



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MEXICO

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA

**Movilización del manganeso por erosión hídrica
en el Distrito Minero de Molango, Estado de
Hidalgo.**

T E S I S
PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN GEOGRAFIA
P R E S E N T A N :
JUAN MANUEL CRUZ RAMIREZ
LUIS ALBERTO OLVERA VARGAS

ASESOR: DR. LORENZO VAZQUEZ SELEM



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

DEDICATORIAS

Juan Manuel:

A los maravillosos seres humanos que el destino me puso como padres, por creer en mi y dedicarme todo su tiempo y amor.

A mis viejos Rosario y Antonio

Al hermano que he tenido todos estos años, por haberme demostrado su solidaridad en todo momento.

Jorge

A una mujer con quien comparto los mejores sueños de mi vida y por acompañarme en este hermoso viaje de la Geografía.

Luz María

Luis Alberto

A la persona más importante de mi vida... por sacarme adelante y enseñarme que los sueños se pueden realizar

gracias MAMÁ

A **MAY y PATO** por estar a mi lado y apoyarme en todo, por los ratos tristes y divertidos y por ser mis mejores amigas.

Agradecimientos

Agradecemos a los miembros que formaron parte del sínodo. Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem por asesorar este trabajo, por su tiempo y dedicación; a la Dra. Silke Cram por sus valiosos comentarios y su ayuda en el trabajo de campo; al Ing. Alberto Pérez Rojas por transmitirnos sus conocimientos geológicos y formar parte del jurado; al Dr. Arturo García por sus atinadas correcciones; y muy especialmente a la Dra. Christina Siebe por la confianza y motivación que nos ha dado durante todos estos años... ahhhh y por el billete (gracias Chris).

Agradecemos a las instituciones que nos ayudaron durante la realización de este trabajo. Al Institute Development research centre (IDRC – Canadá), Instituto de Salud Ambiente y Trabajo (ISAT) y al Programa Universitario del Medio Ambiente (PUMA – UNAM) por coordinar, financiar e invitarnos a ser parte del proyecto “Impacto en la salud del ecosistema por actividades antropogénicas en una cuenca manganesífera”, de donde surgió este trabajo. A la Compañía Minera Autlán por facilitarnos la entrada a sus instalaciones, ayudarnos en los registros de precipitación y proporcionarnos material cartográfico. Al Instituto de Geología por resguardarnos durante todo este tiempo.

También agradecemos al Dr. Luis Miguel Morales por proporcionarnos los mapas de usos de suelo, a los Químicos Rufino Lozano y Patricia Girón por hacer los análisis de fluorescencia de rayos X, a la M. en C. Kumiko Shimada, al Biol. Antonio y M. en C. Manuel Hernández por su ayuda en los análisis de laboratorio.

Al Laboratorio de Edafología Ambiental (super LEA): a las casi Doctoras Andrea Herre (güera) y Lucy Mora por su amistad, la ayuda incondicional y una que otra borrachera. También a la casi Dra Norma Fernández (Momorro) por ser nuestra madre adoptiva, por tener siempre tiempo para nosotros y motivarnos en todo momento. A la Dra. Pili, Yann Rene, a la china casi mamá Ana Cecilia, Víctor Peña.

A toda la banda de la COGEPU en especial a los teporochos y alcohólicos del Pablo, Daniel, Panter, Memo, Iván, Culiacán, Bazooka, Melox..... borrachitos que nos hicieron reír y gracias por todos los momentos que nos la pasamos chido.

INDICE

Índice

Índice de figuras

Índice de cuadros

Índice de anexos

INTRODUCCIÓN

1

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 La erosión como concepto	4
1.1.1 Concepto de erosión del suelo	5
1.1.2 Proceso de producción de sedimento	9
1.1.3 La erosión en México	10
1.2 El manganeso en el ambiente	11
1.3 Sistemas de Información Geográfica	12

CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DISTRITO MANGANESÍFERO DE MOLANGO

2.1 Características físicas	15
2.1.1 Localización geográfica	15
2.1.2 Relieve	15
2.1.3 Geología	18
2.1.4 Clima	20
2.1.5 Hidrología	24
2.1.6 Suelos	26
2.1.7 Vegetación y uso del suelo	28
2.2 Aspectos socioeconómicos	31
2.2.1 Características de la población	31
2.2.2 Descripción de las actividades mineras	33
2.2.3 Problemática de contaminación ambiental	35

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS HIDROLÓGICAS CON EL USO DE UN SIG

3.1 Delimitación de las cuencas hidrológicas	37
--	----

CAPÍTULO 4. CUANTIFICACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN DEPÓSITOS DE RESIDUOS MINEROS Y SUELOS AGRÍCOLAS

4.1 Metodología	48
4.1.1 Selección de los sitios para la instalación de las parcelas de clavos	48
4.1.2 Instalación de las parcelas	50
4.1.3 Características físicas del suelo y residuos mineros determinadas en campo	54
4.1.4 Características físicas del suelo y residuos mineros determinadas	57

en laboratorio	
4.2 Resultados	58
4.2.1 Características y propiedades que determinan la erosionabilidad de las parcelas	58
4.2.2 Uso de suelo agrícola	62
4.2.3 Uso de suelo minero	64
4.3 Análisis y discusión de los resultados	68
4.3.1 Uso de suelo agrícola	68
4.3.2 Uso de suelo minero	72
4.3.3 Comparación entre usos de suelo	76
4.4 Conclusiones	81

CAPÍTULO 5. DISPERSIÓN DEL MANGANESO A TRAVÉS DE LAS CORRIENTES SUPERFICIALES EN CINCO CUENCAS CON ACTIVIDAD MINERA

5.1 Muestreo de agua y sedimento	83
5.1.1 Metodología	83
5.1.2 Resultados	89
5.1.3 Análisis y discusión de los resultados	95
5.2 Cubetas de captación de sedimentos	106
5.2.1 Metodología	106
5.2.2 Resultados	111
5.2.3 Análisis y discusión de los resultados	111
5.3 Conclusiones	115

CAPÍTULO 6. CAMBIOS DE USO DE SUELO COMO FACTOR EN LA PÉRDIDA DE SUELO

6.1 Cambios de uso de suelo	118
6.1.1 Metodología	118
6.1.2 Uso de suelo en 1976	119
6.1.3 Uso de suelo en el 2000	120
6.1.4 Comparaciones de las superficies de uso de suelo. 1976-2000	121
6.2 Pérdida de suelo a nivel cuenca con el uso de suelo actual	125

CONCLUSIONES	129
---------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA	131
---------------------	-----

ANEXOS	137
---------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Localización del Distrito Manganesífero de Molango	16
Figura 2.2 Mapa altimétrico del Distrito Manganesífero de Molango	17
Figura 2.3 Mapa geológico del Distrito Manganesífero de Molango	19
Figura 2.4 Mapa de climas del Distrito Manganesífero de Molango	21
Figura 2.5 Precipitación y temperatura media mensual en dos estaciones meteorológicas	22
Figura 2.6 Precipitación media anual en el Distrito Manganesífero de Molango	23
Figura 2.7 Hidrología del Distrito Manganesífero de Molango	25
Figura 2.8 Mapa edafológico del Distrito Manganesífero de Molango	27
Figura 2.9 Vegetación y uso del suelo en 1976 en el Distrito Manganesífero de Molango	29
Figura 2.10 Vegetación y uso del suelo en 2000 en el Distrito Manganesífero de Molango	30
Figura 2.11 Evolución de la población de 1960 – 1990 en los municipios del Distrito Manganesífero	31
Figura 3.1 Mapa de pendientes de las cuencas de Nonoalco y Malila	39
Figura 3.2 Mapa de pendientes de las cuencas de Otongo y Tetzintla	40
Figura 3.3 Mapa de pendientes de la cuenca de Naopa	41
Figura 4.1 Ejemplo de la cuantificación del suelo con las parcelas de clavos	47
Figura 4.2 Localización de las parcelas de erosión en las cuencas de Otongo y Nonoalco	49
Figura 4.3 Esquema del diseño de muestreo	50
Figura 4.4 Secciones transversales realizadas (A,B,C) en el depósito de polvos, Unidad Molango	52
Figura 4.5 Pluviómetro	53
Figura 4.6 Infiltrómetro de doble anillo	56
Figura 4.7 Precipitación en las cuencas de Nonoalco y Otongo durante el tiempo del experimento (septiembre – noviembre 2002)	62
Figura 4.8 Alturas medias acumuladas de suelo en las parcelas de uso agrícola en las cuencas a) Nonoalco y b) Otongo	64
Figura 4.9 Pérdida de suelo medida en secciones transversales bajo uso de suelo minero en la cuenca de Otongo	65
Figura 4.10 Alturas medias acumuladas de suelo en las parcelas bajo uso minero de las cuencas a) Nonoalco y b) Otongo	67
Figura 4.11 Suelo Movilizado y Erosión Neta en el uso de suelo agrícola	69
Figura 4.12 Densidad aparente y Erosión Neta en las parcelas bajo uso de suelo agrícola en ambas cuencas	71
Figura 4.13 Suelo Movilizado y Erosión Neta en uso de suelo minero	73
Figura 4.14 Densidad aparente y Erosión Neta en las parcelas bajo uso de suelo minero en ambas cuencas	75
Figura 4.15 Materia Orgánica y Erosión Neta en uso de suelo agrícola y minero	78
Figura 4.16 a) flujo inicial y b) flujo terminal de la infiltración en los usos de suelo agrícola y minero	79
Figura 5.1 Sitios muestreados de agua de río y sedimento en época de secas y lluvias en las cuencas de los ríos Cuate (Otongo) y Chipoco (Tetzintla)	86

Figura 5.2 Sitios muestreados de agua de río y sedimento en época de secas y lluvias en la cuenca del río Xaltetla (Naopa)	87
Figura 5.3 Sitios muestreados de agua de río y sedimento en época de secas y lluvias en las cuencas del los ríos Malila y Puente Alto (Nonoalco)	88
Figura 5.4 Concentraciones de manganeso en a) agua y b) sedimento de río en las cuenca de Otongo	96
Figura 5.5 Concentraciones de manganeso en a) agua y b) sedimento de río en las cuenca de Tetzintla	98
Figura 5.6 Concentraciones de manganeso en a) agua y b) sedimento de río en las cuenca de Naopa	100
Figura 5.7 Concentraciones de manganeso en a) agua y b) sedimento de río en las cuenca de Malila	101
Figura 5.8 Concentraciones de manganeso en a) agua y b) sedimento de río en la subcuenca del río La Cañada, Nonoalco	103
Figura 5.9 Concentraciones de manganeso en a) agua y b) sedimento de río en la subcuenca del río Puente Alto, Nonoalco	104
Figura 5.10 Cubetas de captación de sedimento	107
Figura 5.11 Área de la sección transversal	108
Figura 6.1 Cambios en los usos de suelo de 1976 – 2000 en el Distrito Manganesífero de Molango	122

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1 Clases de susceptibilidad a la erosión	8
Cuadro 1.2 Pérdida de suelo anual para terrenos con diferente cobertura vegetal	9
Cuadro 1.3 Contenidos típicos de manganeso en diferentes matrices	11
Cuadro 2.1 Densidad de población y porcentaje de la población total estatal de 1960 – 1990 en el Distrito Manganesífero	32
Cuadro 2.2 Población económicamente activa en el sector minero, 1960 – 1990	33
Cuadro 3.1 Superficies de las cuencas hidrológicas estudiadas	38
Cuadro 3.2 Superficie (ha) de pendientes de las 5 cuencas estudiadas	42
Cuadro 3.3 Superficie (ha) de la facies manganesífera sobre las cuencas estudiadas	43
Cuadro 3.4 Superficie (ha) de los usos de suelo en las 5 cuencas de estudio	43
Cuadro 3.5 Superficie (ha) de tipos de suelos en las 5 cuencas estudiadas	44
Cuadro 4.1 Características del suelo y propiedades del relieve de las parcelas	60
Cuadro 4.2 Valores de precipitación registrados para cada medición	61
Cuadro 4.3 Resultados generales del uso de suelo agrícola y minero	77
Cuadro 5.1 Resultados de la cantidad de manganeso en agua (mg/L) y sedimento (%) en época de secas	90
Cuadro 5.2 Resultados de la cantidad de manganeso en agua (mg/L) y sedimento (%) en época de lluvias	92
Cuadro 5.3 Porcentajes de facies manganesífera y usos de suelo en superficies de área de captación de los sitios muestreados	94
Cuadro 5.4 Porcentaje de manganeso en sedimento	111
Cuadro 6.1 Superficie y porcentaje por clase de uso de suelo en la zona de estudio. Año 1976	121
Cuadro 6.2 Superficie y porcentaje por clase de uso de suelo en la zona de estudio.	121

Año 2000	
Cuadro 6.3 Superficie (ha) de coincidencias y crecimiento de los usos de suelo entre los mapas del 2000 y 1976	124
Cuadro 6.4 Estimaciones de la pérdida de material a nivel cuenca bajo uso de suelo minero en laderas con pendientes similares a las parcelas de clavos (Sep – Nov 2002)	126
Cuadro 6.5 Estimaciones de la pérdida de material a nivel cuenca bajo uso de suelo agrícola en laderas con pendientes similares a las parcelas de clavos (Sep – Nov 2002)	127

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Registros de erosión y sedimentación de las parcelas en cada una de las mediciones	137
Anexo 2 Precipitación (mm) en el Distrito Minero de Molango	145
Anexo 3 Datos de Densidad aparente en las parcelas de clavos de erosión	147
Anexo 4 Registros de Infiltración en las parcelas de clavos de erosión del Distrito Minero de Molango	148
Anexo 5 Determinación de Carbono Orgánico de las muestras compuestas	162

INTRODUCCIÓN

El Distrito Manganesífero de Molango es el más importante de América del Norte y uno de los diez más grandes del mundo y se encuentra localizado al norte del Estado de Hidalgo. Tiene una extensión de 50 kilómetros Norte-Sur y 15 kilómetros Oriente-Poniente (Alexandri y Martínez, 1988). La Compañía Minera Autlán se ha encargado de la exploración, explotación y comercialización de yacimientos de manganeso desde 1960 (Sánchez y Sánchez, 1992). Esta compañía es la principal productora de manganeso del país con el 99.6 % de la producción nacional. Las zonas de extracción se localizan sobre una franja importante de rocas calizas-lutitas originadas de depósitos marinos del Jurásico Inferior (INEGI, 1992) que se conoce como formación Chipoco o facies Manganesífera. Esta formación que contiene los yacimientos se localiza dentro de los municipios de Molango, Tepehuacán de Guerrero, Lolotla, Xochicoatlán y Tlanchinol. En el distrito minero se extraen carbonatos y óxidos de manganeso en minas a cielo abierto (Tetzintla, Naopa, Nonolaco) y subterráneas (Tetzintla, Coyoles), los cuales se procesan en las plantas de Nonolaco y Malila y en la planta de nodulación de Otongo. La zona tiene reservas probadas de 200 millones de toneladas para los carbonatos de manganeso y se estiman reservas máximas de 1,500 millones de toneladas. A la fecha se han explotado de 15 a 20 Mt (Consejo de Recursos Minerales, 1992).

Las comunidades cercanas a la Compañía Minera han expresado su descontento ante las actividades que se realizan. Los pobladores se sienten afectados por las emisiones atmosféricas provenientes de la planta de nodulación en la unidad Molango y también por la contaminación de los ríos con sedimentos ricos en manganeso. Ésta última es provocada por la erosión de los depósitos del material de descapote en las minas a cielo abierto, de los desechos de la planta de nodulación (depósito de polvos) y de las presas de lodos de la planta de concentración de manganeso en Nonoalco. Sin embargo, las actividades agropecuarias también contribuyen a la erosión de los suelos. Suponemos que algunos de los suelos de la zona presentan concentraciones elevadas de manganeso, dado que se han desarrollado a partir de rocas de la facies manganesífera, y al igual que los depósitos mineros, al ser erosionados contribuyen con la contaminación de los ríos.

En 1997 el Instituto de Salud Ambiente y Trabajo, llevó a cabo una primera caracterización de los riesgos a la salud poblacional por la exposición de manganeso en dos localidades del Estado de Hidalgo. Este estudio contempló la evaluación de sintomatologías respiratorias y exámenes neuropsicológicos en adultos de la comunidad de Chiconcuac, municipio de Lolotla. También se incluyeron análisis de manganeso en agua, suelo y alimentos. Los resultados fueron comparados con los obtenidos en la comunidad de Cuxhuacán, municipio de Molango, y se encontraron diferencias significativas en los niveles de sangre entre ambas comunidades. La comunidad expuesta a las actividades mineras presentó cargas corporales de manganeso en sangre (Santos-Burgoa *et al.* 2001). El manganeso, en cantidades pequeñas (menos de $10\mu\text{g/L}$), es importante para mantener buena salud, pero en cantidades mayores (más de $15\mu\text{g/L}$), puede provocar perturbaciones mentales y neuropsicológicas (similares al parkinson), pérdida de habilidades motoras y de rápidos movimientos manuales, así como la dificultad de mantener el equilibrio y causar problemas respiratorios (ATDSR, 1993). El gobierno del Estado de Hidalgo y el ISAT han desarrollado campañas de información sobre los efectos de la sobre exposición al manganeso. El objetivo de estos programas de comunicación es promover la participación de la población en procesos de reflexión y acción que les posibilite el intercambio de experiencias, la producción/recepción de ideas innovadoras y el desarrollo de habilidades creativas, que contribuyan a reducir los riesgos a la salud causados por la exposición al manganeso (http://web.idre.ca/es/ev-41180-201-1-00_topic.html).

En función de lo expuesto, en este estudio se cuantificó la erosión hídrica en diferentes usos de suelos, utilizando dos métodos experimentales: parcelas de clavos de erosión y muestreo de agua y sedimentos. Para el primer método se seleccionaron zonas alteradas por la actividad minera y zonas agrícolas. Las parcelas de clavos, según Pizarro (1997) corresponden a un método experimental sencillo, directo, de gran precisión y principalmente de bajo costo, que permite estimar la pérdida de suelo o material directamente en el terreno. Para el segundo método se ubicaron, con ayuda del Sistema de Información Geográfica ILWIS (Integrated Land Water Information System), los ríos principales y secundarios afectados por las actividades mineras y por zonas agrícolas,

para medir las concentraciones de manganeso en agua y sedimento. La FAO (1997) considera necesario hacer cálculos de la pérdida de suelo a través del movimiento de sedimentos en las corrientes y ríos, en diferentes momentos del año, en varias cuencas hidrográficas y en diferentes usos de suelo.

Al final de este trabajo, los resultados obtenidos por cada método se extrapolaron a nivel cuenca, ya que estos datos pueden convertirse en información útil para realizar medidas de conservación en la zona del Distrito Manganesífero. Además se planteó la hipótesis de que las zonas de presas de lodo, jales y tajos a cielo abierto son más vulnerables a la erosión hídrica superficial que las zonas bajo uso de suelo agrícola, por lo que aportan mayor cantidad de materiales a los ríos.

OBJETIVO GENERAL

- Cuantificar la erosión hídrica superficial del suelo y el aporte de sedimentos ricos en manganeso en cuencas bajo diferente uso de suelo del Distrito Minero de Molango, Hidalgo.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Hacer una revisión cartográfica sobre características morfológicas, litológicas y de uso de suelo en cinco cuencas hidrológicas de la zona de estudio e integrarlas a un Sistema de Información Geográfica.
- Medir la pérdida del suelo a través del método de parcela de clavos en campos agrícolas y en depósitos de residuos mineros.
- Determinar el contenido de manganeso en el agua y los sedimentos de los ríos en diferentes puntos de muestreo y en dos épocas del año (lluvias y secas).
- Cuantificar áreas bajo uso de suelo agrícola y de depósitos de actividades mineras en la zona de estudio con ayuda del SIG.

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO.

1.1 La erosión como concepto.

Erosión es la acción de roer, gastar y provocar pérdidas de sustancias del relieve, originando una disminución de volumen. El proceso de erosión está conformado por tres fases principales:

- La acción de desprendimiento de partículas
- El transporte o desplazamiento de los materiales desgastados
- La acumulación o finalización del transporte, depositación de los materiales transportados en lagos, océanos o áreas continentales (Gregory y Walling, 1973).

Lugo (1989) define la erosión como el conjunto de procesos que originan separación de los productos del intemperismo del sustrato original. Los agentes actuantes pueden ser el agua en distintas manifestaciones (superficial, hielo, subterránea, olas, etc.), el viento y los organismos. La intensidad del proceso depende de factores tales como topografía, clima, litología, tiempo, estructura geológica o actividad tectónica.

La erosión es un término amplio aplicado a las diversas maneras en las que los agentes móviles (agua, viento, etc.) desprenden y transportan los productos del intemperismo y los sedimentan (Núñez, 2001). El proceso general puede clasificarse en dos grandes formas: la erosión geológica o natural y la erosión acelerada o antrópica. En ambas categorías intervienen los mismos agentes, sólo que la intensidad en su actuación es distinta, así como su interacción con otros factores y agentes que también intervienen en el proceso, por lo que los resultados de su acción son diferentes.

La erosión geológica o natural consiste en el desgaste y remodelado del paisaje terrestre original a largo plazo, sin intervención del hombre. Es provocada por la acción del viento, el agua, los cambios de temperatura, mecanismos biológicos, gravedad y glaciares. Este tipo de erosión es lo suficientemente lenta como para permitir el desarrollo de suelos en constante rejuvenecimiento.

Por otro lado, la erosión acelerada o antrópica, es aquella en la que las acciones de la naturaleza se unen a las actividades del hombre. La erosión acelerada también puede ser originada por factores como deforestación por incendios forestales, avance de desiertos, sobrepastoreo, tala inmoderada, etc. Afecta principalmente al suelo y es un proceso denudativo más fuerte y rápido que la erosión geológica, debido a un cambio brusco en las condiciones imperantes de una zona, generalmente influenciado por actividades humanas (Hudson, 1982). Los estudios se han inclinado a investigar la erosión acelerada y sus consecuencias, por ser ésta la que se presenta con mayor frecuencia.

1.1.1 Concepto de erosión del suelo.

La erosión del suelo es un concepto vasto empleado de diversas formas; para un geólogo es el movimiento de material sólido, para un edafólogo es la pérdida de potencial del suelo. Por tal motivo se revisó literatura de las diferentes ciencias que se encargan del estudio de la erosión.

En el “Diccionario de Geología”, Foucault y Raoult (1985) describen a la erosión como un conjunto de fenómenos externos que en la superficie del suelo o a escasa profundidad, quitan en todo o en parte los materiales existentes modificando el relieve. Estos fenómenos externos son procesos químicos (alteración y disolución por la cantidad de agua) y físicos o mecánicos (disgregación de las rocas y arrastre de los fragmentos por un fluido).

Desde el punto de vista geomorfológico la erosión del suelo es la remoción del material no consolidado incluyendo al suelo de la superficie terrestre por la acción del agua o el viento y conduce a la desaparición o alteración del suelo (Lugo, 1989).

Dentro del área de conservación del suelo la erosión de éste, es la destrucción del suelo por la acción del agua y el viento (Zachar, 1982), y en el Manual de conservación de suelo y agua (Chapingo, 1991), se dice que es el proceso físico que consiste en el desprendimiento y arrastre de los materiales del suelo por los agentes del intemperismo.

La erosión del suelo consiste en el acarreo o transporte de partículas sólidas y elementos nutritivos que contiene el suelo, provocando que su potencial productivo y fertilidad disminuyan (Figueroa, 1991). El acarreo de dichas partículas puede darse por agentes como agua o viento.

El proceso de erosión está influenciado por una gran cantidad de factores que al interactuar entre sí, provocan el desprendimiento y esparcimiento de las partículas del suelo. Dentro de los factores físicos que intervienen en dicho proceso están, en primer término, la pérdida de la cubierta vegetal, ya que ésta establece un límite a la acción erosiva de las gotas de lluvia y al escurrimiento. Las características de la pendiente del terreno afectan la velocidad y cantidad de escurrimiento, además de las propiedades y características de erodabilidad del suelo (Bennett, 1965).

La erosión del suelo puede ser altamente favorecida por las actividades que realiza el hombre, por ejemplo, la tala de bosques, quema de vegetación, construcción de vías y obras de comunicación, inadecuados sistemas de cultivo, etc. Todas estas actividades pueden aumentar el poder de acción de agentes como agua y viento (Núñez, 2001).

La erosión rápida del suelo propiciada por el hombre ocurre cuando éste rompe el equilibrio existente entre los factores que intervienen en el mencionado proceso. Para que podamos entender el concepto de erosión en términos de la importancia que representa para el hombre, es necesario incluir en la definición de erosión de suelo la cantidad de suelo perdido en un tiempo y área específicos; se expresa en unidades de masa por unidad de área como ton/ha o kg/m² (FAO, 1997).

Los agentes erosivos más importantes que actúan en el proceso son: el agua, el viento, los cambios de temperatura y la actividad biológica. Los dos primeros son considerados los más destructivos.

La erosión hídrica se ve altamente favorecida por las condiciones de topografía, intensidad de precipitación, destrucción de la cubierta vegetal y grado de alteración del ecosistema

en general. De acuerdo a la forma como el agua actúa en el suelo, pueden distinguirse tres clases o tipos de erosión hídrica: pluvial, por escorrentía y remoción en masa (FAO, 1997).

Bajo este esquema de mecánica de la erosión hídrica se presentan 3 formas de erosión hídrica por escorrentía según la FAO (1967):

- erosión laminar: consiste en la remoción más o menos uniforme de una lámina delgada de suelo de una superficie inclinada, sin que se formen claramente canales de desagüe; el suelo es arrastrado de manera paulatina y casi imperceptible.
- erosión en surcos: ocasionada por el escurrimiento concentrado del agua en surcos más o menos paralelos, independientes y durables. El desprendimiento de partículas se origina principalmente por la energía del flujo de agua. La formación del surco es frecuente en suelos medianamente susceptibles a la erosión.
- erosión en cárcavas: se origina cuando hay mayor concentración en el escurrimiento, pueden unirse varios surcos y formar zanjas de gran tamaño (cárcavas). Se presenta en suelos susceptibles a la erosión. Este tipo de erosión disecta tan profundamente al suelo que el terreno no puede nivelarse.

La erosión hídrica alcanza su máximo donde la lluvia intensa y la cubierta vegetal están desfasadas, es decir, hay mayor cantidad de agua precipitada y menor superficie de suelo cubierta con vegetación, de manera que el grado máximo de erosión coincide con el punto máximo de precipitación pluvial (Figuroa, 1991). Las variaciones en las tasas de erosión aumentan conforme disminuye la protección vegetal, de manera que los valores más altos de erosión se encuentran en áreas con suelos desnudos.

La mayoría de los eventos erosivos del suelo, originados por la salpicadura de las gotas de lluvia se presenta con lluvias entre 30 y 60 mm; sin embargo, la intensidad de la lluvia crítica para iniciar el proceso erosivo varía, dependiendo de las condiciones climáticas presentes. La severidad de la erosión cambia con el tiempo y el espacio, depende de la topografía local, de las condiciones y uso del suelo y del clima, de manera que estos

factores producen variaciones regionales que pueden llegar a ser muy marcadas (Figuerola, 1991).

Cualquiera que sea el agente erosivo del suelo, las alteraciones que ocasiona son muy diversas. El primer efecto significativo redundaría en el cambio de la textura y estructura de los agregados del suelo, en una disminución de la infiltración del agua de lluvia y en la cantidad de agua que puede ser almacenada en el suelo, que a su vez puede aumentar los valores de escorrentía (Kirkby, 1993).

Houghton y Charman (1986) clasifican en seis clases la intensidad de la erosión hídrica. Las dos primeras tienen valores tolerables de pérdida de suelo, la clase moderado tiene un riesgo aceptable y las clases altas representan condiciones graves de pérdida de suelo (Cuadro 1.1)

Cuadro 1.1 Clases de susceptibilidad a la erosión

Clase	Pérdida de suelo en t/ha/año
Muy poco	0 – 5
Poco	6 – 12
Moderado	13 – 25
Alto	26 – 60
Muy alto	61 – 150
Extremadamente alto	Más de 150

En el cuadro 1.2 se muestran estudios de varios autores que cuantifican la pérdida anual de suelo para terrenos con diferente cobertura vegetal. Los resultados muestran que para la cobertura forestal presenta muy poca pérdida de suelo, mientras que el suelo desnudo tiene una pérdida que va de muy alta a extremadamente alta (Jason, 1982 citado en Meijerink, 1985).

Cuadro 1.2 Pérdida de suelo anual para terrenos con diferente cobertura vegetal

Fuente	Localización	Periodo	Precipitación anual (mm)	Pendiente (°)	Cobertura	Pérdida de suelo (t/ha)
Fournier (1967)	Adropodoumé, Ivori Coast	Un año	1936	3.1	Forestal	2.4
		Un año	1936	3.1	Suelo desnudo	117
		Un año	2289	3.1	Forestal	.002
		Un año	2289	3.1	Suelo desnudo	143.2
Glymph (1954)	Bethany, Montana	9 años	749	3.6	Maíz	114.1
Temple (1972)	Tangeru, Tanzania	2 años	675	2.7	Suelo desnudo	219.2

1.1.2 Proceso de producción de sedimentos.

La producción de sedimentos puede entenderse como el flujo total de partículas de una cuenca hidrológica, en un tiempo determinado, es decir, es el material que se transporta hacia algún punto de interés dentro de la misma cuenca (Mitchell y Bubenzer, 1980).

El movimiento del suelo por el agua ocurre en tres fases: separación de las partículas individuales del suelo; transporte o movimiento de esas partículas separadas, sobre la superficie del suelo o terreno; y la depositación de dichas partículas en nuevos sitios cercanos o no al sitio original de donde fueron desprendidas (Oropeza, 1980).

