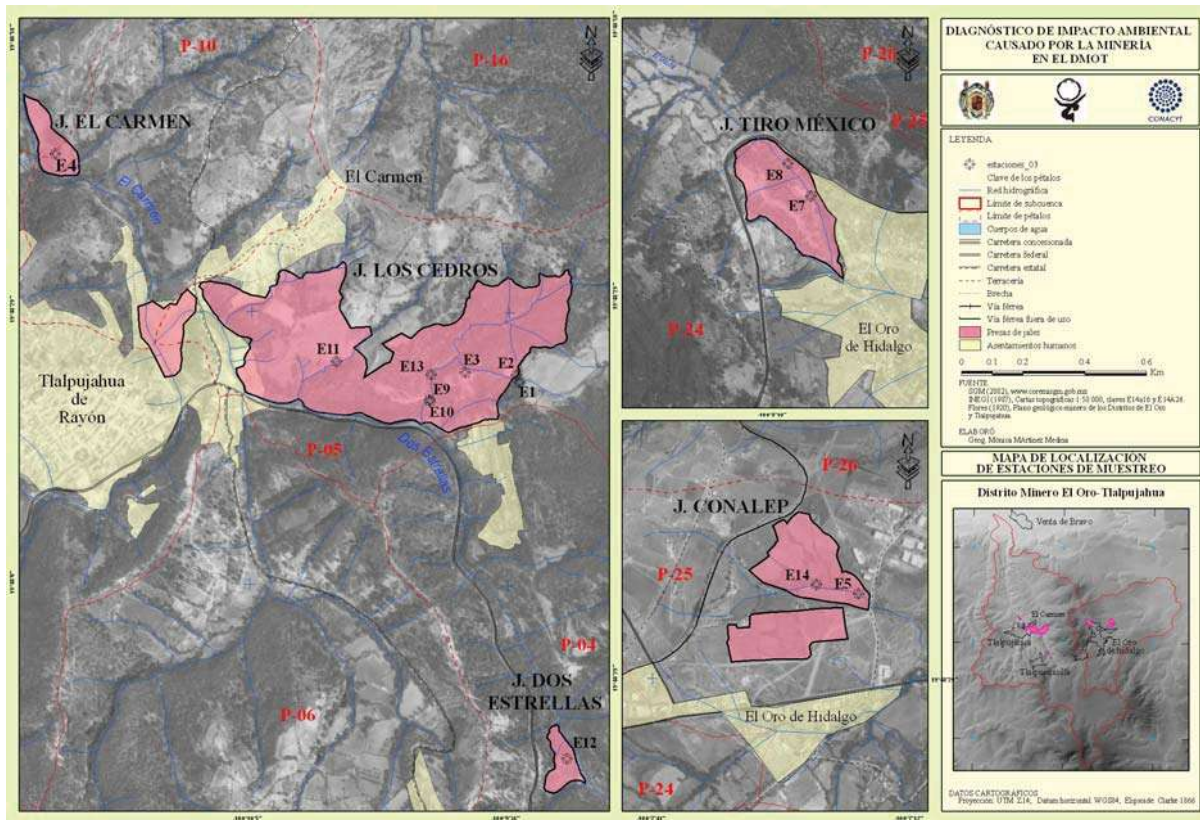
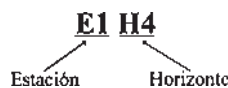


Figura 50. Mapa de la localización de las estaciones de muestreo de jales del DMOT.

En relación al nivel topográfico de los jales contenidos en las presas del DMOT es común encontrar una diferencia de altitud dentro de una misma presa por la irregularidad del relieve, del depósito original y la intensa erosión de que ha sido objeto.

A cada estación se le asignó la letra “E” y un número, a sus horizontes correspondientes la letra “H” y fueron numerados de forma consecutiva de la parte superior a la inferior.



En la figura 51 se representan las estaciones de muestreo conforme a su posición altitudinal, y profundidad a escala, además, una comparación de las texturas determinadas en campo conforme al triángulo de texturas de Schlichling y Blume (1966) modificado por Siebe *et al.* (1996). En la textura de las muestras existe diversidad a pesar de que el tamaño de grano es similar. En algunas estaciones se llega al sustrato rocoso, en este caso, se clasificaron como “sin textura”. La altitud de las estaciones de muestreo oscila entre una altura máxima de 2,732 msnm en la presa “El Oro” y 2,512 msnm, como mínima para los jales de “El Carmen”.

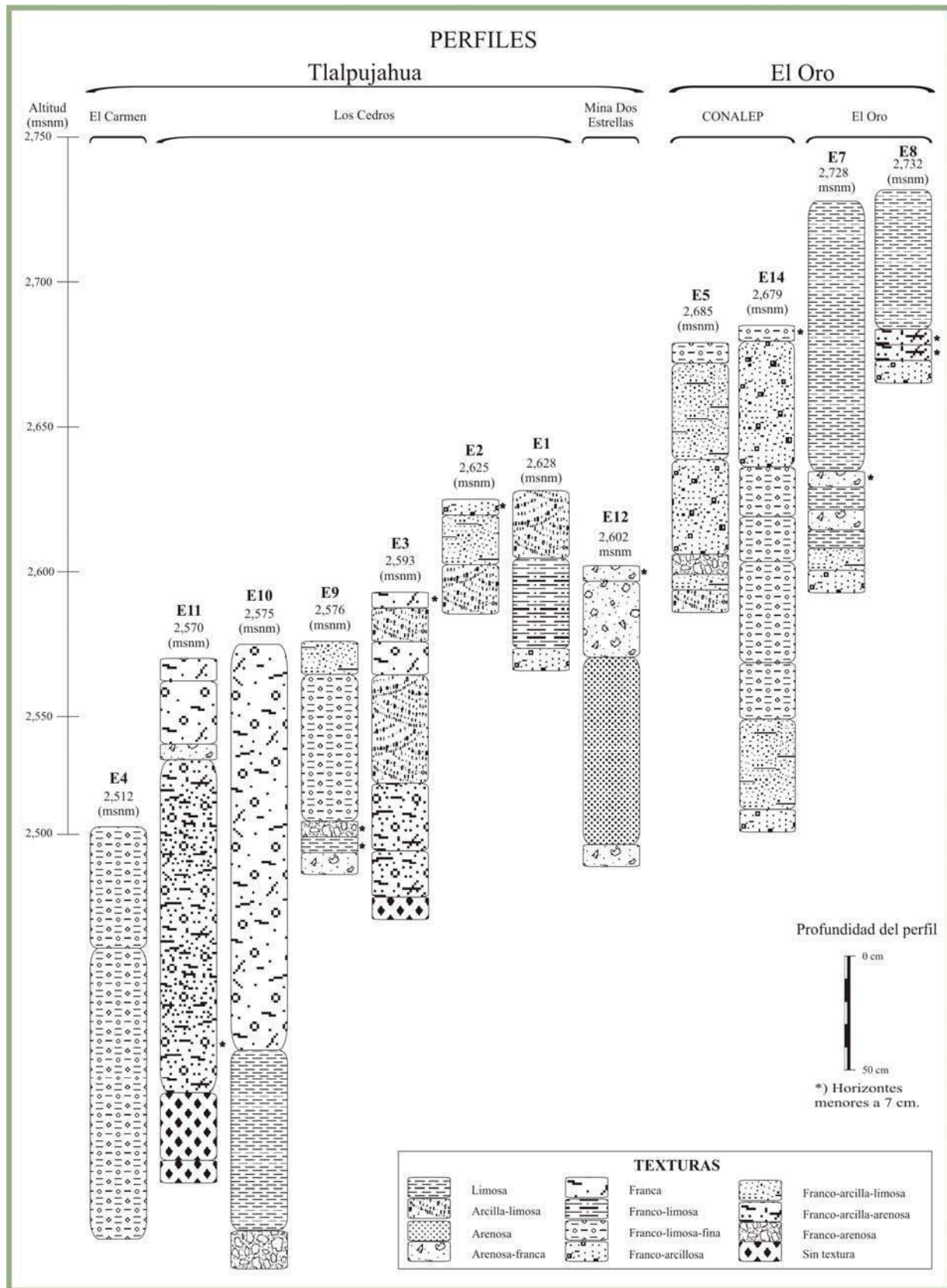


Figura 51 Estaciones de muestreo en DMOT conforme su localización altitudinal

9.7.1 Propiedades físico-químicas y mineralógicas de los jales del DMOT

En el siguiente apartado se presentan la descripción físico-química de los jales (Tabla 20), además, como se podrá observar en las figuras (52 a la 62) los resultados de los datos físico-químicos que han sido confrontados con los resultados del análisis geoquímicos en laboratorio (Corona-Chávez *et al.*, 2007; 2008), así como de su composición mineralógica (Montaño-Cisneros *et al.*, 2006; Robles-Camacho *et al.*, 2007; 2008). En este caso, es conveniente señalar que los resultados de la caracterización mineralógica y geoquímica, si bien fue realizada por estos autores, las salidas de campo y la preparación de las muestras se realizaron en forma conjunta, en cuanto los resultados generales y los de esta tesis forman parte del proyecto auspiciado por el Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología (COECYT) mediante el Convenio No. FOMIX 2005-1-14.

Tabla 20. Características físico-químicas de las muestras colectadas del distrito minero El Oro-Tlalpujahua. Donde T=temperatura en grados centígrados, CE = conductividad eléctrica y CaCO₃ es contenido de carbonatos.

Distrito Minero	Presas de Jales	Muestra	Color	T °C	pH	CE (MS)	CaCO (%)
Distrito Minero Tlalpujahua	<i>El Carmen</i>	E4H2	café oscuro grisáceo	22.4	8.52	110.0	25-50
		E4H3	café oscuro grisáceo	23.6	8.40	110.0	25-50
	<i>Los Cedros</i>	E1H1	gris oscuro rojizo	16.9	7.15	30.0	0
		E1H2	café oscuro rojizo	16.8	6.83	20.0	0
		E1H3	café	16.6	6.39	60.0	0
		E2H1	café oscuro	16.0	8.17	60.0	Moderada
		E2H2	gris oscuro	16.9	7.13	40.0	Medio
		E2H3	gris oscuro	16.0	8.32	60.0	Moderada
		E3H1	café oscuro grisáceo	27.1	8.14	100.0	25-50
		E3H2	café oscuro grisáceo	26.7	8.43	110.0	25-50
		E3H3	gris oscuro	26.4	8.40	90.0	25-50
		E3H4	amarillo pálido	28.5	5.89	2090.0	5-10
		E3H5	amarillo pálido	29.0	5.14	570.0	2-5
		E3H6	café amarillento	31.9	6.87	330.0	2-5
		E9H1	café	18.4	8.45	406.0	Alto
		E9H2	café oscuro grisáceo	18.4	8.78	166.0	Alto
		E9H3	café amarillento	18.5	8.09	197.0	muy alto
		E9H4	gris oscuro	17.6	8.49	6780.0	medio
		E9H5	café amarillento	18.6	8.05	218.0	Alto
		E10H1	café ligeramente olivo	18.5	8.29	1139.0	Alto
	E10H2	café oscuro grisáceo	19.0	8.06	113.0	Alto	
	E10H4	café oscuro grisáceo	18.0	8.04	3420.0	Alto	
	E11H1	gris muy oscuro	18.7	8.32	76.2	Alto	
	E11H2	café grisáceo	19.6	8.66	78.4	Alto	
	E11H3	gris oscuro	18.4	9.03	67.5	Alto	

Distrito Minero El Oro	Dos Estrellas	E11H4	café	19.5	8.87	1728.0	Alto	
		E11H5	café amarillento	19.7	7.40	3960.0	Bajo	
		E11H6	gris oscuro	18.8	6.71	1530.0	medio	
		E12H1	café oscuro grisáceo	18.6	7.14	35.0	Sin	
		E12H2	café oscuro amarillento	18.7	8.14	43.2	Sin	
		E12H3	café ligeramente amarillento	19.0	7.82	31.1	Alta	
		E12H4	café	20.0	7.65	50.8	media	
	Tiro México	E8H1	gris oscuro	19.0	8.54	655.0	Alta	
		E8H2	café rojizo oscuro	19.4	7.81	1937.0	muy baja	
		E8H3	gris oscuro	28.7	8.36	642.0	Alta	
		E8H4	café oscuro	18.2	5.73	5680.0	Sin	
		E7H1	gris verdoso	19.6	7.93	563.0	Alta	
		E7H2	café oscuro	19.8	8.33	750.0	Alta	
		E7H3	gris oscuro	19.9	8.46	197.0	Alta	
		E7H4	gris verdoso oscuro	19.6	7.97	378.0	Sin	
		E7H5	café muy oscuro	18.8	4.48	895.0	Sin	
		E7H6	café oscuro	19.0	6.83	342.0	Baja	
		E7H7	café oscuro	19.4	7.14	240.0	Baja	
		CONALEP	E14H1	café oscuro grisáceo	19.2	7.80	144.9	Alta
			E14H2	café	18.7	7.37	821.0	Alta
E14H3	gris oscuro		18.9	7.35	1188.0	muy alta		
E14H4	café oscuro grisáceo		19.0	7.53	1570.0	Alta		
E14H5	café oscuro grisáceo		18.8	8.24	715.0	Alta		
E14H6	gris oscuro		18.08	8.04	1025.0	Alta		
E14H7	café oscuro grisáceo		18.5	7.86	814.0	Alta		
E14H8	gris oscuro		18.1	7.95	823.0	Alta		
E5H1	gris oscuro		20.8	8.35	48.8	Alta		
E5H2	gris oscuro		18.6	8.74	89.0	media		
E5H3-A	café oscuro grisáceo		21.9	8.81	79.2	Alta		
E5H3-B	café oscuro grisáceo		21.4	8.68	101.0	Alta		
E5H3-C	gris oscuro		21.0	8.68	101.4	Alta		
E5H4	gris oscuro		21.3	8.45	108.9	Alta		
E5H5	gris olivo oscuro	18.9	8.04	765.0	Alta			
E5H6	gris muy oscuro	19.3	7.52	395.0	Baja			

La determinación cualitativa y cuantitativamente de los componentes minerales se llevó a cabo mediante láminas petrográficas, minerografía y difracción de rayos-X (Montaño-Cisneros *et al.*, 2006; Robles *et al.*, 2007; 2008). El estudio mineralógico indicó que el componente principal es el cuarzo con sus isomorfos tridimita y cristobalita [SiO₂] con valores de hasta 95 % en muestra total; la calcita como fragmentos de caliza o como lodo calcáreo [CaCO₃] también es abundante; además contienen silicatos como arcillas, micas, etc. Asimismo se determinó que los minerales opacos identificados en órdenes máximos de 2 % corresponden principalmente con pirita [FeS₂], del mismo modo de calcopirita, galena, etc. En este mismo trabajo concluyó que

existe una relación de EPE (Au y Ag) con los minerales opacos y su forma encapsulada por oro en muchos casos.

Por su parte, una porción de las muestras de jales fue enviada al Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) en la UNAM, para el análisis de elementos mayores por fluorescencia de rayos X (FRX), así como los elementos en traza fueron analizados por medio de un espectrómetro de masas con plasma inductivamente acoplado **ICP-MS**; (Corona *et al.*, 2007; 2008). Todas las muestras presentan leyes de Au y Ag potencialmente remunerable. La Ley de Au es de 0.6 a 4.4 ppm y de Ag es de 1.8 a 178.3 ppm.

En relación a los EPT, las muestras analizadas presentan valores de: 3.0 a 83.9 ppm para As; 7.4 a 808.6 ppm de Cu; de 16.5 a 317.5 ppm de Pb y de 63.8 a 548.2 ppm de Zn. Aún cuando aparentemente todos los valores de los EPT superan los valores establecidos por las normas oficiales mexicanas, no se debe olvidar que la biodisponibilidad de dichos elementos depende de otros factores que requieren de un estudio mas detallado y se sale de los alcances de esta tesis (Anexo V).

En las siguientes figuras (52 a la 62) se presentan las láminas de cada estación de muestreo con: los datos de localización, profundidad, espesor, textura, pedregosidad, color, temperatura, pH, conductividad eléctrica y carbonatos.

9.7.2 Los jales de El Carmen (E4)

Los jales denominados El Carmen cubren una superficie apenas mayor a 2 hectáreas y se encuentra dentro del municipio de Tlalpujahuá. Es el depósito de jales que posee menos altitud en todo el DMOT. Se trata de una zona donde se acumularon los jales como consecuencia del desbordamiento de la presa de jales Los Cedros ocurrido en 1937. En este movimiento los jales se mezclaron, confiriéndole al depósito cierta homogeneidad, por lo que se describió una sola estación denominada “E4”.

9.7.2.1 Propiedades físico- químicas de la Estación 4

Esta se ubica en el centro de los depósitos de El Carmen y consta de tres horizontes: El horizonte **E4H1** con espesor de 13 cm, se caracteriza por ser una delgada capa de material acarreado que cubre a los jales. Los dos horizontes restantes **E4H2** y **E4H3** con un espesor de 41 y 129 cm respectivamente, poseen propiedades físico-químicas muy similares como se puede

observar en la figura 52, la conductividad eléctrica es de 110 (MS) en ambos, y el pH disminuye ligeramente con la profundidad de 8.52 a 8.4. Se trata de un ambiente neutro-alcálico donde el Pb tiene una movilidad baja y elementos como Au, Cu y Zn tienen movilidad muy baja.

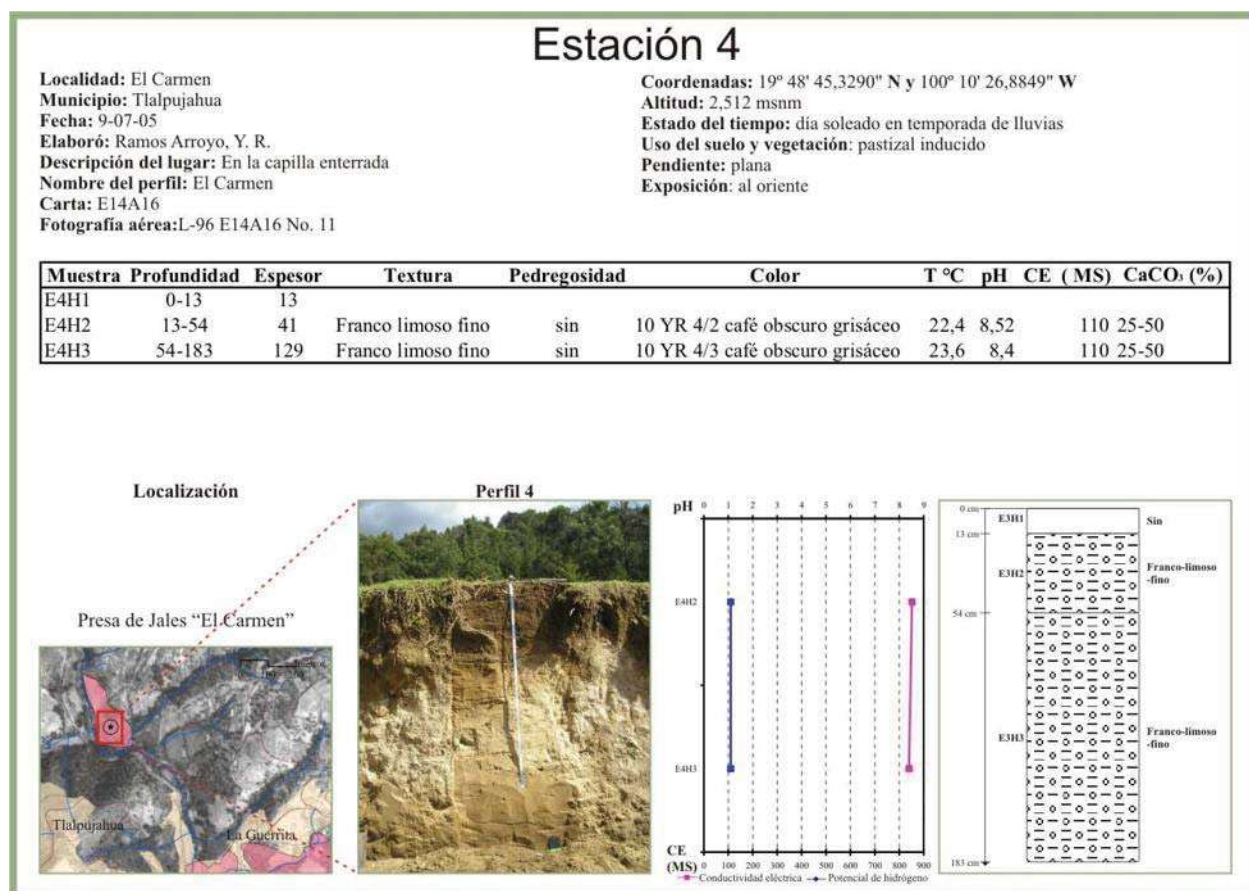


Figura 52. Propiedades físico-químicas de la estación E4.

9.7.3 Los Jales de Los Cedros (E1, E2, E3, E9, E10 Y E11).

La presa denominada Los Cedros es la más extensa y en ella fueron depositados los jales que la compañía Minera Las Dos Estrellas generaba. Se observa una erosión intensa, principalmente hídrica, y aún así se presenta una recuperación de la vegetación en forma natural además en otra porción se practica la agricultura de temporal. Esta presa presenta cierta heterogeneidad morfológica por lo que se seleccionaron seis puntos estratégicos para la colecta de muestras, dichas estaciones se presentan por su altitud en el siguiente orden: **E1, E2, E3, E9, E10 Y E11.**

9.7.3.1 *Propiedades físico- químicas de la Estación 1*

Esta estación se seleccionó en la parte alta de la presa a 2,628 msnm. Se caracteriza por ser un depósito de terreros en contacto con el depósito de jales. Consta también de tres horizontes claramente identificables: el primero E1H1 tiene un espesor de 30 cm y presenta una textura arcillo-limosa; el segundo E1H2 posee un espesor de 40 cm y su textura es franco-limosa; el tercero E1H3 de textura franco-arcillosa inicia los 70 cm de profundidad. En este perfil a mayor la profundidad disminuye el pH y aumenta ligeramente la conductividad eléctrica aunque sólo alcanza 60 MS. Se trata de un ambiente neutro-alcalino donde el Pb tiene una movilidad baja y Au, Cu y Zn tienen movilidad muy baja (Figura 53).

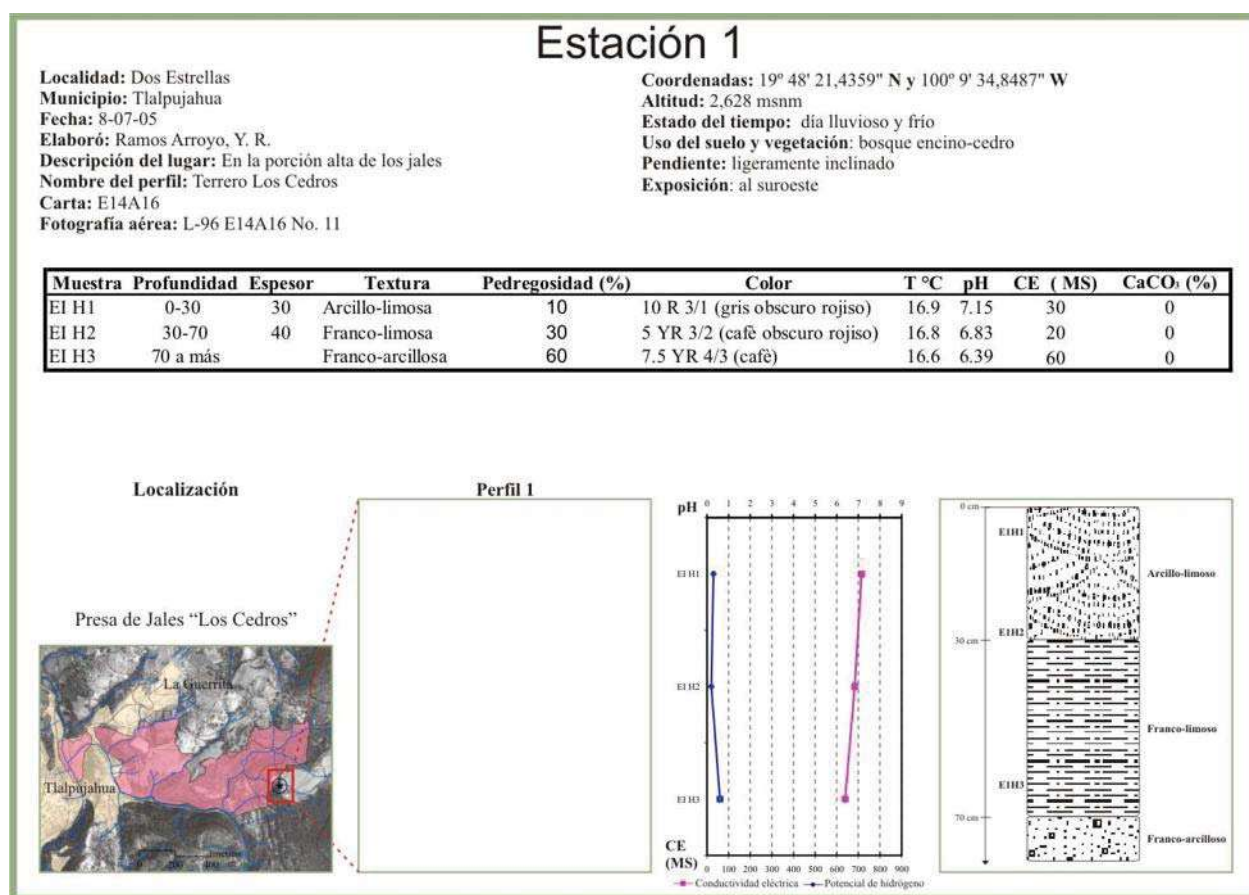


Figura 53. Propiedades físico-químicas de la estación E1.