De manera que los sedimentos se producen mediante la acción de los procesos llevados a cabo en toda la superficie terrestre. Generalmente se habla de una sedimentación cuando las partículas transportadas son depositadas en lagos, ríos u océanos.

Los factores físicos que intervienen en la producción de sedimentos de una área determinada, son los mismos que participan en el proceso de la erosión hídrica: precipitación (cuándo llueve, en qué época y con qué intensidad); erodabilidad (qué capacidad tiene el suelo para ser desprendido y transportado); cubierta vegetal (cómo aumenta o disminuye la pérdida de suelo y grado de erosión de una área, de acuerdo a la

superficie de vegetación cubierta y tipo de la misma); geoforma (cómo afectan las características de la pendiente del terreno, la velocidad y cantidad de escurrimiento, además de la erosividad en sí misma) (Gregory y Walling, 1973); de tal manera que la depositación y almacenamiento temporal o permanente puede ocurrir sobre las laderas, particularmente donde declinan los gradientes, en la base de la pendiente, en áreas planas o incluso en los mismos canales. La magnitud relativa de esta pérdida tiende a aumentar cuando aumenta el tamaño de la cuenca (Núñez, 2001).

1.1.3 Erosión en México.

A nivel mundial y nacional es reconocido el problema y las consecuencias de la erosión. Específicamente en México se tiene información acerca de la proporción del área afectada por el proceso erosivo (80%). Ésta afecta principalmente a las áreas en donde se desarrollan actividades agrícolas, forestales y pecuarias, por lo que para satisfacer las demandas de los alimentos, fibras y combustible provenientes de la tierra, no sólo se están explotando intensamente vastas extensiones sino también se da apertura a tierras nuevas. Sin embargo, la superficie total de tierra cultivable y su capacidad productiva son limitadas (Terrazas, 1983).

Existen diversas estimaciones que difieren según el método y periodo. Por ejemplo, la SARH en 1975, estimó que el 69% de la superficie del país presentaba erosión en algún grado, y que para 1986 ésta se incrementaría hasta el 81%. A su vez, García-Lagos (1981), estimó que el porcentaje de erosión alcanzaba el 71%. Geissert y Rossignol (1987), calcularon que el área afectada por la erosión era del 86% del territorio nacional.

Otras estimaciones hechas por la Dirección General de Restauración y Conservación de Suelos (http://www.semarnat.gob.mx/wps/portal/.cmd/cs/.ce/155/.s/3515/_s.155/3512), con base en información cartográfica, indican que la erosión hídrica afecta a 37% de los suelos del país, porcentaje que se descompone en 25% que afecta sólo a la capa superficial del suelo y 12% que produce deformación del terreno.

1.2 El manganeso en el ambiente.

En el contexto de la clasificación general de los elementos, el manganeso queda incluido en el grupo de los metálicos, en el subgrupo de los ferrosos o de aleación, es decir que se mezcla con el yodo para la producción de acero (Sánchez y Sánchez, 1992). El manganeso es el 12° elemento más abundante en la corteza terrestre, la cual contiene en promedio 950 mg/kg de Mn. Se distribuye en los suelos, sedimentos, rocas, agua y materiales biológicos. Por su amplio uso industrial y la gran cantidad que de él se consume, es un contaminante potencial de la atmósfera de gran importancia (Galbao y Corey , 1987).

La movilidad del manganeso en el suelo depende de factores como concentración, intercambio de iones, cantidad de lluvia, permeabilidad del suelo, erosión, etc., y está integrado a los ciclos geológicos del planeta, interactuando con los tres componentes restantes de un ecosistema: aire, agua y biomasa (ISAT, 2003). Los suelos presentan intervalos de contenidos de manganeso entre 20 y 3000 mg/kg (Cuadro 1.3). En los suelos el manganeso se encuentra como óxido y carbonato de manganeso. La pirolusita (MnO_2) es el mineral más importante para la extracción del manganeso. La disponibilidad del manganeso depende del potencial redox y del pH del suelo.

Cuadro 1.3 Contenidos típicos de manganeso en diferentes matrices (Reinmann y Caritat, 1998).

Matriz	Concentración de Mn
Corteza Terrestre	950 mg kg ⁻¹
Rocas	1500 – 40 mg kg ⁻¹
Suelos	20 – 3000 mg kg ⁻¹
Sedimentos de río	546 – 1960 mg/kg ⁻¹
Agua de río	0.004 – 0.094 mgL ⁻¹
Agua de mar	0.0002 mgL ⁻¹
Agua subterránea	0.007 mgL ⁻¹
Aire	2 ng/m ³
Plantas	40 – 150 mg kg ⁻¹

En las plantas es también un elemento esencial, y por eso tiene gran aplicación en la agricultura, la cual es en gran parte responsable de la contaminación del ambiente por este elemento. Se reporta un contenido de 40 a 150 mg kg⁻¹ de Mn en las plantas (Cuadro 1.3) y un contenido de 50 mg kg⁻¹ en forrajes, para evitar deficiencias en reproducción y crecimiento del ganado. Sin embargo, un exceso de Mn puede causar deformaciones en la hoja y puntos necróticos, así como provocar un crecimiento irregular y bajos rendimientos para la agricultura (Galbao y Corey, 1987).

El Mn es un oligoelemento esencial para todos los organismos y tiene una función controvertida en el ambiente, ya que se conoce como no tóxico y las deficiencias por manganeso en animales y seres humanos son más comunes que los problemas por toxicidad.

En bajas concentraciones, el manganeso es un elemento esencial para el organismo humano. La deficiencia de manganeso en éste, puede ocasionar una disminución en los tiempos de coagulación, manchas en la piel, cambios en la coloración del cabello. En los animales se ha observado interferencia en el crecimiento, formación de huesos y en la reproducción. En las plantas la deficiencia de Mn provoca la clorosis que es una disminución en la clorofila, las hojas se tornan amarillentas. Mientras que un exceso de manganeso en el ser humano, puede ocasionar alteraciones del sistema nervioso central y problemas respiratorios (<http://state.ky.us/nrepc/water/ramp/rmmag.htm>).

Respecto a los problemas de contaminación ambiental, se han detectado residuos de manganeso derivados del procesamiento de mineral en concentrado, a nivel de agua, aire y suelo en el Distrito Manganesífero. Una de las principales causas de contaminación es por efecto de la erosión.

1.3 Sistemas de Información Geográfica.

Las ciencias de la tierra demandan datos espaciales y análisis espacial. El sector público y privado necesitan: planos de caminos y canales, planos de construcciones sobre la costa, planos urbanos y catastrales, conocimiento de la distribución de la tierra y sus recursos en

pueblos y ciudades, la distribución de redes: telefónicas, eléctricas, de agua, etc. Una infinidad de datos espaciales ligados a un mapa (Burrough y McDonnell, 1998).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una nueva tecnología que forma parte del ámbito más extenso de los Sistemas de Información. El contexto general en el que surgen es el de la “sociedad de la información”, en la que resulta esencial la disponibilidad rápida de información, para resolver problemas y contestar a las preguntas de modo inmediato.

Los SIG permiten gestionar y analizar la información espacial, por lo que han venido a constituirse en la alta tecnología de los geógrafos y otros profesionales que trabajan sobre el territorio. El término de Sistemas de Información Geográfica hoy está ampliamente difundido, especialmente entre los profesionales que trabajan en la planificación o en la resolución de problemas socioeconómicos y ambientales. Sin embargo, no es fácil definir lo que es un SIG. Se puede afirmar que hay casi tantas definiciones como autores que escriben sobre el mundo de los SIG (Gutiérrez, 1994).

Estas son algunas definiciones de lo que es un SIG:

- Un conjunto automatizado de funciones que mantienen profesionales con ventajas para almacenar, recuperar, manejar y mostrar datos localizados geográficamente (Ozemoy, 1981).
- Un poderoso conjunto de herramientas, para coleccionar, almacenar, recuperar, transformar y mostrar datos espaciales del mundo real (Burrough, 1986).
- Es un Sistema de Información diseñado para trabajar con datos referenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas (Star y Estes, 1990), es decir, con información geográfica. De hecho la Geografía constituye el elemento clave para estructurar la información dentro de un SIG y para realizar operaciones de análisis.
- Un sistema de base de datos en el cual la mayoría de los datos están referidos espacialmente, y operados por un conjunto de procedimientos para contestar preguntas sobre entidades espaciales de la base de datos (Smith, 1987).

Muchas de las definiciones son relativamente generales y abarcan un vasto rango de temas y actividades. Sin embargo, todas tienen una característica en común, son sistemas computacionales que tratan con información geográfica. Otra característica relevante para distinguirlo de otros es que permite el despliegue de mapas. Desde el punto de vista de una base de datos, se utiliza para relacionar operaciones de aplicación específica para su aprovechamiento y análisis, así como para modelación (Maguire, 1993).

Los Sistemas de Información Geográfica se aplican actualmente a los sistemas computarizados de almacenamiento, elaboración y recuperación de datos con equipo y programas específicamente designados para manejar los datos espaciales de referencia geográfica y los correspondientes datos cualitativos o atributos. En general la información espacial se representa en forma de capas, en los que se describen la topografía, disponibilidad de agua, los suelos, usos del suelo, clima, geología, población, los límites administrativos, la infraestructura, etc.

Una de las funciones más importantes del SIG es la capacidad de combinar distintas capas de información de un área, lo que se conoce con el nombre de superposición.

Los SIG son una opción para evaluar los efectos de la erosión con mayor precisión, ya que permiten introducir, seleccionar, procesar, transformar y combinar diferentes clases de datos georreferidos. En este contexto, el SIG puede ser una herramienta útil para el conocimiento y delimitación de unidades en una cuenca hidrográfica (López *et al*, 1996). El SIG utilizado como herramienta para este estudio fue el Sistema de Información ILWIS (Integrated Land and Watershed Management Information System/ Sistema de Información Integrada de Terreno y Manejo de Cuencas), desarrollado en el Instituto Internacional de Levantamientos Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra (ITC), en Enschede, Países Bajos. El objetivo general del sistema es contribuir al mejoramiento de la disponibilidad y calidad de la información necesaria para llevar a cabo un manejo apropiado de cuencas hidrológicas, incluyendo erosión y sedimentación (Valenzuela, 1988).

CAPITULO 2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DISTRITO MANGANESÍFERO DE LA ZONA DE MOLANGO.

2.1 Características físicas

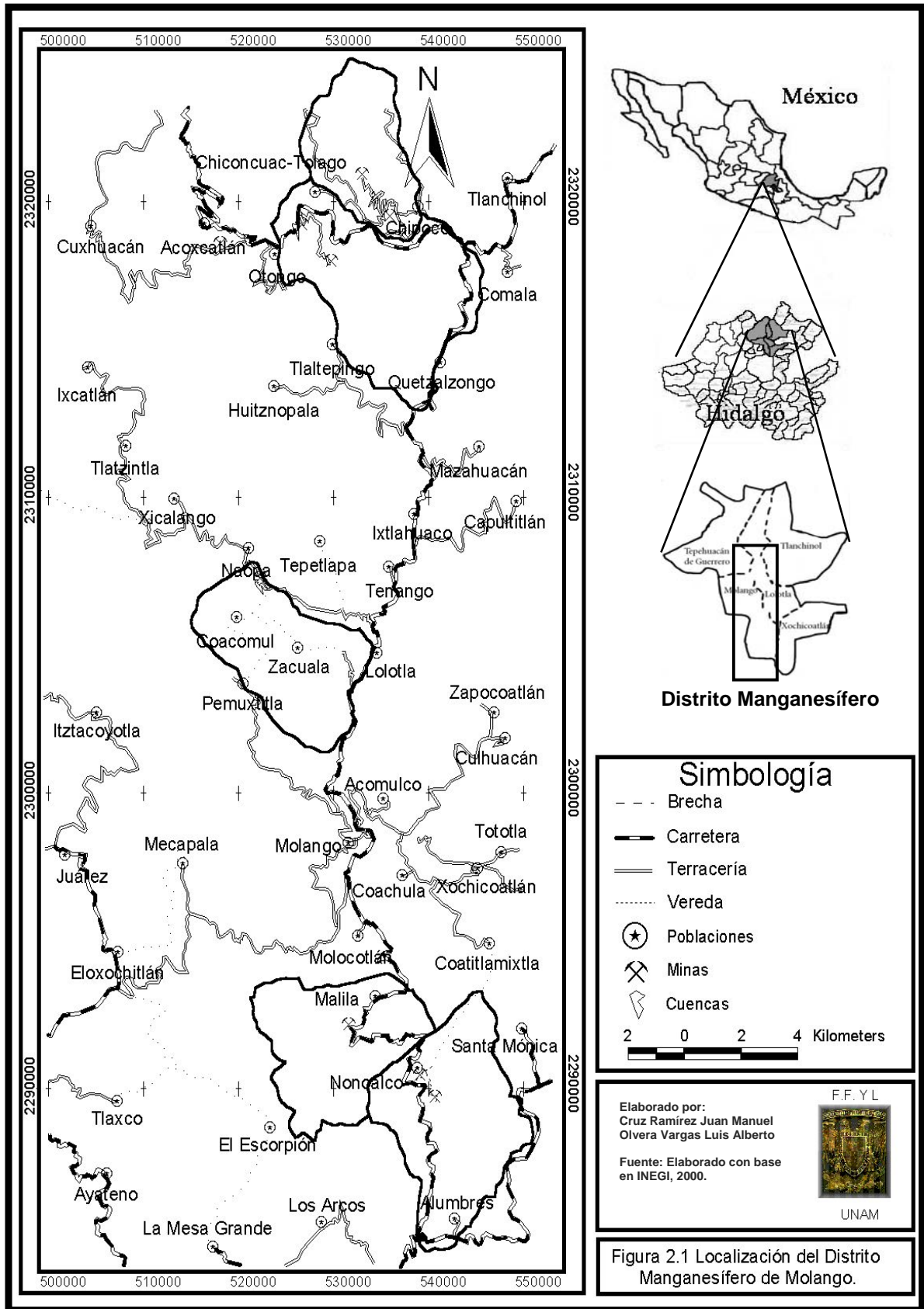
2.1.1. Localización geográfica

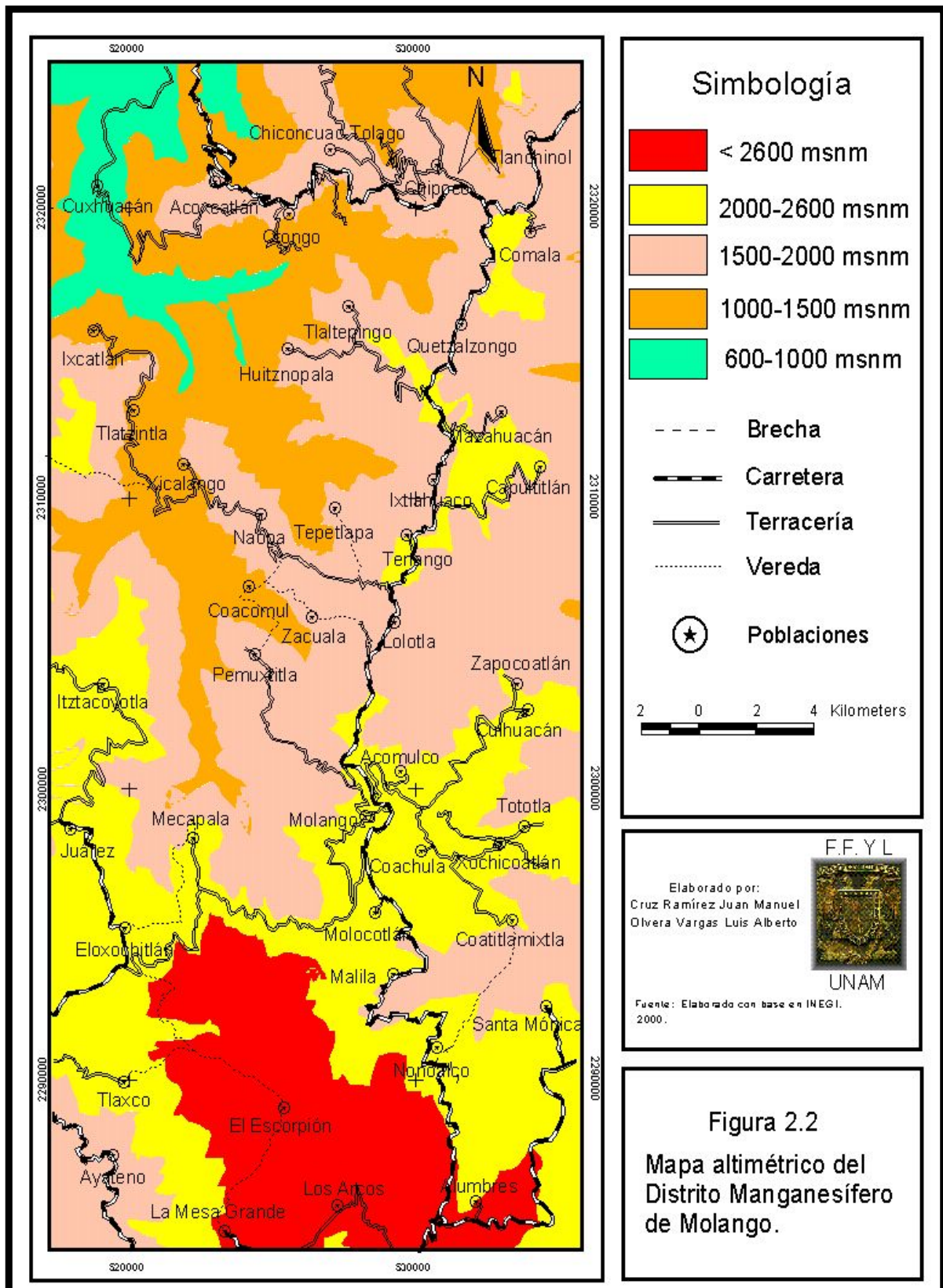
El Distrito Manganésífero se encuentra al norte del Estado de Hidalgo, entre las coordenadas UTM mínimas X=498000 Y=2278000 y máximas X=550000 Y=2339000, Zona 14 (coordenadas geográficas 20°37' y 21°09' latitud norte y 98°31' y 99°01' longitud oeste) (Figura 2.1). Las dimensiones del distrito, de acuerdo con Alexandri y Martínez (1988), son de 50 kilómetros norte-sur y 25 kilómetros oriente-poniente. El cuerpo mineralizado cubre una superficie de cerca de 1250 km², que abarca parte de cinco municipios: Lolotla 15%, Molango 17%, Tepehuacán de Guerrero 30%, Tlanchinol 27% y Xochicoatlán 11%, esto representa el 6 % del territorio estatal (Secretaria de Industria y Comercio, 1970). Limita con el Estado de San Luis Potosí al norte, al este con los municipios de Orizatlán, Huejutla, Huazalingo, Calinali y Tianguistengo; al oeste con los de Eloxochitlán, Juárez, Tlahuiltepa, la Misión y Chapulhuacán; al sur con los de Zacualtipán y Metztitlán.

2.1.2. Relieve

Desde el punto de vista fisiográfico, los municipios que pertenecen al Distrito Manganésífero forman parte de la Sierra Madre Oriental, de la cual forma parte la Sierra de Zacualtipán, que marca el borde suroccidental de la franja de producción de manganeso (formación Chipoco). El Distrito pertenece a la región Tropical del Golfo y al paisaje del Karst Huasteco (Sánchez y Sánchez, 1992).

La parte más montañosa de la zona de estudio se encuentra al sur (Sierra de Zacualtipán), con una altitud que va de 2000 a 2700 msnm. El cuerpo montañoso alcanza la mayor altitud al sur de los municipios de Molango y Xochicoatlán (Figura 2.2).





La porción norte especialmente en los municipios de Tepehuacán de Guerrero, Tlanchinol y Lolotla, sólo alcanza los 1600 metros sobre el nivel del mar. En su mayoría está constituida por mesetas, valles y piedemonte de la Sierra Madre Oriental (Figura 2.2).

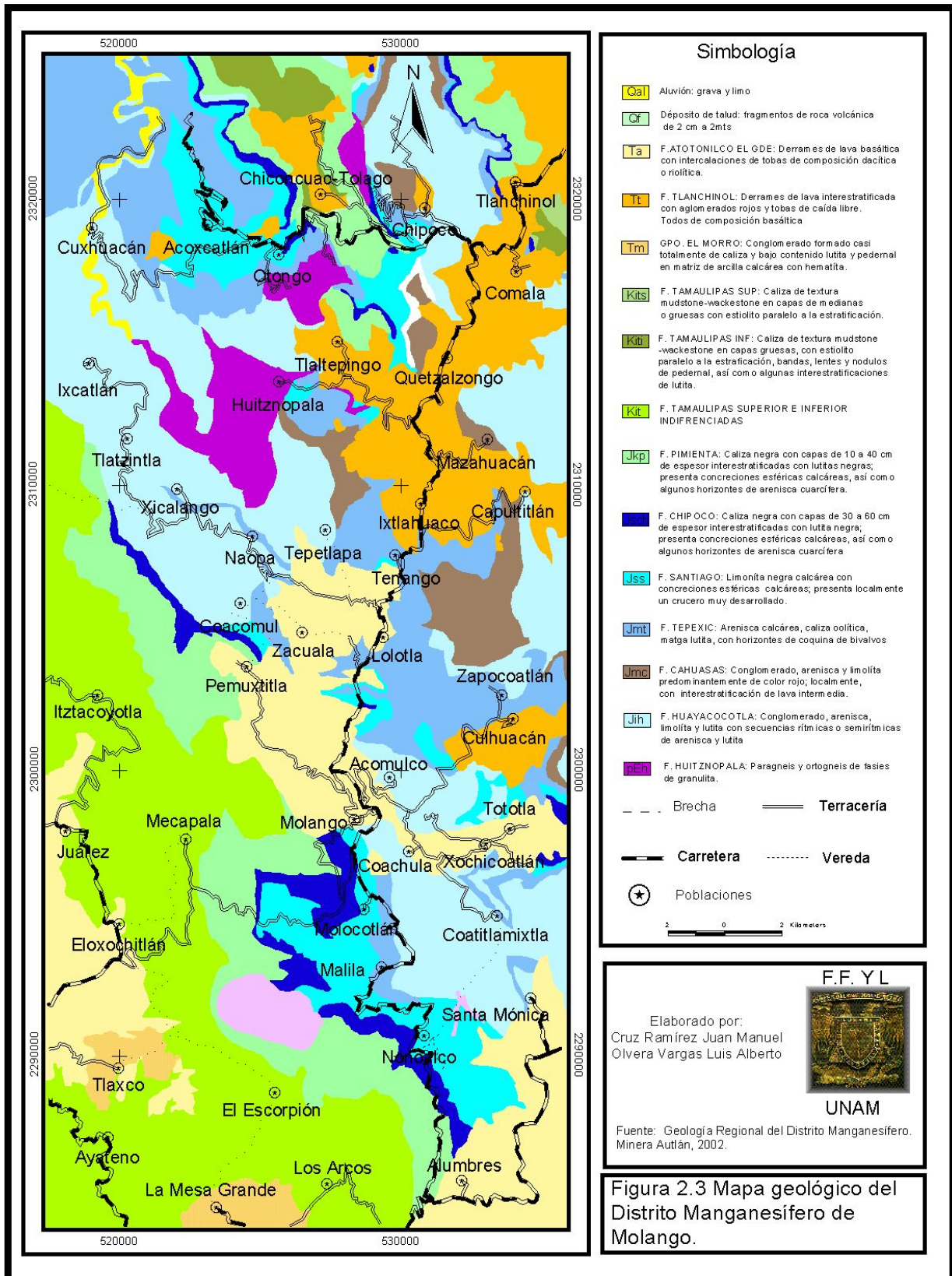
La porción intermedia corresponde a sierra alta escarpada y a mesetas con lomeríos. Cuenta con acantilados, entre los 1000 y 2000 msnm y es el área con mayor extensión en el Distrito Manganesífero, sobre todo en los municipios Molango y Xochicoatlán.

2.1.3 Geología

En la zona de estudio hubo diferentes eventos geológicos de tipo orogénico que, asociados al vulcanismo y al relleno de cuencas oceánicas, dieron origen a una cordillera orgueada y plegada formada por series sedimentarias. Existen rocas del Precámbrico, Paleozoico Superior, Mesozoico y Cenozoico y se encuentran en forma estratificada con más de 4000 metros de espesor (INEGI, 1992).

En la parte norte del área en estudio se encuentra una franja de rocas metamórficas pertenecientes al Precámbrico (las más antiguas de México) que se conoce como formación Huitznopala (Figura 2.3). Su origen se da a partir de una roca granítica que sufrió metamorfismo y presenta un color gris claro con manchas negras. Estos sitios presentan lomeríos suaves, y acantilados cuando la formación aflora en barrancas.

En cuanto a rocas sedimentarias, existe una franja con dirección NW–SE (Figura 2.3) predominantemente de lutitas-areniscas de origen marino del Jurásico Inferior. Se presentan en estratos delgados y masivos, de color negro y con concreciones calcáreas. Esta franja es conocida como formación Huayacocotla y se presenta en lomeríos alargados y abruptos, separados por valles fluviales profundos.



Para este estudio, la formación más importante es el de rocas calizas-lutitas originadas de depósitos marinos en el Jurásico Superior. Son de color gris oscuro a negro y se presentan en estratos de 10 a 30 cm de espesor. A esta formación se le conoce como Chipoco (antes Tamán) y muestra al igual que toda la secuencia de rocas sedimentarias evidencias de fuerte tectonismo (Figura 2.3). El Contacto superior es circundante de las calizas del Cretácico Inferior de la formación Tamaulipas (com. pers. Ing. Jorge Herrera, Minera Autlán). Esta unidad tiene importancia en las actividades económicas, ya que de esta formación se extrae el manganeso.

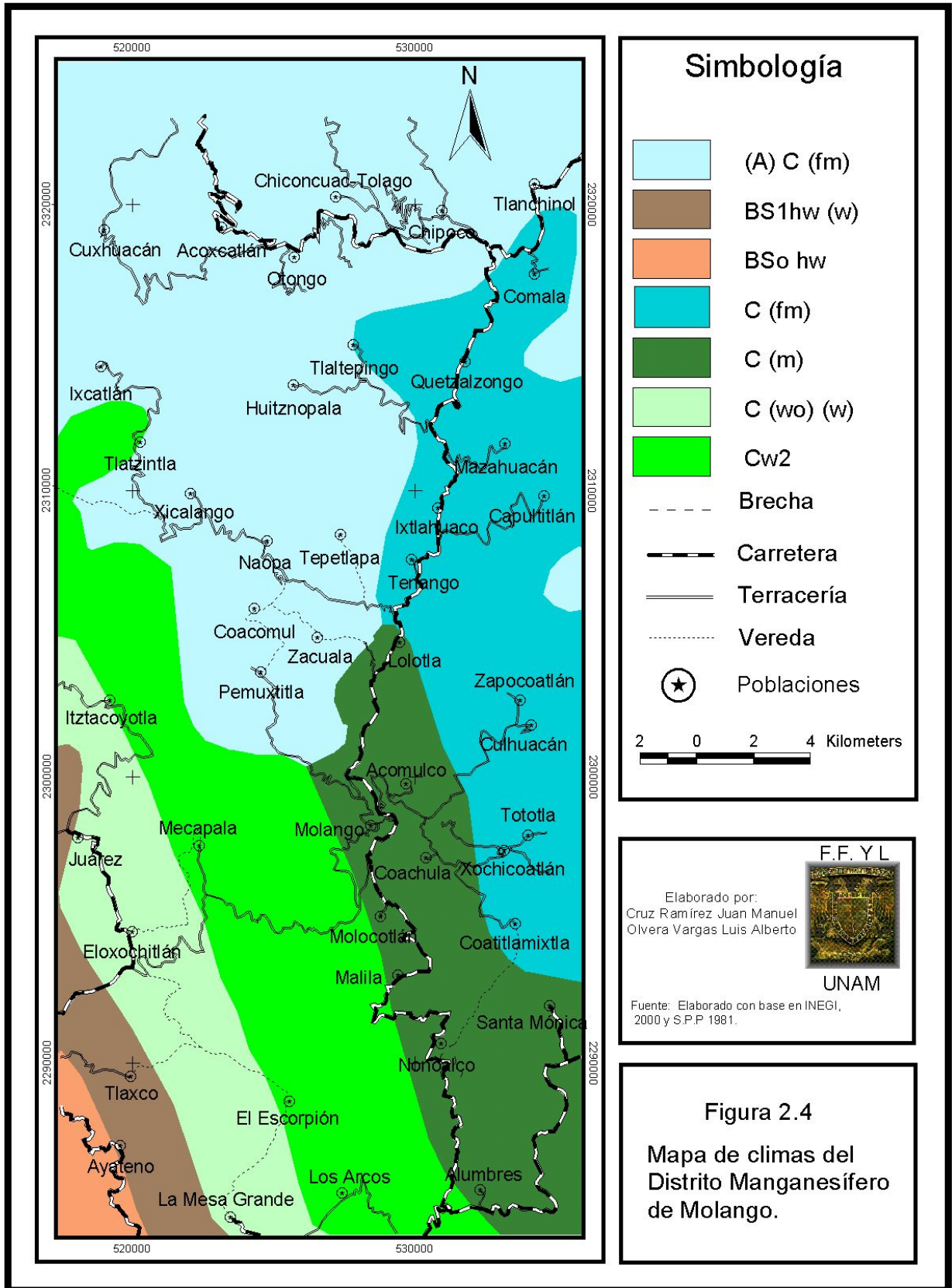
2.1.4 Clima

Los principales tipos de clima que se encuentran en la zona, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1975), corresponden a los cálidos subhúmedos, semicálidos húmedos, y semicálidos semisecos, con templados húmedos y subhúmedos (Figura 2.4).