9.7.3.2 *Propiedades físico-químicas de la Estación 2*

La Estación 2 se localiza en la parte más alta de la presa Los Cedros a 2,625 msnm, 10 metros de la estación anterior. Consta de tres horizontes: el primero **E2H1** es una delgada capa con un espesor apenas de 1 cm de color café oscuro y presenta el pH más elevado de los tres (8.7); los dos horizontes restantes **E2H2** y **E2H3**, presentan también además de una clara diferencia textural una ligera variación en pH (7.13 y 8.32) respectivamente y una débil CE 40 y 60 MS respectivamente (Figura 54). Por tanto se trata de un ambiente neutro-alcalino donde la movilidad del Pb es baja y para el Cu y Zn muy baja.

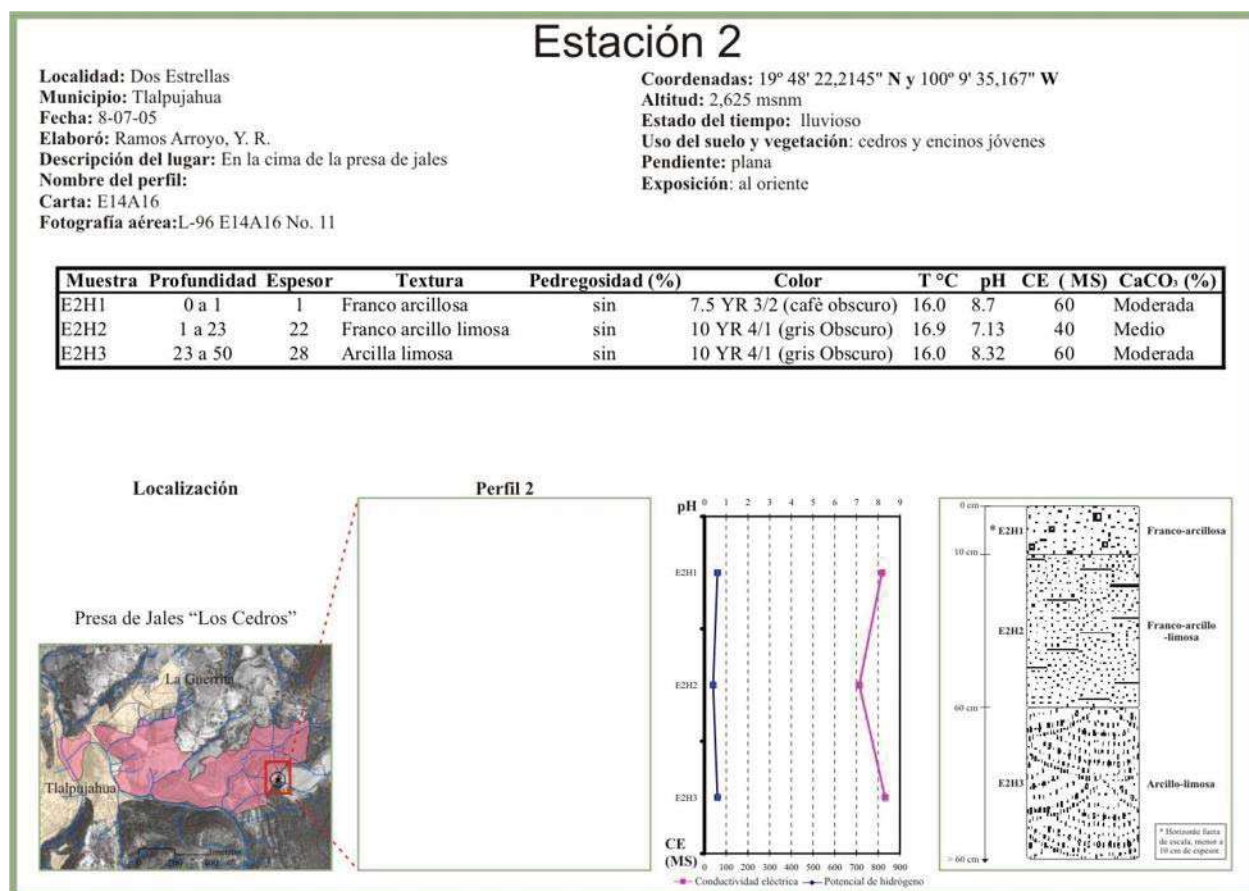


Figura 54. Propiedades físico-químicos de la estación E2.

9.7.3.3 *Propiedades físico-químicas de la Estación III-Cedros*

La Estación 3 se encuentra a 2,593 msnm y se caracteriza porque se observa el substrato rocoso. Esta estación presenta siete horizontes los tres primeros **E3H1**, **E3H2** y **E3H3** son los correspondientes al depósito de los residuos mineros (jales), tienen un pH alcalino (8.14 a 8.43) y su conductividad eléctrica es débil. En estas mismas se presenta los contenidos Au y Ag más

altos de todo el perfil. Es conveniente observar que los horizontes inferiores presentan pH con una tendencia a ácido, de los más bajos comparados con las todas las estaciones, además se observa un drástico aumento en la conductividad eléctrica de 90 MS en **E3H3** hasta 2090 en **E3H4** (Figura 55). Desde el punto de vista geoquímico resalta que el contenido alto en EPT y en función del Ph y CE podría representar un aumento de disponibilidad mayor de metales.

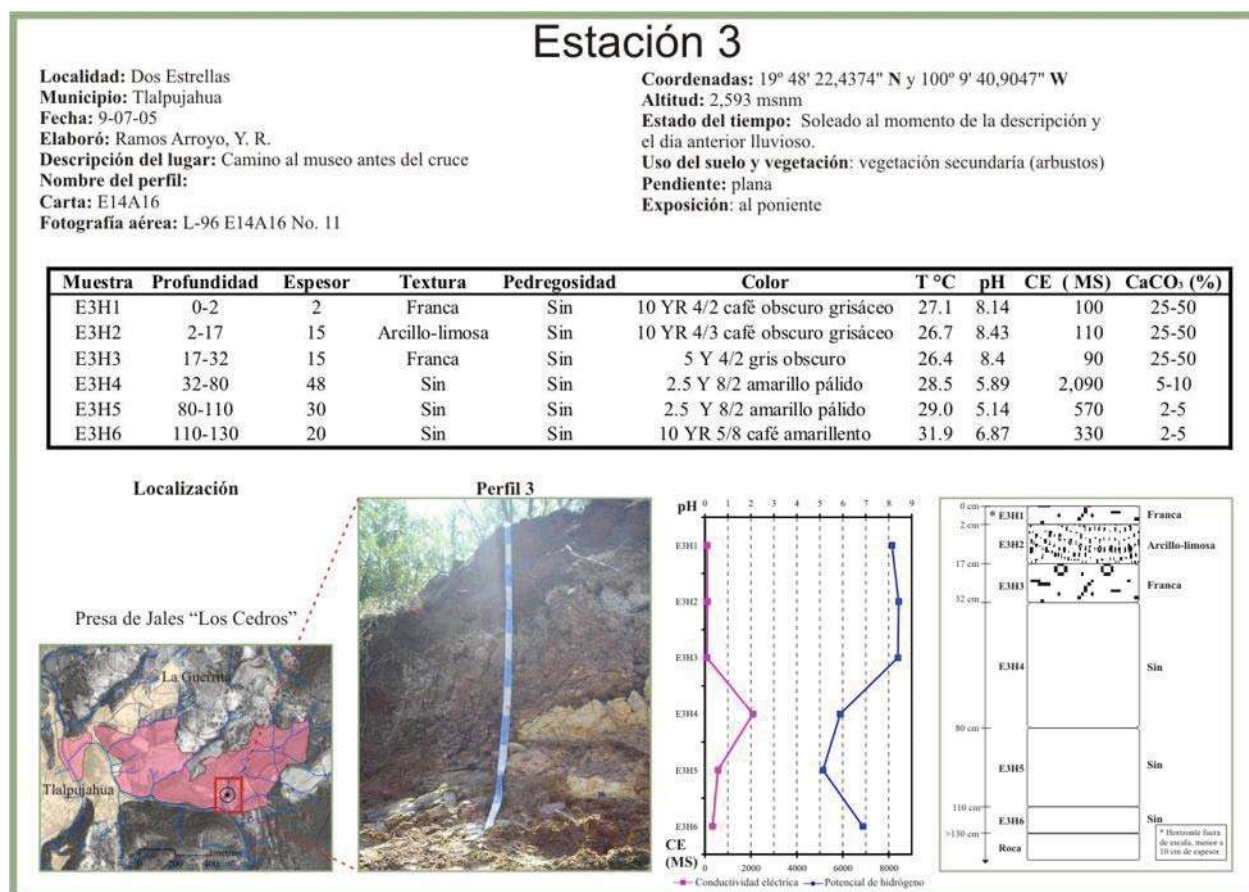


Figura 55. Propiedades físico-químicos de la estación E3.

9.7.3.4 Características físico-químicas de la Estación 9

La Estación IX se encuentra a 2,576 msnm (17 m de diferencia respecto a la Estación III) y se seleccionó por presentar lixiviados con una coloración azul. Se definieron cinco horizontes, todos con un pH alcalino >8, sin embargo en cuanto a conductividad eléctrica presenta un salto de 197 MS en el horizonte **E9H3** hasta 6,780 en el horizonte **E9H4** tratándose de una muestra fuertemente mineralizada se esperaría una fuerte movilidad, sin embargo la abundante presencia de calcita (90 %), mantiene un pH elevado. Desde el punto de vista geoquímico resalta que en los primeros horizontes se registran los valores más elevados de Zn (402.6 ppm) y de Cu (145.3

ppm), así como el horizonte E9H4 presenta 2.7 ppm de Au, uno de los más altos valores de las muestras analizadas (Figura 56).

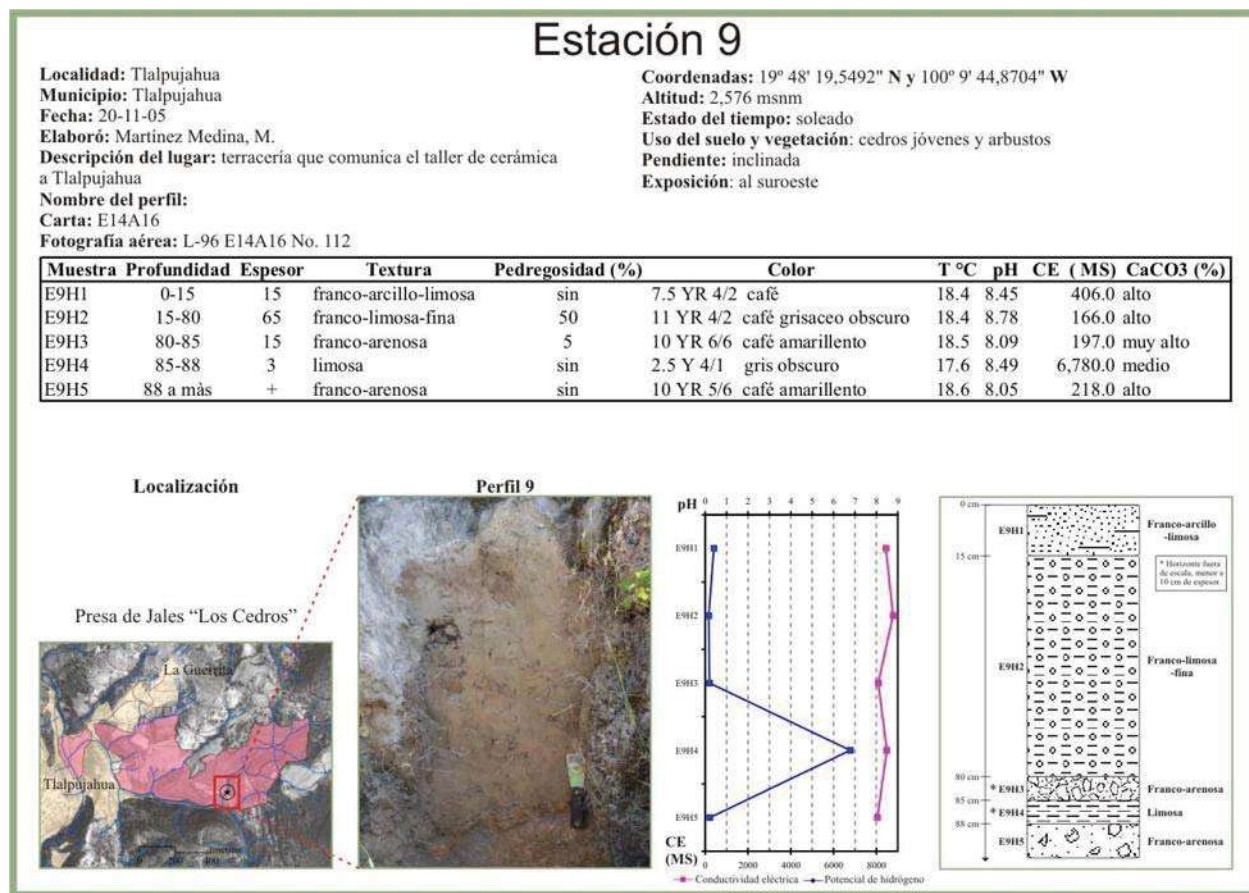


Figura 56. Propiedades físico-químicos de la estación E9.

9.7.3.5 Características físico-químicas de la Estación 10

La Estación X se encuentra a 2,575msnm, a 5 metros de la estación anterior en la ladera opuesta del cauce, también presenta lixiviados con una coloración azul. Consta de tres horizontes E10H1, E10H2 y E10H4 conviene aclarar que el E10H3 resultó ser una lente menor de 1 cm, misma que se etiquetó por separado. Los tres horizontes presentaron un pH alcalino mayor a 8, sin embargo, en cuanto a conductividad eléctrica se observa también un salto de 113 MS en E10H2 a 3,420 MS en E10H4, por lo que se azume una mineralización importante (Figura 57).

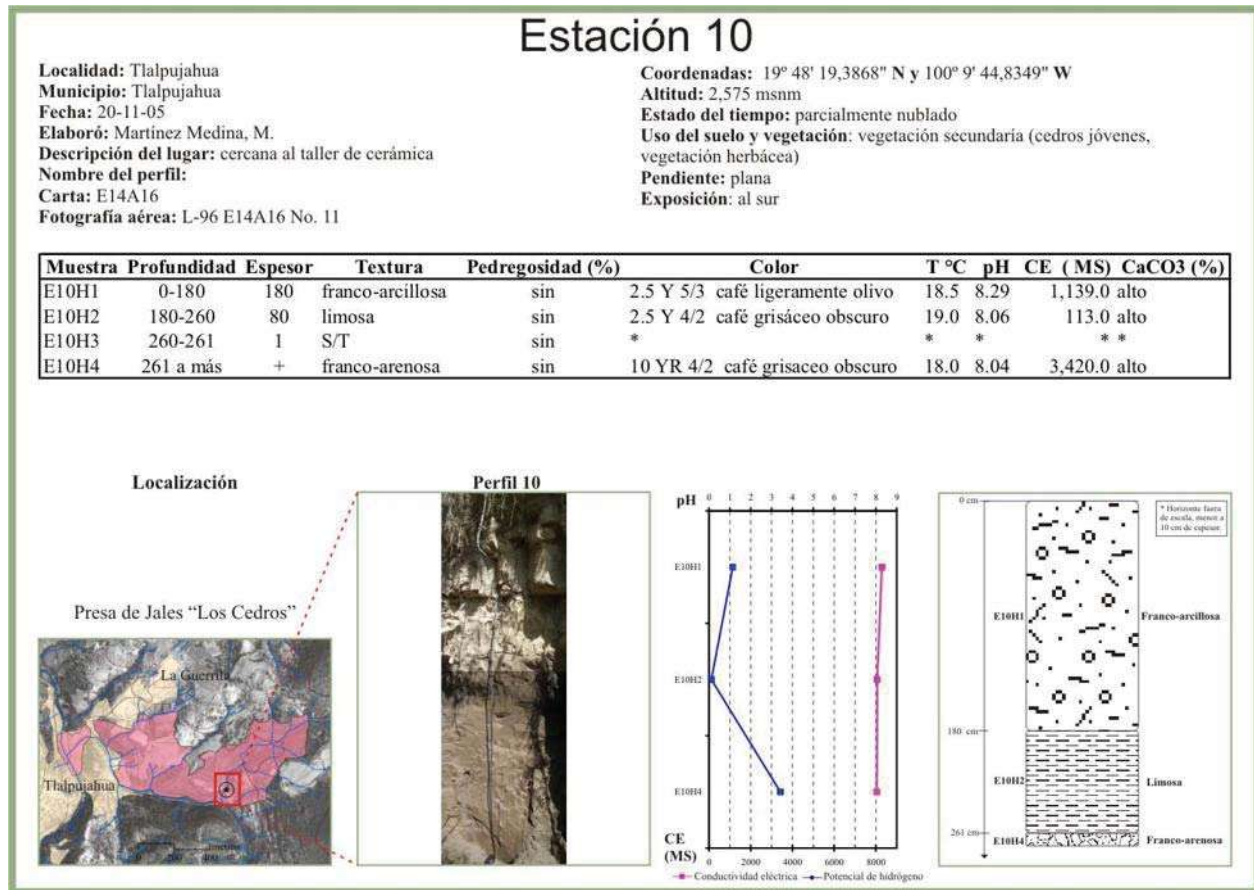


Figura 57. Propiedades físico-químicas de la estación E10.

9.7.3.6 Características físico-químicas de la Estación 11

La Estación XI se encuentra a 2,570 msnm, también presenta lixiviados con una coloración azul. Se describieron seis horizontes, los cuatro primeros corresponden al depósito de jales y presentan un pH superior a 8 e incluso el horizonte **E11H3** es muy alcalino (9.03) siendo el más alto de las muestras colectadas en las 12 estaciones (Figura 58). En cuanto a CE los tres primeros presentan valores bajos (menores a 80 MS), para aumentar drásticamente a 1,728 MS en el horizonte **E11H4**, lo que indica una mayor mineralización, además en éste mismo, el contenido de calcita de 6 % es el más alto de la estación. El horizonte **E11H5** es una zona de transición compuesta de roca fuertemente intemperizada y posee además la mayor CE (3,960 MS) lo que indica mayor concentración de minerales.

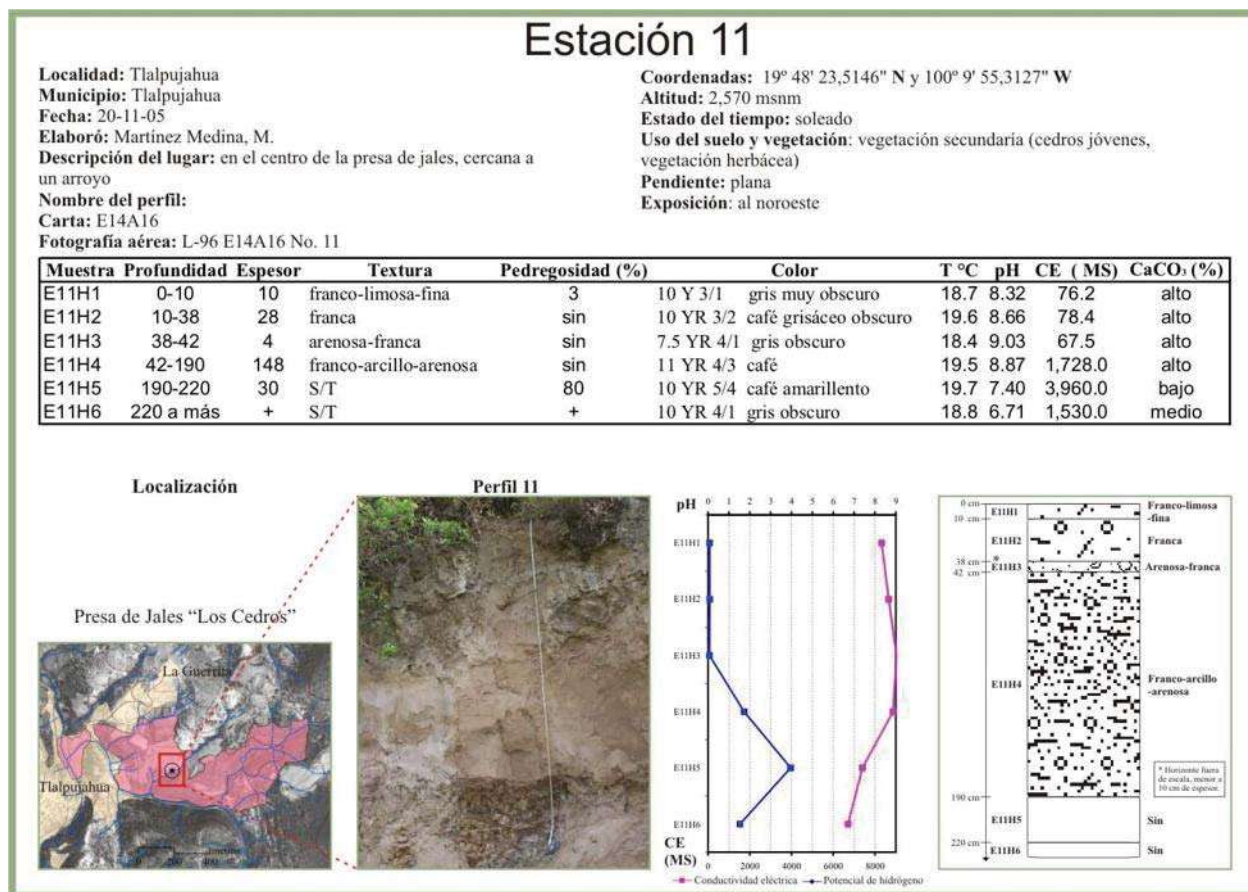


Figura 58. Propiedades físico-químicas de la estación E11.

9.7.4 Propiedades físico-químicas de los Jales Dos Estrellas

La zona de depósito de jales denominada Dos Estrellas recibe este nombre por su cercanía a la mina conocida por el mismo nombre. Es la más pequeña en superficie por lo que se describió una sola estación a la que se asignó el número 12, además conviene aclarar que la mayor parte de estos jales fue removida por el municipio para mantenimiento de terracerías y también ha sido objeto de una fuerte erosión.

9.7.4.1 Características físico-químicas de la Estación 12

La Estación 12 se encuentra a una altitud de 2,602 msnm y ocupa apenas una superficie de 1.5 hectáreas, se distinguen cuatro horizontes: el primero E12H1 es una delgada capa de suelo de 3 cm de espesor con un pH neutro (7.14) y baja conductividad; el segundo E12H2 con un espesor de 34 cm posee el pH más alto de todo el horizonte; en el tercero E12H3 siendo de mayor espesor (82 cm) el pH es neutro y presenta menor valor de CE en el perfil; el último E12H4 se caracteriza por ser un paleosuelo cuyo pH es también neutro (Figura 59).

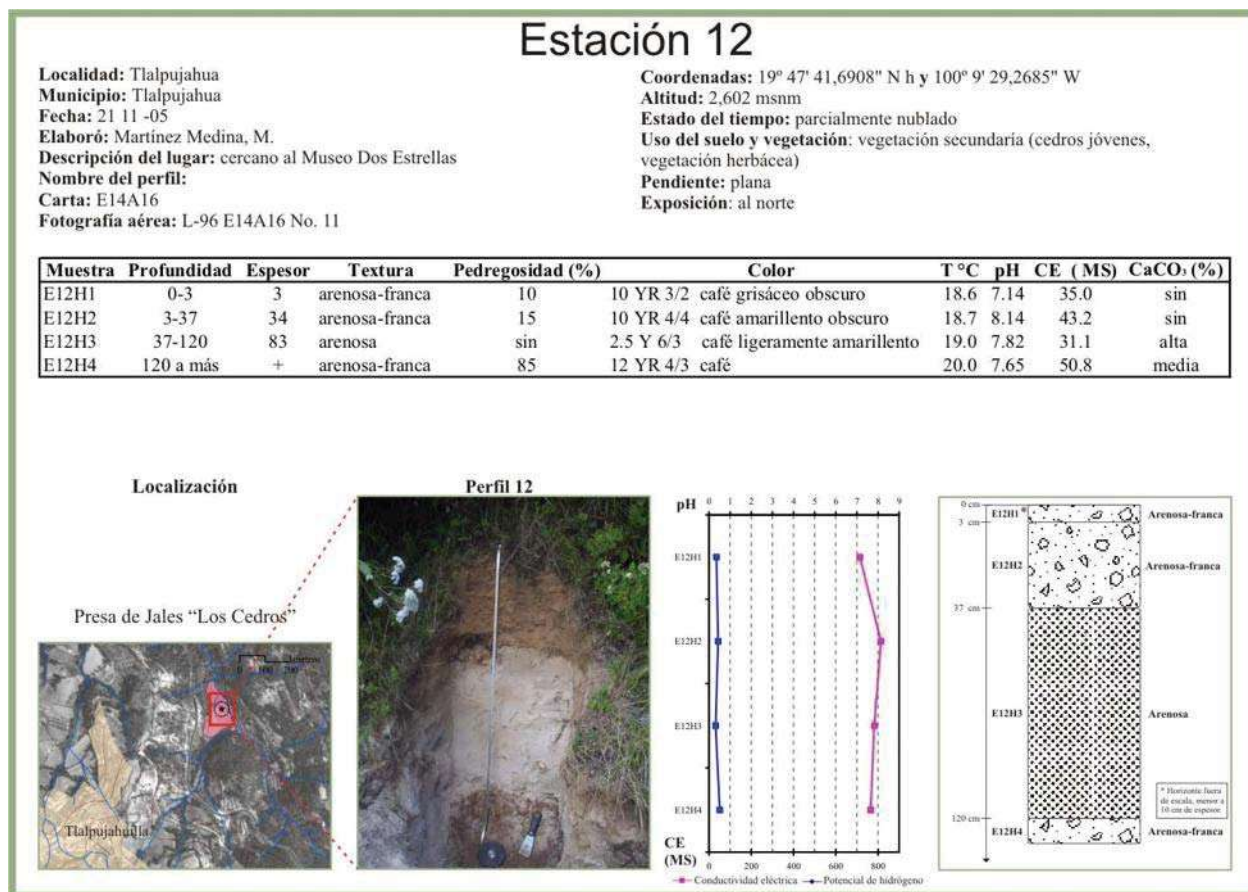


Figura 59. Propiedades físico-químicas de la estación E12.