En el norte y centro de la zona de estudio predomina el clima tipo semicálido húmedo con lluvias todo el año (A) C (fm), es el más representativo y cuyo régimen pluvial es de los más lluviosos; se presenta en zonas de menor altitud (600 a 1000 msnm) y por consiguiente de mayor temperatura.

Los climas de tipo templado se localizan en las áreas montañosas de mayor altitud, pero con diferencias en la humedad y el régimen de lluvias. El clima templado húmedo con lluvias todo el año C (fm) se localiza en el oriente de la región, principalmente en los municipios Lolotla y Xochicoatlán. Cerca de esta área se encuentra el clima de tipo templado húmedo con abundantes lluvias en verano C (m) en los municipios de Nonoalco, Molango y Malilla (Figura 2.4).

Los climas templados subhúmedos con lluvias en verano C (w²) y C (wo) se localizan al occidente y al sur del Distrito Manganesífero, que recibe menor humedad ya que la Sierra Madre Oriental actúa como una barrera orográfica.



En una pequeña porción al oriente del municipio de Tepehuacán de Guerrero se encuentra el clima de tipo seco, subtipo seco semicálido con lluvias en verano BSo hw y el tipo semiseco, subtipo semiseco templado con lluvias en verano BS1 kw. Esta relativa aridez también se debe al efecto orográfico de la Sierra Madre Oriental.

El Distrito Manganésífero está expuesto al avance de las masas húmedas provenientes del Golfo de México, en su ascenso por la Sierra Madre Oriental, lo que provoca nublados y lluvias a lo largo de todo el año. A ello hay que añadir la humedad que trae consigo la presencia de ciclones en verano-otoño y de nortes en invierno. Es decir, se trata de una zona minera *sui generis* en el contexto nacional por encontrarse en una región subtropical, húmeda (Sánchez y Sánchez ,1992). Como el clima depende principalmente de elementos meteorológicos como la temperatura y la precipitación, es importante hablar de ellos.

a) Temperatura

La temperatura media anual en el Distrito Manganésífero se encuentra relacionada con la altitud. La zona norte está entre los 20°C y 24°C; en el centro de la región se mantienen las temperaturas entre 16°C a los 20°C; y las partes que cuentan con mayor altura tienen las temperaturas más bajas de la zona, con valores de 12°C a 16°C. Las temperaturas máximas se presentan en el mes de mayo y las mínimas en diciembre (Figura 2.5).

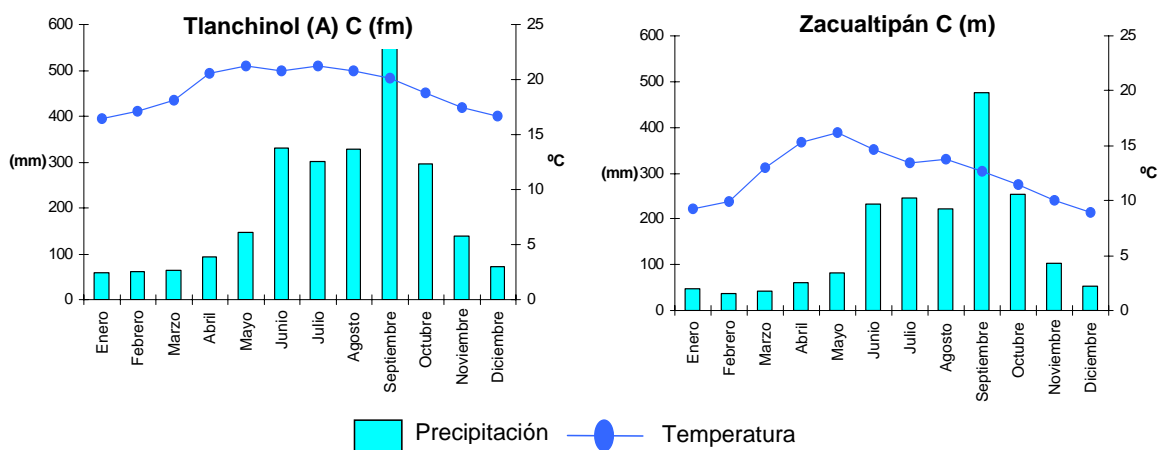
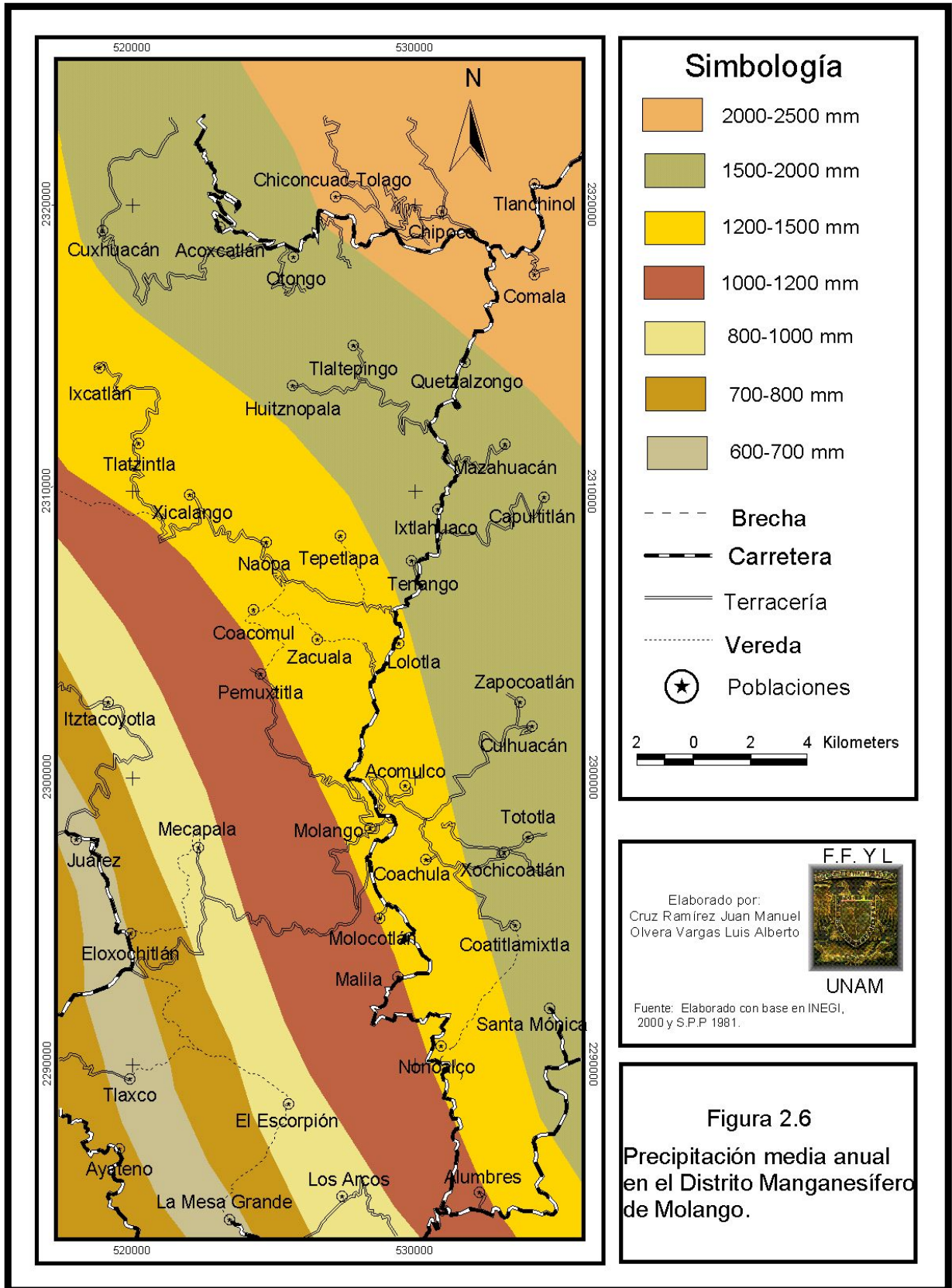


Figura 2.5 Precipitación y temperatura media mensual en dos estaciones meteorológicas (INEGI, 1995).



b) Precipitación

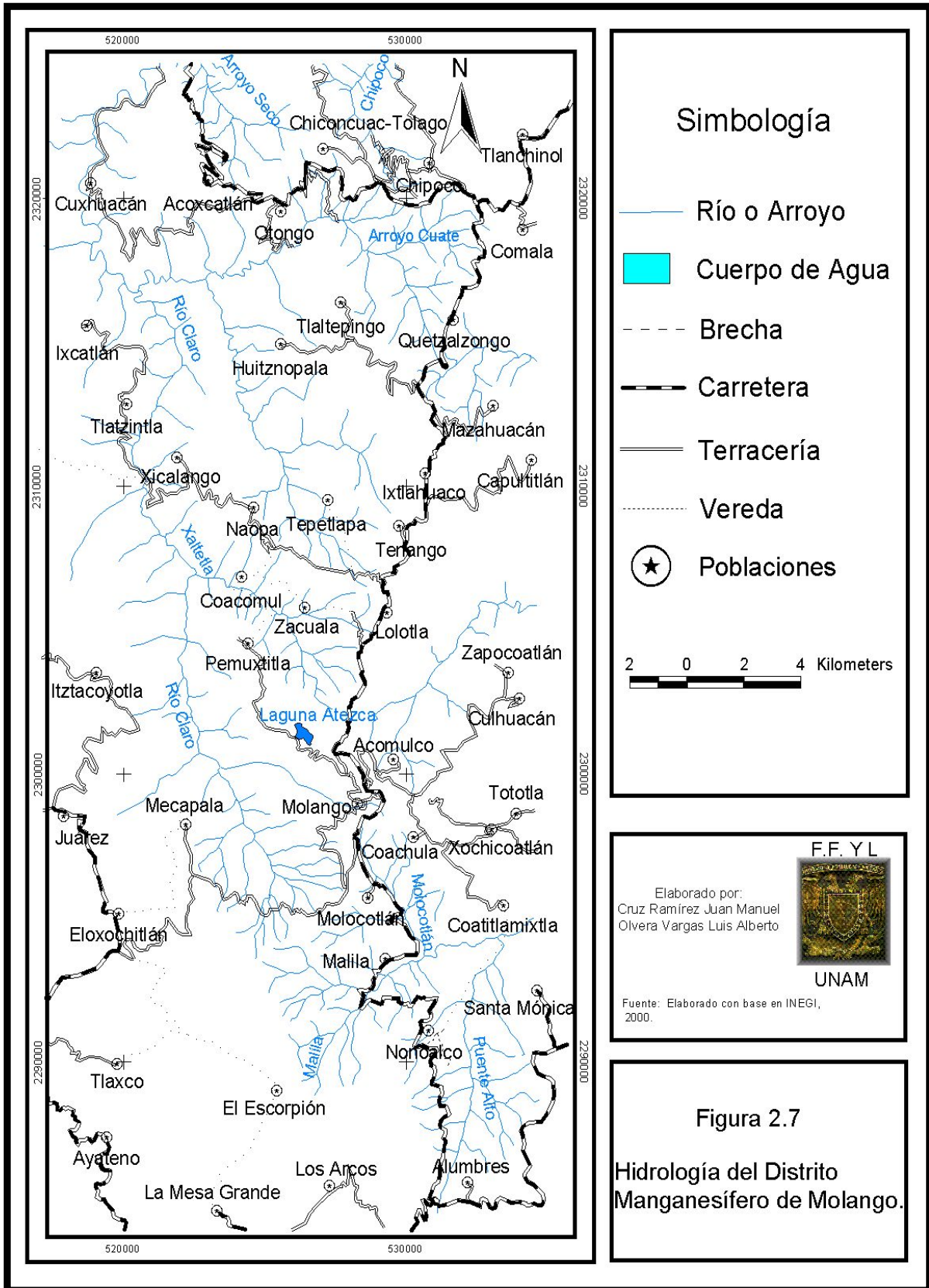
Como resultado de la humedad traída por los vientos provenientes del Golfo de México, y debido a la existencia de la barrera orográfica que representa la Sierra de Zacualtipán, la zona norte presenta los mayores volúmenes de lluvia anual con un rango de 2000 y 3000 mm (Figura 2.6). Los volúmenes de precipitación van disminuyendo con dirección suroeste. En la parte centro presentan valores de 1200 a 1500 mm y en la zona suroeste es donde se registran los valores más bajos, con 600 y 700 mm. La mayor concentración de precipitación es en el mes de septiembre y la mínima en enero y febrero (Figura 2.6).

2.1.5 Hidrología

La zona de estudio corresponde a la región hidrológica del río Pánuco en su porción cuenca del río Moctezuma, que corresponde a la vertiente del Golfo. Tiene dos subcuencas; la principal por la superficie que abarca es la subcuenca del río Amajac y la otra es la subcuenca del río Hules. Dentro de ella se encuentra la localidad de Nonoalco y la subcuenca del río Claro (SPP, 1981).

La hidrología se compone de escurrimientos superficiales y subterráneos. Los primeros se caracterizan por ríos con limitada longitud y poco caudal, debido a lo abrupto del relieve y a la composición geológica de las rocas sedimentarias, en particular las calizas, que permiten una fuerte infiltración de las lluvias al subsuelo. Los escurrimientos subterráneos se presentan principalmente sobre un material consolidado con bajas posibilidades de aprovechamiento de acuíferos.

En la región central se localiza el río Claro que nace de los escurrimientos de agua de los cerros de Santo Roa y La Campana, La Barranca de Juárez y San Lorenzo Ixtacoyotla, de la Laguna de Atezca, donde su caudal sigue una orientación del suroeste al noroeste. En las regiones pertenecientes a los cinco municipios que conforman la zona de estudio existen arroyos y cabeceras de ríos, las principales corrientes de agua son en Lolotla el Arroyo Cuate, Xalpa y Río Claro; en Molango el arroyo Xaltetla, Malila y Molocotlán; en Tlanchinol: Santa María, Tehuetlán y Acuapa; en Xochicoatlán el arroyo Puente Alto, la



Cañada y Trozo de Agua; en Tepehuacán de Guerrero el arroyo Tetelpa, Chicoyoco e Ixcuicuita (figura 2.7).

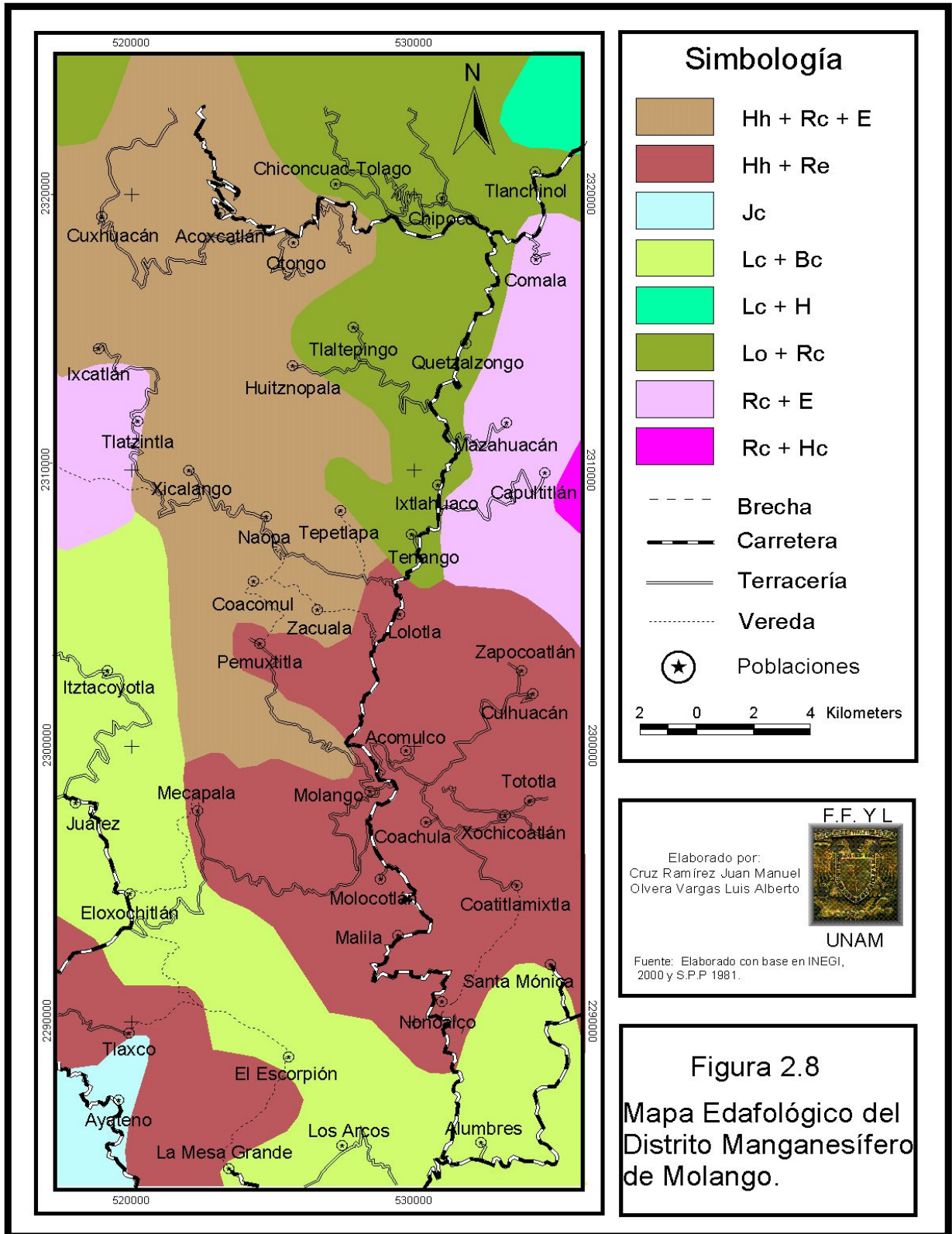
2.1.6 Suelos

En el Distrito Manganesífero predominan los suelos de tipo Feozem háplico, Regosoles y Luvisoles (INEGI, 1992). Estos suelos se encuentran dentro de un paisaje cárstico, lo que hace que los suelos de esta zona tengan altos contenidos de carbonatos, derivados de calizas que son intemperizadas por la acción del agua y la temperatura (Alexandri y Martínez, 1988). La mayoría de los suelos de esta región tienen fase lítica, son de origen residual, someros y de desarrollo moderado o incipiente. Las diferentes asociaciones vegetales los proveen de grandes cantidades de materia orgánica en forma de humus y es en parte por esta circunstancia que los suelos en su mayoría son de colores oscuros (SPP, 1981).

El Feozem háplico (Hh) es el suelo más abundante del Distrito Minero, presentándose en la parte noroeste, centro y sureste (figura 2.8). Estos suelos presentan una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica (Millar, *et al.*, 1975). En la zona de estudio se encuentran Feozem poco profundos que se desarrollan en laderas y pendientes abruptas, en donde sus rendimientos son bajos y se erosionan con mucha facilidad.

Los Luvisoles (L) se presentan en la parte norte y suroeste del Distrito Minero, asociados con Cambisoles (B), Feozem (H) y Regosoles (R) (figura 2.8). Los Luvisoles de esta zona se caracterizan por tener una acumulación de arcilla en el subsuelo y una mineralización de materiales derivados de hierro (lo que les da colores rojizos), son altamente susceptibles a la erosión y están limitados por fases líticas y pedregosas.

Los Regosoles, principalmente calcáricos (Rc) son suelos someros, de color claro, semejantes a los del material que les da origen, como son lutita-arenisca del Jurásico y Terciario y algunas tobas andesíticas del Terciario Superior.



H: Feozem, Hh: Feozem háptico, Hc: Feozem calcárico; Rc: Regosol calcárico, Re: Regosol eútrico; Lc: Luvisol crómico, Lo: Luvisol órtico; E: Rendzina; Jc: Fluvisol cacárico; Bc: Cambisol crómico

Estos suelos sustentan vegetación de selva mediana perennifolia y bosques mesófilos de montañas (SPP, 1981). Este tipo de suelo está presente en una pequeña zona del noreste y noroeste (figura 2.8).

Los suelos de esta zona tienen rendimientos bajos para que se desarrollen las actividades agrícolas, ya que presentan diferentes limitantes, como lo son, terrenos con pendientes abruptas, suelos someros y afloramiento de rocas.

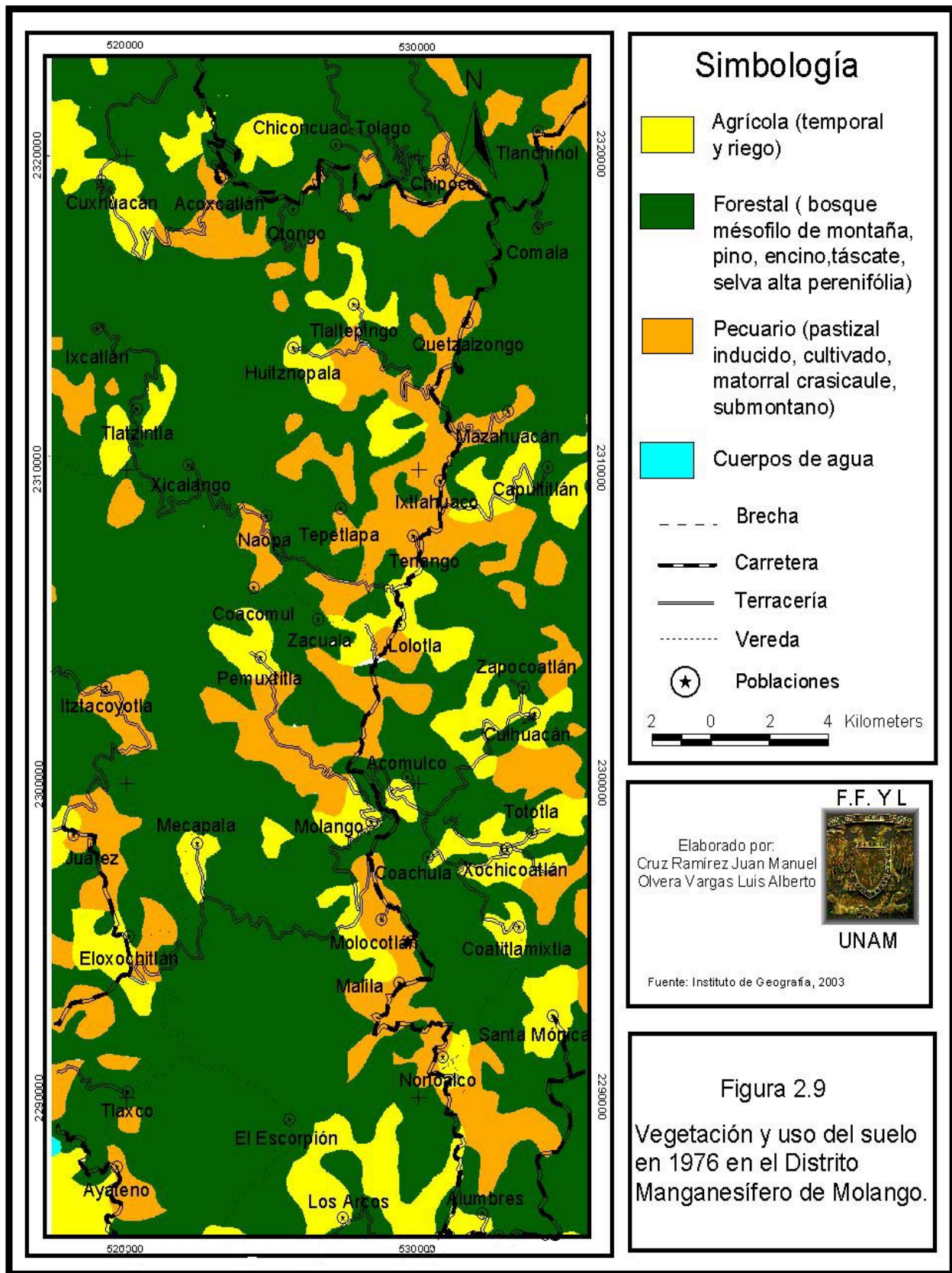
2.1.7 Vegetación y uso del suelo

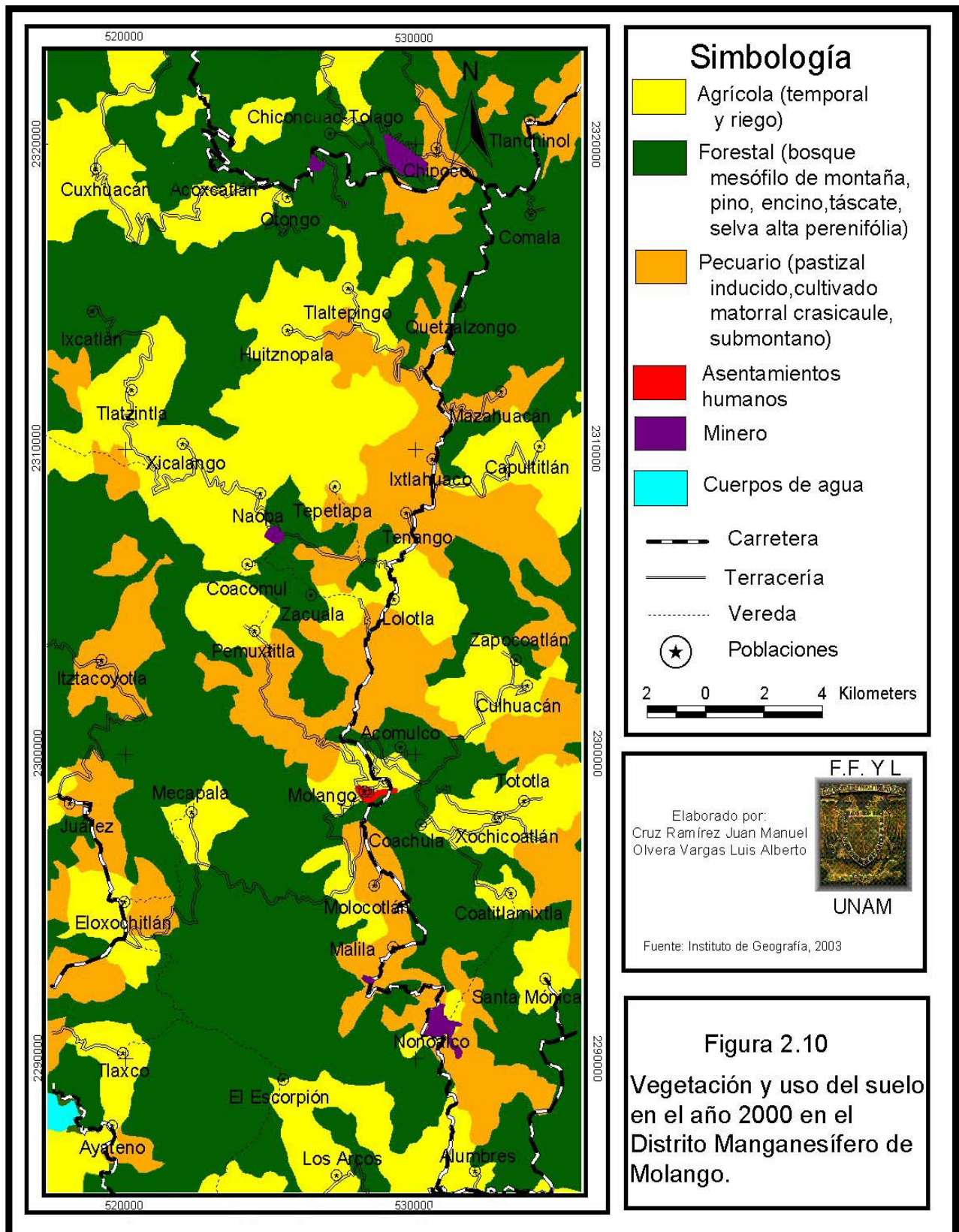
La vegetación del distrito manganesífero está directamente relacionada con el clima y la altitud del lugar. En las partes más altas se hallan bosques de pino-encino (incluye encino-pino), bosques de encino asociado con vegetación secundaria arbustiva, y en una pequeña parte del suroeste hay bosque de táscate. El bosque mesófilo de montaña se encuentra en toda la zona de estudio en laderas con pendientes abruptas y está asociado con vegetación secundaria. En las partes con menor altitud y con climas cálidos subhúmedos se desarrollan selvas altas y medianas perennifolias asociadas con vegetación secundaria arbustiva y herbácea (Figura 2.10).

Las actividades primarias del distrito manganesífero se basan principalmente en la agricultura de temporal y el cultivo de pastizales. La primera se encuentra distribuida en toda el área de estudio, sólo en la parte suroeste se practica la agricultura de riego y humedad por la cercanía a la laguna. Los pastizales son cultivados e inducidos y se distribuyen en el centro y sur de la zona sobre valles intermontanos (Figura 2.10).

El Distrito Manganesífero ha sufrido cambios de uso de suelo en los últimos 25 años (figura 2.9 y 2.10). Estos han sido causados por el rápido incremento de la población (35% de crecimiento poblacional en los últimos 30 años), la cuál ejerce una presión sobre la explotación de los recursos y la ampliación de las áreas agrícolas y de pastoreo.

El aumento del uso agrícola se ha dado en zonas aledañas a las comunidades en donde las pendientes van de ligeras a muy abruptas.