9.7.5 Propiedades físico-químicas de la presa de Jales Tiro México

La presa de jales Tiro México se localiza al pie del Cerro Somera en dirección Este, en la parte alta de la cabecera municipal de El Oro de Hidalgo. Se seleccionaron dos estaciones de muestreo: **E7** en la parte baja y **E8** en la parte alta de la presa, además se colectaron dos muestras intermedias: E7 cima y E7 intermedia.

9.7.5.1 Propiedades físico-químicas de la Estación 8

Esta estación se encuentra a una altitud de 2,732 msnm se identificaron 4 horizontes. Los tres primeros son alcalinos con pH mayor de 7.8 y el último E8H4 presenta uno de los valores más bajos de pH (5.7) y además uno de los valores más altos de CE (5,680 MS) de todas las estaciones descritas (Figura 60).

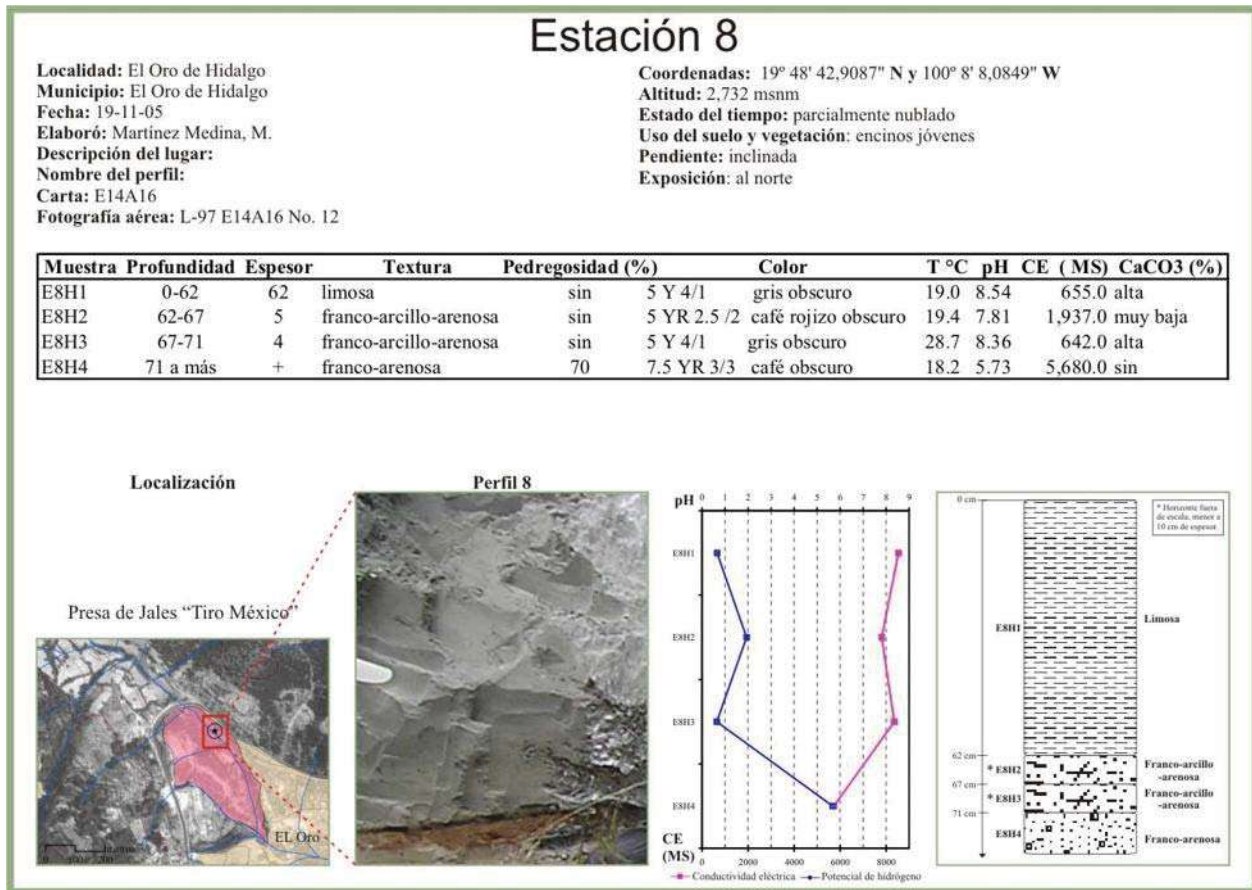


Figura 60. Propiedades físico-químicas de la estación E8.

9.7.5.2 Características físico-químicas de la Estación 7

Esta estación se encuentra a una altitud de 2,728 msnm y se caracteriza por presentar lixiviados con una coloración violeta-azul intensa. Se describieron 7 horizontes todos con un pH que va de neutro a alcalino excepto el E7H5 que presenta el valor más ácido de todas las estaciones descritas(4.48), en este mismo horizonte se observa la mayor CE de la estación con 895 MS (Figura 61).

También se tomaron dos muestras aisladas en la parte media y cima de la presa de jales (E7 media y E7cima), ambas con un pH alcalino sin embargo la mineralización en la segunda es muy fuerte puesto que alcanza una CE de 8180 MS, la mayor de las muestras colectadas.

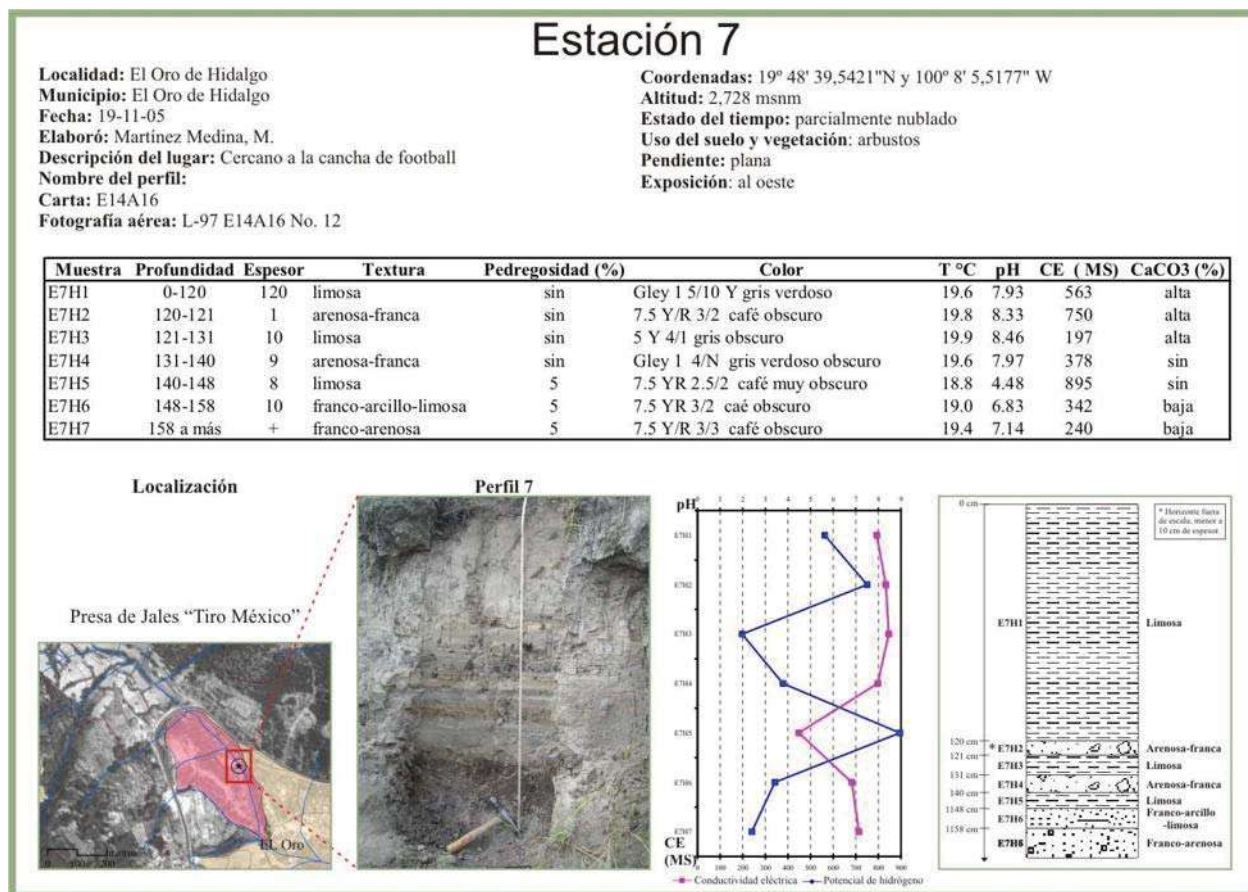


Figura 61. Propiedades físico-químicas de la estación E7.

9.7.6 Características físico-químicas de la Presa de Jales CONALEP

Se caracteriza por presentar sobre los mismos jales: viviendas y parcelas en las que se siembra maíz para el consumo humano. Además se observa una fuerte erosión, principalmente hídrica. Se describieron dos estaciones: 5 y 14

9.7.6.1 Características físico-químicas de la Estación 14

Esta estación se encuentra a una altitud de 2,674 msnm y se describieron en primera instancia ocho horizontes cuyo pH tiende a ser de neutro a alcalino (de 7.35 a 8.24), además en cuanto a conductividad eléctrica la menor es de 144 MS en el horizonte E14H1 y la mayor de 1570 en el horizonte E14H4, el resto oscila entre 715 y 1,188 MS (Figura 45). En el horizonte 6 se observa una textura franco-arcillo-limosa, la arcilla al humedecerse se expande e impide se lixivien elementos a horizontes inferiores, en este caso ha propiciado la acumulación de lixiviados en el horizonte inmediato superior (E7H5), por lo que presenta la mayor conductividad eléctrica y un pH ácido (Figura 62).

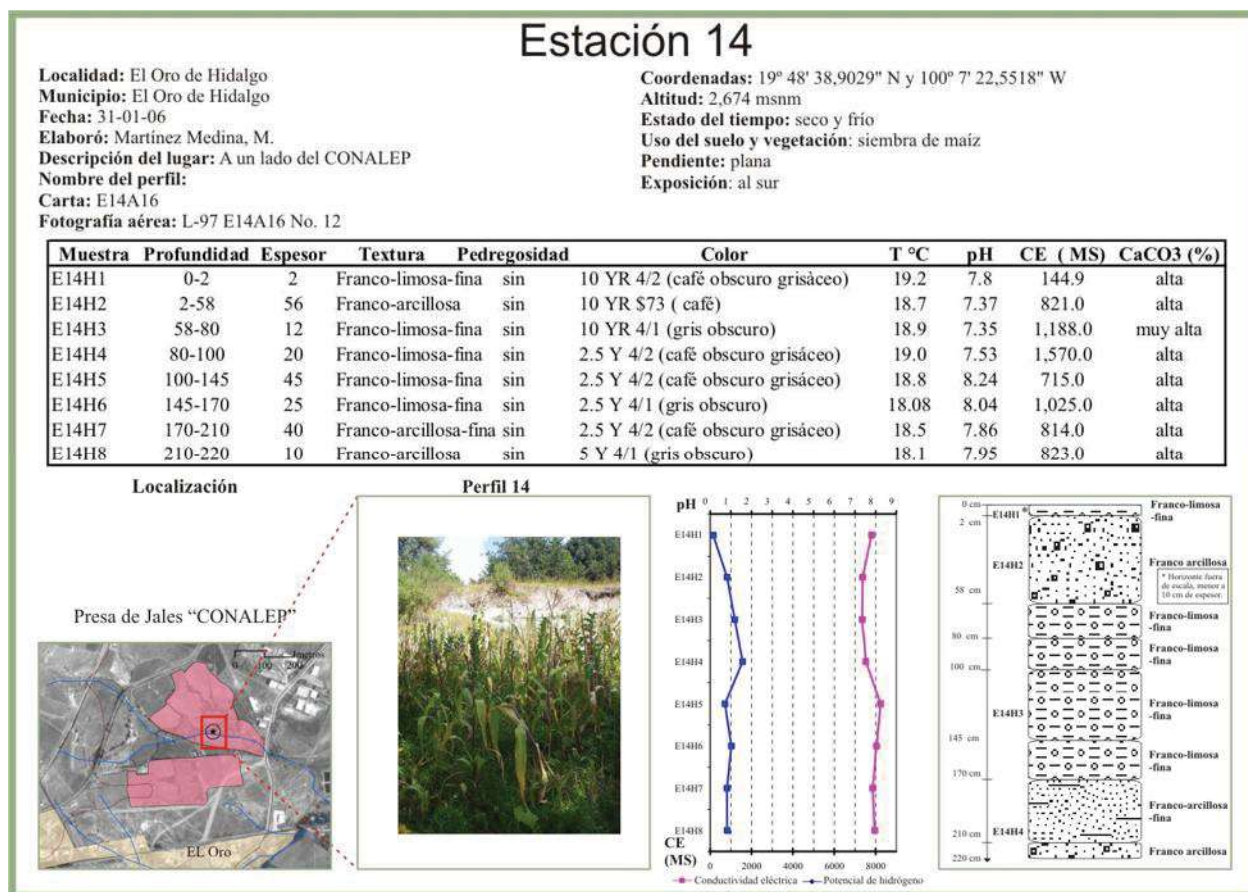


Figura 62. Propiedades físico-químicos de la estación E14.

9.7.6.2 Características físico-químicas de la Estación 5

Esta estación se encuentra a una altitud de 2,685 msnm y se identificaron seis horizontes, el tercero es un horizonte compuesto por delgadas capas intercalas menores a 1 cm y diferenciadas principalmente por color. Todas las muestras presentan un pH alcalino excepto la última E5H6 que presenta un pH neutro. En cuanto a CE los tres primeros presentan cierta homogeneidad con una conductividad eléctrica baja que va de 50 a 100 MS, no así para los dos últimos horizontes E5H5 y E5H5 donde se observa un aumento alcanzando 765 y 395 MS respectivamente (Figura 63).

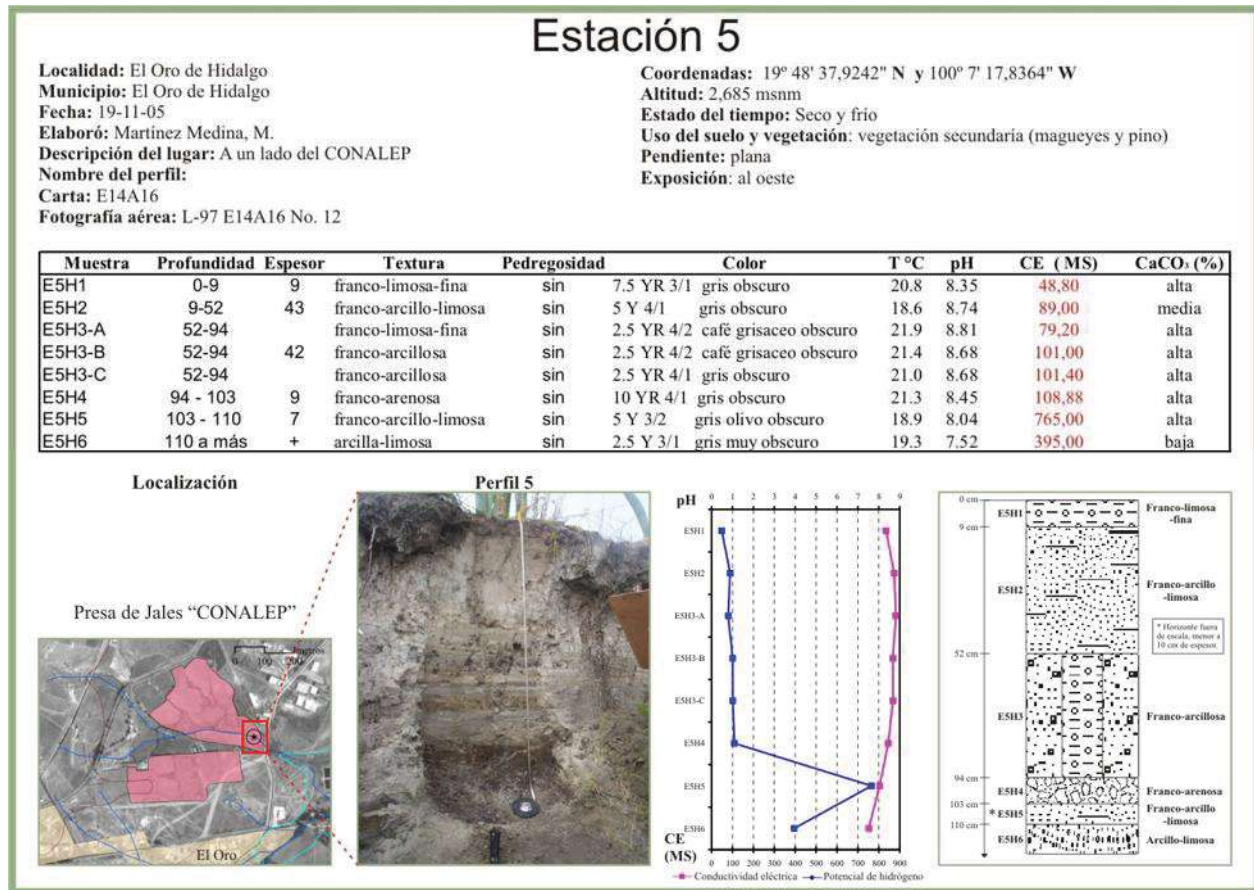


Figura 63. Propiedades físico-químicas de la estación E5.

En general, sobre las presas de jales se observa un proceso de recuperación natural de la cobertura vegetal (Figura 64), sin embargo dicha recuperación no parece ser suficientemente rápida para frenar los procesos de erosión, sobre todo en la temporada de lluvias (Figura 65).



Figura 64. Imágenes que muestran el desarrollo de vegetación sobre los jales en: El Oro (izq) y Tlalpujahua (der).



Figura 65. Fotografía en la que se observan los jales que son arrastrados durante el periodo de lluvias.

9.8 Cartografía geoquímica de sedimentos de arroyo

En geoquímica ambiental la determinación de la extensión y grado de contaminación es de gran importancia, por lo cual en este campo de estudio se utilizan métodos de prospección geoquímica que fueron desarrollados para detectar yacimientos minerales, tal es el caso de geoquímica de sedimentos de arroyo.

La prospección geoquímica tiene como principio básico identificar la dispersión de un determinado metal y en su función localizar la fuente de emisión que podría ser un yacimiento, por tanto es un principio válido para definir la extensión de un fenómeno de contaminación e incluso la localización de su fuente misma. Entonces conforme la dispersión y concentración de los elementos químicos se pueden localizar anomalías geoquímicas.

La geoquímica de sedimentos de arroyo es entonces un excelente elemento para puntualizar/diferenciar fuentes, ya sean de origen natural o antropogénico. Los sedimentos de arroyo o sedimentos fluviales se componen por los productos menos solubles de la meteorización incluyendo elementos móviles adsorbidos por los sedimentos (metales adsorbidos en minerales de arcillas u oxihidróxidos de Fe o Mn).

El Servicio Geológico Mexicano durante la elaboración de las cartas geológico-mineras ha realizado un muestreo y análisis geoquímico de sedimentos de arroyo cuyos datos están disponibles en red www.coremisgm.gob.mx. Como se puede observar en la siguiente tabla, se incluyen los elementos disponibles de las hojas E14A16 y E14A26, en donde se encuentra contenida la cuenca del DMOT.

Tabla 21. Datos geoquímicos de Sedimentos de Arroyo (SGM).

MUESTRA	X	Y	Au ppb	Ag ppm	As ppm	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Fe %
27	373152	2201824	1	0.79	0.65	3.88	16.65	23.96	2.04
28	372112	2200839	10	0.79	0.97	4.24	20.34	36.46	2.53
29	373034	2200242	5	0.79	1.05	2.33	19.3	25.84	2.05
40	378368	2201539	1	0.79	0.79	4.80	20.16	44.39	2.71
41	380438	2201798	5	0.79	1.15	5.93	24.02	43.99	2.94
45	383876	2202050	1	0.79	0.78	6.76	18.59	37.18	2.33
46	384450	2200954	2	0.79	0.84	4.10	21.4	42.03	2.57
57	388435	2202669	1	0.79	0.98	11.22	16.31	45.41	2.81
58	389154	2200987	1	0.79	0.31	7.25	15.35	48.48	3.01
59	388108	2200048	3	0.79	1.11	7.29	15.34	46.42	2.61
83	367129	2199600	96	1.45	20.73	22.8	1.9	64.80	2.9
87	368613	2198746	6	0.93	7.39	43.46	1.9	53.03	3.32
88	369519	2198724	105	2.78	23.6	24.59	2.99	63.59	2.84
89	370808	2198982	9	0.79	1.96	8.48	1.9	33.55	2.49
90	370101	2197990	5	1.72	33.15	23.86	1.9	63.30	2.63
91	370783	2197724	1	0.86	7.45	33.12	1.9	48.89	3.31
92	370287	2198046	8	0.99	2.26	16.23	1.9	58.84	3.2
93	369381	2195744	1	0.79	11.04	33.41	1.9	79.35	3.91
94	369990	2196562	1	0.79	5.03	32.42	1.9	44.76	2.9
95	371365	2195825	6	0.79	8.81	31.17	1.9	63.74	3.37
96	372034	2195007	5	0.79	19.03	38.11	14.88	75.01	3.79
97	370987	2193756	2	1.70	7.09	19.55	14.87	65.88	3.8
98	371076	2193207	3	0.96	3.56	43.72	9.34	49.62	4
99	371288	2193202	1	0.79	7.60	29.49	11.33	64.11	3.84
100	371716	2190671	3	1.18	4.37	15.97	11.91	64.67	4.15
101	371677	2190330	10	0.79	37.37	26.12	11.57	75.46	4.8
102	372488	2190692	1	0.79	9.93	18.65	11.88	70.21	3.37
103	371921	2197109	2	0.79	20.03	22.01	12.03	71.24	3.23
104	372546	2197312	106	2.43	24.69	28.22	21.8	73.10	3.41
105	373220	2196351	1	1.33	20.24	22.70	12.64	78.32	3.54
106	374362	2197068	6	0.79	24.2	38.50	6.03	62.27	3.15
107	375341	2196499	3	0.79	23.64	30.50	11.83	68.91	3.25
108	373754	2191300	8	0.79	41.31	36.86	14.42	93.90	3.42
109	374417	2191984	11	0.81	33.01	38.8	15.65	99.28	3.26
110	374504	2192302	21	0.79	24.76	40.35	15.91	68.28	3.57
111	374976	2192911	10	1.55	3.56	17.50	12.09	81.13	3.27
112	376470	2197399	79	2.21	2.05	9.07	18.47	47.45	2.92
113	376831	2196624	108	2.51	7.23	12.37	11.89	58.76	2.61
114	376321	2195624	207	5.31	32.49	32.02	22.57	77.28	3.08
115	376507	2194145	2	0.79	10.84	24.34	12.31	58.72	3.54
116	376155	2193475	161	5.53	37.82	34.51	31.11	72.57	3.16
117	376308	2191749	5	0.79	32.37	30.69	12.77	61.97	2.98
118	376796	2191094	74	4.35	40.72	38.16	22.21	75.40	3.52
119	377139	2199796	1	0.79	2.14	8.28	8.65	32.76	2.24
120	378347	2197724	82	0.79	1.80	9.37	11.04	34.39	2.3