2.2 Aspectos socioeconómicos

2.2.1 Características de la población

Este subtema se realizó con datos de Cuadernos Estadísticos Municipales de los municipios de Lolotla, Molango, Tepehuacán de Guerrero, Tlanchinol y Xochicoatlán y Censos Generales de Población y Vivienda de los años 1960, 1970, 1980 y 1990 elaborados por la Secretaría de Industria y Comercio e INEGI (Figura 2.11). Ninguno de los municipios que pertenece al Distrito rebasa de los 30 mil habitantes, el más poblado es Tlanchinol, con alrededor de 28 mil habitantes y el menos poblado es Lolotla con un poco más de 9 mil personas. A lo largo de los últimos tres decenios esta zona de Hidalgo no ha concentrado más del 5% del total de la población estatal. Hacia 1990, sólo representa el 4% de la población total del estado, con cerca de 78 mil habitantes.

Entre 1970 y 1990, la población se ha ido incrementando paulatinamente. Así la población total del Distrito Manganésífero pasó de 52 mil habitantes en 1960 a tener cerca de 80 mil en 1990 (Figura 2.11). Sin embargo, los municipios de Molango y Xochicoatlán han tenido un ligero descenso en su población entre 1980 y 1990.

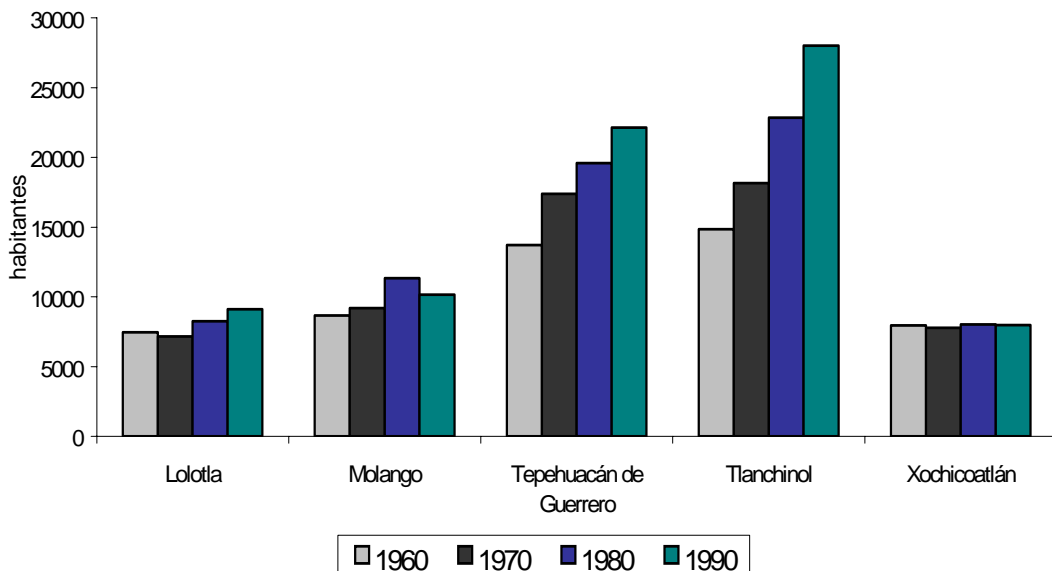


Figura 2.11 Evolución de la población de 1960 - 1990 en los municipios del Distrito Manganésífero.

En 1990 la mayor densidad de población de la zona de estudio se encontró en Tlanchinol con 73 habitantes por km², mientras que la menor se registró en Molango con 41 habitantes por km². En el mismo año, Hidalgo tenía una densidad de 89 habitantes por km² (Cuadro 2.1). Este estado es uno de los más densamente poblados del país.

Cuadro 2.1 Densidad de población y porcentaje de la población total estatal de 1960-1990 del Distrito Manganesífero.

Municipios	1960		1970		1980		1990	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Lolotla	34.51	0.75	33.22	0.60	38.15	0.53	42.26	0.48
Molango	35.18	0.87	37.21	0.77	45.89	0.73	41.10	0.54
Tepehuacán de Guerrero	32.15	1.38	40.75	1.46	45.90	1.27	51.85	1.17
Tlanchinol	39.05	1.49	47.73	1.52	60.07	1.48	73.63	1.48
Xochicoatlán	49.93	0.80	48.76	0.65	50.33	0.52	50.11	0.42
Distrito Manganesífero	42.12	5.29	47.72	5.00	56.00	4.52	61.89	4.10
Hidalgo	47.30	100	56.88	100	73.74	100	89.98	100

a Densidad de población (habitantes por km²).

b Porcentaje de la población total estatal.

En lo que respecta a las actividades económicas, la agricultura es la actividad que domina la zona. La superficie cultivable es de temporal, y la productividad agrícola está sujeta a los regímenes pluviométricos, heladas, a lo accidentado del terreno y a los escasos insumos para elevar la producción. Los principales cultivos son maíz, frijol y café.

Junto con esta actividad también se desarrolla la ganadería. La ganadería propiamente no existe de manera comercial, ya que el ganado es de uso doméstico o de trueque entre comunidades; existen pequeños potreros principalmente de ganado bovino. En un tercer plano se encuentra la actividad forestal, que consta de la explotación de pino y encino (Huerta, 2001).

Las actividades secundarias en la región, para el periodo de 1960-1990, se desarrollaron más que los otros sectores. Ésto se debe en gran parte a la actividad minera del

manganeso de la Compañía Minera Autlán, que es prácticamente la única actividad industrial en la zona.

Los mineros del Distrito Manganesífero no representan una porción sustancial del total de la Población Económicamente Activa en Hidalgo. Por lo que se refiere al número de mineros en la región, éste llegó a ser de cerca de 700 en 1990. Los municipios donde hay mayor concentración de trabajadores en este periodo son Tepehuacán de Guerrero y Tlanchinol. Los otros municipios cuentan con una población menor de mineros (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2 Población económicamente activa en el sector minero, 1960-1990.

Municipios	1960	1970	1980	1990
Lolotla	2	16	41	62
Molango	6	54	65	59
Tepehuacán de Guerrero	3	343	105	200
Tlanchinol	9	155	172	293
Xochicoatlán	0	64	30	92
Distrito Manganesífero	13	632	413	706

Actualmente la Compañía Minera Autlán cuenta con 137 empleados en la unidad Nonoalco y 358 empleados en Molango (Secretaría de Economía, 2002).

2.2.2 Descripción de las actividades mineras

La Compañía Minera Autlán (CMA) comenzó en 1960 la exploración y explotación del Distrito Manganesífero de Molango, considerado el depósito de mineral de manganeso grado metalúrgico más importante de América Latina y uno de los diez más importantes del mundo. La CMA cuenta con 2 unidades mineras: Molango y Nonoalco; produce nódulos y carbonatos de manganeso, bióxido de manganeso grado batería, bióxido de manganeso grado cerámica y óxido manganeso grado alimenticio. La CMA tiene 35 millones de toneladas de reservas probadas de manganeso que son suficientes para 62 años de producción, y 256 millones de toneladas de probables reservas para producir durante 250 años (<http://autlan.com.mx/inicio.htm>).

La extracción de carbonatos de manganeso (rodocrosita) se realiza en la Unidad Molango, en dos minas a cielo abierto (Chipoco y Naopa) y en una mina subterránea (Tetzintla). El método de extracción en la mina subterránea consiste en barrenar, hacer explotar, cargar y transportar el mineral y rellenar la parte extraída. Las minas a cielo abierto sólo usan barrenadoras y palas cargadoras. Una vez que el mineral es extraído, se transporta a la planta trituradora, en donde una parte se vende como carbonatos de manganeso a la industria siderúrgica, mientras que la otra parte pasa por un proceso de calcinación donde se obtienen nódulos de manganeso. Durante el proceso se generan 200 toneladas de polvo al día, el cuáles antes de 1992 eran emitido a la atmósfera (com. pers. del jefe de la unidad Molango). A partir de 1992 se instalaron filtros y/o un colector de polvos de manera que las emisiones de partículas se redujeron a menos de 30 mg/m³. Los polvos colectados son confinados en depósitos ubicados junto a la planta, los cuáles se estabilizan con una cubierta de vegetación. Actualmente se tiene una acumulación de polvos para confinamiento de 500,000 toneladas.

La extracción de óxidos de manganeso (pirolusita) se realiza en varios tajos a cielo abierto (Alumbres, Cerro Prieto 1 y 2, Tepiolo y El Panteón) en las cercanías de Nonoalco, abarcado un área de 5 ha aproximadamente (com. pers. Ing. Lucas, Cía. Minera Autlán). El material extraído es procesado en la planta Nonoalco, donde es triturado y clasificado por gravimetría, separando los materiales ricos en manganeso de los materiales más ligeros a través de tamices y utilizando agua para arrastrar el material ligero en suspensión (Siebe *et al*, 2003). Este material es desechado en presas de lodos, situadas en los alrededores de la planta, mientras que el agua utilizada se recircula (com. pers. Ing. Lucas, Cía Minera Autlán). El producto final es un material fino con un contenido de dióxido de manganeso de 70 % “grado batería”. La CMA desarrolló un tinte basado en manganeso para la industria cerámica y un óxido manganeso usado en el procesamiento de micro nutrientes para alimento animal (<http://autlan.com.mx/inico.htm>).

2.2.3 Problemática de contaminación ambiental

La zona en estudio presenta problemas de contaminación ambiental a nivel de agua, aire y suelo. Las comunidades cercanas a los sitios de operación de la Compañía Minera Autlán han mostrado su descontento ante las afectaciones provocadas por las actividades que se realizan en las minas, de las que sobresalen: la presencia de residuos de manganeso en ríos, producto de la erosión del depósito de polvos y las presas de lodos, y las emisiones atmosféricas provocadas por la calcinación del manganeso en la planta de nodulación de Molango (ésto se refleja en los techos de las casas y en la superficie de la vegetación en las zonas circundantes a la planta). Los pobladores temen que el exceso de manganeso en el ambiente provoque toxicidad y desbalance nutricional en plantas y animales; y que pudiera haber una contaminación con manganeso en pozos de agua potable.

En 1997 el Instituto de Salud Ambiente y Trabajo (ISAT) realizó un estudio epidemiológico preliminar que mostró que los habitantes de las comunidades cercanas a la zona presentan síntomas de enfermedad neurológica por toxicidad de manganeso. Además incluyó un análisis de manganeso en partículas atmosféricas, agua, suelos y alimentos en la comunidad de Chiconcuac (zona afectada) los cuales se compararon con datos obtenidos de la comunidad Cuxhuacán (zona control). Los resultados mostraron diferencias significativas, ya que la población de la zona afectada presentó concentraciones altas de manganeso en sangre ($15 \mu\text{g/L}$) por la continua exposición al mineral. Los síntomas encontrados por la exposición al manganeso son problemas de memoria, alteración en la coordinación motora y anemia.

La intensa deforestación que ha sufrido la zona de estudio en los últimos 25 años por los cambios de uso de suelo, también contribuye con la contaminación de los ríos. Las actividades agrícolas y pecuarias han ganado terreno a los bosques y selvas, donde la pérdida de cobertura vegetal y las intensas lluvias, provocan que los suelos sean más inestables y vulnerables a la erosión.

La Compañía Minera Autlán ha tratado de disminuir los problemas ambientales con los siguientes programas y medidas:

- Reforestación en áreas donde se hayan realizado extracciones a cielo abierto.
- La construcción de 14 presas de lodos en la unidad Nonoalco, para que los residuos mineros no contaminen los ríos cercanos.
- La construcción de una planta de tratamiento de aguas negras en Nonoalco.
- La instalación de un filtro en la chimenea de la planta de nodulación de Molango, para reducir las emisiones atmosféricas del material calcinado.
- La construcción de un depósito de polvos para almacenar los desechos provenientes del horno de nodulación en la unidad Molango.

En 1999 la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente otorgó a la Compañía Minera Autlán la certificación del ISO 14000 en todas sus unidades y plantas.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS HIDROLÓGICAS CON EL USO DE UN SIG

3.1 Delimitación de las cuencas hidrológicas

El Distrito Manganesífero de Molango cuenta con dos unidades mineras en donde se extrae y se procesa el manganeso: Molango y Nonoalco. Se seleccionaron 5 cuencas de 2º y 3º orden que estuvieran en áreas donde se extrae el manganeso o zonas donde se depositan los residuos mineros. Estas 5 cuencas son las siguientes: 1) Cuenca Otongo: se ubica la Zona Industrial Acatitla y la mina subterránea de Coyoles; 2) Cuenca Tetzintla: donde se encuentra la mina subterránea de Tetzintla y el tajo a cielo abierto de Chipoco; 3) Cuenca Naopa: donde se encuentra un tajo a cielo abierto; 4) Cuenca Malila: existe una planta de procesamiento del mineral; y 5) Cuenca de Nonoalco: donde se localizan varios tajos a cielo abierto, presas de lodos y la planta de procesamiento. De estas 5 cuencas se obtuvieron características morfológicas, litológicas y de uso de suelo con el objetivo de localizar algunas zonas en donde se pudieran instalar las parcelas de clavos de erosión y realizar el muestreo de agua y sedimentos.

La delimitación y caracterización de las cuencas estudiadas se realizó utilizando el sistema de información ILWIS (Integrated Land and Water Information System). El objetivo general del sistema es contribuir al mejoramiento de la disponibilidad y calidad de la información necesaria para llevar a cabo un manejo apropiado de cuencas hidrológicas, incluyendo erosión y sedimentación (Valenzuela, 1988).

Este software fue diseñado para satisfacer los siguientes requerimientos (Gorte *et al.*, 1988, citado por Bocco, *et al.*, 1991):

- Aceptar datos en formato vectorial (por ejemplo, mapas digitalizados) y celdas (raster, por ejemplo, imágenes de satélite en forma digital)
- Utilizar un banco de datos tubular

- Incorporar o interaccionar con modelos descritos en la literatura o disponibles como programas (por ejemplo, modelos hidrológicos, de ordenamiento y utilización del terreno).

La delimitación de las 5 cuencas se realizó sobre los mapas topográficos F14D61 (Molango) y F14D71 (Metztlán) escala 1:50 000, en donde se ubicó el parteaguas de cada cuenca y posteriormente se digitalizaron en una tableta digitalizadora *Calcomp* creando un mapa de segmentos. Este mapa fue poligonizado siguiendo el manual de ILWIS (ITC, 1997). Al mapa de polígonos final se le dieron los nombres deseados y se le aplicó un histograma que muestra la superficie ocupada por cada uno de los polígonos (cuadro 3.1).

Cuadro 3.1 Superficie de las cuenca hidrológicas estudiadas

Cuenca	Ha
Cuenca Otongo	3188
Cuenca Tetzintla	1686
Cuenca Naopa	2208
Cuenca Malila	2266
Cuenca Nonoalco	2798

Posteriormente se digitalizaron las curvas de nivel, equidistantes a 20 metros, de cada una de las cuencas estudiadas para crear un modelo digital de elevación (DEM) en el SIG, con el objetivo de desarrollar un mapa de pendientes de cada cuenca (figuras 3.1, 3.2 y 3.3).

El Modelo digital de elevación es una representación digital donde se muestra la altitud de la superficie terrestre. Las aplicaciones más importantes del DEM son (ITC, 1997):

- Mapa de pendientes: muestra la pendiente en grados y porcentajes
- Mapa de dirección de pendiente: muestra la dirección de la pendiente.
- Mapa de forma de ladera: muestra las laderas rectas, cóncavas y convexas.

Para realizar un mapa de pendientes se deben crear dos filtros que detectan las diferencias de las direcciones de pendiente (Dx - Dy) y por último se aplica una fórmula en la línea de comando de ILWIS:

$$\text{Mapa de pendiente} = \text{RADDEG} (\text{ATAN} ((\text{HYP} (\text{Dx}, \text{Dy}))/\text{pixsize}(\text{DEM})))$$

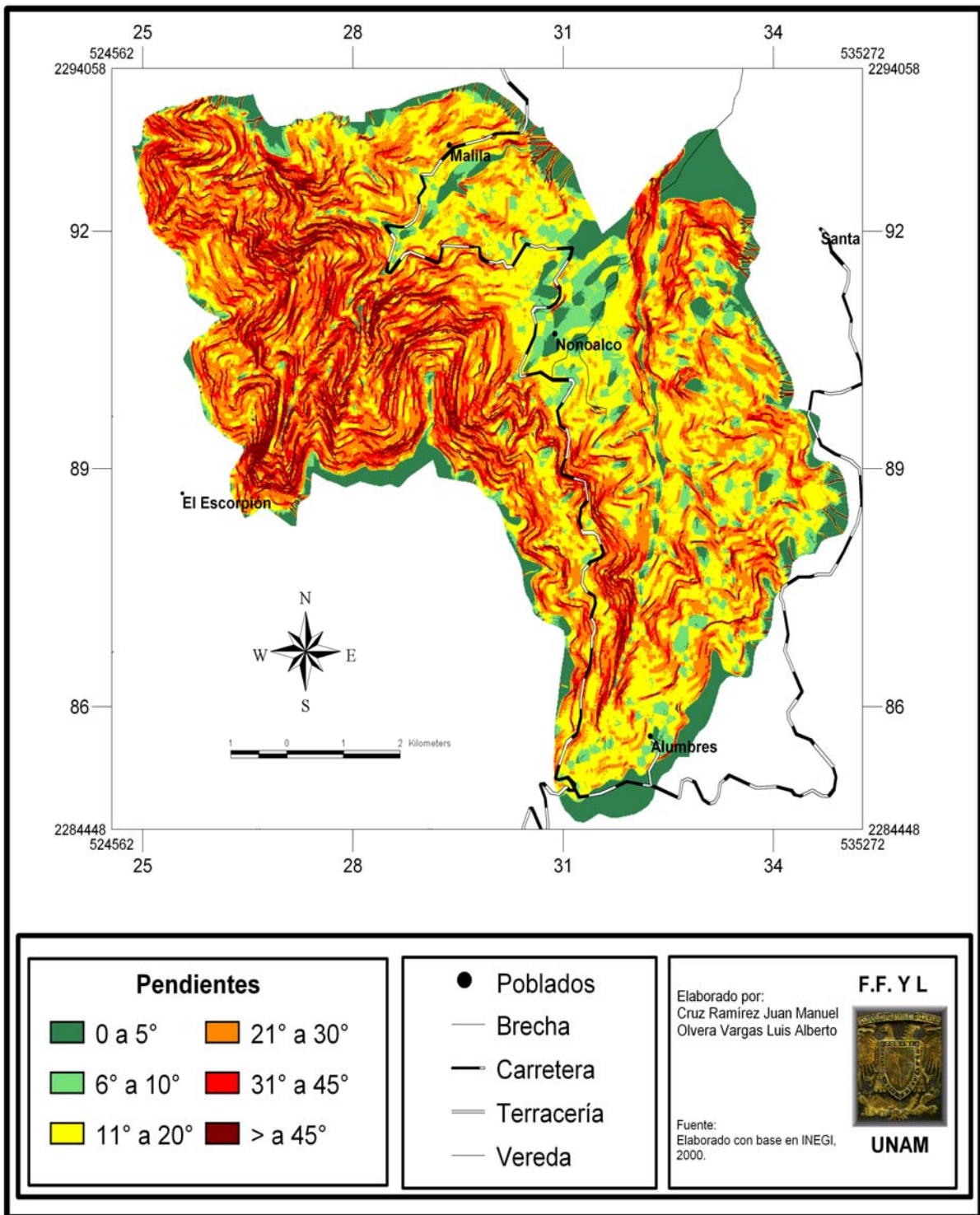


Figura 3.1 Mapa de pendientes de las cuencas de Nonoalco y Malilla.

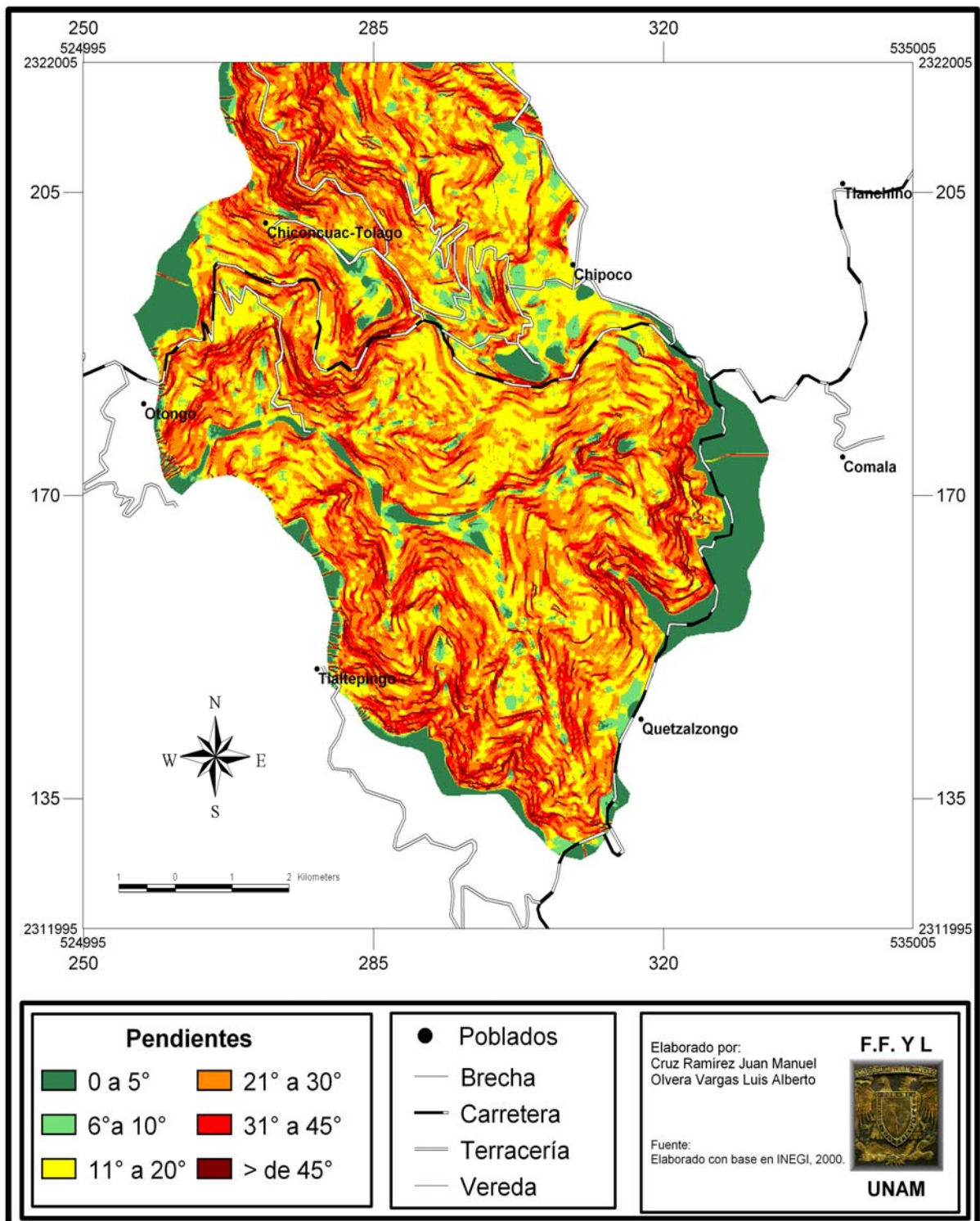


Figura 3.2 Mapa de pendientes de las cuencas de Otongo y Tetzintla.

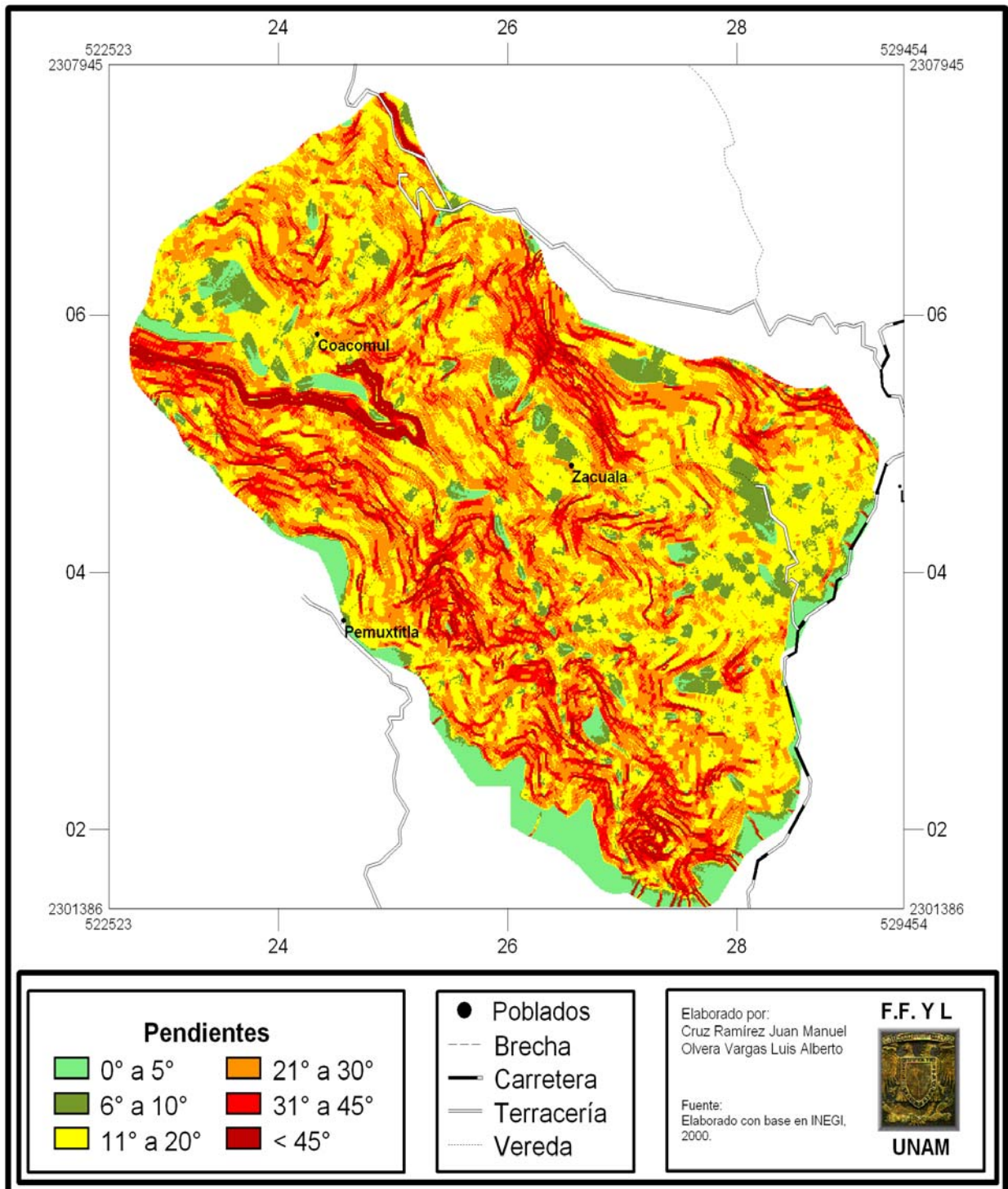


Figura 3.3 Mapa de pendientes de la cuenca de Naopa.

El mapa aparece con valores de pendientes automáticos, que son dados por el programa, y después se aplica un *Slicing* para dar los rangos deseados. Los rangos de pendiente fueron clasificados en 6 clases y se les aplicó un histograma para obtener las superficies que ocupaban en cada una de las cuencas (cuadro 3.2).

Cuadro 3.2 Superficie (ha) de pendientes de las 5 cuencas estudiadas

Cuenca	Pendientes					
	0° a 5°	6° a 10°	11° a 20°	21° a 30°	31° a 45°	> a 45°
Otongo	498.41	123.21	874.29	975.3	539.31	175.44
Tetzintla	208.79	112.65	527.37	467.12	272.45	98.55
Naopa	196.3	170.85	782.04	673.09	310.76	130.96
Malila	301.17	83.64	540.37	655.03	395.85	287.96
Nonoalco	530.53	253.53	937.62	676.65	280.39	123.81

En el cuadro 3.2 se observa que las 5 cuencas estudiadas carecen de superficies planas. El mayor porcentaje de superficie se encuentra entre los 11° y 30°, lo que indica que la mayoría del terreno es accidentado.

Los mapas de pendientes se realizaron con el propósito de sobreponerlos con el mapa de uso de suelo actual y relacionarlo con los resultados obtenidos en las parcelas de clavos para extrapolar la erosión hídrica superficial a nivel cuenca. El análisis se presenta en el capítulo 6.

La delimitación de la facies manganesífera se realizó por medio del mapa geológico escala 1:50,000 elaborado por la Minera Autlán (figura 2.3). De este mapa sólo se digitalizó el polígono perteneciente a la formación Chipoco (antes Tamán), debido a que en esta formación se encuentra el manganeso.

El mapa de segmentos obtenido de la digitalización del mapa geológico, fue transformado a polígonos y posteriormente a un mapa raster, que fue cruzado con el mapa de cuencas con el objetivo de conocer la superficie que tiene cada cuenca estudiada sobre la facies manganesífera (cuadro 3.3).

Cuadro 3.3 Superficie (ha) de la facies manganesífera sobre las cuencas estudiadas

Cuenca	Facies manganesífera
Otongo	185.06
Tetzintla	109.09
Naopa	58.5
Malila	332.25
Nonoalco	287.25

Los datos obtenidos en el cuadro 3.3 fueron utilizados para decidir las zonas en donde se emplazaron las parcelas de clavos de erosión (capítulo 4.1) y ubicar los sitios del muestreo de agua y sedimento (capítulo 5.1.1).

Para la selección de los sitios de muestreo de agua y sedimento y la instalación de parcelas de clavos de erosión se consideró al uso de suelo como otro elemento importante. El mapa de uso de suelo del año 2000 (figura 2.10), fue transformado de formato vectorial a raster para sobreponerse con el mapa de cuencas de la que se obtuvo las superficies que ocupa cada uso de suelo en las cuencas (cuadro 3.4).

Cuadro 3.4 Superficies (ha) de los usos de suelo en las 5 cuencas de estudio.

Cuencas	Uso de suelo			
	Agrícola	Forestal	Pecuario	Minero
Otongo	245.75	2171.75	739	19.75
Tetzintla	611.5	839.25	121.5	119.5
Naopa	787.75	820	568.5	27.25
Malila	65.5	1572.25	622.25	8.75
Nonoalco	539	1215	907	95.25

Los usos de suelo fueron sintetizados en cuatro grandes grupos, ya que en las cuencas seleccionadas predomina el cultivo de maíz de temporal (agrícola), bosque mesófilo (forestal) y pastizal cultivado e inducido (pecuario).

La cobertura vegetal y la facies manganesífera son características esenciales para la selección de los sitios de ambos métodos experimentales. La cuenca Tetzintla presenta menos superficie sobre la facies manganesífera (cuadro 3.3), sin embargo, es la que posee mayor superficie de uso de suelo minero (cuadro 3.4). Ésto se debe a que la intensa explotación del manganeso genera una degradación de las zonas circundantes. Por otro lado, la cuenca Malila es la que tiene mayor superficie sobre la facies manganesífera y cuenta con la menor superficie de uso de suelo minero. La razón es que esta cuenca aún no ha sido explotada.

El mapa edafológico se obtuvo del Atlas Nacional del Medio Físico escala 1:1 000,000 (SPP, 1981), de donde se creó un mapa de segmentos por medio de la digitalización de los polígonos correspondientes a la zona de estudio. Al mapa de segmentos se le aplicó el mismo procedimiento de los anteriores mapas: transformar segmentos a polígonos y posteriormente a raster, para superponerlo con el mapa de cuencas y obtener los tipos de suelo de cada cuenca estudiada (cuadro 3.5).

Cuadro 3.5 Superficies (ha) de tipo de suelos en las 5 cuencas estudiadas.

Cuenca	clasificación	Ha
Tetzintla	Litosol órtico + Regosol calcárico	1684.25
Otongo	Feozem háplico + Regosol calcárico + Rendzina	670.5
Otongo	Litosol órtico + Regosol calcárico	2515.5
Naopa	Feozem háplico + Regosol calcárico + Rendzina	1316.5
Naopa	Feozem háplico + Regosol eútrico	890.75
Malila	Feozem háplico + Regosol eútrico	1627.5
Malila	Luvisol crómico + Cambisol crómico	635.25
Nonoalco	Feozem háplico + Regosol eútrico	1031.5
Nonoalco	Luvisol crómico + Cambisol crómico	1773

El tipo de suelo predominante en la zona de estudio es el Feozem háplico, presentándose como suelo principal en 4 cuencas. El Regosol se encuentra como el segundo tipo de suelo más abundante de la zona, estando presente en todas las cuencas.

Todos los datos obtenidos en este capítulo fueron utilizados para la selección de los sitios muestreados, tanto para el método de parcelas de clavos de erosión (capítulo 4) y el muestreo de agua y sedimento (capítulo 5), y se utilizaron para realizar una interpretación y analizar los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 4. CUANTIFICACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN DEPÓSITOS DE RESIDUOS MINEROS Y SUELOS AGRÍCOLAS.

Existen métodos teóricos, empíricos y experimentales para cuantificar la pérdida del suelo. Los primeros se basan principalmente en estadísticas y datos aproximados y de ellos se obtiene un resultado estimado. Los métodos experimentales son evaluaciones de campo que deben ser sencillas y estar orientadas a objetivos limitados y alcanzables, además de establecer una relación entre causa y efecto (FAO, 1997).

El método de parcelas de clavos de erosión es considerado como un método experimental sencillo, directo, de gran precisión y principalmente de bajo costo, con lo cual se determina la pérdida de suelo en el terreno. Consiste en colocar clavos o varillas en la superficie del suelo para medir los desniveles generados por la erosión o la sedimentación. El tamaño del clavo depende del grosor del suelo y el diámetro debe ser pequeño para que no intervenga en la corriente de superficie (Chapingo, 1991)

Algunas investigaciones y metodologías experimentales sólo consideran el suelo que se pierde en una superficie determinada, sin atender a que también se produce el fenómeno de sedimentación, el cuál implica la entrada de suelo a la superficie, disminuyendo la pérdida efectiva sucedida en el lugar. El método de las parcelas de clavos considera tanto las pérdidas de suelo que se producen en la superficie de la parcela como las entradas que se producen por efecto de la acumulación de materiales acarreados desde otros sectores. Así se ha determinado que la pérdida de suelo es la diferencia entre las entradas y salidas de suelo que ocurren en la superficie de la parcela, lo cual se denomina **Erosión Neta**. Además se considera el total de suelo que se moviliza en la parcela, que es una medida de la dinámica del suelo en su respuesta a la acción de las precipitaciones y al escurrimiento superficial, el cuál se denomina **Suelo Movilizado** (Pizarro, 1997).

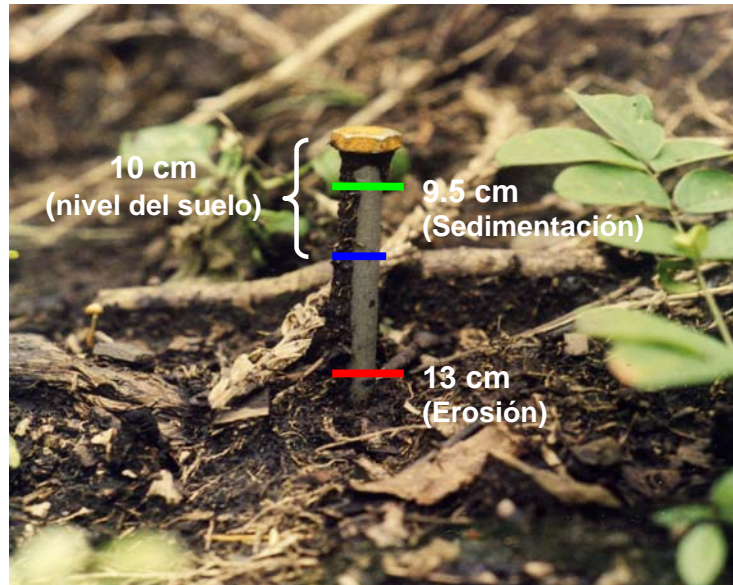


Figura 4.1 Ejemplo de la cuantificación del suelo con las parcelas de clavos

La figura 4.1 ejemplifica la manera práctica en que se manejaron los conceptos de Erosión, Sedimentación, Suelo Movilizado y Erosión Neta. El clavo fue insertado a una cierta profundidad dejando 10 cm de la longitud del clavo expuestos para marcar el nivel inicial del suelo. En la primera medición sólo estaban expuestos 9.5 cm del clavo, lo que indica que ocurrió el fenómeno de sedimentación con un total de 0.5 cm. En la segunda medición la longitud expuesta era de 13 cm, que indica que hubo 3.5 cm de pérdida de suelo con respecto a la medición anterior. Por lo tanto, al cabo de dos mediciones se tiene un suelo movilizado de 4 cm, que es la suma de la cantidad de suelo erosionado (3.5 cm) y la cantidad de suelo sedimentado (0.5 cm). La erosión neta del clavo es de 3 cm, que es la diferencia entre la erosión (3.5 cm) y sedimentación (0.5 cm) registradas.

4.1 Metodología

4.1.1 Selección de los sitios para la instalación de las parcelas de clavos

Para el emplazamiento de las parcelas de clavos de erosión en áreas bajo uso de suelo minero, se localizaron las principales zonas en las que se desarrolla algún tipo de actividad minera, como la extracción, depositación o procesamiento del mineral. De éstas las más importantes son: la Zona Industria Acatitla ubicada en la comunidad de Otongo, en donde opera el horno de nodulación; en Tetzintla existen minas subterráneas y tajos a cielo abierto, en donde se extrae el mineral; en Naopa sólo existe minado a cielo abierto; en Malila se lleva a cabo el procesamiento del manganeso y en Nonoalco está la planta en donde se procesa (secado, molido y envasado) el mineral.

De todas las plantas antes mencionadas sólo se seleccionaron Otongo (sitio 2) y Nonoalco (sitio 1), por contar con depósitos de residuos mineros que operan en estos momentos (Figura 4.2). Para Otongo, se colocaron 3 parcelas en uso de suelo minero sobre la cara principal del depósito de polvos, ubicada en la parte oriente de la zona industrial (UTM X=527026 Y=2319112). En Nonoalco existen trece presas de lodos, de las cuáles sólo se encuentran tres en funcionamiento. La presa Stock 7 está ubicada al oriente de las instalaciones (UTM X=531787 Y=2290316); es la más lejana pero resulta accesible. En esta presa se colocaron 3 parcelas sobre una de sus paredes. En las dos cuencas las parcelas fueron instaladas en la parte convexa, recta y en el pie de la ladera de los depósitos. Se instaló una parcela por cada posición.

También fueron instaladas parcelas en sitios bajo uso de suelo agrícola. Los criterios de selección fueron: a) que estuvieran en sitios donde aflora la facies manganésifera, ya que los suelos que se desarrollan a partir de este material presentan concentraciones elevadas de manganeso. b) ser zonas bajo cultivo de maíz y c) que tuvieran una pendiente mayor a 10° , ya que las zonas planas no son representativas de esta región. En la zona de Otongo, se colocaron 2 parcelas sobre un cultivo de maíz ubicado en la ladera opuesta a la zona industrial

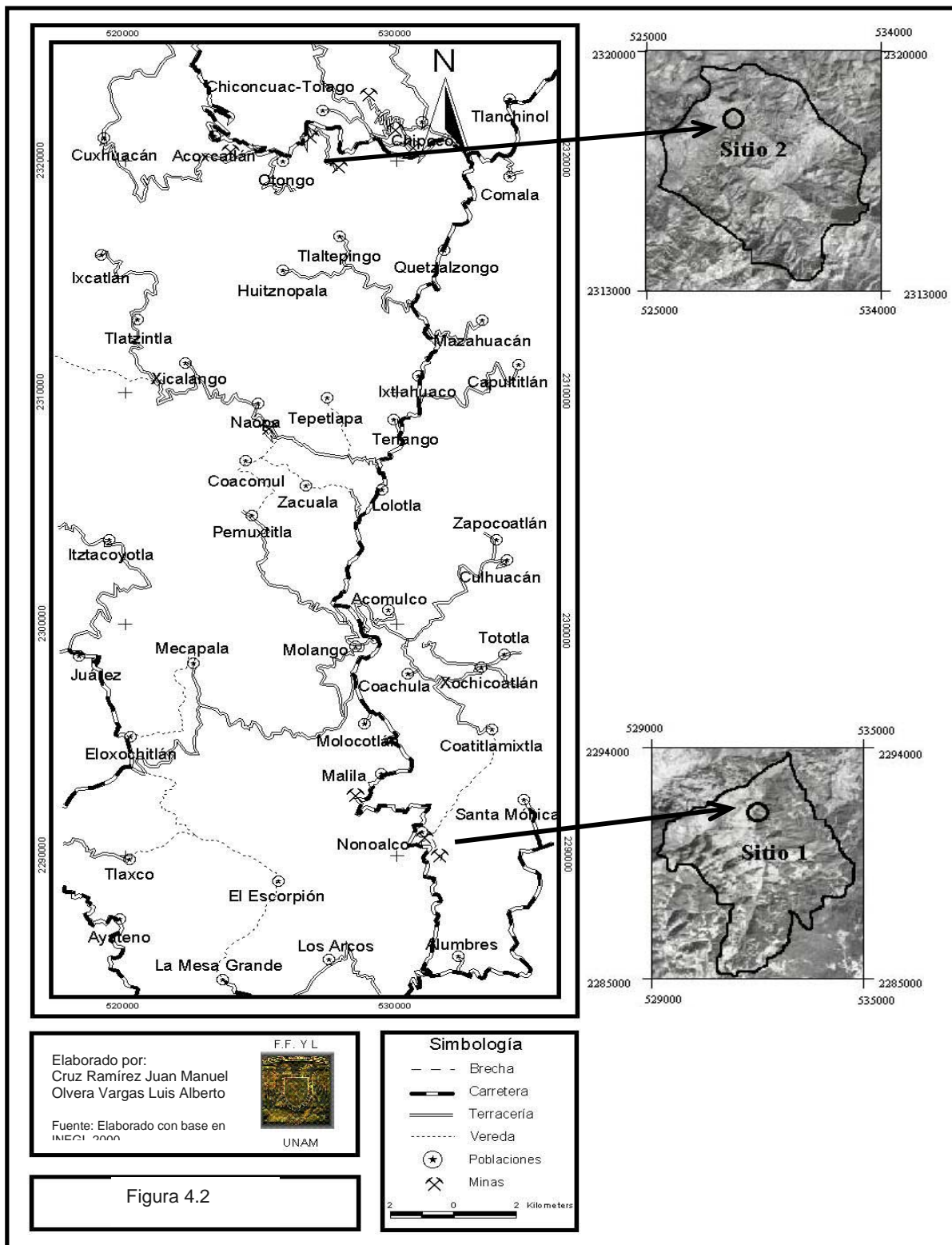


Figura 4.2 Localización de las parcelas de erosión en la cuenca de Otongo y Nonoalco

(UTM X=527084 Y=2319358), muy cerca de la carretera que se dirige a Acoxcatlán. El predio pertenece al señor Demetrio Hernández.

En Nonoalco las 2 parcelas están sobre el camino que lleva a la presa Stock 7, a 500 metros aproximadamente antes de llegar a la presa (UTM X=531707 Y=2290193). El dueño del predio es el Sr. Abundio Villegas. En las parcelas de maíz sólo se colocaron clavos en laderas rectas y pies de ladera, debido a que su pendiente es regular y no presenta muchas variaciones (Figura 4.2). Se instaló una parcela por cada posición.

Otros criterios considerados para la instalación de las parcelas fue buscar zonas de fácil acceso, seguras y donde los propietarios mostraran buena disposición para la realización de este trabajo.

4.1.2 Instalación de las parcelas

El diseño general de muestreo para la instalación de las parcelas fue el siguiente:

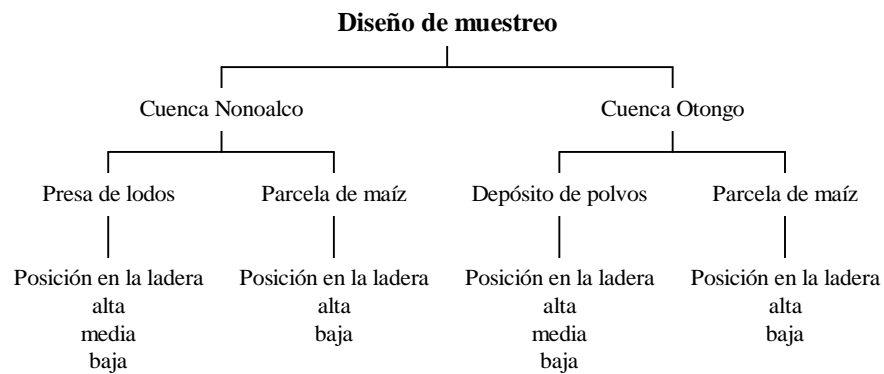


Figura 4.3 Esquema del diseño del muestreo.

Para colocar las parcelas de clavos de erosión se consideraron áreas de 20 m² (5 metros de largo por 4 metros de ancho), donde se colocaron 30 clavos, uno a cada metro de distancia. Se utilizaron clavos de 20 centímetros de largo y 0.4 cm de ancho, los cuáles se enterraron 11 cm en la parte alta de la ladera y 7 cm en la baja. Para el caso del uso de suelo minero, los clavos se enterraron 10 cm en la parte media de la ladera (figura 4.3).

Las mediciones hechas a los clavos de erosión se realizaron a un costado de cada clavo con cinta métrica. A cada clavo se le asignó un número, lo que permitió llevar un registro exacto en cada una de las mediciones. La instalación de todas las parcelas se efectuó entre el 6 y 10 de Septiembre del 2002. Se realizaron 4 lecturas en total siendo la última el 25 de Noviembre del 2002. Estas fechas corresponden a meses con altos períodos de precipitación, en especial el mes de Septiembre.

Se creó una base de datos con todos los registros obtenidos en campo, de donde se obtuvo el promedio de las mediciones realizadas en los clavos que sufrieron erosión. Para esto se calculó el cociente entre la sumatoria de las mediciones de todos los clavos que presentaron erosión y la cantidad total de clavos del sitio, es decir, se tomó con valor cero a los clavos que presentaron sedimentación y aquellos que no presentaron variación. Para obtener la medida de los clavos que sedimentaron, se procedió de la misma forma, estableciendo el cociente entre la sumatoria de las mediciones de los clavos que presentaron sedimentación, dividida por el total de clavos de la situación. En este caso se consideró con valor cero a los clavos que presentaron erosión y a aquellos que no presentaron variación (Anexo 1). Para cuantificar el suelo erosionado o sedimentado en ton/ha para el periodo de estudio, se multiplicó el resultado en milímetros, por la densidad aparente del suelo (t/m^3) y por 10 (Pizarro, 1997). La expresión en forma matemática es la siguiente:

$$X = Y * Da * 10$$

Donde:

X= Suelo erosionado o sedimentado (t/ha)

Y= Promedio del suelo erosionado o sedimentado (mm)

Da= Densidad aparente del suelo (t/m^3)

En el caso del depósito de polvos se realizaron secciones transversales en la parte alta y media de la ladera, ya que por la gran cantidad de suelo movilizado se formaron grandes surcos o vías de escurrimiento y los clavos desaparecieron. Las secciones transversales consisten en establecer una referencia a partir de la cual se puedan medir los cambios de nivel a lo largo de una línea recta y que más adelante pudieran restablecer los mismos puntos (FAO, 1997). Fue necesario colocar tres secciones transversales dentro de los 20

m² que ocupaba la parcela, se tiraron cintas que medían cuatro metros de longitud atadas a varillas que se encontraban en los extremos de la parcela, la cinta estaba a nivel del suelo para medir la longitud de la sección erosionada y los cambios en el área transversal (Figura 4.4).

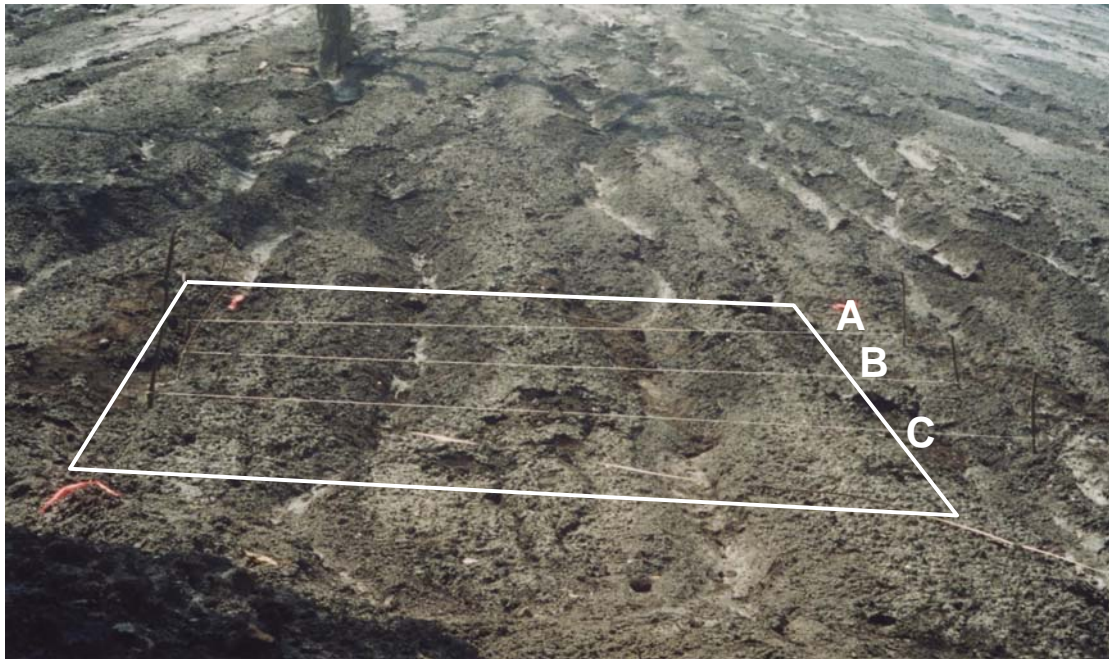


Figura 4.4 Secciones transversales realizadas (A, B, C) en el depósito de polvos, Unidad Molango.

Para estimar la pérdida de suelo se calculó el promedio de las profundidades medidas en la longitud de las secciones transversales. El resultado se multiplicó por la densidad aparente y por 10, para obtener la cantidad en toneladas sobre hectárea. La expresión en forma matemática es la siguiente:

$$X = Y * Da * 10$$

Donde:

X= Material erosionado (t/ha)

Y= Promedio de las profundidades de la sección transversal (mm)

Da= Densidad aparente del material (t/m³)

Una vez obtenidos los datos se prosiguió a calcular el suelo movilizado y la erosión neta. La primera indica la cantidad total de suelo que se mueve y se obtiene sumando los resultados de la erosión y sedimentación. La segunda indica la pérdida real de suelo y se obtiene con la diferencia entre la erosión y la sedimentación

En cada localidad donde se encuentran las parcelas de clavos, se instaló un sencillo pluviómetro que consta de un embudo sobre un recipiente de 1 litro, que está sostenido por una base de madera de 1.50 m. Este pluviómetro fue ubicado en una zona libre de vegetación para evitar el salpicamiento (Figura 4.5). Los registros de precipitación fueron tomados cada 24 horas (Anexo 2).



Figura 4.5 Pluviómetro

El agua captada después de cada evento se vertió en una probeta, registrando la cantidad en mililitros. Para obtener el cálculo de la precipitación, se tomó en cuenta el radio del embudo y los mililitros obtenidos con la siguiente fórmula:

$$PP = (A / V) 10$$

Donde:

PP = Precipitación (mm)

A = área del embudo (cm²)

V = volumen de agua registrado por cada evento (mm)

4.1.3 Características físicas del suelo y residuos mineros determinadas en campo

Para conocer con detalle las propiedades del suelo que intervienen en la erosión en la zona de estudio, se tomaron muestras de suelo y residuos mineros en cada una de las parcelas instaladas. Para ello se realizó trabajo de campo y de laboratorio.

La textura es una de las características más importantes del suelo, ya que el tamaño de las partículas determina en gran medida su erosionabilidad. Puede inferirse en campo a través de la prueba del tacto. Esta prueba se realizó humedeciendo una pequeña muestra de la fracción fina del suelo (<2mm) tomada del horizonte superficial. No debe presentar exceso de humedad en el momento de presionarla; la muestra se encuentra entonces a “capacidad de campo”. Posteriormente, se observan las características de modelado, consistencia y granulosidad de la muestra, presionándola y palpándola entre los dedos y formando esferas y rollos. Para ver el porcentaje de limos, arenas y arcillas que contenían las muestras, se siguió el procedimiento descrito en el “Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo” (Siebe *et al*, 1996).

La estabilidad de agregados se determinó para observar la resistencia de los agregados del suelo al golpeteo de las gotas de lluvia. En el campo se evaluó depositando aproximadamente 10 agregados de diámetro entre 1 a 3 cm en una cápsula de porcelana y saturándolos con agua. Tras hacer rotar suavemente durante 30 segundos la cápsula en la palma de la mano, se evalúa el grado de descomposición de los agregados; según la siguiente relación (Schlichting y Blume, 1966, citado por Siebe *et al*, 1996):

Grado de descomposición	Evaluación
No hay descomposición o solo fragmentos grandes.	Muy alta
Dominan los fragmentos grandes sobre los pequeños.	Alta
Igual número de fragmentos grandes y pequeños.	Mediana
Dominan los fragmentos pequeños sobre los grandes.	Moderada
Sólo fragmentos pequeños y turbidez notable del agua.	Baja
Descomposición total y alta turbidez del agua.	Muy baja

La densidad aparente es una de las variables contenidas en la fórmula utilizada en este estudio para calcular la cantidad de suelo erosionado. Los suelos con alta densidad aparente tienen menor porosidad. Sin embargo, lo que interesa de la porosidad es el predominio de macroporos, que promueven la infiltración. Esto evita que el suelo se sature rápidamente con agua (Núñez, 2001). Además es necesario conocer la densidad aparente para poder calcular la masa del suelo en un volumen definido del mismo.

La muestra para densidad aparente fue tomada introduciendo un pequeño cilindro metálico, con un volumen definido de 100 cm^3 , en la capa superficial del suelo. La muestra se envolvió en papel aluminio para transportarla del campo al laboratorio y evitar alguna pérdida de material. Por cada parcela se tomaron 6 muestras que fueron seleccionadas aleatoriamente (Anexo 3).

Una propiedad del suelo que va muy ligada a la densidad aparente es la capacidad que tienen los suelos para absorber agua. Para poder determinar la proporción de agua que penetra en el suelo, en función del tiempo, se empleó el infiltrómetro de doble anillo que consta de dos aros de metal, uno pequeño de un diámetro de 28 cm graduado y un anillo más grande de un diámetro de 34 cm (Figura 4.6). Otros materiales que se utilizaron son: cronómetro, baldes para transportar agua y una hoja de registro para tomar los datos de la infiltración.

Para llevar a cabo la prueba se seleccionaron sitios dentro de la parcela. Es necesario recortar toda la vegetación de la superficie y retirar la cubierta orgánica suelta dentro de un área un poco más grande que la del anillo exterior, teniendo cuidado de no alterar el suelo. Se hacen girar los anillos hasta enterrarlos 5 cm en el suelo, comenzando con el anillo más pequeño. En caso de no poder introducirlo se puede utilizar un martillo colocando una tabla de madera encima del anillo para evitar que se dañe. El siguiente paso es vertir agua en ambos anillos procurando que el nivel del agua sea siempre el mismo en el interior como en el exterior, al vertir agua en el anillo interior se debe tomar en cuenta que no sobrepase la marca de referencia para poder iniciar el cronometraje (Figura 4.6). Se anota la altura del agua y el tiempo para llevar un registro.

Al transcurrir los primeros 30 segundos se toma la altura de la lámina de agua y el tiempo. Se repite esta operación dos o tres veces con el mismo tiempo, y a medida que el nivel del agua en el anillo interior se vaya comportando estable, se aumenta el tiempo a un minuto y se realiza hasta que el intervalo de alturas se mantenga constante, ésto se hace sacando la diferencia que hay entre una medición y la anterior (Anexo 4). Durante el intervalo de tiempo hay que mantener el nivel de agua en el anillo exterior igual al nivel del aro interior. No se debe permitir que ninguno de los anillos llegue a secarse.

La tasa de infiltración se determinó midiendo el tiempo que toma el agua en penetrar al suelo. Esta tasa cambia con el tiempo, a medida que los poros del suelo se llenan con agua hasta que alcanza una tasa constante.



Figura 4.6 Infiltrómetro doble anillo

La materia orgánica es importante para el suelo, ya que proporciona energía y nutrimento a todos los seres vivos que en ella habitan. Además, tiene la función de proteger la capa superficial del impacto de las gotas de lluvia. Los suelos que poseen altas concentraciones de materia orgánica y humus llegan a presentar un bajo índice de erosión debido a que se forma una capa impermeable que cubre los agregados (Núñez, 2001). Por lo anterior, se decidió tomar muestras compuestas de suelo en todas las parcelas de clavos y analizarlos en el laboratorio. Las parcelas fueron divididas en 3 partes: alta, media y baja. En cada una de estas partes se sacaron 12 barrenos en los primeros 20 cm de suelo o material; se introdujeron en una cubeta para homogeneizar la muestra y fue embolsada y etiquetada. Por lo tanto en cada una de las parcelas se obtuvieron 3 muestras de suelo o de residuos mineros.

La idea de obtener 3 muestras de suelo por cada parcela, es conocer si hay variaciones en el contenido de materia orgánica dentro de cada parcela.

4.1.4 Características físicas del suelo y residuos mineros determinadas en laboratorio

Para tener datos con mayor precisión fue necesario realizar trabajo de laboratorio en dos de las propiedades del suelo, que fueron tomadas en cuenta para evaluar la susceptibilidad de la erosión.

La densidad aparente es importante para inferir la permeabilidad de los suelos, fue necesario determinarla en laboratorio por el método “Cilindro de volumen conocido” (Schlichting, *et al* 1995) (Anexo 3). Consiste en desempacar la muestra quitándole las cubiertas de aluminio y teniendo cuidado de que no haya pérdida de muestra. Se sacaron las muestras de los cilindros colocándolas en cajas petri previamente pesadas y marcadas con el número del cilindro. Éstas se metieron a la estufa a 105°C hasta peso constante.

Posteriormente se sacan las muestras de la estufa, se meten a un desecador y se espera a que se enfríen para poder pesarlas en una balanza con una precisión de 0.1g.

Para realizar los cálculos, se resta el peso de la caja petri (caja vacía) del peso total de la muestra para obtener el peso de la muestra seca a 105°C.

La densidad es el cociente entre el peso de la muestra secada y el volumen del cilindro con el cual se tomó la muestra. La expresión en forma matemática es la siguiente:

$$d.a = (Y - X) / V$$

d.a = Densidad aparente (g/cm⁻³).

X = Peso de la caja petri vacía (g).

Y = Peso de la caja petri con la muestra seca (g)

V = Volumen del cilindro (cm³).