MUESTRA	X	Y	Au ppb	Ag ppm	As ppm	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Fe %
121	377865	2196384	4	0.79	1.23	8.02	10.07	38.28	2.55
122	377772	2193110	3	0.79	3.61	13.67	9.49	54.36	3.14
123	377996	2192536	6	0.79	2.67	12.37	14.16	54.70	3.32
124	378194	2191693	19	0.79	41.16	15.20	24.16	68.97	2.87
125	378433	2191870	1	0.79	13.54	25.76	15.02	61.12	3.04
126	378281	2190454	406	13.12	42.65	23.45	28.52	68.90	1.62
127	379063	2195920	3	0.79	1.00	7.31	7.61	32.24	2.34
128	379488	2197061	7	0.79	0.77	7.83	8.56	31.52	2.35
129	380222	2197335	1	0.79	0.89	4.49	8.45	22.02	2.00
131	381637	2193124	7	0.79	3.89	8.85	17.52	38.95	2.84
132	380671	2191339	4	0.99	14.28	13.09	13.23	53.96	2.48
133	383623	2194412	1	0.79	1.09	4.57	12.68	30.07	1.97
134	383202	2193953	5	0.79	1.58	6.01	13.00	30.97	2.37
135	384293	2193858	31	0.79	4.25	8.51	11.45	61.54	2.42
136	384117	2191642	2	1.38	2.54	10.76	15.66	46.82	2.89
137	384414	2192051	34	0.79	2.51	6.62	14.99	47.17	2.70
138	384777	2192196	80	0.79	3.1	9.05	19.16	45.06	2.41
139	384660	2192046	91	3.02	4.38	14.39	34.61	67.31	2.93
140	385598	2190786	3	0.79	4.13	7.73	18.84	45.35	2.61
141	385083	2198597	4	0.79	1.27	10.15	12.84	39.78	2.89
142	387185	2199242	7	0.79	1.18	11.92	11.85	48.20	3.37
143	386585	2190492	1	0.79	2.34	16.01	28.72	66.59	4.42
144	385723	2190094	7	0.79	2.03	9.91	14.14	48.45	3.47
145	388345	2190149	1	0.79	1.34	6.41	12.21	31.84	1.96
146	388481	2190333	6	0.79	0.59	2.69	9.23	19.52	1.95
148	389106	2192608	2	0.79	0.90	2.48	9.54	22.37	2.32
149	390918	2190978	1	0.79	0.72	3.33	8.86	19.92	1.58
150	391487	2190973	19	0.79	0.86	4.83	9.70	26.19	2.35
151	392311	2190711	4	1.12	0.78	3.46	11.83	26.09	2.52
152	391427	2198611	6	0.79	1.68	9.27	17.17	46.59	3.09
153	392397	2195103	1	0.79	1.33	6.36	14.15	38.88	2.93
154	391897	2194354	2	0.79	1.61	10.81	15.92	42.24	3.19
174	368396	2185596	7	1.05	6.24	21.13	20.70	74.22	4.99
175	368996	2185522	14	0.79	15.98	33.52	16.27	64.00	4.64
176	370571	2186188	2	0.79	23.87	29.99	19.45	69.98	4.42
177	370857	2186863	8	0.79	31.91	24.56	10.59	70.59	4.34
178	371802	2184737	13	0.79	23.61	22.16	18.09	92.15	3.30
179	372777	2187102	1	0.79	36.12	19.34	12.99	77.79	2.90
180	372944	2187192	86	0.79	22.01	24.07	16.81	121.81	3.31
181	373222	2186534	4	0.87	31.34	19.24	18.85	76.90	2.93
182	374347	2185382	1	0.79	6.28	14.16	15.97	74.73	4.16
183	375615	2189004	7	3.54	34.45	25.73	23.01	79.41	2.93
184	375432	2188801	89	0.79	38.26	39.70	21.60	71.55	3.64
185	375588	2185568	1	0.79	31.40	23.66	19.11	93.70	3.99
186	376594	2188513	30	0.79	65.06	35.33	29.40	63.45	3.37
187	376479	2185658	1	0.79	4.02	10.83	14.52	62.64	3.89
188	377642	2190261	19	0.79	21.06	30.40	27.90	92.21	3.25

MUESTRA	X	Y	Au ppb	Ag ppm	As ppm	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Fe %
189	378470	2189855	273	9.15	33.53	41.16	36.61	116.59	2.52
190	378820	2188145	5	0.79	9.07	22.97	14.81	70.73	4.42
191	378334	2184650	13	0.79	2.01	16.02	15.52	74.04	4.39
192	379296	2185117	1	0.79	1.29	15.35	14.90	79.45	3.49
193	380588	2185626	16	0.79	3.18	15.40	16.59	70.54	3.40
194	381151	2184990	9	0.79	1.79	16.23	15.99	81.41	3.48
195	381996	2186542	5	0.79	32.04	32.78	19.31	80.68	3.43
196	381869	2188948	174	1.25	5.40	15.37	22.98	66.55	3.02
198	383959	2188738	12	0.79	2.00	11.94	18.14	49.60	3.67
199	384496	2188568	9	0.79	1.88	14.36	16.77	51.82	3.48
200	384935	2187304	1	0.79	1.66	11.63	25.76	47.89	3.29
201	385160	2187336	1	0.79	1.92	13.20	19.97	55.91	4.30
202	383781	2184300	13	0.79	1.77	14.90	20.19	79.07	4.13
203	385601	2189496	4	0.79	1.98	10.91	19.92	44.23	3.25
204	386024	2189097	1	0.79	2.12	13.47	22.26	49.43	3.79
205	385747	2188367	1	0.79	2.24	13.29	21.07	50.80	3.88
207	386669	2184663	18	0.79	2.91	12.97	16.62	55.05	3.04
208	388056	2189046	1	0.79	1.31	6.82	12.08	37.28	2.65
209	388428	2188436	11	0.79	1.86	12.08	17.98	47.21	3.40
210	389053	2185071	1	0.79	1.86	12.97	25.13	69.79	2.63
211	390774	2189058	1	0.79	0.80	5.88	11.33	33.08	3.03
212	390959	2187729	2	0.79	1.50	10.28	17.50	44.27	3.25
213	391604	2187606	3	0.79	1.03	6.78	13.05	42.38	3.28
214	391129	2186138	2	0.79	1.32	8.31	12.87	39.79	2.61
215	391509	2185828	1	0.79	2.80	11.04	18.31	66.91	2.11
227	367115	2184242.1	1	1.12	2.20	15.84	26.30	73.13	3.12
228	369961	2184032.6	1	1.80	2.27	9.99	26.72	67.80	3.23
229	369446.4	2181484.1	6	0.79	2.15	11.34	26.40	63.33	3.07
230	371299.4	2183185.2	4	0.79	1.55	10.55	25.22	66.98	3.25
231	371902.4	2181990.2	3	0.79	1.13	10.28	25.34	63.97	3.31
232	373867.3	2182706.5	3	1.38	0.81	7.57	19.86	62.74	3.07
233	375413.2	2182644.2	2	0.79	1.52	12.07	26.33	68.19	3.82
234	375396.9	2182116.1	2	0.79	1.72	12.14	26.48	67.61	2.97
235	376365.1	2181845.4	4	0.79	2.17	11.72	30.25	79.85	3.46
236	378015.6	2182148.6	3	0.79	1.29	16.50	27.45	88.78	3.74
237	381004.5	2184154.2	1	0.79	1.78	13.26	31.81	76.83	3.85
238	385203.8	2182800.8	2	0.79	1.60	11.00	29.08	72.19	3.43
239	385426	2182672	3	0.79	1.73	11.03	29.83	65.27	3.55
240	388504.6	2181944.3	5	0.79	1.16	10.27	22.11	54.36	2.88

Asimismo, con la finalidad de aportar mayores elementos al análisis geoquímico ambiental del DMOT, y como se verá para integrar en la discusión de la dispersión e influencia de los diferentes elementos químicos durante los procesos exógenos del DMOT, en la tabla 18, se muestran los datos de los valores de oro (Au) y plata (Ag) como elementos potencialmente

económicos (EPE), así como arsénico (As), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb) y zinc (Zn) como Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT). Los valores se reportan en ppm y se presentan en las figuras 66 y 67, mapas que ilustran la proporción relativa y su distribución al interior de la cuenca del DMOT.

Como se puede observar en ambas figuras, las muestras de sedimentos de arroyo contienen importantes valores económicos de Au y Ag que resultan de interés para la exploración y explotación minera. Por otro lado, se concentran los valores de los elementos potencialmente tóxicos; los más altos en zonas hipogénicas o de vetas mineras. La mayor concentración tanto de EPE como EPT en sedimentos de arroyo se encuentra en la subcuenca El Carmen. Sin embargo, es conveniente señalar que en este apartado se ha pretendido presentar los mapas con la distribución relativa de los valores químicos de sedimentos de arroyo, sin considerar aún ningún tipo observación directa o interpolación sobre dicha distribución, con la finalidad de complementar la base de datos geográfica, geológica, minera y geoquímica de la cuenca del DMOT y facilitar una discusión sobre sus implicaciones en un diagnóstico de impacto ambiental.

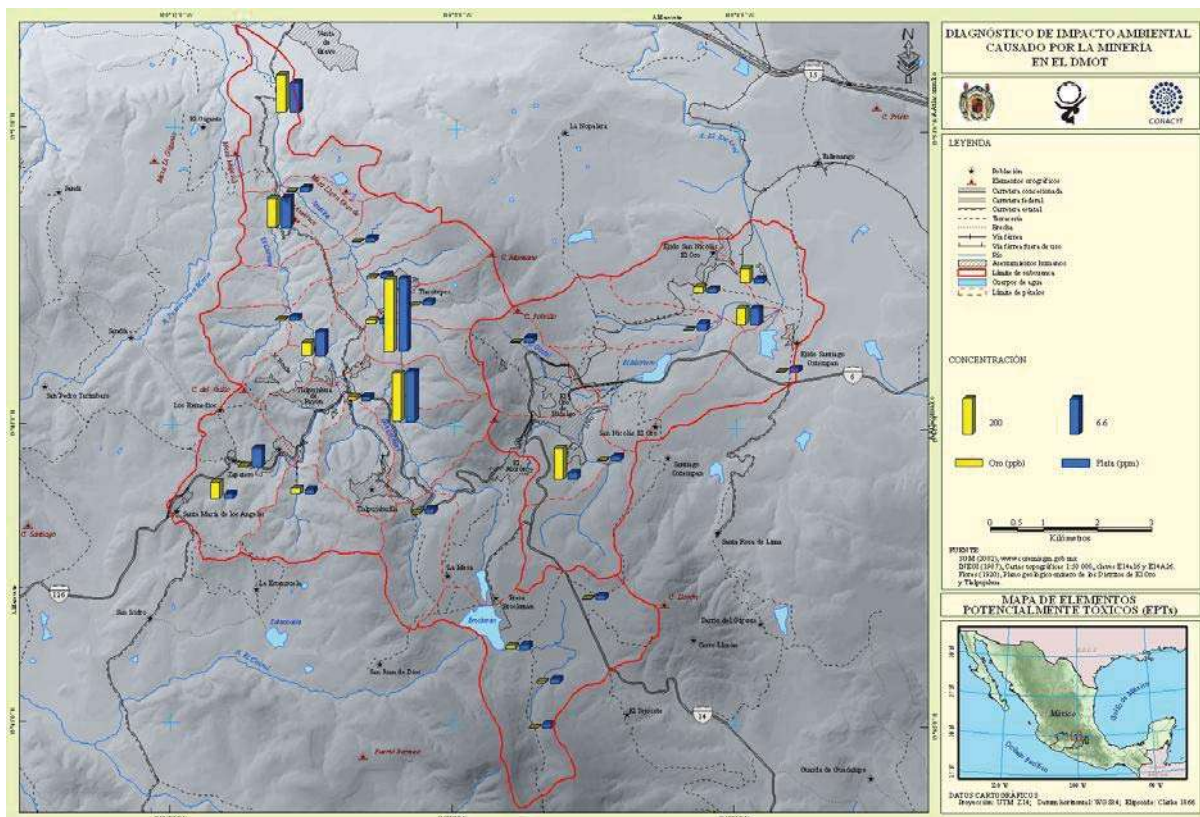


Figura 66. Concentración de EPE (Au y Ag) en las muestras de sedimentos de arroyo al interior del DMOT.

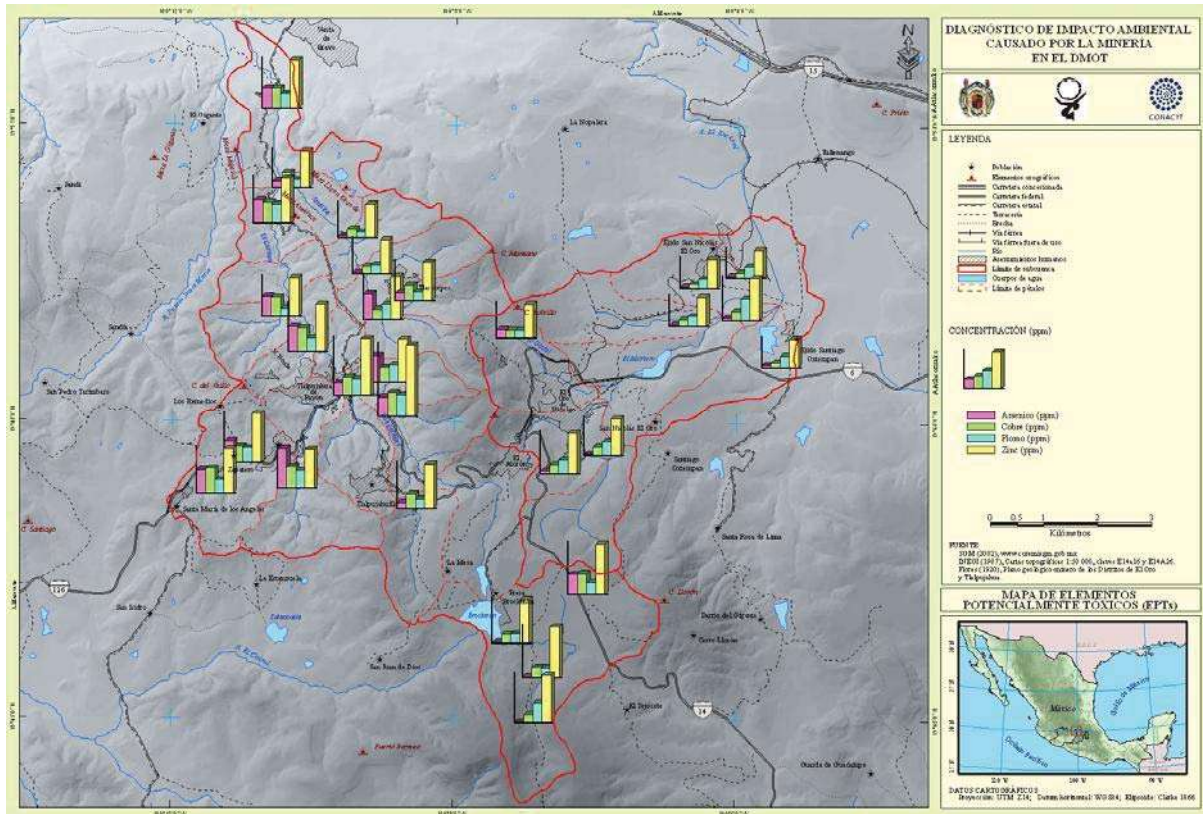


Figura 67. Concentración de EPT (As, Cu, Pb y Zn) en las muestras de sedimentos de arroyo al interior del DMOT.

CAPÍTULO 10 DISCUSIÓN

En el siguiente apartado se realiza la integración de la información generada y compilada durante el desarrollo del trabajo. La discusión se divide en cinco partes:

- i) Se revisan las características de clima y paisaje en general de las subcuencas hidrográficas.
- ii) Se presenta la información y clasificación de las subcuencas y su relación con las obras y residuos mineros.
- iii) Se describe la carta geomorfológica como carta de integración y se discute la importancia de los procesos exógenos de erosión en las cuencas hidrográficas del DMOT. Además, su relación con la re-distribución de los EPE y EPT, haciendo énfasis en los procesos de erosión y remoción de volúmenes de los residuos mineros.

10.1 Las subcuencas hidrográficas del DMOT

En cuanto a la precipitación, cuanto más grande sea la superficie de una cuenca los regímenes de alimentación tienden a ser ponderados, puesto que cubren áreas climáticas diversas o bien porque las lluvias o sequías la afectan parcialmente, en cambio en una cuenca pequeña o microcuenca se puede observar un mayor contraste estacional entre los aportes de agua máximos y mínimos (Bruniard 1992 en Ángeles y Gil 2006). Las microcuencas “El Carmen” y “El Ocotál” pertenecen a un mismo tipo de clima de acuerdo con García E. (1998), sin embargo, gracias a las estaciones meteorológicas FOMIX instaladas durante 2007-2008 se observa que presentan algunas diferencias; la cuenca El Ocotál es más cálida que Tlalpujahuá de enero a mayo, y de octubre a diciembre, con una diferencia aproximada de 2 ° C. El resto del año, en la temporada de lluvias (junio a septiembre) la temperatura entre ambas tiende a ser homogénea.

En relación a la precipitación, conforme al índice de Gaussen, en ambas subcuencas, los meses secos son de enero a mayo y de noviembre a diciembre. Los meses más húmedos son de junio a octubre, de hecho es en esta temporada cuando los procesos geoquímicos de disolución de los EPE y EPT podrían presentarse.

En cuanto al diagrama de Wilson (Figura 68 izq.) la estación P. Brockman localizada en la parte sur de la subcuenca El Ocotál presenta procesos morfoclimáticos del tipo templado

subhúmedo y en las tres estaciones restantes serían del tipo semiárido. Los pétalos que albergan los depósitos de jales se encuentran en zonas semiáridas.

Por otro lado, la intensidad de los procesos de intemperismo de acuerdo al diagrama de Peltier (Figura 68 der.) en las estaciones El Oro CNA y P. Brockman CNA presentan procesos de meteorización moderados con acción de heladas, y las dos restantes (El Oro FOMIX y La Guerrita FOMIX) se encuentran desplazados hacia los procesos de intemperismo químico moderado. Entonces los pétalos en que se encuentran los depósitos de jales presentan preferentemente intemperismo químico.

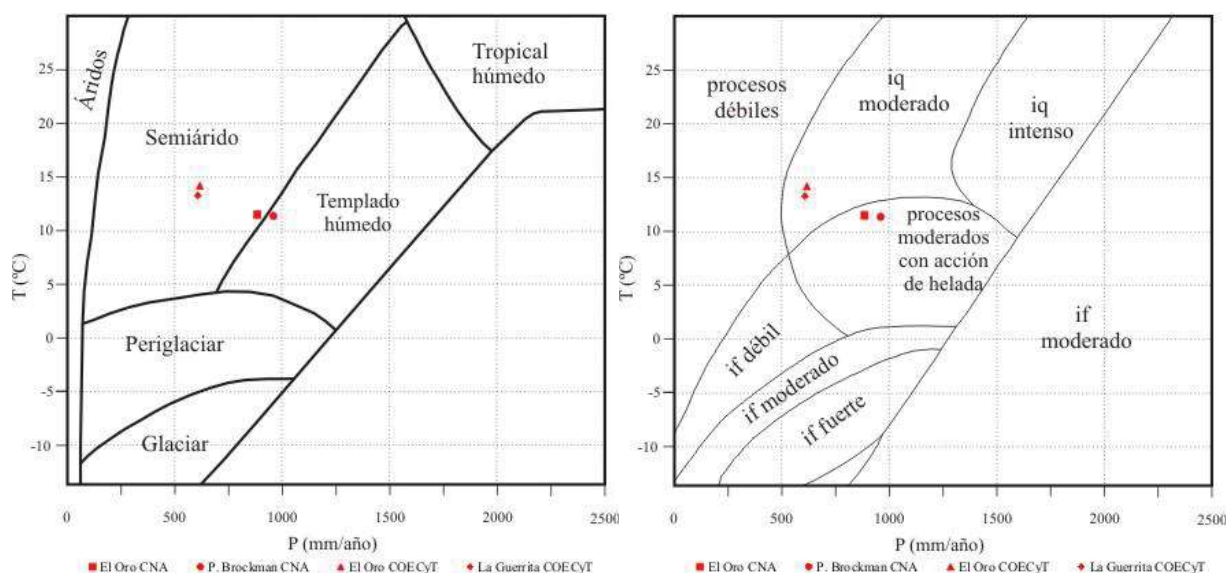


Figura 68. Diagrama morfoclimático de Wilson (izq.); Diagrama de intemperismo de Peltier (der.).

Conviene resaltar que las estaciones El Oro CNA y El Oro FOMIX no son lo suficientemente distantes una de la otra como para representar procesos diferentes y además el último registro en la primera estación corresponde al año 2000 y el registro en la segunda estación es 2007-2008, por lo que se puede apreciar una variación a través del tiempo en donde la temperatura aumentó y la precipitación disminuyó.

10.2 Las subcuencas hidrográficas del DMOT y su relación con las obras y residuos mineros.

En el presente apartado se integra la información específica de ambas subcuencas determinando sus elementos geográficos como son: parámetros físicos, mineralógicos y espacio-temporales de los residuos mineros.

10.2.1 Subcuenca Hidrográfica El Carmen (SHEC)

La subcuenca El Carmen presenta en general un drenaje de tipo dendrítico y subdendrítico excepto P-01 con un tipo de drenaje anastomosado. Además la forma que presenta es de oval oblonga a rectangular, con mayor amplitud del relieve que la subcuenca El Ocotil (940 m) y por tanto un mayor coeficiente de torrencialidad. Estas características y la presencia de lluvias torrenciales principalmente en el mes de julio, propician una intensa erosión fluvial y podrían ser causantes de una importante pérdida acelerada de suelo y de volúmenes jales.

Con la finalidad de identificar algunas diferencias internas de esta subcuenca se subdividieron en veintidós pétalos de drenaje de P-01 a P-21. Con base en los mapas de amplitud de relieve y torrencialidad, los pétalos que presentan un mayor riesgo de erosión son ocho: P-01, P-04, P-05, P-06, P-08, P-13, P-14 y P-21. Es conveniente hacer notar que los parámetros hasta el momento considerados no son los únicos que intervienen en los procesos de intemperismo y erosión como se verá en los siguientes puntos.

En cuanto a la distribución de residuos mineros las presas de jales Dos Estrellas, Los Cedros y El Carmen se encuentran en los pétalos P-04, P-05 y P-10/12 respectivamente. Las dos primeras se localizan en pétalos que presentan una tendencia a la erosión intensa. La erosión intensa puede ser correlacionada con el transporte y removilización de material en suspensión y/o en forma detrítica. Por su parte, de los cuatro terreros de esta subcuenca, uno se encuentra ubicado en P-06 y los tres restantes en P-17, lo cual implicaría una tendencia media a un riesgo de erosión.

Por lo que se refiere a las obras mineras (socavones, tiros, etc, se observa una amplia distribución ya que las obras se concentran en 14 de los 21 pétalos. Sin embargo es conveniente señalar que existe una mayor concentración de socavones en la SHEC que en la SHEO. Esto se puede explicar a su vez porque en Tlalpujahuá las vetas se encuentran normalmente expuestas, mientras que en El Oro, las vetas se extienden en el subsuelo debajo del cerro Somera.

10.2.2 Subcuenca Hidrográfica El Ocotal (SHEO)

El tipo de drenaje superficial que presenta la subcuenca hidrográfica El Ocotal (SHEO) es dendrítico/subdendrítico, con una forma de oval redonda a oval oblonga y amplitud del relieve que aun siendo fuerte (460 m) es casi la mitad que (SHEC), por tanto esto implica un menor coeficiente de torrencialidad, además estas características indicarían también un cierto riesgo de erosión pero menor en comparación con la subcuenca de Tlalpujahua.

Esta subcuenca se dividió en ocho pétalos (de P-22 a P-29) y conforme a los mapas de amplitud de relieve y torrencialidad, los pétalos que presentan un mayor riesgo de erosión son cuatro: P-22, P-23, P-24 y P-26.

En cuanto a la distribución de residuos mineros las presas de jales Tiro México y CONALEP se encuentran concentrados en los pétalos P-24 y P-25 respectivamente. Los jales del Tiro México se localizan en un pétalo que presenta una mayor tendencia a la erosión que el segundo. De hecho, como se puede observar en la figura 69, se forman canales de erosión y cárcavas que evidencian una gran remoción de material. Por lo que a obras mineras concierne, se observa una mayor distribución, dado que 5 de los 8 pétalos presentan socavones y se observa una mayor concentración en P-23 y P-24.



Figura 69. Erosión en los jales Tiro México

10.3 Análisis geomorfológico del DMOT

En el presente apartado se realiza el análisis geomorfológico del DMOT identificando relaciones entre unidades geomorfológicas con los atributos geológicos, mineros y ambientales.

10.3.1 La carta geomorfológica del DMOT

El mapa geomorfológico del DMOT se elaboró con base en la carta geológica y su relación con las unidades definidas en los mapas altimétricos, de pendientes, hidrográficos. Para la definición de las unidades geomorfológicas se siguió por lo tanto un criterio morfoestructural, considerando el sustrato litológico y la red hidrográfica como una pauta para visualizar el relieve. Se identificaron, por su origen, cuatro grandes grupos (Tabla 22) y 25 unidades geomorfológicas, cuya localización/distribución se refleja en la figura 70. La subcuenca Hidrográfica El Carmen (SHEC) observa mayor diversidad de unidades geomorfológicas que la SHEO (24 y 10 tipos de unidades respectivamente), lo que indica que los procesos exógenos sean diferentes en ambas subcuencas y por tanto, como se verá más adelante, estas variaciones han influido en origen y distribución de las anomalías geoquímicas identificadas.

En principio, la Subcuenca El Carmen (SHEC) observa predominancia de unidades de origen volcánico y tectónico/denudatorio sumando un 61.2% de la superficie del DMOT. En la Subcuenca Hidrográfica de El Ocotil (SHEO) se observa que predominan la unidades de origen volcánico con un 19.3% de la superficie del DMOT, mientras que las de origen tectónico/denudatorio apenas cubren el 0.6% (Figura 70).

Tabla 22. Porcentaje de cobertura de formas de relieve según su origen.

Formas de Relieve según su origen	SHEC (m ²)	SHEO (m ²)	Total (m ²)	SHEC (%)	SHEO (%)	Total %
F. R. de origen fluvial y lacustre	4,043,431	4,353,359	8,396,789	5.7	6.1	11.8
F. R. de origen volcánico	25,455,983	13,669,577	39,125,560	35.9	19.3	55.2
F. R. de origen denudatorio	2,455,552	2,553,156	5,008,708	3.5	3.6	7.1
F. R. de origen tectónico/denudatorio	17,966,259	401,194	18,367,453	25.3	0.6	25.9
Total			70,898,510			100.0

11.3.1.1 Formas de relieve de origen fluvio/lacustre

Este subgrupo cubre una pequeña extensión alcanzando 8,396,789 m² cubriendo el 12% de la superficie del DMOT con 3 tipos de unidades geomorfológicas (Tabla 23). En la SHEC predominan valles acumulativos mientras que en la SHEO predominan las unidades de planicie aluvial y lacustre. Estas unidades se caracterizan por presentar pendientes que van de plana o casi plana a moderadas (0-8°) predominando las pendientes planas o casi planas (0-2°), el riesgo de erosión por tanto, se puede considerar menor. En estas unidades se practica, preferentemente, la agricultura de temporal y la agricultura de riego, esta última solamente en la SHEO. Cabe destacar que las planicies se encuentran en las desembocaduras de las subcuencas por lo que es de esperarse que se acumulen sedimentos provenientes de aguas arriba.