Para conocer el contenido de materia orgánica, se siguió el método de Lichterfelder (Schlichting, *et al* 1995). Para ello las muestras recolectadas en campo son secadas al

aire libre, tamizadas <2mm y molidas en un mortero o en un molino de suelo Fritsch. Se pesa entre 0.1 y 1 g de suelo (esto depende del color de la muestra) en matraces. Se agregan 10 ml de dicromato de potasio 2N y 10 ml de ácido sulfúrico. Se colocan los matraces en la estufa a 120° C durante 90 minutos. Se sacan las muestras de la estufa y se dejan enfriar a temperatura ambiente. Después se pasa la muestra (la solución y el suelo) a matraces aforados, se centrifuga durante diez minutos y se mide en un espectrofotómetro. Los resultados se obtuvieron en la unidad de mg/g, que para transformar el carbono orgánico a porcentaje de materia orgánica se siguió la siguiente fórmula (Anexo 5):

$$M.O = (Corg * 1.724) / 10$$

M.O. = Materia orgánica (%)

Corg = Carbono orgánico (mg/g)

4.2 Resultados

Los resultados se presentan en 3 subcapítulos: Características y propiedades que determinan la erosionabilidad; resultados obtenidos en parcelas bajo uso de suelo agrícola; y en parcelas bajo uso de suelo minero.

4.2.1 Características y propiedades que determinan la erosionabilidad de las parcelas.

Existen factores naturales y antrópicos que hacen elevar o disminuir las tasas de erosión. Las primeras son el clima, la topografía, la vegetación y las características *in situ* del suelo; las segundas son el manejo y el grado de explotación de los suelos. Cada suelo posee un nivel de susceptibilidad a esta erosión y se le conoce con el nombre de erosionabilidad. Las propiedades que determinan la erosionabilidad de un suelo son: textura, contenido de materia orgánica, densidad aparente, la permeabilidad del suelo y su estructura. Además existen características que contribuyen a la pérdida de suelo y son: la pendiente, longitud de la ladera y pedregosidad (Zachar, 1982).

El cuadro 4.1 muestra las características y propiedades de cada uno de los sitios en donde se instalaron las parcelas de clavos de erosión. En las parcelas de uso minero se presentaron las pendientes más abruptas (41° y 45°). Las parcelas de maíz tienen pendientes que van de moderadas a muy abruptas (11° y 35°). Las texturas en todos los sitios son similares y están entre francas y franco-arcillo limosas. En cuanto a la densidad aparente, en las parcelas de maíz se obtuvieron los registros más bajos (0.7 - 1.2 g/cm³). Estos sitios tienen mayor capacidad de infiltración que las zonas mineras, tanto en el flujo inicial como en el terminal. El porcentaje de materia orgánica más alto se obtuvo en las parcelas de maíz de Otongo y también las presas de lodos presentaron valores altos.

Cuadro 4.1 Características del suelo y propiedades del relieve de las parcelas.

	Longitud (m)	Pendiente (grados)	Pedregosidad Volumen (%)	Textura*	Densidad Aparente (t/m ³)	Infiltración		Materia orgánica (%)	Estabilidad de agregados
						Flujo inicial (cm/min)	Flujo terminal (cm/min)		
Nonoalco									
Parcela de maíz alta	30	22°	15	CRL	1.15	1.310	0.027	3.88	alta
Parcela de maíz baja	35	11°	20	CLf	1.23	1.520	0.023	3.67	mediana
Presa de lodos alta	15	45°	40	CR	1.20	0.103	0.004	5.01	muy baja
Presa de lodos media	15	45°	40	CRL	1.23	0.977	0.006	4.67	baja
Presa de lodos baja	5	15°	10	CRL	1.22	0.067	0.003	4.42	alta
Otongo									
Parcela de maíz alta	40	35°	10	CRA	0.86	4.819	0.607	13.57	mediana
Parcela de maíz baja	100	24°	15	C	0.74	3.083	0.173	16.53	muy baja
Depósito de polvos alta	80	41°	0	CRL	1.61			3.67	muy baja
Depósito de polvos media	80	41°	0	CRL	1.70	0.198	0.007	3.63	muy baja
Depósito de polvos baja	100	9°	25	CRL	1.60	0.116	0.001	3.70	muy baja

Textura: CRL= Franco arcillo limosa; CLf= Franco limosa fina; CR= Franco arcillosa; CRA= Franco arcillo arenosa; C= Franca

La precipitación monitoreada durante el tiempo en que duró el experimento (7 de Septiembre al 26 de Noviembre de 2002) fue 559.24 mm para la cuenca de Otongo y 377.84 mm para la cuenca de Nonoalco.

En el cuadro 4.2 se muestran los registros de precipitación por número de medición de cada cuenca. Estos registros se obtuvieron sumando la precipitación diaria para el lapso de días de cada medición.

Cuadro 4.2 Valores de precipitación registrados para cada medición

No. Medición	Nonoalco	Otongo	Periodo (días)	Fecha
1	162.50 mm	215.97 mm	14	11- 24 sep de 2002
2	28.90 mm	60.21 mm	15	25 sep-9 oct de 2002
3	63.35 mm	120.34 mm	16	10-25 oct de 2002
4	122.67 mm	147.67 mm	32	26 oct-26 nov de 2002

En la primera medición de la cuenca de Otongo, se presentaron 4 eventos de más de 20 mm y el evento máximo fue de 74 mm. En la segunda medición sólo se registraron 2 eventos de más de 20 mm. En la tercera medición hubo un registro de 62 mm, siendo el más importante de 3 eventos. Para la última medición se presentaron 4 eventos de más de 17 mm (figura 4.7).

En la primera medición de la cuenca de Nonoalco se registraron 2 eventos mayores a 20 mm y 2 mayores a 40 mm. En la segunda medición hubo 10 días sin precipitación y sólo uno de 18 mm. La tercera medición presentó 11 días sin precipitación, un evento de 11 mm y uno de 44 mm. En la última medición hubo un registro de 44 mm, siendo éste el más importante de 3 eventos (figura 4.7).

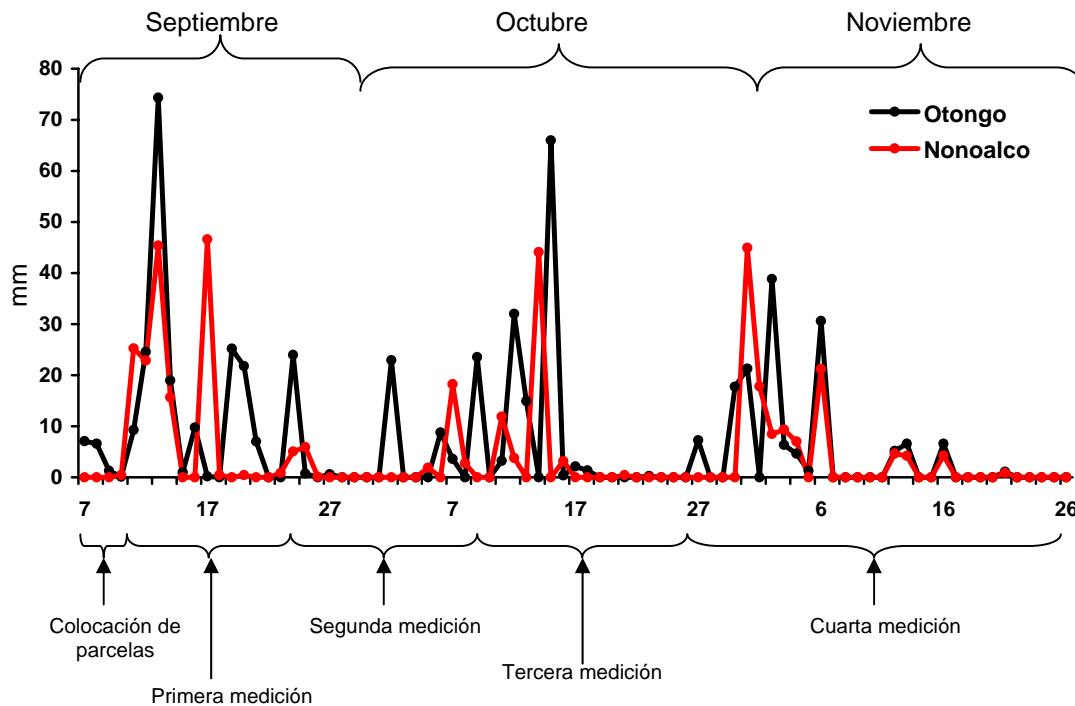


Figura 4.7 Precipitación en las cuencas de Nonoalco y Otongo durante el tiempo del experimento (Septiembre – Noviembre 2002).

4.2.2 Uso de suelo agrícola

En la figura 4.8 se muestran las alturas medias del suelo de cada medición. Se observa una tendencia creciente en el tiempo, a excepción de la erosión neta que puede llegar a presentar alzas y bajas en sus valores. Esta variación depende del proceso que domine: erosión o sedimentación. En la parcela de maíz ubicada en la parte alta de la ladera de la Zona Industrial Acatitla (cuenca Otongo) se registraron 4 mediciones. El proceso dominante es la erosión, ya que en la primera medición no se presentó ningún valor para la sedimentación. En la segunda se registró la pérdida de una lámina de suelo de 1.8 mm. Para la tercera y cuarta medición la erosión disminuyó presentando valores bajos, en cambio la sedimentación aumentó con una lámina de 1.7 mm en la tercera y 1.9 mm en la cuarta medición. En los resultados finales de la parcela de maíz parte alta de la cuenca de Otongo se registró una erosión neta de 49.59 t/ha lo que representa una lámina de suelo de altura media de 5.7 mm. El resultado es la diferencia de la erosión con 64.78 t/ha y la

sedimentación con 15.19 t/ha. El suelo movilizado fue de 79.97 t/ha que corresponde a una lámina de suelo de 9.2 mm.

Los resultados de la parcela de maíz parte baja de la cuenca de Otongo indican una erosión neta de 24.42 t/ha, teniendo una lámina de altura media de suelo de 3.3 mm. Esta diferencia está dada por la cantidad de erosión 59.44 t/ha y la sedimentación 35.02 t/ha. El suelo movilizado se presentó en una lámina de suelo de 12.8 mm que corresponde a 95.4 t/ha. La precipitación que presentaron estas dos parcelas en el tiempo que duró el experimento fue de 544 mm.

En la cuenca Nonoalco, en la parcela de maíz de la parte alta de la ladera, la erosión se mantuvo por encima de la sedimentación, aunque en el último registro la erosión neta sufre un descenso, debido a que se presentó una acumulación de suelo en la parcela de 3.3 mm (figura 4.8). En los resultados finales la erosión neta equivale a una lámina de suelo de altura media de 10.2 mm, la cuál señala una pérdida de suelo de 118.06 t/ha. Ésto es resultado de la diferencia de la erosión de 195.11 t/ha entre la sedimentación de 77.05 t/ha. En cuanto a la cantidad de suelo movilizado se registró 272.16 t/ha (23.6 mm de lámina de suelo).

Para la parte baja de la parcela de maíz en la cuenca de Nonoalco la erosión neta se mantuvo por debajo de todos los demás valores, lo que significa que la sedimentación presentó un comportamiento similar a la erosión y en dos ocasiones fue mayor. A pesar de eso el proceso dominante fue la erosión (Figura 4.8). En los resultados finales se obtuvo una lámina de altura media de 1.2 mm lo que indica que hubo erosión neta de 14.76 t/ha. El resultado es la diferencia entre la erosión con 19.4 mm (239.03 t/ha) y la sedimentación con 18.2 mm (224.27 t/ha). Se registró una lámina de suelo movilizado de 37.6 mm que equivale a 463.30 t/ha. La precipitación que presentaron estas dos parcelas en el tiempo que duró el experimento fue de 377 mm.

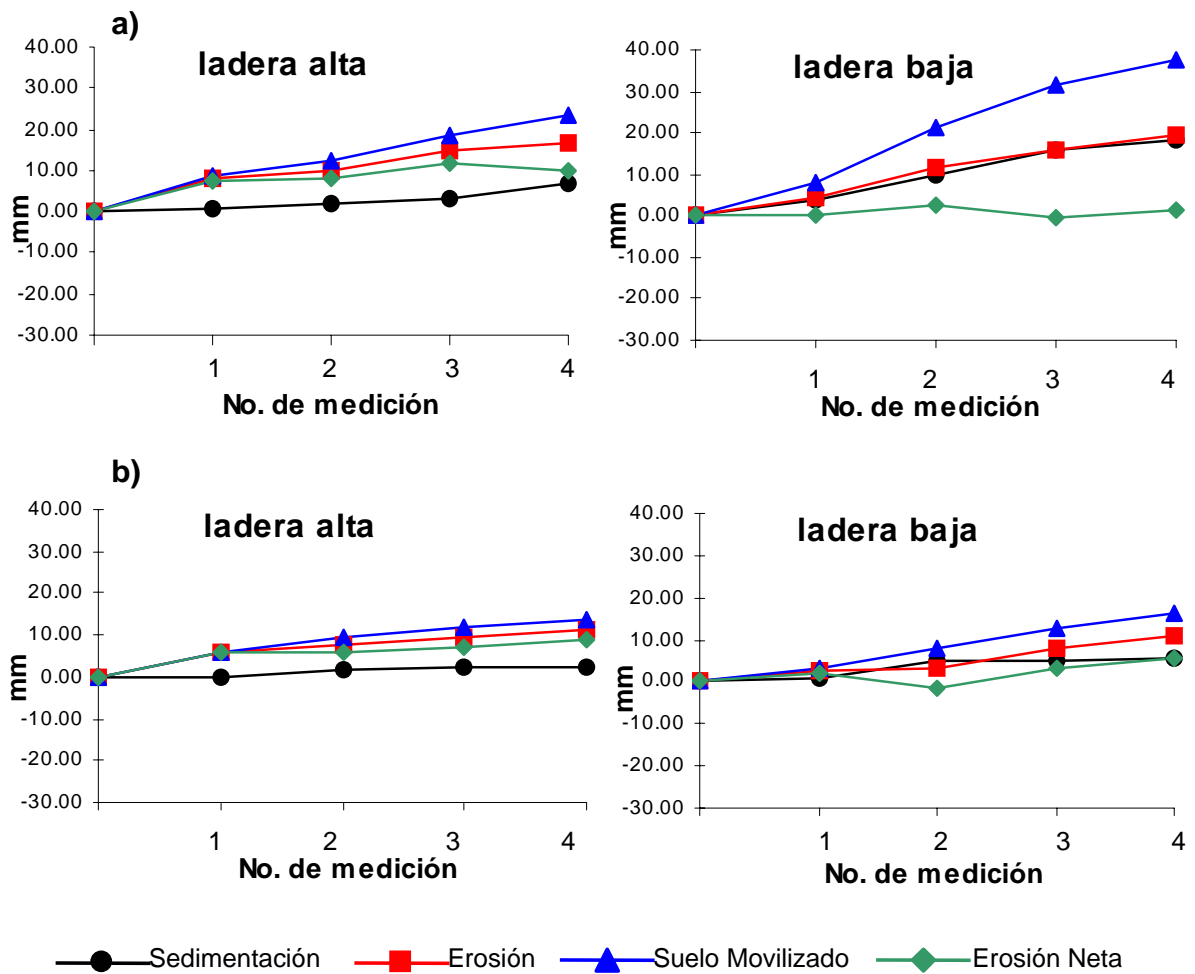


Figura 4.8 Alturas medias acumuladas de suelo en las parcelas de uso agrícola de las cuencas a) Nonoalco y b) Otongo.

4.2.3 Uso de suelo minero

En la Zona Industrial Acatitla donde se encuentra el depósito de polvos las parcelas de clavos en la parte alta y media desaparecieron debido a la gran cantidad de suelo movilizado. Se realizaron 3 secciones transversales en la parte alta del depósito de polvos. En la primera medición se registró una erosión de 1282.63 t/ha, la segunda medición aumentó a una erosión de 12389.33 t/ha y, por último, en la tercera medición se registró

una sedimentación de 9414 t/ha en la parcela. Ésta última es resultado de la resta de la 2ª medición menos la 3ª (figura 4.9). Para el depósito de polvos en la parte media se realizaron 3 mediciones. En la 1ª medición se registraron 2009.64 t/ha, en la 2ª aumentó la erosión a 9752.96 t/ha, y en la 3ª medición a 10187.41 t/ha. La precipitación que presentaron estas dos parcelas en el tiempo que duró el experimento fue de 396 mm. Para la parcela ubicada en la parte baja del Depósito de polvos se registraron 4 mediciones, en las cuales la sedimentación fue el proceso que dominó. Por tal motivo la erosión neta mostró valores negativos -288.55 t/ha, resultado de la diferencia de la erosión 136.53 t/ha y la sedimentación 425.06 t/ha. El suelo movilizado correspondió a 561.59 t/ha que equivale a una altura media de 35 mm (figura 4.10). La precipitación que presentó esta parcela en el tiempo que duró el experimento fue de 544 mm.

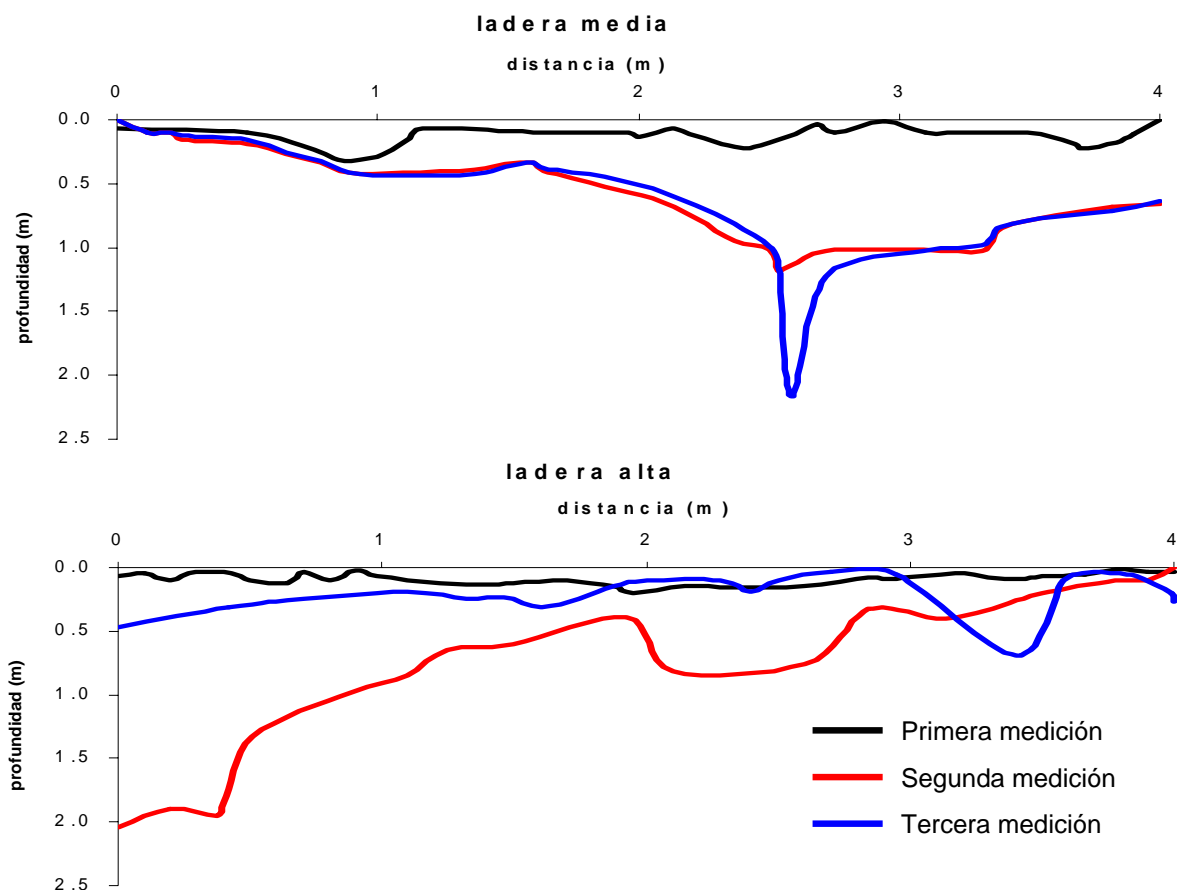


Figura 4.9 Pérdida de suelo medida en secciones transversales bajo uso de suelo minero en la Cuenca de Otongo.

En la cuenca de Nonoalco donde se ubica la presa de lodos, en la parcela de la parte alta se realizaron 4 mediciones, en donde el proceso dominante fue la sedimentación. Por tal motivo la erosión neta siempre se encontró por debajo de todas las demás mediciones y con valores negativos (figura 4.10). Los resultados finales de esta parcela indican que la erosión neta fue -37.60 t/ha (-3.1 mm) resultado de 92.8 t/ha de suelo erosionado menos 130.4 t/ha de suelo sedimentado. En cuanto a suelo movilizado se registró una pérdida de lámina de suelo de altura media de 18.6 mm (223.2 t/ha).

En la misma cuenca, la parcela ubicada en la parte media tuvo 4 mediciones de las cuáles tres fueron dominadas por la erosión y en sólo una dominó la sedimentación. La línea de la erosión neta tuvo alzas y bajas, lo que significa que hubo una considerable movilización de suelo relacionada con las diferencias en la precipitación (figura 4.10). Con estas mediciones se obtuvo una erosión neta de 19.68 t/ha que es una lámina de suelo de 1.6 mm y este resultado se deriva de la erosión de 211.56 t/ha y la sedimentación de 191.88 t/ha. La cantidad de suelo movilizado corresponde a una lámina de suelo de 32.8 mm que extrapolado a hectáreas corresponde a 403.44 t/ha.

Por último, en la ladera baja del Depósito de polvos se registraron 4 mediciones, en las cuales la erosión dominó en todas, aunque la erosión neta en la última medición sufre un descenso. En la figura 4.10 se observa que el comportamiento de la erosión de esta parcela es relativamente lineal. Los resultados finales que se obtuvieron en la parcela baja indican que la erosión neta fue de 68.32 t/ha ya que la lámina de suelo de altura media es de 5.5 mm. El resultado se deriva de la diferencia entre la erosión de 179.74 t/ha y la sedimentación de 111.42 t/ha. El suelo movilizado se calculó en 291.16 t/ha. La precipitación que presentaron estas tres parcelas en el tiempo que duró el experimento fue de 377 mm.

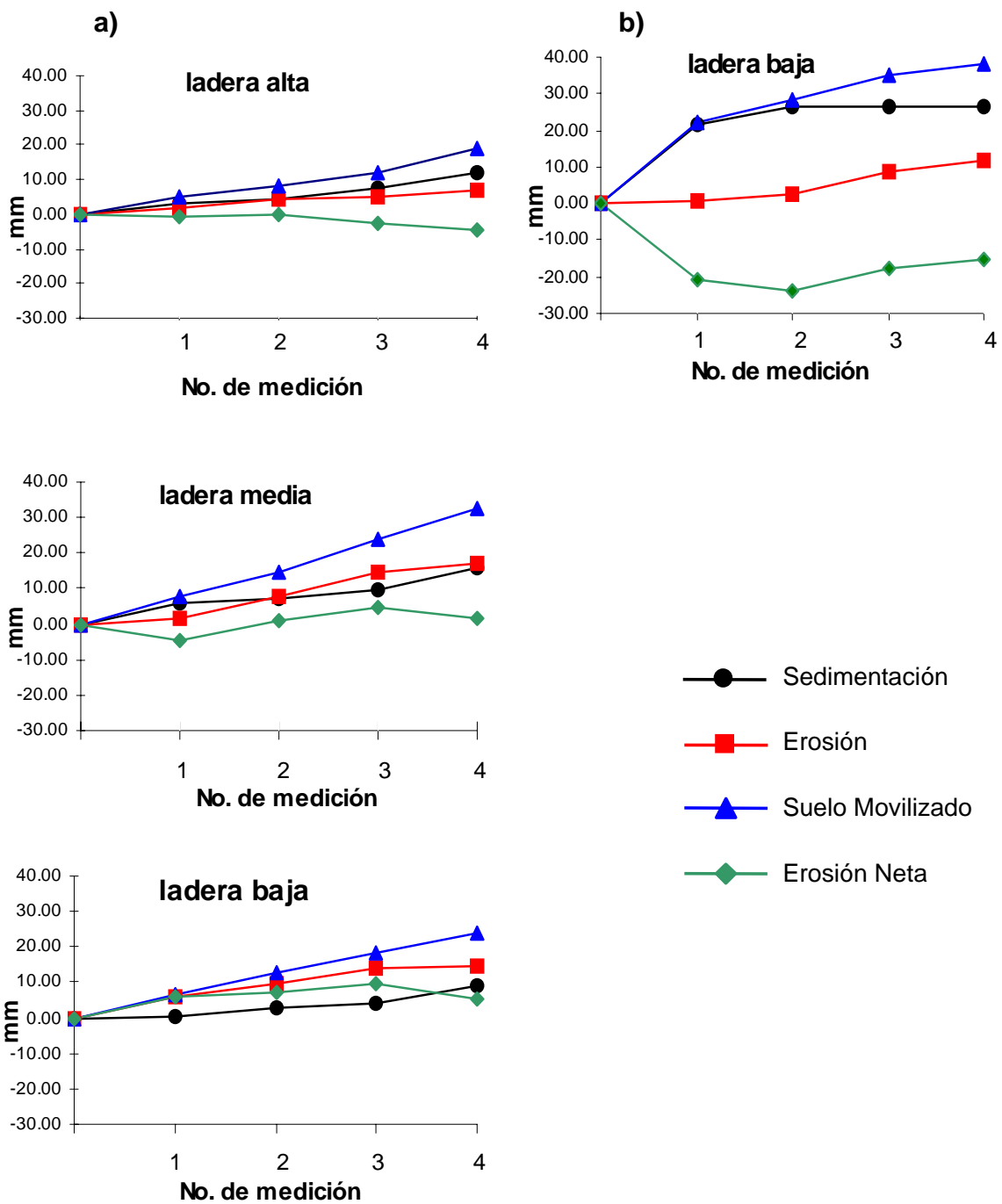


Figura 4.10 Alturas medias acumuladas en las parcelas bajo uso minero de las cuencas a) Nonoalco y b) Otongo.

4.3 Análisis y discusión de los resultados

4.3.1 Uso de suelo agrícola

Los resultados en las parcelas de maíz de la cuenca de Otongo nos indican que la parte baja tuvo 15.3 % más de suelo movilizado que la parte alta, lo que se debe a una fuerte acumulación de suelo erosionado ladera arriba más cierta erosión local (figura 4.11). Este comportamiento se atribuye a dos factores: a) la pendiente, que es menor en la parte baja que en la alta, lo que aumenta la acumulación del material. Ésto se ve reflejado en la cantidad de sedimentación que hubo en la parte baja, siendo ésta 56% más que en la parte alta. b) la forma cóncava de la ladera favorece la acumulación en la parte baja y en la parte alta la forma convexa de la ladera genera una mayor erosión.

La erosión neta en la parte alta es 50 % más que en la parte baja. Este resultado es producto de los mismos factores que producen la sedimentación. La pendiente de la parte alta es 9° mayor que en la parte baja, su longitud es de 40 m y por estar ubicada la parcela en una ladera convexa es más vulnerable a la erosión. Debe entenderse que la erosión neta es la pérdida real e irrecuperable. El factor determinante de la mayor erosión neta en la parte alta posiblemente es la pendiente, ya que con la intensidad de la lluvia aumenta la escorrentía y se incrementa la erosión.

En la cuenca de Nonoalco, las parcelas de maíz muestran mayor variación en sus resultados. La parte baja presenta 41 % más de suelo movilizado que la parte alta (figura 4.11). En este caso la longitud de la ladera es similar en ambas parcelas, las diferencias se presentan en la pendiente y en la forma del terreno. La parte baja tiene una inclinación de 11° y se encuentra en una ladera de forma cóncava, lo que hacen que la sedimentación sea 65 % mayor que en la parte alta.

La erosión neta es mayor en la parte alta, con 87 % más respecto a la parcela baja, por encontrarse en una ladera convexa y tener una pendiente mayor que la parte baja. Estos factores son los más importantes en este sitio para que el suelo sea susceptible a la erosión.

Las parcelas ubicadas en las laderas convexas (parte alta) de ambas cuencas, presentaron una erosión neta mayor que en las laderas cóncavas (parte baja). Estos resultados demuestran que en las parcelas agrícolas de este estudio, ubicadas en pendientes abruptas, se produce mayor arrastre de material y por tanto mayor pérdida del suelo. Debe entenderse que existen más factores que determinan que un suelo sea o no susceptible a la erosión hídrica. En cuanto al suelo movilizado, las partes bajas tuvieron valores más altos que las partes altas. Ésto se debe a que el grado de pendiente es menor y favorece que el material proveniente de las partes alta se acumule.

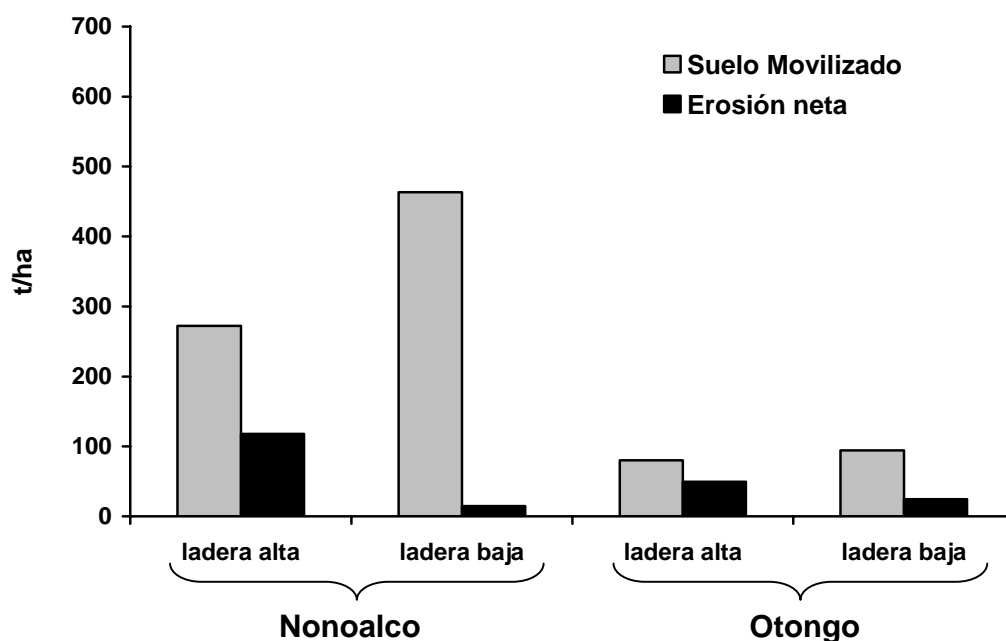


Figura 4.11 Suelo movilizado y erosión neta en el uso de suelo agrícola.

Para fines comparativos se graficaron las parcelas de uso agrícola en cada cuenca, sin importar sus características morfométricas. En la figura 4.11 se observa que los procesos de remoción de suelo no son iguales. En la cuenca de Nonoalco la cantidad de suelo movilizado, considerando las dos parcelas, es de 735.4 t/ha, mientras que en la cuenca de Otongo se movilizaron sólo 174.4 t/ha. En cuanto a la erosión neta la cuenca de Nonoalco perdió 132.8 t/ha contra 74 t/ha de la cuenca de Otongo. Estas diferencias no se pueden atribuir al relieve, debido a que las parcelas de Nonoalco presentan pendientes menores que las de Otongo y también las longitudes de ladera son menores.

Para explicar cómo se comporta la erosión y la sedimentación en las parcelas de maíz de cada cuenca, se compararon las características y propiedades de cada parcela, para ver cuál de éstas es la que genera las diferencias.

La pedregosidad en las parcelas de la cuenca de Nonoalco, va de 15 a 20 % sobre la superficie del suelo, mientras que las parcelas de la cuenca de Otongo tienen entre 10 y 15 % de rocas (cantos menores a 2 cm) (cuadro 4.1). Como los suelos pedregosos son menos susceptibles a la erosión, por proteger al suelo de la lluvia y contribuir a que haya una mejor infiltración, se deduce que este factor no explica la mayor movilización registrada en Nonoalco.

La textura es una característica que influye de manera importante en la erosionabilidad del suelo. Kirkby (1993) y Núñez (2001) mencionan que los suelos que poseen altos contenidos de arcillas y arenas son menos susceptibles a la erosión. Ésto se debe a que los suelos arcillosos forman agregados estables que soportan el impacto de la lluvia y almacenan mucha agua que los hace resistentes a los flujos laminares. Los suelos arenosos tienen altas tasas de infiltración y también son resistentes a los flujos superficiales. Por lo tanto, los suelos que son más erosionables poseen texturas limosas. Los suelos de la cuenca de Nonoalco tienen texturas franco-arcillo limosas y franco-limosas, eso significa de 0 a 30 % de arenas, 0 a 30 % de arcillas y 60 a 70 % de limos, mientras que los suelos de la cuenca de Otongo tienen de 40 a 100 % de arenas, 0 a 30 % de arcillas y de 60 a 80 % de limos (CRA a C). Esta característica nos indica que los suelos de la cuenca de Nonoalco presentan una mayor vulnerabilidad a la erosión, por los altos contenidos de limos y bajos contenidos de arenas y arcillas. Otongo tiene el mismo contenido de limos pero mayor porcentaje de arenas, lo que ayuda a que las parcelas de esta cuenca tengan una mejor infiltración (ver cuadro 4.1).

La densidad aparente es un valor determinante en la permeabilidad y la porosidad en un suelo. Los resultados de laboratorio nos muestran que los suelos de la cuenca de Nonoalco tienen densidades aparentes más altas que los suelos de la cuenca de Otongo.

La cuenca de Nonoalco tiene densidades de 1.1 a 1.4 t/m³ que significa que el suelo de esta cuenca presenta una menor porosidad que los suelos de la cuenca de Otongo (figura 4.12). En las parcelas de Otongo las densidades van de 0.6 a 1.1 t/ha, lo que indica que la porosidad es mayor.

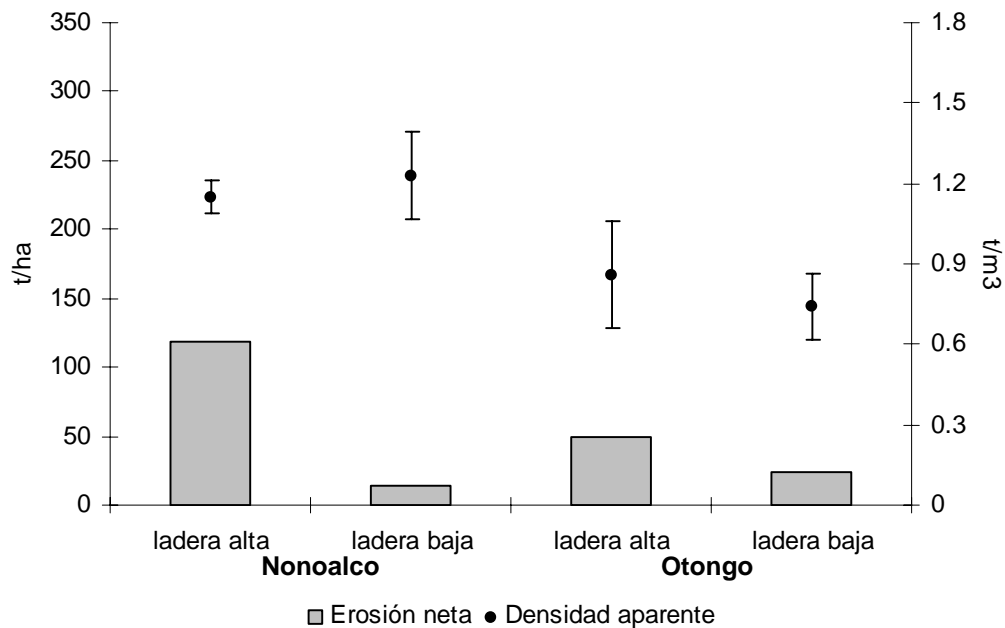


Figura 4.12 Densidad aparente y erosión neta de las parcelas bajo uso de suelo agrícola en ambas cuencas.

La infiltración es el ingreso vertical descendente del agua de lluvia a través de la superficie de un suelo no saturado con agua (Núñez, 2001). En las parcelas de la cuenca de Otongo la infiltración es alta, en comparación con las otras parcelas, con valores de 3 a 5 cm/min de flujo inicial y de 0.17 a 0.60 cm/min de flujo terminal. Este comportamiento se debe a que el suelo presentó mayor porosidad, altos contenidos de materia orgánica y texturas más gruesas (arenas) lo que hace que se pierda menos suelo, dado que la escorrentía superficial es menor. Nonoalco presenta valores de 1.3 a 1.5 cm/min en flujo inicial y 0.023 a 0.027 cm/min de flujo terminal. Estos valores de infiltración son menores a las parcelas de la cuenca de Otongo y su comportamiento se debe a los mismos factores.

Estos resultados señalan que bajo uso agrícola, las parcelas de la cuenca de Otongo tienen propiedades más favorables, tales como texturas más arenosas, densidades más bajas y una buena conductividad hidráulica, lo que genera menos pérdida de suelo. Esto se ve reflejado en la cantidad de suelo que se sedimenta y se erosiona, tanto a nivel parcela como a nivel cuenca. Mientras que en la cuenca de Nonoalco, los suelos presentan condiciones desfavorables que aceleran y aumentan los procesos erosivos.

4.3.2 Uso de suelo minero

Los resultados en las parcelas ubicadas en las presas de lodos de la Cuenca de Nonoalco, indican que la parte baja fue la que registró mayor erosión neta, con 71 % más que la parte media. Ésto no lo podemos atribuir al grado de pendiente, que es menor que las otras parcelas y la longitud de ladera es más pequeña. La parte alta presentó valores negativos, lo que representa que la sedimentación es el proceso dominante de esta parcela. Este comportamiento no se relaciona con la pendiente, ya que es una de las más abruptas, ni con la longitud. En cuanto al suelo movilizado la parcela media fue la que registró los valores más altos, con 43 % más que la parte alta y 27 % más que la parte baja. El comportamiento observado en estas parcelas no tiene que ver con la forma e inclinación de los sitios.

En la cuenca de Otongo, las parcelas ubicadas en la ladera alta y media del depósito de polvos fueron sustituidas por secciones transversales, ya que la movilización del suelo en esta zona es alta (según datos proporcionados por personal de la mina se vierten 200 toneladas de material al día y 500,000 toneladas de material están acumuladas para confinamiento). De estas dos parcelas la parte media fue la que registró la mayor cantidad de suelo movilizado y erosión neta, mientras que la parte alta presentó valores menores a la media. Los resultados en la parte media y alta se extrapolaron a hectáreas sólo con el fin de comparar con las determinaciones hechas en las demás parcelas, ya que el depósito de polvos tiene un área menor a los 10000 m². La parte baja tiene erosión neta negativa, lo que significa que el proceso dominante es la sedimentación (figura 4.13). Esta

sedimentación se debe a que esta parcela cuenta con una pendiente menos abrupta lo que genera que el material proveniente de las partes altas se deposite.

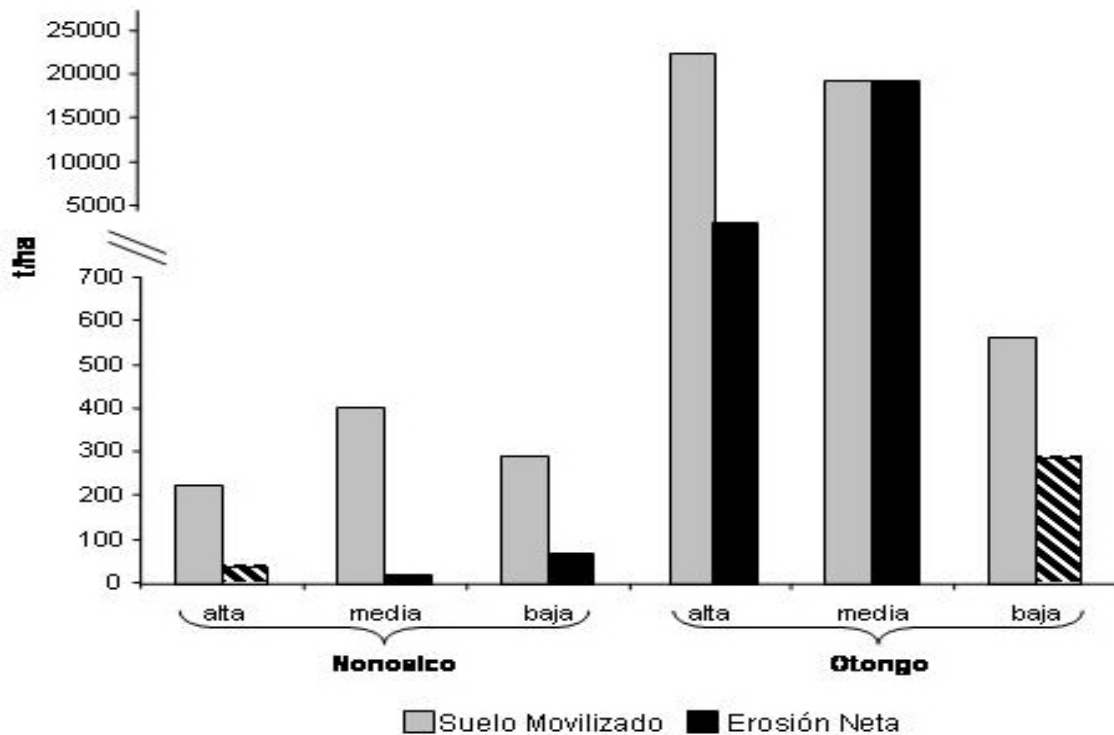


Figura 4.13 Suelo movilizado y erosión neta en uso de suelo minero.

▨ La erosión neta de estas parcelas presenta valores negativos.

Para poder hacer una comparación entre cuencas de este uso de suelo, se sumaron los resultados de las parcelas instaladas en los jales de Nonoalco y las parcelas del depósito de polvos en Otongo, sin tomar en cuenta sus características morfométricas. La figura 4.13 muestra que los procesos de suelo movilizado y erosión neta en cantidades son muy distintos. En la cuenca de Nonoalco el suelo movilizado es 917.8 t/ha, éste es resultado de la suma de las tres parcelas; en tanto en Otongo se registró una movilización 45,597 t/ha. En cuanto a la erosión neta Nonoalco tuvo 88 t/ha, en dos parcelas, ya que en la parte alta no existió este proceso. En Otongo fueron también dos parcelas las que registraron erosión neta con 26,207 t/ha; en la parte baja dominó el proceso de sedimentación. En este caso las diferencias no se pueden atribuir a las características del relieve, debido que Nonoalco y Otongo presentan grados de pendientes muy fuertes. Para poder explicar cómo se comportan los procesos en las dos cuencas, fue necesario comparar las

propiedades del suelo en cada parcela, para ver cuál de éstos es el determinante en la pérdida de suelo.

La pedregosidad de las zonas mineras está determinada por las actividades que se realizan en cada cuenca. En las parcelas de la cuenca de Otongo no existe pedregosidad, debido a que son residuos de manganeso procesado y es material no consolidado. En las parcelas de Nonoalco hay un gran porcentaje de pedregosidad, debido a que se ubican sobre las paredes de la presa de lodos que son de material grueso (2 a 5 cm). Este contraste de pedregosidad puede influir en las cantidades de suelo movilizado y erosionado.

Las densidades aparentes de las parcelas de Otongo son más altas que las de la cuenca de Nonoalco, ya que Otongo tiene entre 1.6 a 1.7 t/m³ mientras que Nonoalco sólo 1.20 a 1.23 t/m³ (Figura 4.14). Cabe mencionar que en el depósito de polvos se encontraron dos tipos de estructuras del material en forma estratificada. El primero es la capa superficial originada del depósito de material, que es suelto y fácil de erosionar, mientras que la capa inferior es material que presenta un grado de cementación en seco y pegajoso y arcilloso en húmedo. Estas capas se encuentran sólo en la ladera media y alta. Las muestras se tomaron sobre el material inferior por lo cuál la densidad es relativamente alta y coincide con los datos de infiltración que también se realizaron sobre la capa cementada.

Las densidades de las presas de lodos son medianas, debido a que estas presas son construidas con materiales gruesos y arenosos y sus paredes van aumentando de densidad con el tiempo.

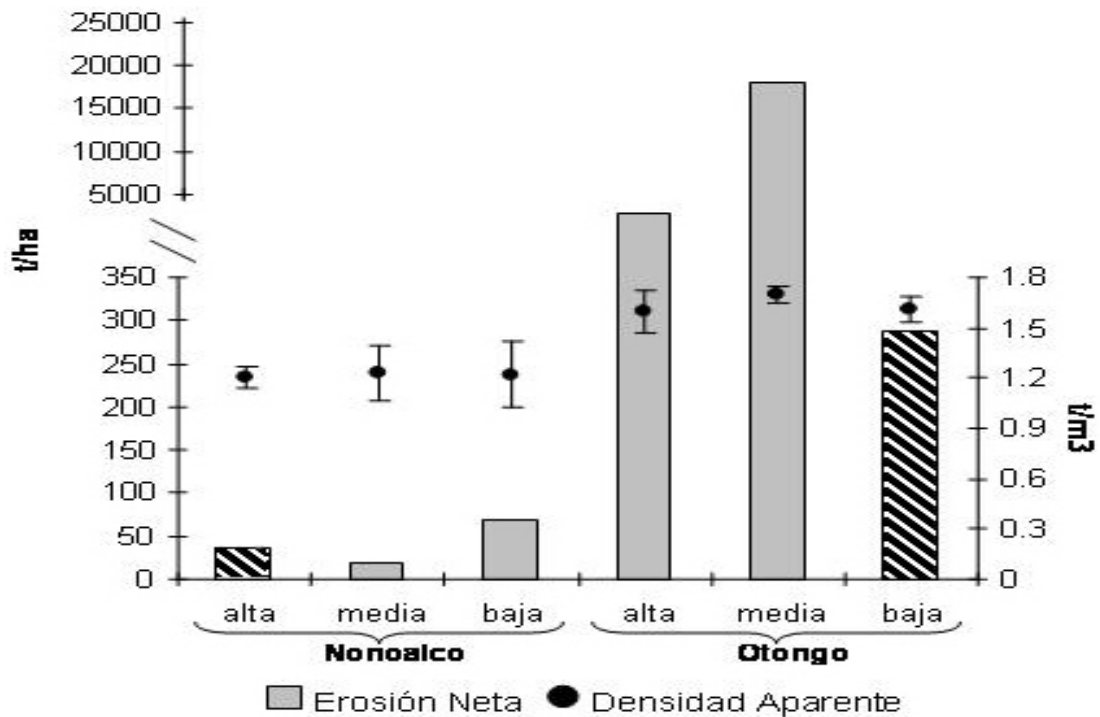


Figura 4.14 Densidad aparente y erosión neta de las parcelas bajo uso de suelo minero en ambas cuencas.

▨ La erosión neta de estas parcelas presenta valores negativos.

La infiltración en las parcelas de Otongo va de 0.1 a 0.2 cm/min de flujo inicial y de 0.001 a 0.007 cm/min de flujo terminal. En la parte alta no se realizó esta prueba por la inaccesibilidad del sitio, ya que era difícil subir 40 litros de agua en una pendiente de 45° y sobre un terreno inestable. Las primeras mediciones de infiltración se realizaron sobre el material no consolidado y la cantidad de agua (20 litros) vertida fue absorbida en 10 segundos. Por tal motivo, las pruebas se realizaron en la superficie cementada. La baja pedregosidad y la densidad aparente alta del estrato inferior, son factores que hacen que el agua se infiltre con lentitud, lo que nos indica que existe una escasez de poros.

En cuanto a las parcelas de Nonoalco los valores van de 0.06 a 0.10 cm/min de flujo inicial y de 0.003 a 0.006 cm/min de flujo terminal. A diferencia de Otongo, estas parcelas tienen una pedregosidad alta y su densidad aparente es menor, sin embargo el flujo inicial es más bajo. Este comportamiento se debe a que el material presentó una alta pedregosidad sólo en la capa superficial de la pared de la presa y mientras aumenta la profundidad la

porosidad disminuye. Este tipo de infiltración se debe a la forma en como están construidas las presas de lodos, ya que la pared externa está hecha de suelos naturales y/o de los materiales que se generan durante las actividades de extracción, e incluso con residuos de depósitos anteriores; y la parte interna de la presa, a medida que las partículas se estratifican por efecto de la gravedad, se provoca la consolidación presentando una estructura laminar que influye determinadamente en la lenta infiltración (Monroy, 2002).

Las texturas de las parcelas de uso minero son muy parecidas, ya que van de franco arcillo limosas a franco arcillosas. Esta similitud se debe a que el material proviene del procesamiento del manganeso en las unidades mineras. Estas texturas nos muestran que las parcelas presentan un grado de sensibilidad a la erosión hídrica por tener porcentajes altos de limos.

Las parcelas de la cuenca Nonoalco presentaron valores más bajos que las parcelas de Otongo, tanto en erosión neta como en suelo movilizado. Este comportamiento no depende, en gran medida, de las características y propiedades del material, ya que son residuos del manganeso procesados en las unidades mineras. Las diferencias de material erosionado o sedimentado se atribuyen al manejo que tienen las presas de lodos y el depósito de polvos, ya que puede considerarse malo en las presas y nulo en el depósito.

4.3.3 Comparación entre usos de suelo

Entre el uso de suelo agrícola y uso minero, para el mismo período de tiempo, existen diferencias significativas en los resultados de cada uno de los procesos que contempla este estudio. Los resultados expresados en toneladas por hectárea muestran que las cantidades de suelo movilizado y erosión neta son de mayor magnitud en el uso de suelo minero (cuadro 4.3).

Cuadro 4.3 Resultados generales del uso de suelo agrícola y minero.

Uso de suelo	Sedimentación	Erosión	Suelo Movilizado t/ha	Erosión neta
agrícola	87.89	139.60	227.48	51.71
minero	2069.09	3858.34	5927.42	1789.25

De las propiedades y características que se obtuvieron en cada parcela, las que resaltan a nivel uso de suelo son la materia orgánica, infiltración y precipitación por cuenca. Estos resultados son indicativos para explicar qué actividad es más vulnerable a la pérdida de suelo por erosión hídrica.

La materia orgánica tiene como función principal la de conservar los materiales y sustancias nutritivas orgánicas e inorgánicas del suelo (Kirkby, 1993), además de protegerlo de la erosión hídrica y eólica. Para las zonas de uso de suelo agrícola, la cuenca de Otongo tiene los valores más altos de materia orgánica, con 13 y 16 %, mientras que la cuenca de Nonoalco sólo tiene el 3% (figura 4.15). Esta cantidad de materia orgánica se ve reflejada en el total de suelo movilizado y erosión neta de cada cuenca para el uso de suelo agrícola. La baja cantidad de materia orgánica en las parcelas agrícolas de la cuenca de Nonoalco, está asociada con el mal manejo que tiene la parcela y con los años que lleva como terreno agrícola.

Las variaciones de materia orgánica en el uso de suelo minero son mínimas, ya que van de 3 a 5 %. Sin embargo, las diferencias en la cantidad de erosión neta son considerables, siendo mucho mayor en la cuenca de Otongo. Por tal motivo, la materia orgánica puede considerarse como un elemento importante para que existan los procesos de erosión y sedimentación en los suelos agrícolas y en los depósitos de residuos mineros de las cuencas de Otongo y Nonoalco.

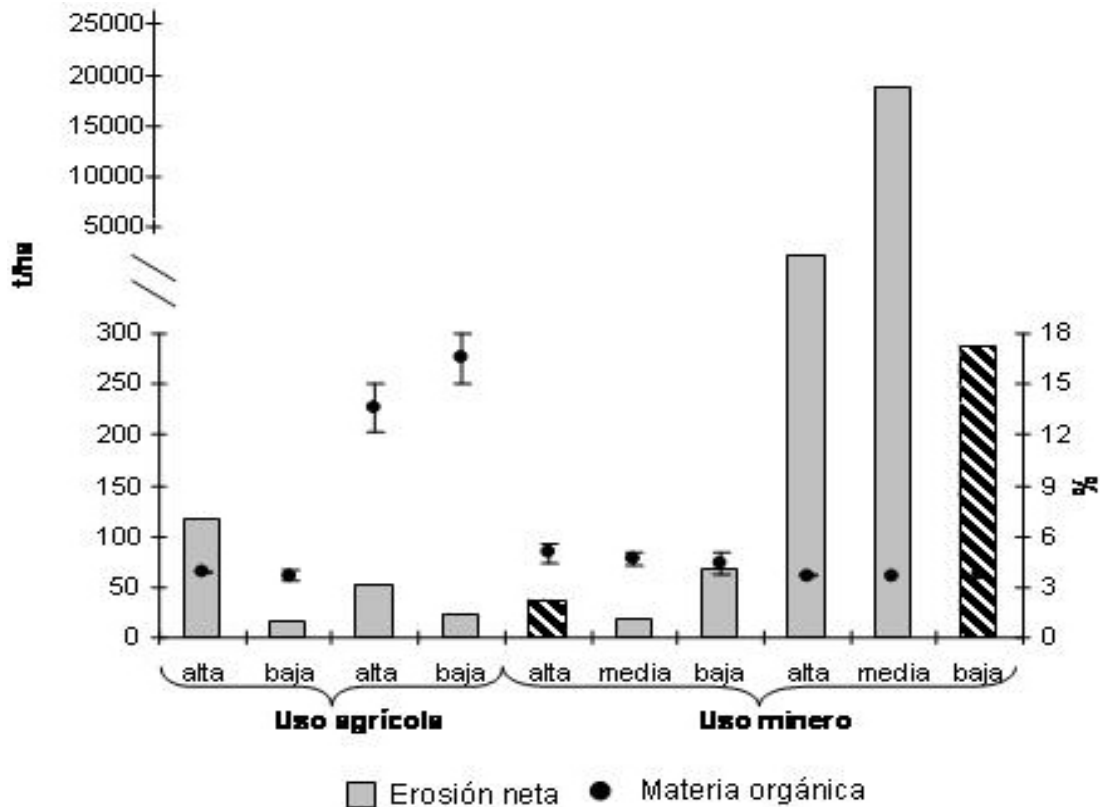


Figura 4.15 Materia orgánica y erosión neta en uso de suelo agrícola y minero
 ▨ La erosión neta de estas parcelas presenta valores negativos.

La infiltración se consideró como otro elemento generador de la cantidad de suelo erosionado y sedimentado en las parcelas agrícolas y mineras de la zona de estudio. En la figura 4.16 se observa que el uso de suelo agrícola presenta una mayor infiltración, tanto en flujo inicial como en el flujo terminal. En este uso el agua de lluvia es absorbida con mayor rapidez que en el uso minero, ya que los agregados de las parcelas de maíz tienen un mejor desarrollo estructural que favorece la infiltración disminuyendo la escorrentía, aunque se debe tomar en cuenta la intensidad y duración de la precipitación.

En el uso de suelo minero sucede lo contrario, ya que la baja estabilidad que poseen sus agregados genera una menor infiltración aumentando la escorrentía. En cuanto al flujo terminal, el uso de suelo agrícola presenta mayor cantidad de agua absorbida, es decir, la infiltración es constante y se presenta en menor tiempo que las parcelas de uso minero.

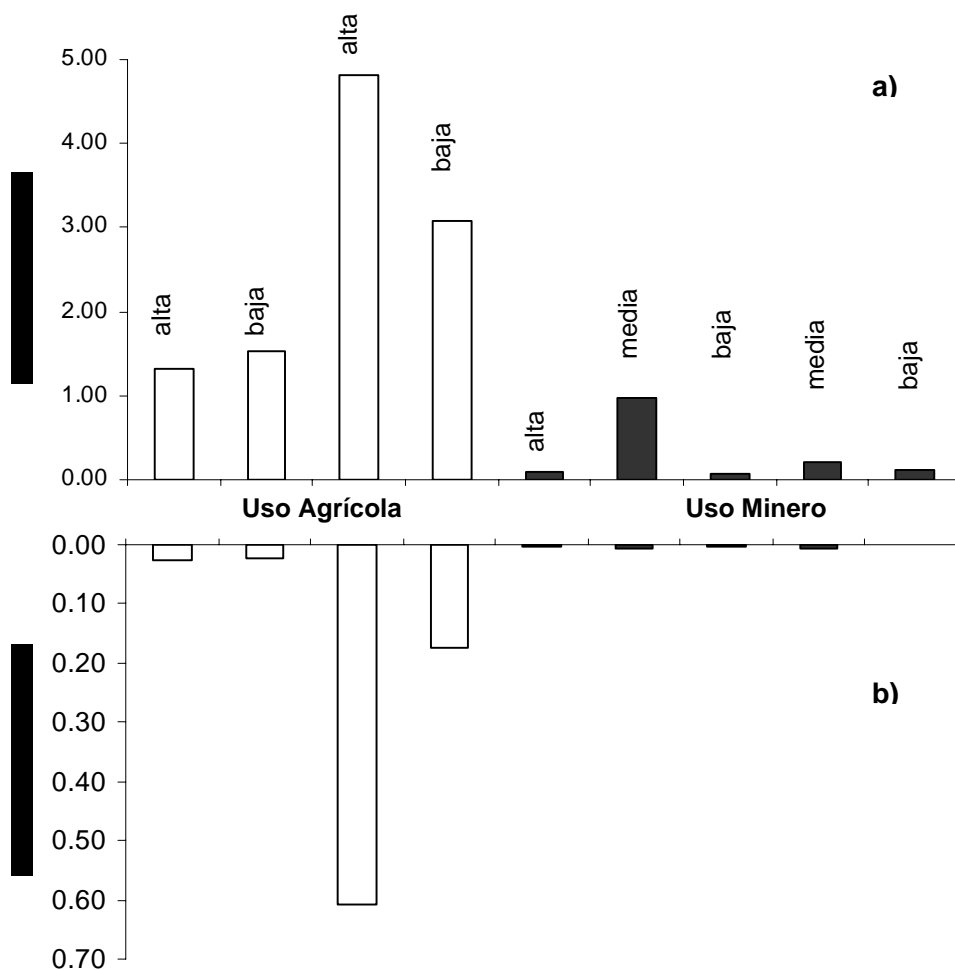


Figura 4.16 a) Flujo inicial y b) flujo terminal de la infiltración en los usos de suelo agrícola y minero.

La erosividad de la lluvia, es diferencial por el efecto directo de sus características físicas como la intensidad, la duración y la frecuencia del evento pluvial, sumado a las características hidrodinámicas de las gotas de lluvia (Hudson, 1982). La precipitación es considerada en este estudio como uno de los factores más importantes, ya que aunada a las características y propiedades de los suelos con uso agrícola y minero, aceleran los procesos erosivos. En la cuenca de Otongo y Nonoalco la precipitación se presentaba en chubascos que duraban entre 1 y 2 horas, y raramente había lloviznas que se mantenían

durante todo el día. Estos eventos intensos de lluvia se presentaban después de varios días de no registrarse precipitación alguna (comentado por el personal de la compañía Autlán). Estas razones provocan que el suelo pierda humedad, que al momento en que llueve los poros se saturan rápidamente, el agua escurre ayudada por las pendientes abruptas provocando el movimiento del suelo. Dentro de las características hidrodinámicas de la lluvia, y considerada por varios autores como un factor determinante en la pérdida del suelo (Hudson, 1982, Kirkby, 1993, Zachar, 1982, Llamas, 1989), el impacto de las gotas hace que las partículas de suelo se esparsan, quedando material fino suelto, el cuál es arrastrado por el efecto de la escorrentía. La erosividad y la erodibilidad de cada parcela estudiada permite entender las cantidades de suelo erosionado y/o sedimentado.