Tabla 23 Superficie cubierta por las formas de relieve de origen fluvio/lacustre

Unidad	SHEC (%)	SHEO (%)	Total %
Planicie aluvial	0.3	1.7	2.0
Planicie lacustre	0.8	3.8	4.6
Valle acumulativo	4.5	0.7	5.2
Total	6	6	12

10.3.1.2 Formas de relieve de origen volcánico

Se delimitaron diez unidades geomorfológicas de origen volcánico, todas presentes en la SHEC y siete tipos de unidades en la SHEO, estas unidades cubren el 55% del DMOT.

Este grupo tiene mayor distribución espacial en la SHEC donde predomina la unidad de ladera estratovolcánica andesítica con 11.1% (Tabla 24), presenta pendientes que van de 8° a 35°. En esta unidad se observa la mayor concentración de tiros (obras mineras) lo que se explica debido a que las estructuras mineralizadas del DMOT se alojan generalmente en rocas metacalcáreo-pelíticas que fueron sepultadas por las andesitas miocénicas del C. Somera, a pesar dicha concentración de tiros, la cubierta vegetal es “bosque denso” por lo que se espera menor riesgo de erosión superficial. Por otro lado, también presentan bosque abierto y agricultura de temporal, lo cual refleja un impacto de tipo antropogénico.

Otras unidades menos expuestas son: ladera volcánica-ignimbrítica, ladera estratovolcánica-basáltica y ladera volcánico-basálticas (5.3%, 4.5% y 4.3 % respectivamente), las cuales presentan pendientes que van de 8° a 35°. En estas unidades no se observan obras mineras (a excepción de la primera, donde se extrae “cantera”. En cuanto a cobertura y uso del

suelo, la primera presenta vegetación arbustiva y agricultura de temporal; la segunda esta cubierta por bosque denso y en menor altitud agricultura de temporal; en la tercera se observa bosque fragmentado y agricultura de temporal.

Tabla 24 Superficie cubierta por las formas de relieve de origen volcánico

Unidad	SHEC (%)	SHEO (%)	Total (%)
Superficie cumbral estratovolcánica-andesítica	1.2	0.6	1.8
Ladera estratovolcánica-andesítica	11.1	4.1	15.2
Superficie cumbral estratovolcánica-basáltico	0.2	0.0	0.2
Ladera estratovolcánica-basáltico	4.5	0.0	4.5
Superficie cumbral volcánica-andesítica	0.9	0.9	1.8
Ladera volcánica-andesítica	2.5	8.0	10.5
Superficie cumbral volcánica-basáltica	3.0	0.9	3.9
Ladera volcánica-basálticos	4.3	4.3	8.6
Superficie cumbral volcánica-ignimbrítica	3.0	0.0	3.0
Ladera volcánica-ignimbrítica	5.3	0.4	5.7
Total	36	19	55

10.3.1.3 Formas de relieve de origen denudatorio.

En este grupo se identificaron tres tipos de unidades: piedemonte andesítico, piedemonte basáltico y colinas ignimbríticas, cubren el 7% del DMOT (Tabla 25).

El piedemonte andesítico se observa en ambas subcuencas y presenta pendientes de 2° a 8°, en estas unidades se han desarrollado la agricultura de temporal y asentamientos humanos (El Atorón y El Oro de Hidalgo). Es en esta unidad que se encuentra la presa de jales “Tiro México”. El piedemonte basáltico únicamente se observa en la SHEO, presenta pendientes de 2° a 8° y se ha desarrollado preferentemente la agricultura de temporal, en esta unidad se encuentran los depósitos de jales “CONALEP”.

Por último las colinas ignimbríticas se encuentran únicamente en la SHEC, esta unidad es básicamente receptora de sedimentos con una pendiente predominantemente plana en la que se practica la agricultura de temporal, en ella se localiza solamente un tiro denominado El buen Suceso.

Tabla 25. Superficie cubierta por las formas de relieve de origen denudatorio.

Unidad	SHEC (%)	SHEO (%)	Total (%)
Piedemonte andesítico	0.3	1.9	2.2
Piedemonte basáltico	0.0	1.7	1.7
Colinas bajas ignimbríticas	3.2	0.0	3.2
Total	3	4	7

10.3.1.4 Formas de relieve de origen tectónico/denudatorio.

Son ocho las unidades de origen tectónico/denudatorio y cubren el 25% de la superficie del DMOT. Se encuentran evidentemente en la SHEC con el 97.8% y solo el 2.2 % en la SHEO (Tabla 26).

En estas unidades se observa la mayor densidad de disección del DMOT. Además, en ellas se encuentra la mayor cantidad de obras mineras del distrito minero Talpujahuá, especialmente en laderas metacálcáreas pelíticas y laderas metapelíticas.

En las unidades de las laderas metapelíticas y laderas metavolcánicas se observa una pendiente de moderadamente fuerte a fuerte (8-35°). Esta unidad sostienen: bosque denso, bosque fragmentado y agricultura de temporal los dos últimos pones de manifiest

o un proceso de deforestación. Por lo que respecta a obras mineras se presencia de tiros y socavones además de un terrero.

En laderas metavolcánicas se localizan las presas de jales “Los Cedros” y “El Carmen” mismas que observan las pendientes más bajas (de suaves a moderas) lo que refleja la modificación del relieve natural. Es importante destacar que la agricultura de temporal (maíz) se practica sobre las presas de jales.

En las unidades de ladera metacálcáreo pelítica predominando las pendientes de moderadamente fuertes a fuertes. Apenas el 2.2% se encuentra en la SHEO con pendientes moderadamente fuertes (8-16°) se destaca porque sobre ella se encuentra una parte de la cabecera municipal de El Oro. La mayor porción se encuentra dentro de la SHEC y sostiene: bosque denso, bosque abierto, bosque fragmentado, vegetación arbustiva y agricultura de temporal. En esta unidad geomorfológica destaca una importante concentración de socavones como: S. Santa Gertrudis, S. La Lucha, S. Santa Gertrudis, S. Carmen de V., S. Santa María y S. Dos Estrellas.

Tabla 26. Superficie cubierta por las formas de relieve de origen tectónico/denudatorio

Unidades de relieve	Total	SHEC (%)	SHEO (%)	Total (%)
Ladera de Calizas masivas	274,521	1.5	0.0	1.5
Ladera en conglomerado continental	849,753	4.6	0.0	4.6
Superficie cumbral metacálcáreo pelítica	842,705	4.6	0.0	4.6
Ladera metacálcáreo pelítica	5,221,402	26.2	2.2	28.4
Superficie cumbral metapelítica	691,762	3.8	0.0	3.8
Ladera metapelítica	5,255,872	28.6	0.0	28.6
Superficie cumbral metavolcánica	568,588	3.1	0.0	3.1
Ladera metavolcánica	4,662,851	25.4	0.0	25.4
Total	18,367,453	97.8	2.2	100

10.3.2 Distribución geomorfológica de las anomalías de EPT y EPE en el DMOT

Las unidades geomorfológicas (o geoformas) son una expresión espacial de la forma en que se han interrelacionado e interactuado los elementos del paisaje y para explicarlas “tiene que dar cuenta de la génesis del relieve y tipificar sus geoformas: explicar fuerzas y procesos y clasificar resultados” (Duque-Escobar, 2003). Además se asocia a los procesos exógenos de redistribución y concentración de sedimentos y por tanto de EPE y EPT.

En este apartado se propone sobreponer información geomorfológica y geoquímica. Se parte de la premisa que un distrito minero representa una anomalía geoquímica primaria que puede contener o concentraciones de elementos potencialmente económicos y/o tóxicos. El objetivo entonces de este análisis es el identificar las anomalías e interpretar el origen y su distribución. Para la identificación de anomalías geoquímicas se utilizaron: i). Los mapas de concentración/dispersión de los elementos químicos presentes en los sedimentos de arroyo para lo cual se utilizó el método de triangulación que aplica la herramienta *Natural Neighbor*⁸; ii) Unidades geomorfológicas; iii) Delimitación de subcuencas/pétalos con su correspondiente red hidrográfica; iv) La identificación y distribución de obras mineras como: tiros, socavones, molinos o plantas metalúrgicas, jales y terreros; y v) Unidades y estructuras geológicas. En los siguientes puntos se discuten dichas anomalías geoquímicas presentándose en dos grupos: EPE y EPT.

8 La triangulación *Natural Neighbor* (proximidad natural) se considera la más apropiada cuando los puntos de muestreo se encuentran distribuidos en una forma desigual, por lo que este último es el más apropiado para el presente trabajo

10.3.2.1 Anomalías geoquímicas de Elementos Potencialmente Económicos (EPE): Oro (Au) y Plata (Ag)

Solo ocho de los veintinueve pétalos del DMOT reflejan anomalías geoquímicas de oro (Figura 71) y plata (Figura 72), cinco en la subcuenca El Carmen y dos en El Ocotál. En general la primera subcuenca presenta los valores más intensos de ambos metales.

A) Anomalías geoquímicas de EPE en la subcuenca El Carmen.

Los pétalos **P-04** y **P-05** Poseen los valores más altos de todo el distrito (hasta 406 ppb de Au y 13.12 ppm de plata). Ahora bien las unidades geomorfológicas que los caracterizan son de origen volcánico y tectónico/denudatorio. Esta concentración se puede explicar en cuanto estas unidades alojan las vetas mineralizadas. Por su parte las concentraciones en el P-04 se explican porque contienen la presa de jales Dos Estrellas, El Molino Los Cedros, los socavones *Dos Estrellas* y *Los Cedros*, así como en el P-05 se encuentra la mayor presa de jales nombrada también como Presa Los Cedros.

Otro aspecto que es importante mencionar es que en ambos pétalos presentan una amplitud de relieve y torrencialidad que indica mayor riesgo de erosión y considerando que ningún pétalo colindante aguas arriba o aguas abajo presenta concentraciones de Au más elevadas indicaría que la fuente es de origen primario y que se encuentra dentro de ellos y es evidente que dicha anomalía tiene una fuerte dependencia antropogénica, lo cual indiaría por lo tanto que el impacto ambiental causado por la minería sigue presente aún cuando dicha actividad ha cesado hace más de medio siglo.

En el **P-07** se observa una anomalía que alcanza valores de hasta (89 ppb de Au y 3.54 ppm de Ag). La amplitud de relieve y torrencialidad señalan un riesgo de erosión es bajo. Sin embargo, predominan nuevamente las unidades geomorfológicas de origen tectónico/deenudatorio asociadas a las vetas mineralizadas. Independientemente que ambas anomalías se encuentran en el mismo pétalo su comportamiento es diferente, es decir que su distribución está en direcciones opuestas y por tanto sugiere un origen diferente. El comportamiento de la red hidrográfica confirma que la concentración anómala de Au es alimentada por tres socavones: *S. Santa María*, *S. El Orito* y *S. Carmen de Vírgenes*, lo que indica un origen antropogénico (por minería). En el caso de la anomalía registrada de Ag es alimentada por el *S. Santa Gertrudis* por lo que también es de origen antropogénico (por minería).

El **P-11** presenta anomalías de ambos EPE cuyo origen se encuentra en el mismo pétalo dado que hidrográficamente no es alimentado por ningún otro. Como en los dos casos anteriores, aquí predominan las mismas unidades de origen tectónico/denudatorio. Las obras mineras que se localizan aguas arriba en este pétalo son: *S. La Lucha*, *T. Coloradillas* y *T. La Barranca*, además también tiene influencia de la conocida *V. Coronas*. Todo lo anterior indica que el origen en mayor proporción antropogénico pero no se descarta la posibilidad de ser hipogénico.

Los pétalos **P-15** y **P-21** no presentan obras mineras ni estructuras mineralizadas. Por amplitud de relieve y torrencialidad no figuran en los de riesgo de erosión y desde el punto de vista geomorfológico los valores más altos de Au y Ag se encuentran dentro la unidad de *valle acumulativo*, lo cual sugiere que esta anomalía está relacionada a la acumulación de sedimentos.

B) Anomalías geoquímicas de EPE en la subcuenca El Ocotal.

En la subcuenca El Ocotal se observan concentraciones de Au y Ag en sedimentos de arroyo más bajos que en El Carmen y se encuentran concentrados en los pétalos P-23 y P-27. En el primero únicamente Au pero con una concentración que alcanza las 174 ppb y en el segundo ambos EPE.

El **P-23** presenta una forma de la cuenca, una amplitud de relieve y una torrencialidad que indicaría un riesgo de erosión intermedio. Presenta unidades de origen volcánico (superficie cumbral estratovolcánica-andesítica, ladera estratovolcánica-andesítica, Superficie cumbral volcánica-andesítica y Ladera volcánica-andesítica) y nuevamente figura la ladera metacalcáreo-pelítica de origen tectónico denudatorio. Por la abundante presencia de obras mineras verticales (tiros) construidos sobre la ladera andesítica y puesto que la mayor concentración de Au coincide con la unidad ladera metacalcáreo pelítica y la inexistencia de residuos, se considera que en este caso la anomalía geoquímica puede ser considerada de tipo hipogénico (primario).

En relación al **P-27** se puede mencionar que este se localiza aguas abajo y los valores de concentración, aún siendo importantes no son tan altos como en las demás anomalías de DMOT. Por su forma, amplitud de relieve y torrencialidad el pétalo tiene mayor tendencia a la acumulación de sedimentos que a la erosión. Además las unidades geomorfológicas que presenta son de origen volcánico y fluvio/lacustre, es en esta última que se localizan las anomalías geoquímicas de ambos EPE. Es decir el origen se encuentra aguas arriba, probablemente de las

presas de jales *Tiro México* y *CONALEP* puesto que ambos pétalos que las contienen drenan en esta dirección.

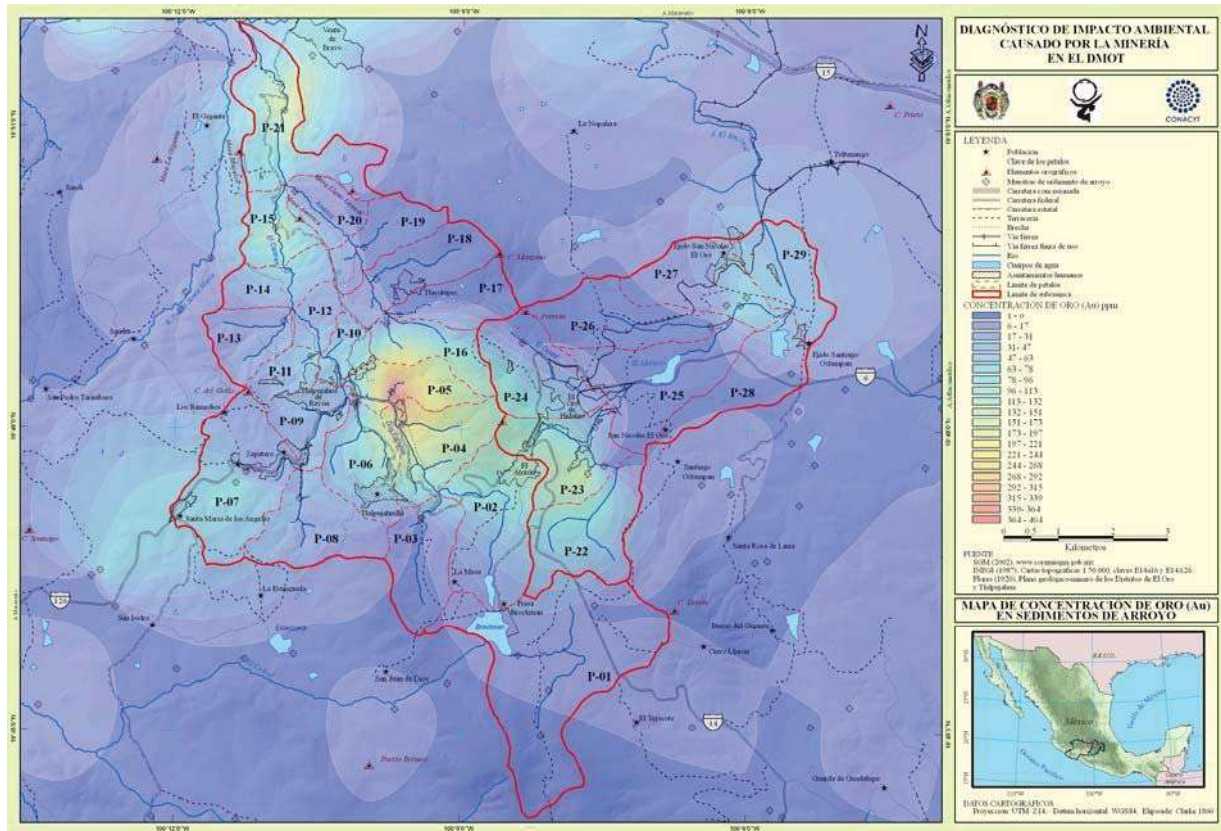


Figura 71. Mapa de anomalías geoquímicas de Au (ppb) en sedimentos de arroyo

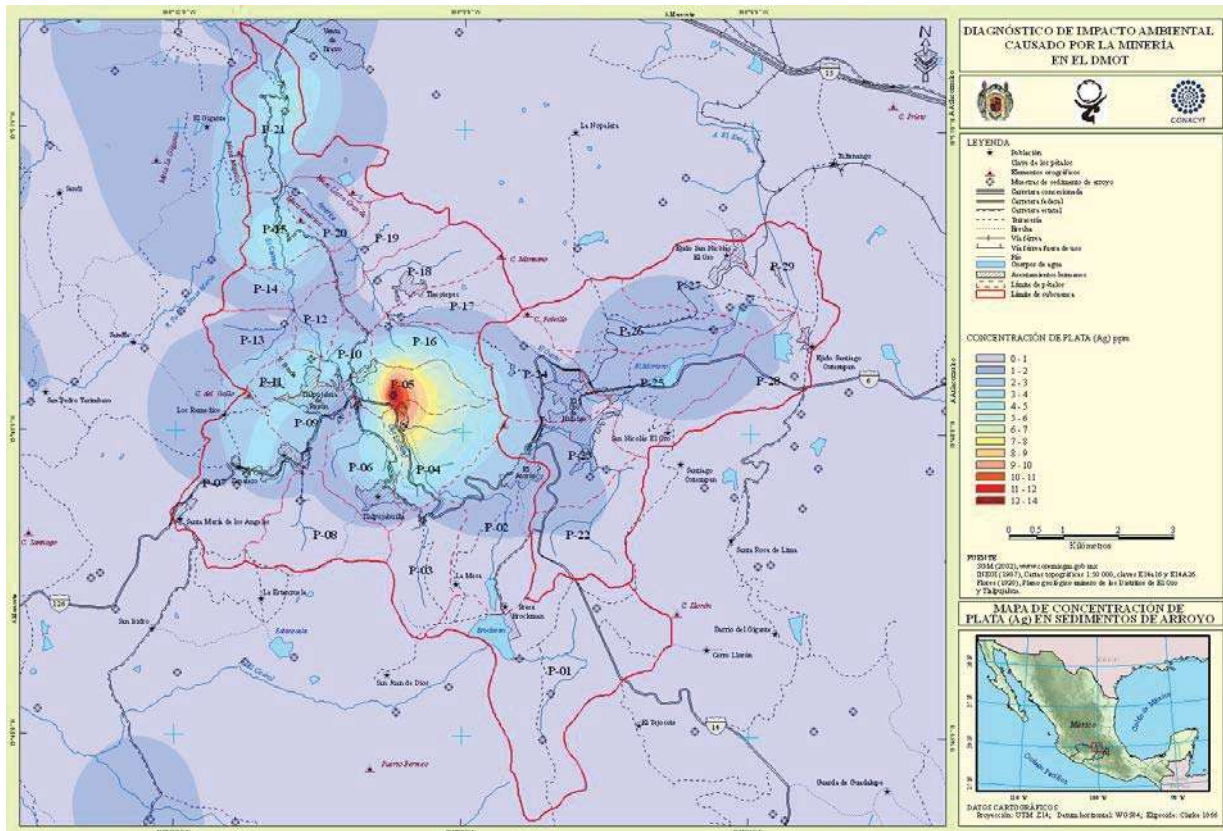


Figura 72. Mapa de anomalías geoquímicas de Ag (ppm) en sedimentos de arroyo.

10.3.2.2 Anomalías geoquímicas de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT): cobre (Cu), plomo (Pb), Zinc (Zn) y fierro (Fe)

En el presente apartado se discuten las anomalías de los EPT: cobre, zinc, fierro y plomo; los tres primeros se encuentran dentro del grupo de metales esenciales para el metabolismo humano, lo que quiere decir que tanto su deficiencia como un alto consumo puede causar daños a la salud. Es importante señalar que las anomalías que aquí se describen se refieren a las concentraciones relativas distribuidas a lo largo de la cuenca del DMOT y que no necesariamente implican ya un riesgo de impacto ambiental.

Son 10 los pétalos que presentan anomalías geoquímicas de alguno(s) EPT. Al igual que los EPE, los valores más altos de concentración se localizan dentro de la Subcuenca El Carmen. Las anomalías de Cu se presentan en 7 pétalos (Figura 73), las de Pb en 7 pétalos (Figura 74), las de Zn solo en uno (Figura 75) y finalmente de Fe sólo en dos (Figura 76). Conviene hacer notar que las anomalías de Cu y Zn solo se manifiestan en la subcuenca El Carmen.

A) *Anomalías geoquímicas de EPT en la subcuenca El Carmen.*

El **P-01**, desde el punto de vista geomorfológico es particularmente complejo, presenta seis tipos de unidades, lo que explica que el tipo de drenaje retorcido y también que el coeficiente de torrencialidad sea bajo respecto a los demás pétalos a pesar de una amplitud del relieve entre 300 y 400 m. En este mismo pétalo se encuentran anomalías geoquímicas de Cu y Pb pero en unidades geomorfológicas diferente y por tanto también diferente origen. La anomalía de Cu alcanza 32.78 ppm y se encuentra sobre las colinas ignimbríticas cuya pendiente del terreno es baja y por tanto se trata de acumulación de sedimentos cuya fuente se infiera provenga aguas arriba. En cambio la anomalía de Pb se encuentra sobre el valle acumulativo (recibe sedimentos de cumbres y laderas estratovolcánicas basálticas y puesto que no se observan obras mineras ni depósitos de residuos mineros definitivamente la fuente es hipogénica.

El **P-04** presenta anomalías de Cu, Pb y Zn, con los valores más altos de todo el DMOT. Considerando que ningún pétalo colindante aguas arriba presenta altas concentraciones de dichos elementos y que sus características geomorfológicas, hidrográficas e histórico mineras (ya descritas), podemos interpretar que la fuente es principalmente de origen antropogénico.

En el **P-05** se observa una anomalía geoquímica de Pb alcanzando 28.5 ppm, cuya fuente es definitivamente la Presa de jales los cedros. En este punto conviene hacer hincapié en el hecho de que el Pb es un elemento definitivamente tóxico y que esta presa está sujeta fuertes procesos de erosión hídrica cuyos sedimentos se redistribuyen aguas abajo y además el alto riesgo que implica la practica agrícola sobre estos jales aún cuando el Pb es un elemento altamente biodisponible.

La principal anomalía que presenta el **P-07** es de Cu, se encuentra sobre ladera metacalcárea pelítica y conforme al comportamiento de la red hidrográfica confirma que es alimentada por tres socavones: *S. Santa María*, *S. El Orito* y *S. Carmen de Vírgenes*, es decir su origen es antropogénico (por minería).

En el **P-08** se observa una diversidad de unidades geomorfológicas tanto de origen tectónico/denudatorio como volcánico la mayor superficie del pétalo esta cubierta por el primer grupo y especialmente sobre la ladera metapelítica se encuentran la anomalías geoquímicas de Cu y Pb. Este pétalo tiene un coeficiente de torrencialidad alto por lo que es más propenso a la pérdida de sedimentos que a la acumulación y puesto que no se observan obras mineras ni depósitos de jales o terrero (aguas arriba) el origen es definitivamente hipogénico.

Las características geomorfológicas, hidrográficas y mineras de los pétalos siguientes ya han sido discutidas en el punto **10.3.2.1**, razón por la cual solo se establecerá el posible origen de las anomalías conforme los pétalos.

El **P-11** presenta una concentración elevada de Cu, la fuente se encuentra en el mismo pétalo y es en mayor proporción antropogénico.

Los pétalos **P-15** y **P-21** presentan concentraciones anómalas de Cu y Pb, y puesto que como ya se mencionó tienen una mayor tendencia a la acumulación de sedimentos la fuente se encuentra aguas arriba.

B) Anomalías geoquímicas de EPT en la subcuenca El Ocotal.

En el Ocotal solo se presentan concentraciones anómalas de Fe y Pb. Ambas en **P-23** y solo Pb en **P-27**. En el P-23 la concentración anómala de Fe dadas las características geomorfológicas e hidrográficas ya discutidas su origen es hipogénico (natural).

Por último, el **P-27** se localiza aguas debajo de la subcuenca y como ya se ha mencionado, dadas sus características geomorfológicas tiene mayor tendencia a la acumulación de sedimentos que a la erosión. Es decir el origen se encuentra aguas arriba, de las presas de jales *Tiro México* y *CONALEP* puesto que ambos pétalos que las contienen drenan en esta dirección y por tanto es antropogénica.

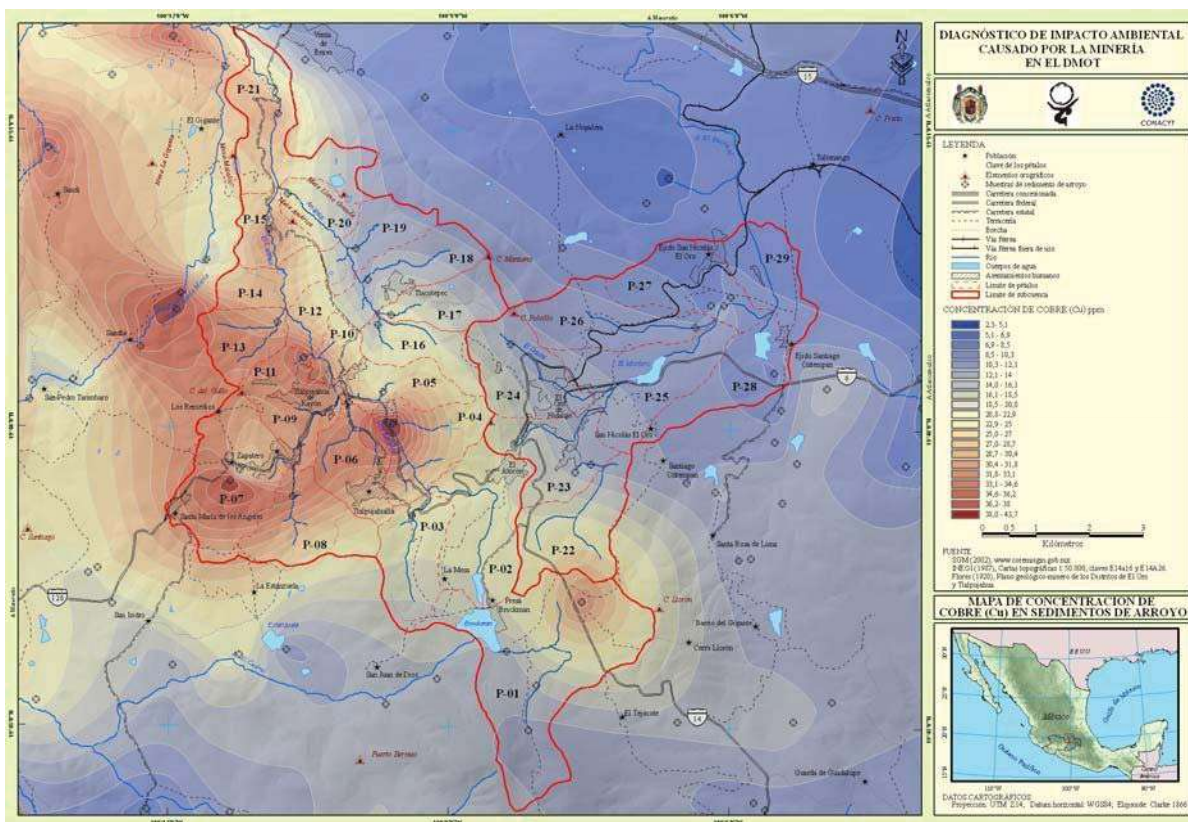


Figura 73. Mapa de anomalías geoquímicas de Cu (ppm) en sedimentos de arroyo.

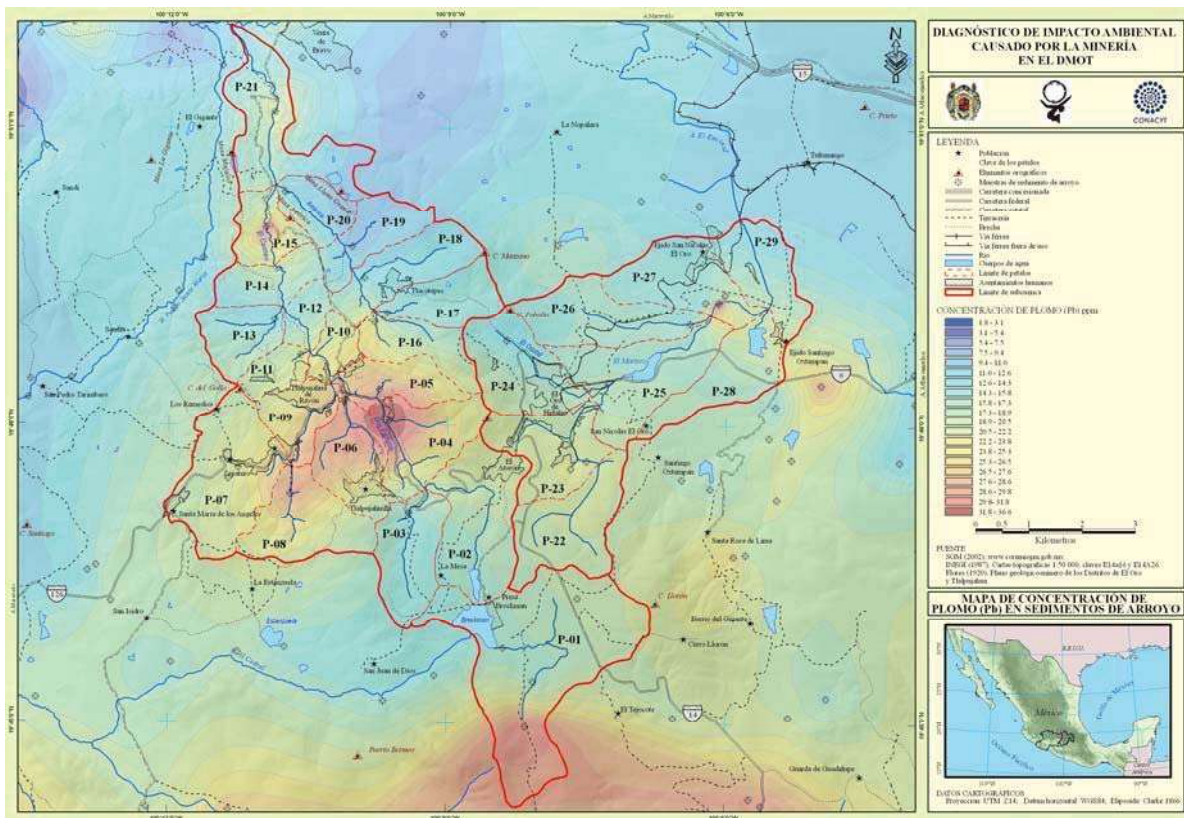


Figura 74. Mapa de anomalías geoquímicas de Pb (ppm) en sedimentos de arroyo.

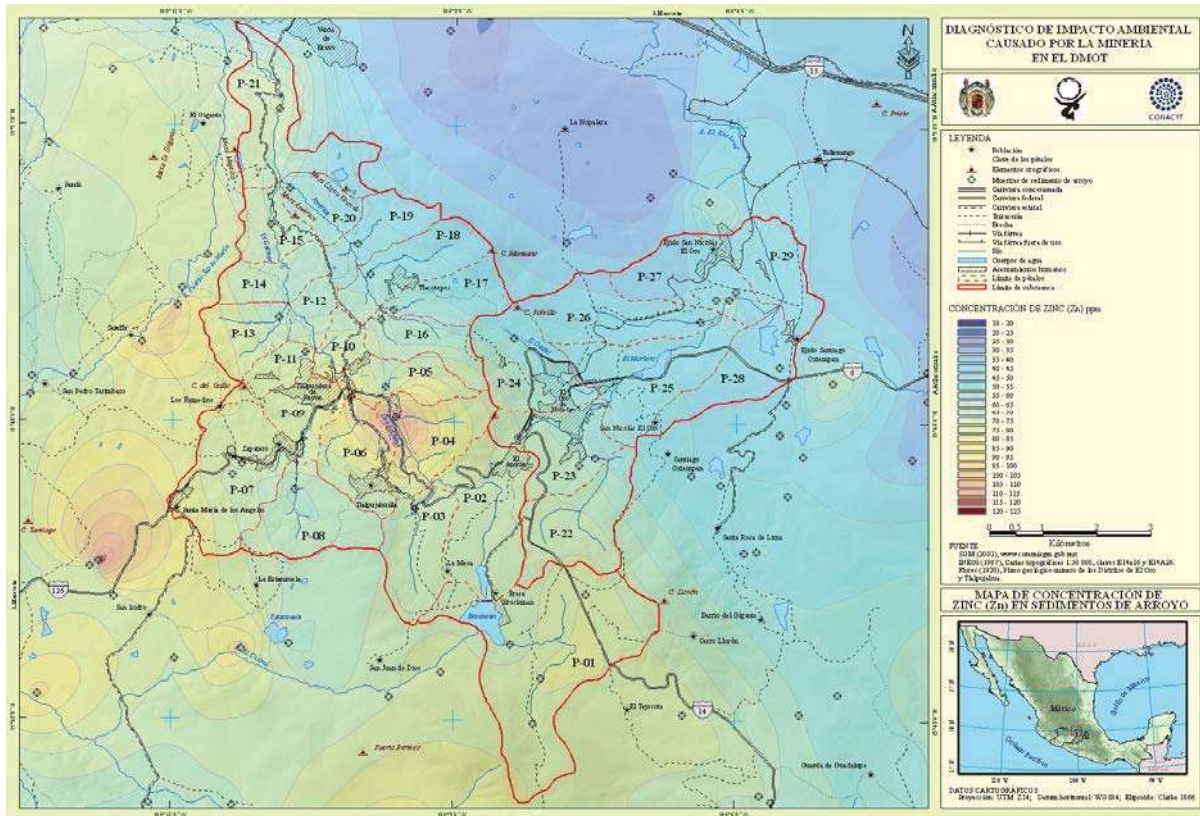


Figura 75. Mapa de anomalías geoquímicas de Zn (ppm) en sedimentos de arroyo.

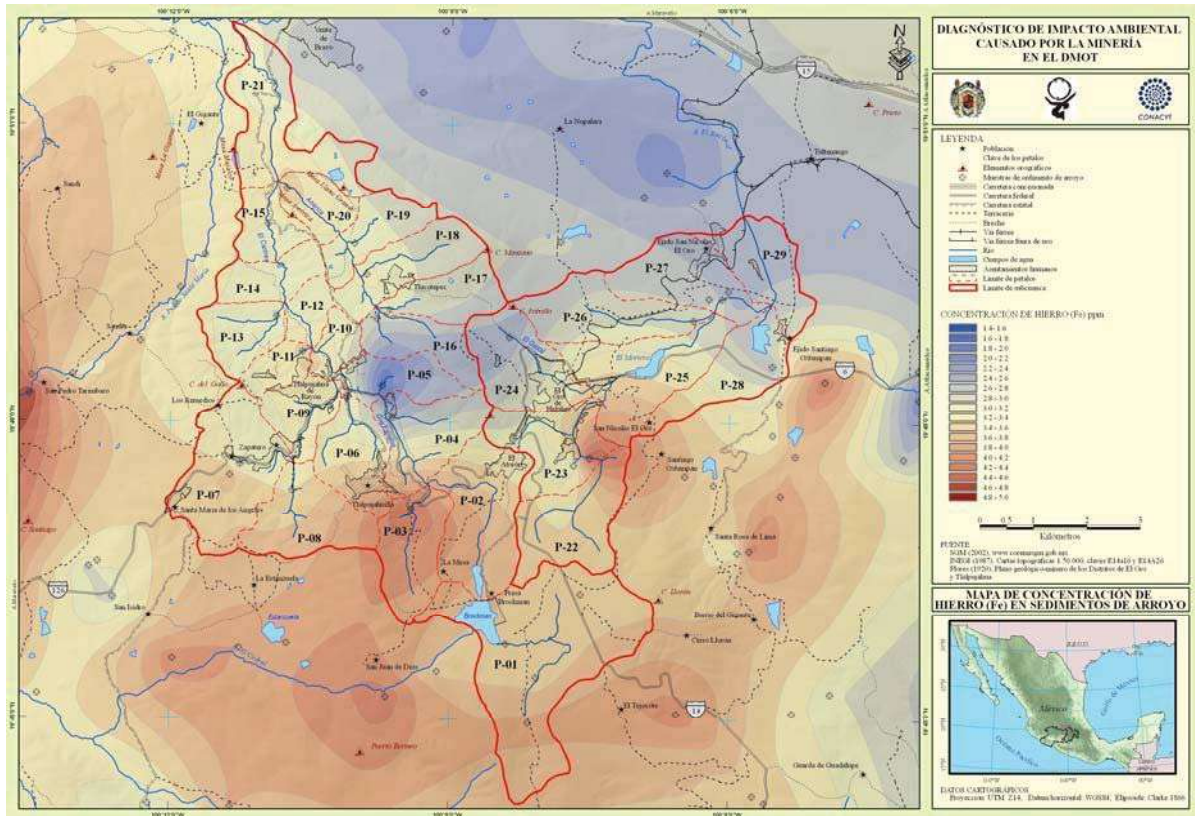


Figura 76. Mapa de anomalías geoquímicas de Fe (%) en sedimentos de arroyo.

CAPÍTULO 11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ☑ El estudio del medio ambiente con una perspectiva multidisciplinaria en un distrito minero en cualquier parte del mundo comporta estudiar: las características naturales o de pre-minería en conjunto con las obras de minería (o efecto antropogénico) que impactan directamente los recursos naturales y los procesos exógenos que se llevan a cabo en la cuenca hidrográfica que contiene dicho distrito minero.
- ☑ En México se tiene escasamente 12 años que se han producido estudios en los distritos mineros del país. La mayor parte de los trabajos realizados se han dirigido al estudio geoquímico sin considerar las implicaciones de un estudio holístico del medio ambiente.
- ☑ Los sistemas de información geográfica se revelan como una potente herramienta en el estudio multidisciplinario de diagnóstico de impacto ambiental de un distrito minero. En el presente trabajo se generaron mapas de trabajo (hidrográfico, geológico, de uso de suelo, geomorfológico, etc.), los cuales se realizaron por medio de trabajo de compilación de gabinete e investigación de campo.
- ☑ La cuenca Río Tlalpujahuá puede subdividirse en 21 subcuencas de las que solo dos: El Ocotlán y El Carmen, contienen el DMOT. Estas dos subcuencas han sido caracterizadas y presentan algunas diferencias que tienen implicaciones directas en el estudio de impacto de las obras mineras.
- ☑ Conforme a las características climáticas definidas por medio de la compilación de 9 estaciones meteorológicas de la CNA, así como por la colecta directa de dos estaciones instaladas ex profeso durante 2007-2008, y considerando los diagramas de clasificación de Wilson y Peltier se identificó que en las dos subcuencas del DMOT predomina el intemperismo de tipo químico. Los meses más húmedos son de junio a octubre, es en esta temporada que los procesos geoquímicos de disolución de los EPE y EPT podrían presentarse.
- ☑ En la comparación con las estaciones meteorológicas El Oro CNA y El Oro FOMIX se puede apreciar una variación climática a través del tiempo en donde la temperatura aumentó y la precipitación disminuyó.

- ☑ Por medio de la compilación bibliográfica del DMOT se han documentado y referenciado 51 obras mineras, entre las que se cuentan: 4 terreros, 5 jales o residuos arenosos, 12 socavones, 30 tiros.
- ☑ Por medio de la cartografía de las obras mineras realizada en el DMOT se encontró que los residuos mineros están constituidos principalmente por jales arenosos, los cuales han sido divididos en: 3 en el Distrito de Tlalpujahuá, los cuales ocupan un área de 431,183.30 m². Por su parte 2 presas en el Distrito de El Oro los cuales ocupan un área de 191,580.92 m²
- ☑ Considerando los datos generados en la compilación histórica los volúmenes de jales generados en el DMOT serían un total de 17,518,865 toneladas Considerando los datos obtenidos en este estudio, así como a la evidente formación de canales de erosión y cárcavas, estos volúmenes han sido removidos entre un 20 y 30% .
- ☑ Por medio del levantamiento de 11 perfiles en ambos distritos se observó que en los jales del DMOT varía su granulometría de limo-arenosos a arenosos, presentan en general un pH = 7.598 y una conductividad eléctrica que alcanza $ce=8,180$, así como variaciones mineralógicas y geoquímicas (Au=4.37 ppb, Ag=178.3 ppm, Pb=371 ppm, Cu=808.59 ppm, 548.20). Aunque le otorgan un potencial económico también existe un riesgo potencial, puesto que se observan procesos de lixiviación de metales pesados (Cu).
- ☑ Dado que se ha comprobado el alto contenido de plomo en las presas de jales no es conveniente continuar con la actividad agrícola que se practica en ellas, por la toxicidad y biodisponibilidad que le caracterizan.
- ☑ La presencia de lluvias torrenciales principalmente en el mes de julio, propician una intensa erosión fluvial y causantes de una importante pérdida acelerada de suelo y de volúmenes jales.
- ☑ Los diagramas de Peltier y Wilson resultan eficientes en la consideración de los procesos morfogenéticos del paisaje pero también lo son para considerar los procesos geoquímicos probables en los residuos mineros.
- ☑ Las unidades geomorfológicas y la delimitación de subcuencas-pétalos en conjunto, conforman marco muy eficiente en el diagnóstico de impacto ambiental causado por minería por

lo que se recomienda tenerlos en consideración en estudios futuros de cualquier trabajo de impacto ambiental.

☑ Aun cuando los datos geoquímicos de sedimentos de arroyo generados por el SGM tenían como objetivo la localización de yacimientos son convenientemente útiles en el DIA. La concentración de EPE y EPT en las presas de jales de la subcuenca El Carmen es notablemente menor que en la Subcuenca El Oro, lo que indica que en la primera se trabajó con más cuidado la separación de los minerales.

☑ Particularmente en laderas estratovolcánicas andesíticas se observan una amplia concentración de tiros esto se debe a que las estructuras mineralizadas del DMOT se alojan generalmente en rocas metacalcáreo-pelíticas que fueron sepultadas por las andesitas miocénicas del C. Somera por lo que los mencionados socavones superan una altitud de 2700 msnm.

☑ En las unidades de origen tectónico denudatorio, se concentran la mayor porción de los socavones del DMOT con una altitud entre 2500 y 2700 msnm, es decir las estructuras mineralizadas más cercanas a la superficie e incluso expuestas.

☑ En base a una sobreposición de información histórico-minera, geológica, hidrográfica, geoquímica y geomorfológica, se puede identificar y precisar la(s) fuentes de las anomalías geoquímicas.

☑ Por medio del análisis geomorfológico y distribución de las anomalías geoquímicas se puede afirmar que a más de 50 años de haber cesado la minería en el DMOT se observa un impacto ambiental activo asociado a los procesos exógenos de la misma cuenca. Sin embargo en este distrito minero también se observa una recuperación natural de la vegetación, que aún no siendo más rápida que los cambios generados antropológicamente si comprueba la capacidad de el paisaje para auto-recuperarse.

☑ Se concluye que la cartografía y delimitación de las cuencas es un importante paso para la realización del DIA en el DMOT, se sugiere realizar una cartografía geológica a escala pequeña, la cual puede ahora convertirse en un instrumento básico para precisar con más certeza el impacto ambiental que pueda tener la minería.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E., Carrasco M.A., León O., Martínez E. Silva P., Castillo G. Ahumada I., Borie G y González S. (2005). **Criterios de calidad de suelo agrícola. Gobierno de Chile ministerio de agricultura.** 217 pp.
- Angeles, G. R. y Gil V. (2006). **Identificación del grado de transformación antrópica y riesgo ambiental en cuencas fluviales serranas. El caso de la cuenca del arroyo El Belisario (Argentina).** GeoFocus (Artículos), n° 6, pp. 138-151.
- Armienta, M. A., Tlavera O., Morton O. y Barrera, M. (2003). **Geochemistry of metals from mine tailings in Taxco, Mexico.** Bulletin Environment Contamination Toxicology, vol. 71, n° 2, pp. 387-393.
- Aristizábal, E. y Yocota S. (2006). **Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburra.** DYNA, Colombia, Medellín. Año 73, n° 149, pp 5-16.
- Aronoff, S. (1989). **Geographic Information Systems: a Management Perspective.** WDL Publications. Michigan. 294 pp.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry ATSDR, (1999). <http://www.atsdr.cdc.gov>
- Bocco, G. (1986a). **Aspectos de anthropic erosión in Tlalpujahu River Basin, Central Mexico. An Applied geomorphological approach.** Tesis de Maestría, International Institute for Aerospace survey and Earth Sciences 8ITC). 86 pp.
- Bocco, g. (1986b). **Some coments on volcanic geomorfology as related to anthropic erosion processes.** Internal Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). 35 pp.
- Bocco, G. (1989). **Cartografía geomorfológica y análisis morfométrico para estudios de erosión acelerada.** Instituto de Geografía, UNAM, México. Boletín n° 19, pp.39-54.
- Bocco, G., Palacio J. L. y Valenzuela C.A. (1991). **Integración de la percepción remota y los sistemas de información geográfica.** Ciencia y Desarrollo, vol 12, n°97, pp. 79-88.
- Burrough, P. A. y McDonnell, R. A. (1997). **Principles of geographical information systems.** Nueva York, Oxford University Press. 356 pp.
- Buzai, G. D. (2007). **Dilemas de la relación Geografía-SIG entre la disciplina, la interdisciplina y la transdisciplina.** GeoFocus, n° 7, pp. 5-7.
- Calderón, G. y Rzedowsk, J. (1994). **Smilacaceae.** Flora del Bajío y regiones adyacentes, fascículo 26, 23 pp.
- Carranza-González .E. (2005). **Vegetación:** En: Villaseñor-Gómez L: (Ed). **La biodiversidad de Michoacán: estudio de estado. Gob del Estado.** 494 pp.

-
- Carrillo-Chávez, A., Morton-Bermea, O., González-Partida E., Rivas-Solorzano, H., Oesler G., García-Meza V., Hernández E., Morales P. y Cienfuegos, E. (2003). **Environmental geochemistry of the Guanajuato Mining District, México**: Ore Geology Reviews, vol. 23. 277-297.
- Chiprés-De La Fuente, J. A.; Raos-Arroyo, Y. R., Castro-Larragoitia, J. y Monroy-Fernández, M. (2005). **Mapeo geoquímico ambiental para identificar áreas con concentraciones elevadas de elementos tóxicos en suelos: aplicación en el Altiplano Potosino**. Actas INAGEQ, vol. 11, n° 1, pp. 31-35.
- CIPAMEX-CONABIO “Sección Mexicana del Consejo Internacional para la Preservación de las Aves – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad” (1999). **Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves**. Escala 1:250 000. México. Financiado por CONABIO-FMCN-CCA.
- Corona-Chávez, P. (1999). **El Basamento Litológico y Tectónico del Estado de Michoacán**. En: Corona-Chávez, P. e I. Israde-Alcántara (Eds.) **Carta geológica de Michoacán Escala 1:250000**. UMSNH y Gob. del Edo. de Mich. pp 10-26.
- Corona-Chávez, P., Martínez-Medina M., Robles-Camacho J., Ramos-Arroyo Y. R. (2007). **Evaluación de la importancia económica y el efecto de impacto ambiental por residuos mineros (jales) en el distrito dinero de El Oro-Tlalpujahuá: resultados geoquímicos preliminares de elementos económicos y potencialmente tóxicos**. 2º Congreso IDEAR, Morelia Mich.
- Corona-Chávez, P., Martínez-Medina M., Robles-Camacho J., Ramos-Arroyo Y. R. (2008). **Variaciones geoquímicas espaciotemporales en los residuos mineros sólidos del distrito minero El Oro-Tlalpujahuá**. Boletín de mineralogía, n° 18. pp. 43-44.
- Crook, J. y Bastian, R.K., (1992). **Guidelines for water reuse US EPA**. Washington DC, 71 pp.
- Dall’Aglia, M. (2004). **Geochemica ambientale e salute**. ARACNE, Roma Italia, 340 pp.
- De la Teja-Segura, M. A., Vergara-Martínez A. y Moctezuma-Salgado M. D. (2000), **Carta geológico-minera El Oro de Hidalgo E14A16 escala 1:50,000**. Consejo de Recursos Minerales. 39 pp.
- Dean, J. D., Stephens, J. E., Bankroft, J. (1996). **Use of Mine Tailings in Construction Materials**. En Taylor y Francis (Eds.) **Tailings and mine waste '96: proceedings of the Third International Conference on Tailings and Mine**. Balkema, Rotterdam. Pp.567-575.
- (De Vivo, B, Lima A. y Siegel F. R. (2004). **Geochemica Ambientale: metalli potenzialmente tossici**. Liguori Editore. 449 pp.
- Duque-Escobar, Gonzálo (2003). **Manual de Geología para ingenieros**. Universidad Nacional de Colombia. 480 pp.
- Elvir-Aceituno, R. (1955). **Informe Geológico de la Región Auroargentífera de El Oro, México y Tlalpujahuá, Michocán**. UNAM, México D.F. 56 pp.
- Etter, A. 1991. **Introducción a la ecología del paisaje. Un marco de integración para los levantamientos rurales**. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia, 80pp.
- Fryxell, Paul A. (1993). **Malvaceae**. Flora del Bajío y regiones adyacentes, fascículo 16, 174 pp.
- Flores, Teodoro.(1920). **Estudio Geológico Minero de los Distritos de El Oro y Tlalpujahuá**. Secretaria de Gobernación. México. 85 p y anexos.
-

-
- Fries, C. Jr., Ross O. y Obregón A., (1965). **Mezcla de vidrio en los derrames cineríticos “Las Américas” de la región El Oro-Tlalpujahua, estados de México y Michoacán, parte Centromeridional de México.** UNAM, Instituto Geológico, Boletín. 70, 85 pp.
- García, E. (1987). **Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana).** Cuarta edición, México D.F. 220 pp.
- García, E. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). **Climas (clasificación de Köppen, modificado por García).** Escala 1:1000000. México
- García-Leyton, L. A. (2004). **Aplicación de análisis multicriterio en la elaboración de impactos ambientales.** Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña. España. 285 pp.
- Galván-Villanueva, R. (2002). **Juncaceae.** Flora del Bajío y regiones adyacentes, fascículo 104, 45 pp.
- Garduño-Monroy (1999). **Marco tectónico del Estado de Michoacán.** in: La Carta Geológica del Estado de Michoacán escala 1: 250 000 en 4 hojas con notas explicativas, 27p.
- González, L. E. (2004). **Caracterización y ecodinámica de las unidades de paisaje en la cuenca del Río San Marcos.** Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. 310 pp.
- González-Fabián, M. C., Corona-Chávez P.; Ornelas-Chávez m. y Erba, E. (2006). **Nanoplancton Jurásico Superior-Cretácico Inferior de la región de Tlalpujahua, Michoacán.** Memorias del X Congreso Nacional de Paleontología. UNAM, Instituto de Geología, Publicación Especial 5, pp. 41
- González-Trueba, J. J. (2006). **El macizo central de los picos de Europa: Geomorfología y sus implicaciones geocológicas en la Alta Montaña Cantábrica.** Universidad de Granada. 819 pp.
- Higuera, P. y Oyarzun, R. (2002). **Curso de Minería y medio ambiente.** UCLM-UCM. Manual on-line: <http://www.uclm.es /users/higuera>
- INEGI (2000a). **XII censo general de población y vivienda,** Estado de México.
- INEGI (2000b). **XII censo general de población y vivienda,** Estado de Michoacán.
- Jambor, J.L., Blowes, D.W. (1998). **Theory and applications of mineralogy in environmental studies of sulfide-bearing mine waste.** En: Cabri, L.J., Vaughan, D.J. (Eds.), **Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy:** Ottawa, Canadá, Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, n° 27, pp.367-401.
- John, A. J. y Leventhal J. S. (1995) **Bioavailability of metals.** En: Du Bray (Ed). **Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models.** U. S. Department of the Interior y U. E. Geological Survey, pp. 10-18.
- Langedal, M. (1997). **Dispersion of tailings in the knabeana-kvina drainage basin, Norway, 1: evaluation of overbank sediments as sampling medium for regional geochemical mapping.** Journal of Geochemical Exploration, vol 58, n° 2. pp. 157-172.
- Loureiro, S., Ferreira A., Soares A. y Nogueira A. (2005). **Evaluation of the toxicity of two soils from Jales Mine (Portugal) using aquatic bioassays.** Chemosphere 2005, vol. 61, n° 2, pp. 168-177.
- Lottermoser, B. G. (2003). **Mine Wastes: Characterization, treatment and environmental impacts.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 278 pp.
-

-
- Lozano-Valencia, P.J. y Lozano-Valencia M.A. (2002). **Geología y geomorfología del sector oriental del Macizo de Cinco Villas y zonas aledañas**. Lurralde, n° 25, pp. 119-140.
- Lunar, R. y Oyarzun, R. (1991). **Yacimientos minerales: técnicas de estudio, tipos, evolución metalogénica, exploración**. Centro de Estudios Ramón Areces. 938 pp..
- Maioli, C. Corona Chávez P., Arreygue-Rocha E., Garduño-Monroy V.H. y Previtali, F. (2004). **Estudio Geológico-Geomorfológico de la Cuenca del Río Chiquito: evidencias de erosión acelerada**. En Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental de Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 116-137.
- Martínez-Arredondo, J.C. (2008). **Determinación de la influencia de obras mineras abandonadas al escurrimiento de base, en dos zonas con clima diferente: Tlalpujahua, Michoacán y Guanajuato, Guanajuato**. Tesis profesional, Universidad de Guanajuato. 92 pp.
- Monroy, M., Díaz-Barriga F., Raso I. y Carrizales L. (2002) **Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados (Pb, Cu, Zn) y análisis de riesgo en salud en Villa de la Paz-Matehuala, S. L. P.** Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 7 pp.
- Montaño-Cisneros, E., Robles-Camacho J., Corona-Chávez P., Martínez-Medina M., Ramos-Arroyo Y. R. (2006). **Caracterización mineral y geoquímica de los jales del distrito minero El Oro-Tlalpujahua**. 3er Foro de Ingeniería e Investigación de Materiales, pp. 198-203.
- Mosier, D.L., Berger, B.R., y Singer, D.A. (1986): **Descriptive Model of Sado Epithermal Veins**; en **Mineral Deposit Models**, Cox, D.P. y Singer, D.A., Eds, U.S. Geological Survey, Bulletin 1693, p. 154.
- Navarro, M.C.; Pérez-Sirvent C.; Martínez-Sánchez M. J.; Vidal J. y Marimon J. (2005). **Lead, cadmium and arsenic bioavailability in the abandoned mine site of Cabezo Rajao (Murcia, SE Spain)**. Chemosphere. 2006, vol. 63, n° 3, pp. 484-489.
- Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-031-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- Novelo, A. (2003). **Lilaeaceae**. Flora del Bajío y regiones adyacentes, fascículo 118, noviembre 2003. 10 pp.
- Park, C. F. y MacDiarmid, R. A. (1981). **Yacimientos Minerales**. Omega. Barcelona. 524 pp.
- Pereira-Neto, O.C. y Limberger L. (2004). **Análisis de la precisión de mapas de pendientes utilizando modelos digitales de terreno**. Revista de la facultad de Agronomía, La Plata, vol. 105, n° 2, pp. 97-103.
- Pérez-Caix, E. (2005). **Grossulariaceae**. Flora del Bajío y regiones adyacentes, fascículo 138, diciembre 2005. 22 pp.
- Plumlee, G. S. y Nash J. T. (1995). **Geoenvironmental models of mineral deposits-fundamentals and applications**. En: Du Bray (Ed). **Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models**. U. S. Department of the Interior y U. E. Geological Survey, pp. 1-9.
-

- Ramírez-Ramírez, I., (2001). **Cambios de la cubierta de uso del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y EdoMex., (1971-1974-2000)**. Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, n°. 45, pp. 39-55.
- Ramírez-Ramos, E. (1998). **Un reto de imaginación y valor**. Revista México en el Tiempo. Año 4, Número 27, Noviembre-Diciembre, pp. 34-40.
- Ramos-Arroyo, Y. R. (2004). **Caracterización geoquímica de depósitos de jales del Distrito de Guanajuato: México, D.F.** Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. D. F., México. 221 pp.
- Ramos-Arroyo, Y.R., Prol-Ledesma, R.M., Siebe-Grabach, Ch. (2004). **Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México; Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros**: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol 21, n°2, pp. 268-284.
- Ramos-Arroyo, Y.R. y Siebe-Grabach, C.D. (1998). **Variabilidad espacial de condiciones geoquímicas en presas de jales**: Actas INAGEQ, 4, pp. 51-63.
- Ramos-Arroyo, Y. R. (2006). **Estrategias para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México**. *Revista Mexicana de las ciencias geológicas*, vol. 23, n° 1, pp. 54-74.
- Razo, I., Carrizales L., Castro-Larragoitia J., Díaz-Barriga F. y Monroy, M. (2004a). **Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico**. *Water, Air, and Soil Pollution*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 152, pp. 129-152.
- Razo, I., Téllez J., Monroy M., Carrizales L., Díaz-Barriga F. y Castro J. (2004b). **As and Pb bioaccessibility in polluted soils from a mining site under semiarid climate in México**. Proceedings of the Tailings and Mine Waste '04 Conference. Balkema Publishers (The Netherlands), pp. 173-184.
- Razo, I., Téllez H. J., Carrizales Y. L., Castro L. J., Díaz-Barriga M. F. y Monroy F. M. (2005). **Influencia de la mineralogía en la bioaccesibilidad de plomo en suelos contaminados del Distrito Minero Santa María de la Paz, S.L.P.** En: R. Corona Esquivel, J. Gómez Godoy (Eds.). **Memoria de la XXVI Convención Internacional de Minería de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México**. Veracruz, Ver. (México): pp. 459-464.
- Robles-Camacho, J., Corona-Chávez P., Montaña-Cisneros E., Martínez-Medina M. y Ramos-Arroyo J.R.. (2007). **Caracterización mineral y reutilización potencial de los jales en el distrito minero de El oro-Tlalpujahuá**. 2º Congreso IDEAR, Casa de Gobierno.
- Robles-Camacho, J., Corona-Chávez P., Ramos-Arroyo Y.R., Nieto Monroy A.P., Martínez-Medina M.(2008). **Redistribución de masas en el sistema de jales de El Oro-Tlalpujahuá, Michoacán**. XI Coloquio de Mineralogía, Sociedad mexicana de Mineralogía, Jalapa Ver. Boletín de Mineralogía, Vol.18, N° 1, pp.41-42.
- Rzedowski, J. y Calderón G. (1992). **Linaceae**. Flora del Bajío y regiones adyacentes, fascículo 6. 22 pp.
- Rzedowski, J. y Calderón, G. (2002). **Verbenaceae**. Flora del Bajío y regiones adyacentes, fascículo 100, 145 pp.

- Salomón, M. A., Soria N. D. y Fernández R. (2005). **Segundo informe: Estudio de caso sitio piloto Mendoza Departamento de Lavalle. Segundo Informe. Evaluación de degradación de tierras.** Laboratorio de Desertificación y Ordenamiento Territorial. LADyOT-IADIZA-CRICTY. 14 pp.
- Samudio S. y Carranza E. (1994). *Cupressaceae*. Flora del bajío y de regiones adyacentes, fascículo 29. septiembre 1994. 20 pp
- Sánchez, L. E. (2000). **Evaluación de impacto ambiental.** En Repetto, F. L. y Karez, C. S. (Ed). **Notas de clases dictadas en II Curso internacional de protección al ambiente.** UNESCO/UNICAPM. Campinas, Brasil. pp. 36-68
- Santana-Rodríguez, L. M., Beaulieu N. y Pubiano-Sanabria Y. (2004). **Planificación en los Llanos colombianos con base en unidades de paisajes: El caso de Puerto López, Meta.** Geotrópico, Bogotá Colombia. Vol. 2, n° 1, pp. 21-33
- Saucedo-Ocaña, I. (2005). **Mina “Las Dos Estrellas”.** México D.F. 145 pp.
- SEMARNAT “Secretaría de medio ambiente y recursos naturales” (2001). **Programa de Manejo del Area Natural Protegida con el carácter de Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca.** Diario Oficial de la Federación, 48 pp.
- Siebe, Ch., Jahn R. y Stahr K.(1996). **Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo.** Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, EdoMéx. 57 pp.
- Silva-Ortiz, I. y Salgado-Soto, Z. (1988). **Estudio estratigráfico estructural en la región de Tlalpujahuá- El Oro, Edos de Mich. Méx.** Tesis profesional, Instituto Politécnico Nacional. México D.F. 74 pp.
- Simón, M., Ortiz I.; García I.; Fernández E.; Fernández J.; Dorronsoro C. y Aguilar. J. (1998). **Desastre ecológico de Doñana.** Universidad de Granada, Edafología, vol. 5. Diciembre 1998. pp. 153-161.
- Sonneschmidt, F., (1825). **Tratado de Amalgamación de la Nueva España.** México. 159 pp.
- Sotelo-Navaltropo, J. A. (1992). **Paisaje, semiología y análisis geográfico.** Anales de Geografía de la Universidad Complutense, Madrid, n° 11, pp. 11-23.
- Spadoni, M. (2006). **Geochemical mapping using a geomorphologic approach based on catchments.** Journal of Geochemical Exploration, vol 90, n° 3, pp. 183–196.
- Southworth, J.R. (1905). **Las minas de México: edición ilustrada historia - geología - antigua minería y descripción general de los estados mineros de la república mexicana.** Gobierno del Estado, México D. F. Tomo IX.
- Uribe-Salas, J. A. (2006). **Historia económico y social de la compañía minera Las Dos Estrellas, en El Oro y Tlalpujahuá, S. A. 1898-1938.** Facultas de Historia, UMSNH, 362 pp.
- Uribe-Salas, José Alfredo, 2005. **Historia de la minería en Michoacán, volumen II.** UMSNH, SMM, Museo Tecnológico del Siglo XX “Mina Dos Estrellas”. Morelia Mich. 227 pp.
- Uribe-Salas, José Alfredo. (1994). **Recuento histórico bibliográfico de la minería en la región central de México.** UMSNH, IIH y Departamento de Historia de México. 271 pp.
- Vargas-Márquez, F. (1997). **Parques nacionales de México.** Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México (SEMARNat). 760 pp.

Wathern, P. (1988). **Environmental impact assessment. Theory and practice.** Ed. Routledge. Cd. London and New York. 322 pp.

CARTOGRAFÍA

Archivo Cartográfico Histórico del Museo Tecnológico Dos Estrellas (1905-1956). **266 ejemplares entre planos de pertenencias, secciones y planos geológicos**

Benítez-Muro, J. A. (1976). **Plano de estructuras del distrito minero El Oro-Tlalpujahua, Mich.** Consejo de Recursos Minerales (CRM).

INEGI, (1987). **Carta topográfica.** Hojas E14a16 y E14A26, escala 1:50,000

INEGI, (1987). **Carta Edafológica.** Hojas E14a16 y E14A26, escala 1:50,000

NEGI (1994). **Ortofotos digitales,** E14A16E, E14A16F y E1426B, con dimensiones de pixel X, Y: 2 metros.

INEGI, (1987). **Datos vectoriales 1:50,000.** Hojas E14a16 y E14A26.

I INEGI, (1990). **Fotografías aéreas.** Escala 1:25000

CONSULTA EN RED

<http://www.coremisgm.gob.mx>

<http://www6.uniovi.es/~feli> (consulta agosto 2009)

<http://earth.google.es> Google Earth. Imágenes de satélite en línea (2006)

<http://smn.cna.gob.mx> (Servicio Meteorológico Nacional y Comisión Nacional del Agua)

<http://www.conanp.gob.mx> (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas)

<http://www.difusioncultural.uam.mx>

<http://www.geociencias.unam.mx> (Molina Garza, R. *Paleomagnetismo*)

ANEXO I LOS MÉTODOS DE EXTRACCIÓN MINERA

Los métodos de extracción de la actividad minera, como ya se menciono, también determinan el tipo de impacto ambiental y se agrupan en cuatro sistemas: A) minería de superficie, B) minería subterránea, C) extracción por dragado y D) por pozos de perforación.

A) MINERÍA DE SUPERFICIE

Minas a cielo abierto: se practica en depósitos mineralizados diseminados o en venillas (stockwork) cuya característica principal es un gran volumen y baja ley. Se realiza una selección del mineral o mena y se transporta a la planta de beneficio mientras que la ganga (sin valor económico) se deposita en “zonas especiales”. Este método tiene un fuerte impacto visual puesto que las minas toman formas de fosas con terrazas que con el tiempo de extracción abarcan más superficie y aumentan su profundidad. Se remueve la capa superficial del yacimiento propiciando en primer lugar la perdida total de la cobertura vegetal y el suelo. También es una de las que más propicia el drenaje ácido de mina (DAM).

Explotación al descubierto: este sistema se utiliza generalmente para extraer carbón y lignito y sigue el mismo método de extracción que el de a cielo abierto con la diferencia de que el material que cubre las vetas de carbón se deja en la cavidad formada por la reciente explotación mientras que en la minería a cielo abierto se lleva a zonas lejanas.

Cantera: los materiales que se extraen son minerales industriales o bien materiales para construcción y generalmente la mayor porción se convierte en un producto, por lo que el material de desecho es mínimo.

Minas de placer: son depósitos de partículas minerales mezcladas con arena o grava localizadas en lechos de ríos o en sus cercanías, sedimentos de lecho marino y depósitos de glaciares. El proceso de extracción normalmente se limita a movimiento de tierras y sistemas de recuperación física y no química.

B) MINERÍA SUBTERRÁNEA

Se practica en yacimientos que se presentan en vetas o cuerpos profundos de mineral muy rico y se subdivide en dos grupos.

Subterránea de roca blanda (el carbón): consiste en realizar en la veta de carbón dos túneles paralelos separados por una distancia de 300 metros, después se abre una galería que conecta ambos túneles y se extrae el carbón con ayuda de un equipo hidráulico de entibado⁹ que hace la función de un techo por encima del personal. El material extraído se saca de la mina mediante una cadena transportadora. Se propicia que el techo ceda al avanzar el sistema de soporte, este procedimiento en la superficie se manifiesta con una depresión.

Subterránea de roca dura (metales y minerales): se realizan perforaciones y voladuras, este sistema de extracción genera una red de galerías que siguen la dirección de las vetas, además puesto que los trabajos se realizan en cientos de metros de profundidad es considerada una de las más peligrosas para los mineros, hay riesgo de derrumbes, propicia el drenaje ácido de mina, y en la superficie se llegan presentar zonas de depresión o fracturas. Es éste el tipo de extracción que se practicó en el DMOT.

C) EXTRACCIÓN POR DRAGADO

Se considera el sistema de extracción de minerales más barato y se practica en aguas poco profundas (hasta 65 metros). Consiste en la recuperación de minerales con el uso de dragas situadas en el extremo de tubos de succión emplazadas en plataformas flotantes o barcos. Por supuesto los efectos ambientales que genera esta actividad son: la alteración de la morfología de fondo marino, pérdida o perturbación de organismos bentónicos, alteración de la composición química del agua de fondo, incremento de nutrientes en la capa superficial del agua.

D) EXTRACCIÓN POR POZOS DE PERFORACIÓN

Este sistema permite extraer del subsuelo materiales líquidos (petróleo-agua) y materiales solubles en agua sin necesidad de excavar túneles y galerías. Este sistema tiene riesgos de contaminación con el relevo incontrolado del material empleado en la perforación como aditivos, tratamientos anticorrosivos. Las vibraciones en las plataformas de perforación atraen peces propiciado una redistribución de local cardúmenes.

⁹El entibado o apuntalamiento es el equipo que hace la función de una pared portátil que se usa para evitar derrumbes.

ANEXO II TIPOS DE IMPACTO AMBIENTAL CAUSADOS POR MINERÍA

IMPACTO AMBIENTAL DE LA MINERÍA SOBRE EL MEDIO FÍSICO

Los tipos de impacto ambiental en el presente trabajo se abordan en función del medio que modifican.

SOBRE LA ATMÓSFERA

El impacto ambiental que genera la minería en la atmósfera según Oyarzun et. al. (2002) no es tan importante, en términos volumétricos, como el que producen otros procesos industriales o el tráfico automovilístico. Sin embargo no es menos importante para los ecosistemas y los grupos humanos que diariamente están bajo la influencia de zonas mineras y por tanto están expuestos en mayor o menor grado a los efectos que esta pueda generar. La minería produce emisiones a la atmósfera en cuatro formas: i) partículas sólidas, ii) gases, ii) ruidos y, i) aerosoles.

- ☑ Las partículas sólidas se generan durante los procesos de voladura, de carga, de transporte y de molienda. La composición de las partículas es la misma que la del yacimiento y la roca encajonante.
- ☑ Los gases pueden ser liberados durante el proceso de extracción (siendo los más comunes CO₂, CO y Gas Metano) y los que se generan durante la combustión de la maquinaria utilizada en el proceso minero.
- ☑ El ruido es una forma de contaminación acústica que puede tener efectos adversos sobre las personas como sordera, psicológicos, desorganización visual y taquicardias. Sobre la fauna puede alterar las costumbres fisiológicas.
- ☑ Los aerosoles se pueden formar desde la explotación del yacimiento, sin embargo el mayor riesgo esta en los procesos de beneficio por ejemplo en las pilas de mineral con compuestos como el cianuro la presencia de viento favorece la dispersión a grandes distancias.

Conviene hacer hincapié que el impacto ambiental que la minería ejerce sobre la atmósfera es durante el desarrollo de dicha actividad, una vez que esta cesa el impacto ambiental también

SOBRE EL AGUA

El agua es un recurso vital en el desarrollo de todos los procesos biológicos y por tanto para el desarrollo del ser humano. La calidad del agua es importante para un determinado tipo de uso por ejemplo un tipo de agua que cumple con la calidad para el riego en uso agrícola puede no ser cumplir con la calidad para consumo humano. Para medir la calidad de agua los parámetros más importantes a considerar son: potencial de hidrogeno (pH), temperatura, contenido de gases, contenido de sales, sólidos en suspensión, contenido orgánico, demanda biológica de oxígeno (BBO), demanda química de oxígeno (DQO) y carbono orgánico total. Los problemas que genera la minería en la calidad del agua pueden ser:

- ☑ Impacto en el agua debido a la movilización de partículas sólidas en ocosos de arrastre por el viento o aguas superficiales y que proceden de las zonas de labor, las presas de jales y terreros.
- ☑ Impacto por la adición de sales al agua debido a la disolución de minerales expuestos por los mismos procesos de minería o por vertidos de las plantas de beneficio.
- ☑ Impacto por adición de metales pesados al agua, principalmente por la minería metálica en donde los elementos metálicos son expuestos al aire libre en donde los agentes externos pueden actuar libremente sobre ellos y favorecen su movilidad, la formación de compuestos solubles. La adición de metales pesados depende además de la misma naturaleza de los yacimientos en explotación y podrían ser: Cu, Zn, Cd, Hg, Pb, As. El impacto ambiental también depende de las técnicas de lixiviación en pila de metales pesados (el agente lixivante puede ser cianuro de sodio o ácido sulfúrico).
- ☑ Cambios en el pH del agua, en dónde se da origen al drenaje ácido de mina (DAM), es decir aguas con fuerte acidez (pH de 2-3), ricas en sulfatos y contenido variable de metales pesados. El DAM es un fenómeno muy estudiado en donde los sulfuros de los minerales se transforman en ácido sulfúrico y arrastra consigo elementos potencialmente tóxicos, este proceso se presenta indistintamente en minería a cielo abierto o subterránea convirtiéndose en un factor de riesgo. Este problema tiene su origen en los túneles (socavones) de las minas subterráneas o en minas a cielo abierto. Conviene mencionar que la presencia de carbonatos es importante por su capacidad de neutralización de acidez.

- ☑ Impacto en las aguas subterráneas: por la extracción de agua para satisfacer las necesidades de operación en el tratamiento del mineral y/o los procesos de desagüe durante la extracción en las minas podría abatir el nivel del agua, pero es necesario considerar que el abatimiento también depende de las propiedades hidráulicas de las formaciones y estructuras geológicas.

SOBRE EL SUELO

Un concepto completo del suelo es la que ofrece López (1991) que lo señala como “un cuerpo tridimensional, continuo y coherente que cubre las porciones de la superficie terrestre; desarrollado a partir de una mezcla de materiales minerales y orgánicos bajo la influencia del clima y del medio natural, como el material parental, relieve y organismos, que a través del tiempo, puede ser modificado y aún constituido por el hombre”.

Nuestro interés ahora es el impacto que la minería ha causado sobre dicho elemento que además resulta valioso para el desarrollo de actividades económicas como la agricultura y ganadería, porque es sobre este que se desarrolla la vida humana. La minería puede impactar al suelo de forma tal que propicia la pérdida total del suelo, pérdida de fertilidad del suelo o bien mantener su fertilidad permitiendo el paso de contaminantes a la cadena alimenticia. Las formas de impacto al suelo causado por la minería se pueden mencionar:

- ☑ Impacto sobre la calidad del suelo por vertidos o efluentes líquidos por ejemplo el DAM.
- ☑ Impacto por jales y terreros que pueden inducir la infiltración de aguas de lixiviación, contaminadas o no al suelo que les subyace o a unidades de suelo cercanas.
- ☑ Sepultamiento del suelo por jales o terreros con el que se evita la acumulación de materia orgánica y se traduce en pérdida de hábitat.

SOBRE EL PAISAJE

El paisaje como patrimonio intangible además de su valor estético tiene importancia en cuanto a su morfología, ya que determina la distribución o el alcance espacial del impacto ambiental. La minería puede impactarle de varias formas como por ejemplo:

- ☑ La minería a cielo abierto al remover la capa superficial, propicia la modificación total del paisaje sin posibilidad de recuperarse,

- ☑ La construcción de tiros, socavones, respiraderos, la construcción de plantas de beneficio, oficinas y viviendas merma su valor escénico.
- ☑ La acumulación de terreros y construcción de presas de jales modifica su morfología.
- ☑ La acumulación de terreros, construcción de presas de jales y obras mineras modifican los causes naturales de agua.
- ☑ En donde la extracción minera subterránea ha sido muy intensa el terreno puede colapsarse dando origen depresiones.
- ☑ También, la minería a cielo abierto puede dar origen a nuevas microcuencas.
- ☑ Como consecuencia de una intensa deforestación se intensifican los procesos de erosión y sedimentación modificando el relieve.
- ☑ El arrastre de partículas sólidas propicia el asolve de los cuerpos de agua convirtiéndolos en pequeños pastizales.
- ☑ Las perforaciones y voladuras pueden desestabilizar el suelo por soliflucción y subsidencia, y en algunos casos propiciar los deslizamientos en masa.
- ☑ Cuando la lluvia ha caído varios días, los poros tienen un nivel de saturación cercano al 100% y los jales pueden llegar a fluir por efecto de su propio peso resultando en pérdida de estabilidad y deslizamiento (Terlien, 1998 en Ramos, 2006).

IMPACTO AMBIENTAL DE LA MINERÍA SOBRE EL MEDIO BIÓTICO

(FLORA Y FAUNA)

El hábitat es considerado cómo el lugar que presenta las condiciones adecuadas para que viva un organismo, especie o comunidad vegetal o animal, cualquier modificación en uno de sus elementos tiene repercusiones sobre los organismos vivos que en él se desenvuelven. La minería puede impactar al medio biótico de la siguiente forma:

- ☑ La minería causa la destrucción parcial o total de vegetación en las zonas de operaciones mineras y áreas circunvecinas
- ☑ La antigua minería requería de madera como combustible para fundir los metales preciosos, dicha madera era extraída de los bosques cercanos a la zona de las minas propiciando la pérdida de hábitat y en algunos casos de especies.

- ☑ Durante el desarrollo de la minería la flora y la fauna acuática/terrestre son desplazadas, eliminadas o sepultadas lo que puede llevar a la pérdida de biodiversidad.
- ☑ La pérdida de nichos ecológicos puede llevar también a la extinción de poblaciones.
- ☑ La contaminación o introducción de elementos potencialmente tóxicos a los ecosistemas puede modificar las características fisiológicas de algunas especies causando: enanismo, gigantismo o algunas enfermedades y en el peor de los casos su desaparición.

IMPACTO DE LA MINERÍA SOBRE LA SALUD HUMANA

La concentración de minerales y metales en el medio ambiente por la actividad minera pueden tener efectos negativos en la salud humana. Por ejemplo: la silicosis es la formación permanente de tejido en los pulmones causada por la inhalación de sílice cristalina en polvo (cuarzo/cristobalita) es una enfermedad “incurable”; en las minas de carbón los mineros pueden desarrollar la enfermedad conocida como “pulmón negro” causada por la acumulación de polvo de carbón en los pulmones y desarrollar fibrosis masiva progresiva en la que se forman cicatrices en el pulmón.

En algunos casos las altas concentraciones de elementos químicos pueden ser dañinos y tener diferente origen como la lixiviación y escurrimiento de metales tóxicos ya sea que los depósitos minerales sean meteorizados (natural) o expuestos al aire libre por los procesos de la minería (antropogénicos).

ANEXO III

PARÁMETROS DE CONTROL DE LA MOVILIDAD DE METALES PESADOS

La geoquímica ambiental es la disciplina que estudia la composición química de los componentes de la litosfera, hidrosfera, atmósfera y las formas de vida que en ellos se desarrollan para definir el impacto de la contaminación de metales en los ecosistemas. Además estudia los factores que condicionan la movilidad, dispersión, deposición, concentración y tiempo de residencia de elementos y compuestos químicos en los ecosistemas. Los elementos, conforme su abundancia en la superficie terrestre se clasifican en:

- ☑ *Elementos mayores:* componen el 95.5% de la corteza terrestre (Silicio, Aluminio, Hierro, Calcio, Sodio, Magnesio y Potasio).
- ☑ *Elementos menores y elementos traza:* componen el 5% de corteza terrestre, se encuentran en pequeñas porciones (<1.0%ppm)

Cuando se presenta una mayor concentración de los elementos traza por encima de su media se dice que se trata de una anomalía geoquímica que puede ser antropogénico o hipogénico.

Para referirse a aquellos metales cuya densidad excede los 5 g/cm³ se usa la connotación de **metales pesados** (Forstner y Wittman, 1976 en Green, 2000). Por otra parte los metales se definen como elementos químicos que son buenos conductores de electricidad y cuya resistencia eléctrica es directamente proporcional a la temperatura absoluta, poseen alta conductividad térmica, alta densidad, alta maleabilidad y alta ductibilidad.

La importancia de la geoquímica de una zona minera y el substrato rocoso se debe a la influencia que tiene la distribución natural de los elementos químicos sobre los procesos geoquímicos que se desarrollan durante o después de la Minería como es el caso de la redistribución o concentración de elementos potencialmente tóxicos (EPT), oxidación de sulfuros, movilidad de los elementos, generación y neutralización de ácidos, etc., por ejemplo en una zona con rocas carbonatadas favorece la alcalinidad y por lo tanto la liberación de metales pesados disminuye.

Los yacimiento minerales se consideran estables si se encuentran en equilibrio con el medio encajonante, esto significa que ante cualquier modificación como es la exposición del mineral a la atmósfera se induce un cambio geoquímico por ejemplo en: potencial redox y potencial de hidrogeno (Lunar, R. y Oyarzun, R,1991), por tanto buscan estabilizarse, esto lleva a la formación de nuevas especies minerales y en algunos casos la liberación de EPT. Las características mineralógicas y geoquímicas del yacimiento en conjunto con el método de beneficio aplicado definen el potencial que los residuos mineros presentan para formar especies mineralógicas secundarias.

La toxicidad de los EPT depende de su concentración en el medio ambiente, del tiempo que estén en contacto con los organismos vivos y de las dosis que hayan sido absorbidas o ingeridas, Pero también de las especies minerales en las que se encuentren, y las condiciones fisicoquímicas juegan un papel importante en el comportamiento de los elementos químicos y su especiación por ejemplo: temperatura, el potencial de hidrógeno (pH), el potencial de oxido-reducción (potencial redox) y oxígeno disuelto .

Temperatura

La temperatura que se presenta es importante dada la relación directa que mantiene con la solubilidad de sales y gases. A mayor temperatura mayor solubilidad de iones y menor de gases. Ambos factores degradan la calidad de agua aumentando su dureza y disminuyendo su capacidad de disolución de oxígeno. La temperatura es una variable independiente que puede modificar el pH y Eh.

Potencial de hidrógeno (pH)

El agua es considerada como el disolvente por excelencia y en su estado más puro no se compone únicamente por moléculas de H₂O, una porción muy pequeña se disocia generando iones de hidrónio (H³O⁺) y de hidroxilo (OH⁻); en soluciones los valores de iones de H⁺ son muy pequeños, Sören Sorensen (1909) ideó una expresión logarítmica para expresar dichos valores:

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]}$$

A 1 atmósfera y 25°C de temperatura la concentración de iones de hidrógeno es de 1x10⁻⁷ M, por lo que el agua posee un pH de 7 como se muestra en la siguiente expresión:

$$pH = \log \frac{1}{[1.0 \times 10^{-7}]} = \log [1 \times 10^7] = 0 + 7 = 7$$

El pH puede tomar valores que van de 0 a 14, en donde el valor más cercano a 7 es considerado neutro, cuanto más cercano a cero tiende a ser ácido y cuánto más cercano a 14 tiende a ser básico (Figura 77)

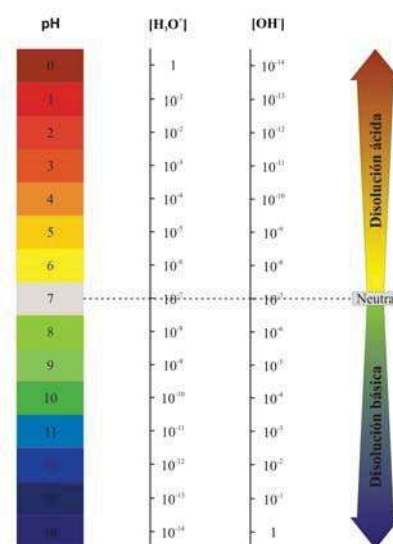


Figura 77. Valores de pH.

Como ya se mencionó el valor más deseable es el 7 porque indica que la sustancia es neutra y cuánto más distantes estén de dicho es más reactiva, por tanto no son deseables puesto que se asocian a un alto contenido de sales o metales pesados.

A) Potencial redox (Eh)

Todos los elementos químicos, excepto los gases nobles, tienen capacidad para ganar o ceder electrones. El potencial redox (Eh) es la tendencia a oxidar o reducir de un sistema y depende de los elementos o minerales que le componen. Los elementos químicos pueden ceder o ganar electrones conforme a sus propiedades fisicoquímicas y en este proceso generan una carga eléctrica que se mide en milivoltios (mV). Un sistema reductor que posee más átomos de hidrógeno cede electrones, en cambio si el sistema posee menos átomos de hidrógeno gana electrones y se dice que es oxidante. Entonces un sistema oxidante tiende a capturar metales pesados hasta saturarse y mudarse a un sistema reductor, por el contrario un sistema reductor libera algunos metales pesados. En la siguiente tabla se muestra la movilidad de algunos elementos en función de pH y Eh (Tabla 27).

Tabla 27. Movilidad de algunos elementos en función de pH y Eh.

	Movilidad	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Eh	Oxidante	Zn	Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd	Pb	Fe, Mn, Al, Sn, Pt, Cr, Zr
	Reductor				Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd, Pb
pH	Acido	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Cd	Pb	Al, Sn, Pt, Cr
	Neutro y alcalino		Cd	Pb	Al, Sn, Cr, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au

La utilidad de los diagramas Eh-Ph radica en que es un método sencillo para mostrar la estabilidad de los compuestos de los metales pesados y predecir su comportamiento ante un cambio de condiciones ambientales, ilustran la estabilidad e inestabilidad de minerales bajo particulares condiciones de Eh-pH y muestra las especies iónicas que los elementos presentan en solución (Lottermoser, 2003). En el siguiente diagrama Eh-pH Dall’Aglío (2004) presenta las diferentes condiciones oxido-reductoras en aguas naturales. Las aguas naturales son enumeradas de la siguiente forma: **I = agua de mina**, **II = agua de lluvia**, **III = agua de río**, **IV = agua oceánica**, **V = agua salina en contacto con la atmósfera**, **VI = agua subterránea**, **VII = agua de turbera**, **VIII = agua de suelos en condiciones muy húmedas**, **IX = agua salina aislada de la atmósfera** y **X = agua salina con abundante materia orgánica**.

Entonces conforme al diagrama Eh-pH (Figura 78) las aguas de mina y aguas naturales son predominantemente oxidantes, sin embargo los cambios en pH pueden aumentar o disminuir la movilidad y disponibilidad de algunos elementos. Por ejemplo: Cu, Hg Ag, y Au suelen ser medianamente móviles en ambiente oxidante pero su presenta un pH ácido su movilidad es alta y cuando se tienen pH neutro o alcalino la movilidad de dichos elementos es muy baja.

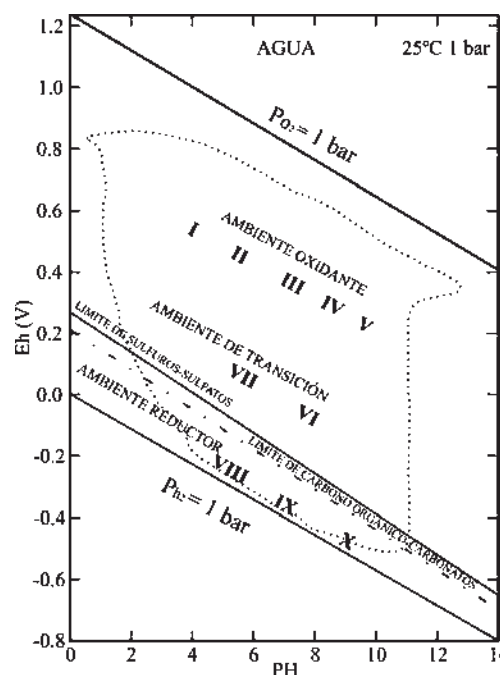


Figura 78. condiciones de oxido-reducción en las aguas naturales Fuente: Dall’Aglío, 2004.

ANEXO IV LOS ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS Y SUS EFECTOS EN LA SALUD HUMANA

De acuerdo con la Environment Protection Agency (EPA) y la Organización Mundial de la Salud los elementos potencialmente tóxicos son: As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sc, Se, Ti, Tl, V y Zn pero además estos elementos se pueden subdividir en:

- ☑ Metales tóxicos (MT) que están normalmente presentes en el ambiente y que constituyen un peligro para la salud del hombre.
- ☑ Metales con toxicidad menor (MTm) respecto al grupo anterior y que se encuentran en ambientes laborales
- ☑ Metales con toxicidad relativa (MTr) y que suelen utilizarse en terapias médicas
- ☑ Metales esenciales (Mesc) para la vida pero que grandes dosis son potencialmente tóxicos.

La EPA también realizó una lista de los elementos que tienen interés en estudios de biodisponibilidad, los agrupa de mayor interés en biodisponibilidad **Mayor** y de menor interés en biodisponibilidad **Menor** (Tabla 28).

Tabla 28. Elementos por grado de toxicidad e interés en estudios de biodisponibilidad
Datos: Du Bray *et. al.* (1995).

	Elementos potencialmente tóxicos			Elementos con interés en estudios de biodisponibilidad		
	Metales tóxicos	Metales con toxicidad menor	Metales con toxicidad relativa	Metales esenciales	Mayor	Menor
Elementos	As, Be, Cd, Hg y Pb.	Sb, Ag, Ba, In, Sn, Tl, Te, Ti, U y V	Al, Bi, Ga, Li, Au, e Pt	Co, Cr, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Cu, Se, y Zn	Al, As, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se y Sb	Ag, Ba, Co, Mn, Mo, Na, Tl, V y Zn

Son varios los elementos potencialmente tóxicos que podrían encontrarse en ambientes naturales, ya sea que su acumulación tenga origen natural o antropogénico. En el presente trabajo nos ocuparemos de tres elementos que pertenecen al grupo de metales tóxicos: Arsénico (As),

Mercurio (Hg) y Plomo (Pb); y dos que pertenecen al grupo de metales esenciales: Cobre (Cu) y Zinc (Zn) y todos ellos aparecen como elementos de interés en estudios de biodisponibilidad.

Arsénico

El As esta en el medio ambiente principalmente por la combustión del carbón y de aguas provenientes de surgencias y efluentes geotérmicos capaces de disolver el As presente en el suelo y las rocas (De Vivo *et. al.*, 2004). Entonces el enriquecimiento de este elemento en la superficie terrestre es resultado de la actividad hidrotermales y los valores anómalos elevados son característicos de depósitos auríferos epitermales y mesotermiales (frecuentemente asociados a Bi, Sb, y Se), por esto el arsénico es frecuentemente utilizado como elemento traza para Au y Ag. (Boyle y Johnasson, 1973; Duna, 1989; Plant *et. Al.* 1989).

El arsénico es un elemento abundante en la tierra (Tabla 29), sin embargo no todas las formas de As son tóxicas; la forma de arsenito (AsO_3^{-3}) es la más tóxica de las especies biológicas y las más móviles son los arsenatos (AsO_4^{-3}) y las formas inorgánicas son más tóxicas que las orgánicas. Su toxicidad se debe a que el As es químicamente similar al fósforo por lo que interfiere en el metabolismo del fosfato que se encuentra ampliamente distribuido en la biosfera (Yamauchi *et. al.* en Lottermoser, 2003; Du Bray, 1995; Higuera, *et. al.*, 2002).

Tabla 29. Valores de fondo de contenido de arsénico.,Lillo, 2002

Ambiente	Valor de fondo
Ríos y lagos	0.8 $\mu\text{g l}^{-1}$
Oceanos	1.5 $\mu\text{g l}$
Estuarios	< 4 $\mu\text{g l}$
Aguas subterráneas	< 0.5 y 5000 $\mu\text{g l}^{-1}$
Atmósfera	0.18 $\mu\text{g m}^{-3}$ (areas urbanas) 1 $\mu\text{g m}$ (núcleos industriales)

La movilidad, biodisponibilidad y toxicidad del arsénico dependen principalmente de su especiación, del potencial redox y del pH (Figura 50). Las formas orgánico-metálicas del As pueden ser más biodisponibilidad que las formas inorgánicas; aún cuando los arsénicos orgánicos son excretadas por muchas especies y no aparecen como altamente tóxicas (Luoma, 1983 en Du Bray, 1995). El arsenito (AsO_3^{-3}) siendo la forma más tóxica del As solo, se forma en un ambiente reductor que adquiere valores negativos de Eh y pH alcalinos de (9-12). En la naturaleza predominan las especies menos tóxicas.

Para el hombre es muy tóxico, ya sea por concentraciones elevadas o por exposición a pequeñas dosis por largos periodos de tiempo. El hombre lo absorbe por el tracto gastrointestinal acumulándose en el hígado, los riñones, los pulmones y el corazón generando daños que pueden persistir por meses aún después de la intoxicación, también puede atravesar la barrera de la placenta causando daños al feto (Kagev *et. al.*, 1997 en De Vivo *et. al.*, 2004). Además provoca cáncer en la piel, hígado y los pulmones.

Mercurio

El Mercurio que se encuentra en la naturaleza es la forma inorgánica de cinabrio (HgS), es la principal mena para su explotación. También se encuentra en forma de geodas de mercurio líquido, como en las minas de Almadén, o como pizarras y esquistos en Yugoslavia y La India, en el ambiente natural ocurre en niveles muy bajos (ATSDR, 1999).

Este elemento es muy tóxico y la forma de metilmercurio puede entrar a la cadena alimenticia y acumularse, es decir que se transfiere de un organismo a otro, posee tres estados de oxidación (valencias) en sedimentos y aguas de ambientes naturales: su forma elemental Hg^0 y iones de mercurio (Hg^+ y Hg^{2+}) y pueden ser absorbidos por la materia orgánica, hidróxidos de fierro y arcillas minerales (Covelli *et al.* 2001 y Domagalski 1998, 2001 en Lottermoser, 2003).

El mercurio se evapora a temperatura ambiente, pero también puede ser transportado y disuelto en aguas naturales y absorbido por partículas suspendidas y coloides, ser transformado en formas orgánicas: monometil mercurio (CH_3Hg^+) y dimetil mercurio ($(CH_3)_2Hg$) especies que son altamente tóxicas por ser solubles en grasas y tienden a acumularse en la cadena alimenticia (Jhon *et al.* 1995; Ganguli *et al.* 2000 en Lottermoser 2003). El metil-mercurio es el más bioacumulable respecto a los otros iones de Hg (Dall’Aglia, 2004). En ambientes anóxicos los microorganismos juegan un papel importante en la transformación del mercurio a especies metiladas (muy tóxica), pero este proceso es inhibido por la presencia de sulfuros (Keisten 1988 en Jhon *et al.* 1995).

En el caso del mercurio liberado por la minería en forma de compuestos de sulfuros es relativamente no biodisponible pero en grandes cantidades se asocian nuevamente con complejos orgánicos, aguas abajo de su fuente (Jhon *et al.* 1995). En conclusión los factores que favorecen la metilación del mercurio son: altas concentraciones de carbono, materia orgánica disuelta, bacterias sulfato-reductoras y aguas ácidas DAM (Lottermoser, 2003).

La toxicidad del mercurio en los seres humanos es determinada por la cantidad absorbidas y las propiedades de los compuestos. Puede ingresar al cuerpo humano por la piel, por el tracto gastrointestinal o ser inhalado. De acuerdo con Nordberg la principal vía de entrada del mercurio al organismo es la inhalación y se absorben aproximadamente un 80% por los pulmones de los vapores inhalados y la absorción por el aparato digestivo es apenas de 0.01% de la dosis ingerida. Afecta: el sistema inmunológico, los sistemas genéticos y enzimáticos, el sistema nervioso central (sentidos del tacto, gusto, coordinación y visión) y se acumulan en el cerebro. Además propicia un desarrollo anormal en los embriones. Las sales solubles tienen un efecto corrosivo en la piel y membranas mucosas, provoca náusea, vómito, dolor abdominal, diarrea con sangre y daña a los riñones.

Cobre

En sedimentos fluviales el Cu puede estar presente en silicatos y óxidos, mientras en zonas cercanas a áreas mineralizadas se presenta bajo forma de sulfuros como **calcopirita** (De Vivo, 2002). En aguas fluviales contaminadas por minería el cobre es capturado eficientemente por carbonatos y cubierto por óxidos de hierro y manganeso, es menos móvil que el cadmio, plomo y zinc (Prust *et al.* 1994 en Jhon 2002). El Cu tiene mayor solubilidad a pH ácido (< 5.0) y su dispersión es controlada por la presencia de materia orgánica, óxidos hidratados y carbonatos solubles, además la toxicidad del cobre se relaciona con una baja abundancia de Zn, Pb, Mo y sulfatos (Chaney 1988 en Jhon 1995; De Vivo 2002).

Como ya se mencionó el cobre es elemento esencial para el metabolismo humano y su deficiencia puede causar anemia. Sin embargo también tiene efectos adversos, la inhalación de polvos o humos de cobre puede causar desde congestión nasal hasta ulceración con perforación del tabique nasal. La enfermedad de Wilson- Bedlinton es atribuida a una exposición crónica al cobre, según Nordberg parece presentarse en personas que han heredado una pareja específica de genes recesivos por los que en consecuencia son susceptibles de desarrollar dicha enfermedad.

Plomo

Las principales fuentes de plomo en el medio ambiente son las gasolinas con plomo y la minería, esta última libera compuestos inorgánicos de plomo que son de alto riesgo para la salud y todas las formas de vida. El Pb presente en depósitos minerales no es móvil, pero se vuelve más

soluble en condiciones acidas y es absorbido por óxidos hidratados de Fe y Mn, (Jhon *et al.* 1995; De Vivo, 2002).

El plomo es capturado en condiciones reductoras por la precipitación de sulfuros y formación de complejos con materia orgánica insoluble e inmovilizado al precipitar como óxidos de plomo bajo condiciones oxidantes (Gambrell *et al.* 1991 en De Vivo 2002).

El Pb es un elemento que no es necesario para el funcionamiento normal de los seres vivos sin embargo el ion Pb^{+2} es compatible con otros iones de valor biológicos (Ca^{+2} , Fe^{+2} , Zn^{+2} , K^{+2}), por lo que aún no siendo necesario para los organismos puede entrar a los procesos biológicos (De Vivo, 2002; Higuera *et al.* 2002) e incluso acumularse.

El plomo entra al organismo por la vía respiratoria y por ingestión, es absorbido por el sistema circulatorio y desechado por las vías urinarias y las heces. Una exposición constante y excesiva no permite que el Pb sea desechado completamente propiciando su acumulación y en consecuencia la intoxicación.

Zinc

En ambientes ligeramente básicos y sedimentos de ambientes anóxicos el zinc es inmóvil y no biodisponible. En condiciones oxidantes y a pH ligeramente básicos (5-6.5) el zinc se torna más disponible. En ríos contaminados por minería el zinc puede ser capturado por carbonatos y materia orgánica además es menos móvil que el cobre. (Jhon 1995)

El zinc al igual que el cobre es esencial para el metabolismo humano y su deficiencia puede causar enanismo, crecimiento retardado de las gónadas y acrodermatitis esteropática. En cuanto a efectos adversos se puede mencionar que las concentraciones en soluciones acuosas muy elevadas (675-2280 ppm) son irritantes para el tracto gastrointestinal causando “fiebre metálica” o diarrea.

ANEXO V LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE METALES PESADOS EN MÉXICO.

El interés sobre el medio ambiente se fue expandiendo primero para determinados proyectos hasta alcanzar una difusión generalizada. En América Latina al principio fue, más que la concientización, el hecho de que organismos financieros como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) establecen como requisito para conceder créditos “la institucionalización de la evaluación de impactos ambientales”, y en el año de 1973 México creó La Subsecretaría para el Mejoramiento del Medio Ambiente, para el año de 1982 se establece La Ley Federal de Protección del Medio Ambiente que es sustituida por Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente promulgada el 28 de enero de 1988. En la actualidad la gestión ambiental en México debe considerar la interacción de factores sociales, económicos, culturales, políticos y ambientales.

En cuanto a los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, de actividades agroindustriales, de servicios y del tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal la Norma oficial mexicana (NOM-O31-ECOL-1993) establece que debe cumplir con las especificaciones que se indican en la tabla 30.

Tabla 30. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales NOM-O31-ECOL-1993.

Parámetros	Límites máximos permisibles	
	Promedio Diario	Instantaneo
Temperatura (°C)		40°C (313°K)
pH (unidades de pH)	6 a 9	6 a 9
Sólidos sedimentables (ml/L)	5	10
Conductividad eléctrica (micromohs/cm)	5,000	8,000
Arsénico (mg/L)	0.5	1.0
Cianuros (mg/L)	1.0	2.0
Cobre (mg/L)	5	10
Mercurio (mg/L)	0.01	0.02
Plata (mg/L)	1.0	2.0
Plomo (mg/L)	1.0	2.0
Zinc (mg/L)	6	12

Más tarde en la NOM-001-ECOL-1996 se hace una diferenciación en cuanto a los cuerpos de agua y suelos y el tipo de uso del agua (Tabla 31) de forma tal que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, dice que la concentración de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado como límite máximo en la siguiente tabla siendo el rango permisible del potencial Hidrógeno (pH) de 5 a 10 unidades.

Tabla 31. Límites máximos permisibles NOM-001-ECOL-1996
Donde: P.D. = Promedio Diario; P.M. = Promedio Mensual.

	Tipos de Uso del agua	Promedios de muestras	Arsénico (mg/l)	Cianuros (mg/l)	Cobre (mg/l)	Mercurio (mg/l)	Plomo (mg/l)	Zinc (mg/l)
Ríos	Uso en riego agrícola	P.M.	0,2	2	4	0,010	0,5	10
		P.D.	0,4	3	6	0,020	1.0	20
	Uso público urbano	P.M.	0,1	1	4	0,005	0,2	10
		P.D.	0,2	2	6	0,010	0,4	20
	Protección de vida Acuática	P.M.	0,1	1	4	0,005	0,2	10
		P.D.	0,2	2	6	0,010	0,4	20
Embalses naturales y artificiales	Uso en riego Agrícola	P.M.	0,2	2	4	0,010	0,5	10
		P.D.	0,4	3	6	0,020	1.0	20
	Uso público urbano	P.M.	0,1	1	4	0,005	0,2	10
		P.D.	0,2	2	6	0,010	0,4	20
Aguas costeras	Explotación pesquera, navegación y otros usos	P.M.	0,1	1	4	0,010	0,2	10
		P.D.	0,2	2	6	0,020	0,4	20
	Recreación	P.M.	0,2	2	4	0,010	0,5	10
		P.D.	0,4	3	6	0,020	1.0	20
	Estuarios	P.M.	0,1	1	4	0,010	0,2	10
		P.D.	0,2	2	6	0,020	0,4	20
Suelo	Uso en riego Agrícola	P.M.	0,2	2	4	0,005	5.0	10
		P.D.	0,4	3	6	0,010	10.0	20
	Humedales naturales	P.M.	0,1	1	4	0,010	0,2	10
		P.D.	0,2	2	6	0,010	0,4	20