Muchas veces resulta difícil cuantificar la erosión que está ocurriendo aún cuando se mantenga un área determinada bajo observación permanente. La medición de la cantidad de suelo perdido requiere la presencia de algunos puntos de referencia, y bajo condiciones naturales, tales puntos son difíciles de detectar. Uno de los principales métodos para cuantificar la capa de suelo que se ha perdido por erosión es instalando parcelas de clavos de erosión (Chapingo, 1991).

Takei, *et al.*, (1981) realizaron un estudio en Japón con el método de parcelas de clavos de erosión, en donde instalaron tres parcelas de 100 m² con pendientes de 30° sobre un bosque recién talado. Las mediciones se realizaban cada mes durante 10 años, mostrando que el ritmo anual de erosión de cada parcela es uniforme, alrededor de 13 mm/año. En este estudio, sólo se cubrió un tiempo de tres meses (Septiembre – Noviembre considerados los meses más lluviosos de la zona), las parcelas eran de 20 m² y las pendientes variaban entre 11° y 35°, de lo cuál se obtuvo que las parcelas influenciadas por las actividades mineras son más propensas a la erosión que las parcelas agrícolas.

Pizarro (1997) aplicó el mismo método en los predios de la Precordillera Andina y Valle Central de la VII región en Chile, en donde colocaron parcelas de erosión sobre suelos desnudos durante un lapso de 6 meses. Se instalaron parcelas de 12 m² con tres repeticiones en cada situación, en donde se instalaron clavos distanciados a 30 cm a lo

largo y 40 cm a lo ancho de la parcela, con pendientes que variaban entre 2° y 5°. Los resultados que se obtuvieron para estos predios son de 32 y 26 t/ha, teniendo una precipitación de 1477 y 372 mm respectivamente. Pizarro muestra que la variable más importante es la precipitación, ya que la intensidad, frecuencia y duración de la lluvia crea la mayor pérdida de material, sin dejar de considerar las características y propiedades del suelo.

El estudio desarrollado por Pizarro y el presente estudio difieren en el tamaño de las parcelas, la cobertura vegetal, inclinación del terreno, el manejo que tienen las parcelas y el periodo de tiempo. En cuanto a la similitud que existe entre estos estudios es la precipitación, ya que en el Distrito Minero de Molango la lluvia es uno de los factores que producen la erosión.

4.4 Conclusiones

El método de las parcelas de clavos de erosión es sencillo, práctico, preciso y de bajo costo; no presenta limitaciones en cuanto al área a cuantificar, es decir el tamaño de la parcela puede ser variable; y las mediciones pueden realizarse en el lapso de tiempo que se desee (semanas, meses, años). Djorovic (1977) hace notar que aunque sea un método sencillo debe aplicarse con cuidado, ya que los cambios que se producen en el suelo por la erosión superficial son milimétricos.

El método de parcelas de clavos, a diferencia de otros métodos, no sólo cuantifica la erosión que se produce sobre la superficie, sino también las entradas de suelo que pueden llegar a producirse, es decir cuantifica la sedimentación, la cuál implica la entrada de suelo a la superficie reduciendo la pérdida efectiva del suelo en el lugar. Además se obtienen resultados del total de suelo que se haya movilizado en la parcela (Suelo Movilizado) y la pérdida efectiva de suelo (Erosión Neta). Los datos que se obtienen con las parcelas de clavos de erosión, pueden extrapolarse a hectáreas con el fin de entender el fenómeno de erosión a escala regional.

Los resultados que se obtuvieron con el método de parcelas de clavos de erosión, indican que en el Distrito Minero de Molango, el uso de suelo minero es el que presentó mayor

cantidad de erosión neta y de suelo movilizado que el uso agrícola. Las principales causas que propician la inestabilidad de los residuos mineros son la falta de cobertura vegetal, el tipo de precipitaciones y el manejo que se les da a las presas de lodos y al depósito de polvos. De estas zonas mineras el depósito de polvos fue el más vulnerable a la erosión hídrica, debido a que constantemente se vierten residuos de manganeso sobre una ladera con pendiente abrupta, que asociado a las precipitaciones y la falta de cobertura vegetal, provocan una gran cantidad de movilización de materiales hacia el río que se encuentra debajo del depósito. En cuanto a la presa de lodos la cantidad de material erosionado es menor que en el depósito de polvos, debido a que existe un mejor control de los residuos mineros, ya que las presas tienen la función de almacenar y evitar que los desechos sean erosionados. Sin embargo, las presas de esta zona no tienen la capacidad suficiente para contener la gran cantidad de residuos que se generan con el procesamiento del manganeso, y aunado a las precipitaciones, provocan que las presas se saturen y se derramen los desechos mineros, trayendo como consecuencia la contaminación de los ríos.

En el uso de suelo agrícola se registraron cantidades menores de erosión neta y suelo movilizado que en el uso de suelo minero. En estas parcelas los factores que evitaron que hubiera mayor erosión son la cobertura vegetal, la materia orgánica y la capacidad del suelo para retener agua. Sin embargo, la erosión neta producida en este uso de suelo es considerada alta, ya que se pierden 50 t/ha en un lapso de tres meses. Las zonas agrícolas del Distrito Minero se encuentran sobre pendientes abruptas, lo que hace que se pierda más suelo que si se encontraran en terrenos planos.

CAPÍTULO 5. DISPERSIÓN DEL MANGANESO A TRAVÉS DE LAS CORRIENTES SUPERFICIALES EN CINCO CUENCAS CON ACTIVIDAD MINERA.

El cálculo de la pérdida de suelo a través del movimiento de sedimentos en las corrientes y ríos puede resultar difícil. Sin embargo, resulta útil hacer comparaciones del movimiento en diferentes corrientes, en diferentes momentos del año o de cuencas hidrográficas en las que se dan diferentes usos de tierra (FAO, 1997).

En este capítulo se emplean dos métodos para analizar la dispersión del manganeso sobre los cauces principales y secundarios: a) muestreo de agua y sedimento: que consiste en analizar la concentración de manganeso en agua y sedimento de ríos y su influencia con el uso de suelo; b) cubetas de captación de sedimento: el fin de este experimento es corroborar la cantidad de sedimentos que aportan las cuencas con diferente cobertura vegetal.

5.1 Muestreo de agua y sedimento

5.1.1 Metodología

a) Selección de los sitios para el muestreo de agua y sedimento

Para el muestreo de agua y sedimento se seleccionaron cuencas que estuvieran influenciadas por alguna actividad minera. Estas son: Otongo, Tetzintla, Naopa, Malila y Nonoalco. Con la ayuda de cartas topográficas de INEGI escala 1:50 000 se delimitaron las cuencas, donde se superpusieron el mapa geológico y el mapa de uso de suelo y vegetación. El propósito de la superposición es ubicar puntos de muestreo que estuvieran influenciados por la facies manganésífera y sobre diferentes usos de suelo.

En cada una de las cuencas se eligieron cauces principales y secundarios, en donde se tomaron muestras de sedimento y agua con el objetivo de observar el comportamiento del

manganeso en el curso del cauce y sus afluentes. El muestreo se realizó en dos épocas: estiaje (Febrero a Marzo de 2002) y lluvias (Octubre a Noviembre de 2002).

La delimitación se realizó sobre cartas topográficas, siguiendo manualmente el parteaguas de cada cuenca. Posteriormente se digitalizó en el sistema de información ILWIS y se creó un mapa de polígonos que nos da la superficie total de cada cuenca (cuadro 3.1). El mapa geológico y el de usos de suelo y vegetación se digitalizaron de la misma manera. Estos mapas se transformaron de un formato “vectorial” (polígonos) a formato “raster”. Todos los polígonos cuya cobertura pertenecen a una misma clase de información, adquirieron el mismo atributo (el valor de la celda), el cual permitió la identificación e integración en una misma unidad para ser cuantificada. Todos los mapas deben de tener la misma georeferencia para poder sobreponerse unos con otros.

Una vez creado el mapa de sobreposiciones (incluye las cuencas, usos de suelo, facies manganésifera e hidrología) se seleccionaron los sitios de muestreados con los siguientes criterios:

- Ríos que estuvieran sobre algún depósito minero.
- Ríos con usos de suelo agrícola, pecuario o forestal que estuvieran influenciados por la facies manganésifera.
- Ríos con usos de suelo agrícola, pecuario o forestal que no estuvieran influenciados por la facies.

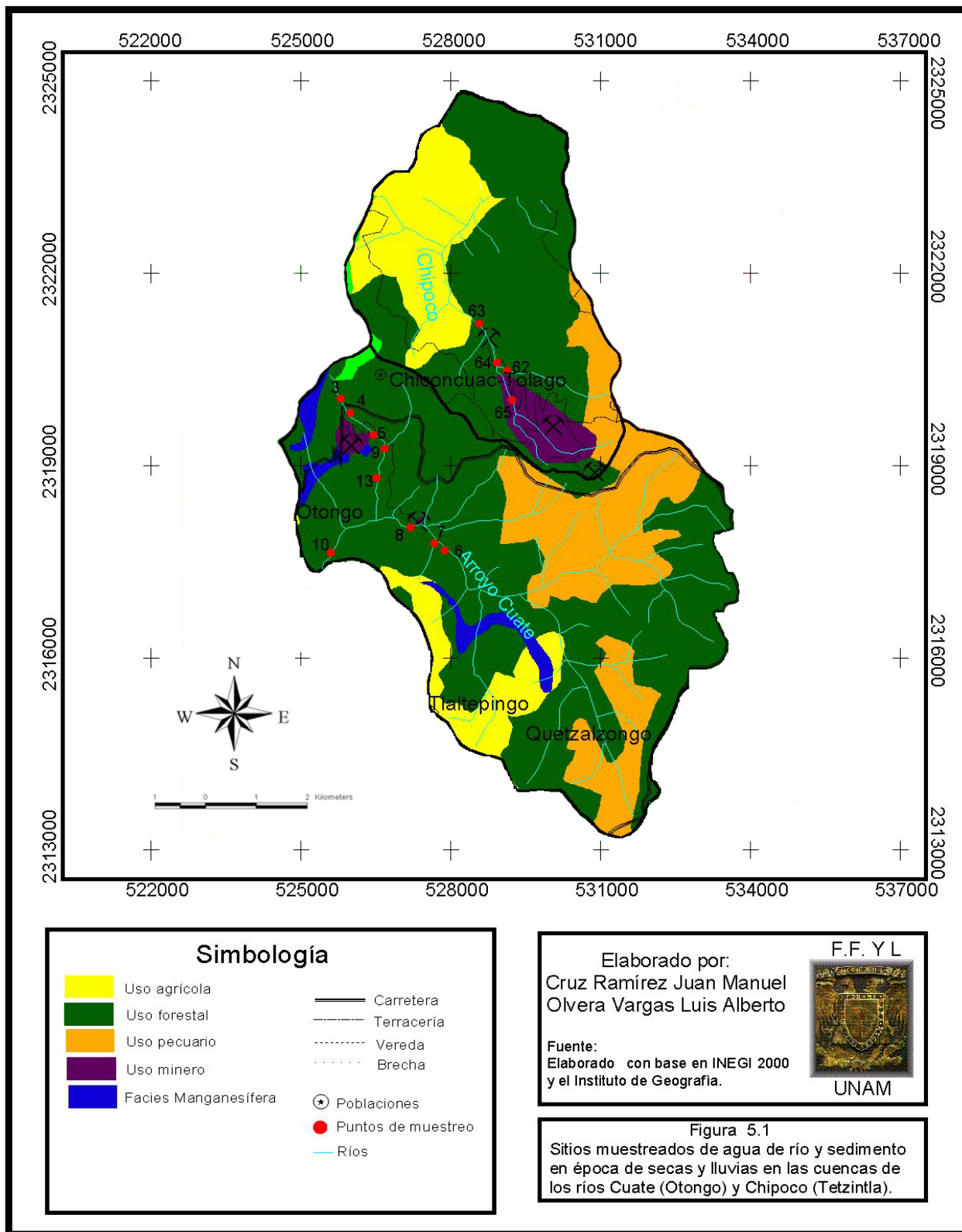
En las figuras 5.1 a la 5.3 se muestra la ubicación de los sitios de muestreo. La selección de los sitios de muestreo también consistió en ubicar ríos que se encuentren aguas arriba de alguna actividad minera o en ríos sin influencia minera, con el fin de conocer las concentraciones naturales del manganeso en la zona. Además se tomaron muestras a lo largo de los arroyos y ríos aguas debajo de las actividades mineras para conocer la magnitud de la dispersión del manganeso a partir de la zona afectada.

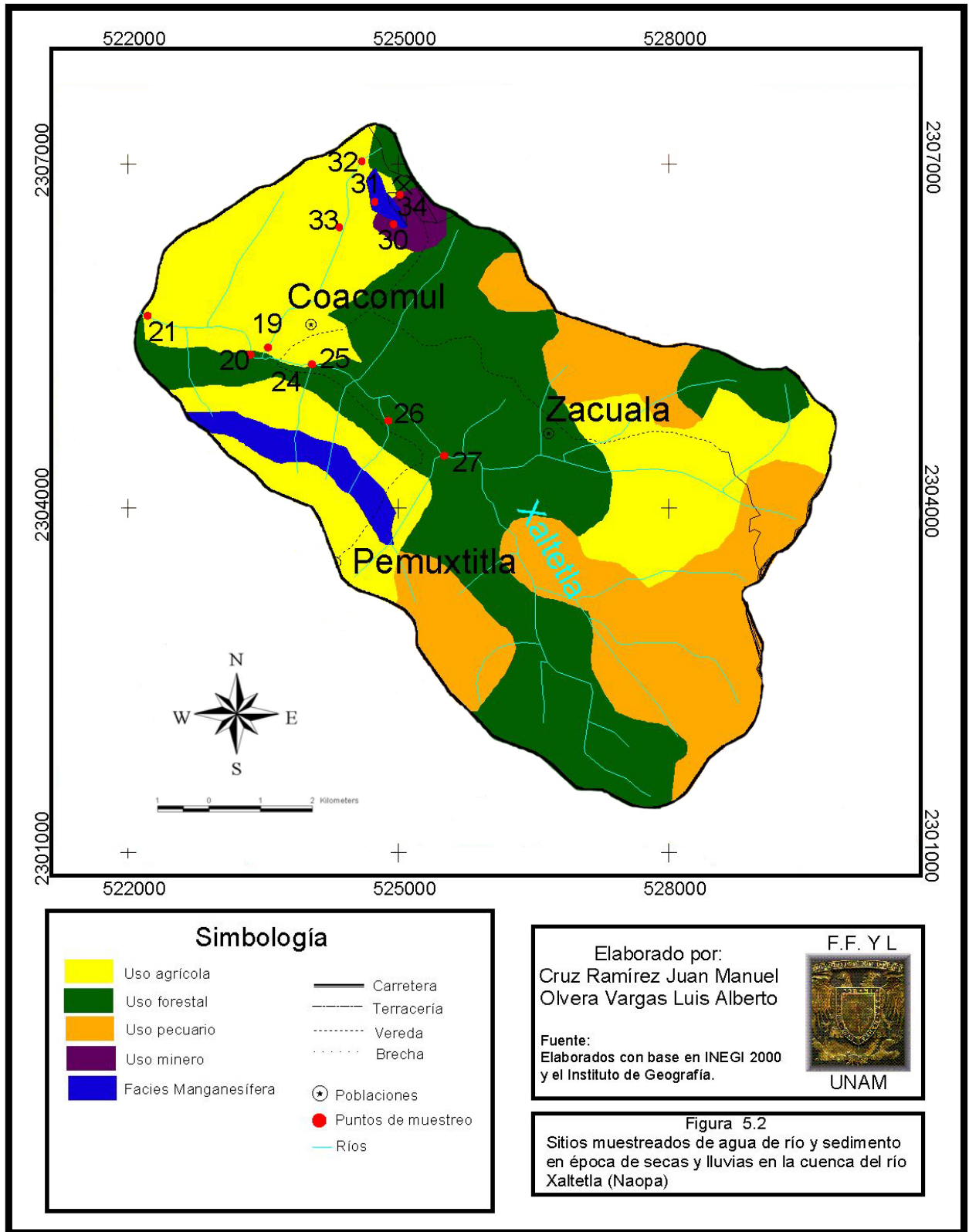
b) Muestreo de agua

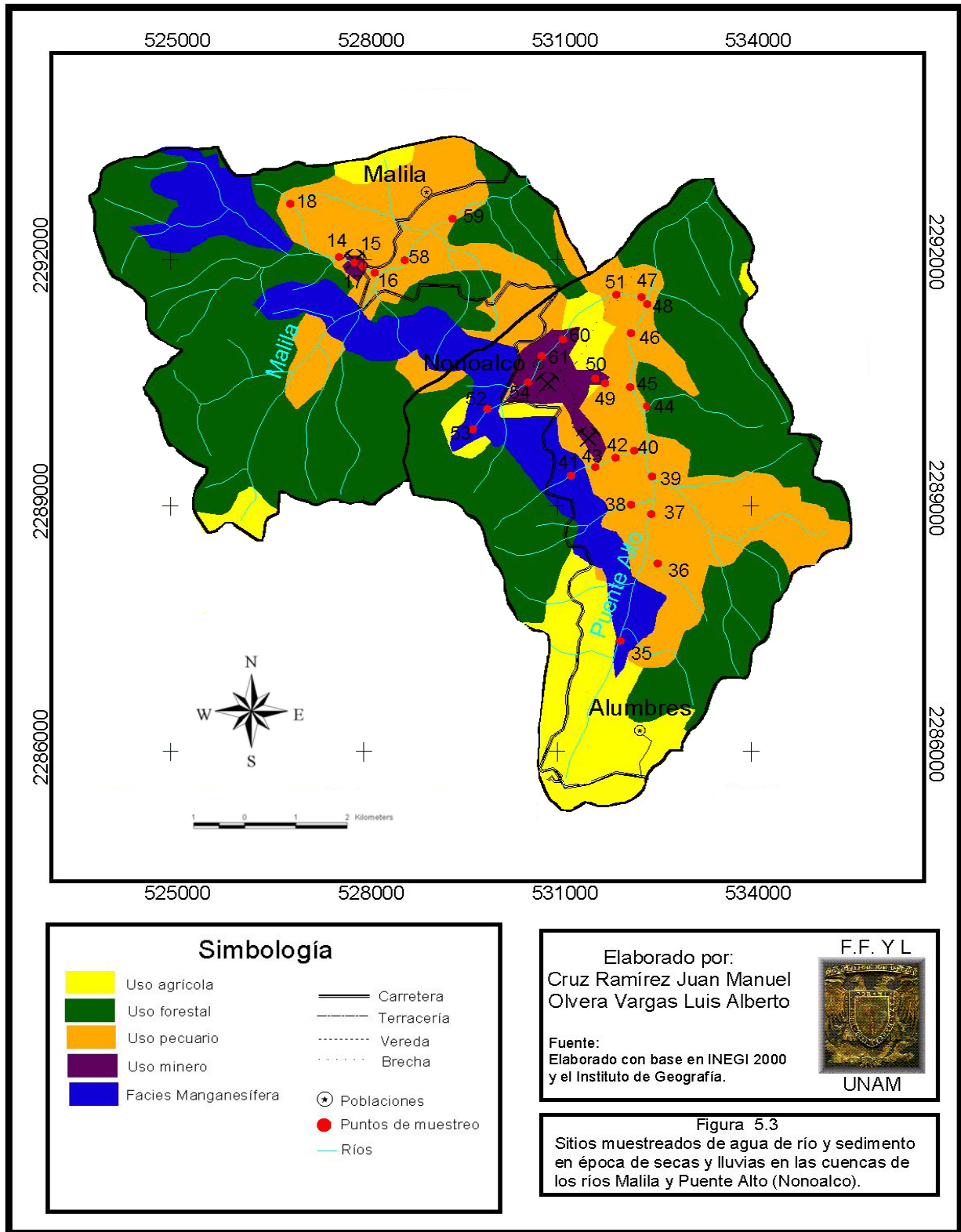
En cada uno de los sitios seleccionados se tomó una muestra de agua de río con una jeringa de 20 mL. Esta muestra se filtró por un filtro de membrana MILIPORE de 0.45 μm a tubos de vacío (VACUTAINERS) de 10 mL para los análisis de manganeso en solución. Las muestras se transportaron en hieleras y se conservaron a 4°C hasta su análisis en laboratorio. Antes de la toma de cada muestra, el porta filtro y la jeringa fueron lavados con agua destilada para evitar que se contaminara la muestra.

c) Muestreo de sedimento

En un frasco de 1 L de polietileno se tomó agua con sedimento que se encuentra depositado en el río. En el caso de que los ríos se encuentren sobre alguna planta minera o un depósito (tajos o presas) las muestras se tomaron en el curso del río antes de que pase la mina, en la mina y después de ésta. Todas las muestras fueron etiquetadas dándole una clave de campo para poder llevar un registro de cada una de ellas. Las muestras se transportaron en hieleras y se conservaron a 4°C hasta su análisis en el laboratorio para poder conservar sus propiedades.







d) Trabajo de laboratorio

La determinación de manganeso en las muestras de agua se realizó por espectrofotometría de absorción atómica de flama con compensación de fondo con lámpara de deuterio directamente en las muestras filtradas en el campo.

En el laboratorio se separó al sedimento del agua por medio de centrifugación y se secó una alícuota del sedimento en la estufa a 105° C hasta peso constante. La muestra seca se molió en un molino con envase de ágata y posteriormente se prensaron pastillas para el análisis de manganeso total por fluorescencia de rayos X.

e) Trabajo de gabinete

Una vez seleccionados los sitios muestreados se procedió a delimitar y calcular el área de captación de cada uno de ellos (cuadro 5.3). La delimitación se realizó manualmente y se digitalizó en el sistema ILWIS. El mapa de áreas de captación fue sobrepuesto al mapa utilizado para ubicar los puntos, del cuál se obtendrán datos sobre los porcentajes de uso de suelo y facies manganesífera de cada sitio muestreado.

Los resultados obtenidos con la sobreposición de mapas ayudaron a realizar un análisis de la dispersión del manganeso en los afluentes principales y secundarios y a determinar si existe una relación entre la concentración de manganeso en agua y sedimento con la cobertura vegetal y la facies manganesífera.

5.1.2 Resultados

En el cuadro 5.1 se muestran los resultados de la cantidad de manganeso en agua (en miligramos por litro) y el porcentaje de manganeso en sedimentos, en la época de secas. En la primera columna se presentan los sitios de muestreo con el número para la ubicación en el mapa (figuras 5.1, 5.2, 5.3).

Para la cuenca de Otongo se muestrearon 13 puntos, de los cuáles los sitios 3, 4, y 5 presentan cantidades altas de manganeso en agua (5.5, 1.3 y 3.9 mg/l respectivamente) y 2 sitios presentan más de 20% de manganeso en sedimento. Estos sitios corresponden a la Zona Industrial de Acatitla. En la cuenca de Tetzintla sólo se muestrearon 4 sitios, en donde el sitio 62 presenta la cantidad más alta de sedimento de la cuenca con 16.54%. En Naopa se muestrearon 16 puntos, en donde sólo 3 sitios presentan valores mayores a 0.05 mg/l de manganeso en agua y 2 sitios tienen poco más de 1.5 % de manganeso en sedimento. En la cuenca de Malila 8 sitios fueron muestreados, de los cuáles 2 presentan más de 0.25 mg/l de manganeso en agua y 4 sitios presentan porcentajes mayores a 4 % de manganeso en sedimento. En la cuenca de Nonoalco se muestrearon 24 puntos, en donde todos los sitios presentan valores menores a 0.08 mg/l de manganeso en agua y 10 sitios tienen más de 10 % de manganeso en sedimento. En la columna donde se muestra el porcentaje de manganeso en sedimento, hay sitios en donde no se muestreó el sedimento debido a que no había.

Cuadro 5.1 Resultados de la cantidad de manganeso en agua (mg/l) y sedimento (%) en época de secas

Cuenca	No. de sitio	Río	Coordenadas		Agua	Sedim
			X	Y	Mn (mg/l)	Mn (%)
Otongo	3	500 m antes del depósito de polvos	526681	2319510	5.52	2.89
	4	250 m antes del depósito de polvos	527189	2319124	1.26	1.10
	5	50 m antes del depósito de polvos	528218	2317386	3.82	5.57
	6	Arroyo Cuate	528012	2317447	<0,04	5.55
	7	Afluente Arroyo Cuate	527684	2317737	<0,04	0.10
	8	Arroyo Cuate abajo mina Coyoles	527257	2318964	0.192	1.94
	9	Depósito de polvos	526381	2316998	0.497	21.45
	10	Entrada de la cuenca Otongo	520408	2315434	0.053	12.39
	13	200 m abajo del depósito de polvos	528185	2292177	0.047	24.13
Tetzintla	62	Afluente de río Chipoco	528735	2320939	<0,05	16.54
	63	abajo de la zona de minas	528999	2320321	<0,05	2.01
	64	50 m abajo de mina subterránea	529269	2319745	<0,05	*nm
	65	100 m antes de mina subterránea	529430	2328093	<0,05	7.21
Naopa	19	2 km abajo del tajo Naopa	523793	2305561	<0,05	0.78
	20	Río Xaltetla después del tajo	522822	2305918	<0,05	0.76
	21	Río Xaltetla – entrada de la cuenca	522636	2305885	<0,05	0.57
	24	Río Xaltetla antes del tajo	524338	2305447	<0,05	0.12
	25	Afluente del Río Xaltetla	525594	2304616	<0,05	1.57
	26	Río que baja de Pemuxtilla	525031	2304940	<0,05	2.20

Naopa	27	Cruce de río Xaltetla y un afluente	521011	2308781	<0,05	0.18
	30	Arroyo 1 abajo del tajo Naopa	524750	2306500	<0,05	0.63
	31	Arroyo 2 abajo del tajo Naopa	524647	2306750	0.13	1.26
	32	Arroyo paralelo al tajo Naopa	524582	2306545	<0,05	0.31
	33	200 m abajo del punto R32	525000	2306850	0.073	0.25
	34	Sobre el tajo Naopa	525157	2306744	2.18	4.89
Malila	14	Sobre la planta Malila	528419	2292108	<0,05	*nm
	15	50 m abajo de la planta Malila	528689	2291977	<0,05	*nm
	16	100 m abajo de la planta Malila	528519	2292056	<0,05	10.96
	18	Afluente antes de la planta Malila	523931	2305630	<0,05	1.15
	57	río Malila y río Puente Alto	529098	2292150	<0,05	4.78
	58	250 m abajo de la planta Malila	529726	2292723	<0,05	5.44
	59	500 m abajo de la planta Malila	531191	2291058	0.351	7.15
Nonoalco	35	Puente Alto sin influencia de minas	532467	2287943	<0,05	0.10
	36	Arroyo Chapatla sin facies	532369	2288629	<0,05	*nm
	37	Puente Alto antes de Cerro Prieto 1	532101	2288758	<0,05	0.24
	38	Afluente abajo de Cerro Prieto 1	532379	2289139	<0,05	5.15
	39	Puente Alto abajo de Cerro Prieto 1	532157	2289479	<0,05	11.02
	40	200 m abajo de Cerro Prieto 2	531312	2289175	<0,05	8.75
	41	Antes del tajo de Cerro Prieto 2	531627	2289284	<0,05	0.06
	42	50 m abajo de Cerro Prieto 2	531900	2289423	<0,05	10.65
	43	Sobre el tajo de Cerro Prieto 2	532235	2290110	<0,05	19.81
	44	Puente Alto pasando Cerro Prieto 2	532121	2290383	<0,05	9.31
	45	200 m abajo de presa Stock 7	532121	2291130	<0,05	15.41
	46	P. Alto pasando presa Stock 7	532333	2291534	<0,05	10.51
	47	1 km abajo de planta Nonoalco	532272	2291619	<0,05	11.10
	48	P. Alto antes de río Cañada	531784	2290435	<0,05	29.28
	49	Abajo de la presa de lodos Stock 7	531637	2290514	<0,05	11.81
	50	Sobre la presa Stock 7	531918	2291674	0.082	5.98
	51	800 m abajo de la planta Nonoalco	530196	2290068	<0,05	*nm
	52	200 m antes de la planta Nonoalco	530001	2289812	<0,05	*nm
	53	400 m antes de la planta Nonoalco	530727	2290447	<0,05	*nm
	54	En la presa de regulación	533017	2293782	<0,05	8.14
	55	Puente Alto y Río Malila	533473	2293539	<0,05	4.79
60	100 m abajo de presa Patio 7	530943	2290806	0.07	8.38	
61	Sobre presa Patio 7	529197	2320225	<0,05	18.11	

*nm= no muestreado

En el cuadro 5.2 se muestran los resultados de la cantidad de manganeso en agua (miligramos por litro) y el porcentaje de manganeso obtenidos en la época de lluvias. En esta época sólo se muestrearon 53 puntos, debido a que en algunos sitios no era posible el acceso. En la primera columna se presentan los sitios de muestreo con el número para la ubicación en el mapa (figuras 5.1, 5.2, 5.3).

En la cuenca de Otongo se muestrearon 8 puntos, donde todos presentan menos de 0.07 mg/l de manganeso en agua y 3 sitios tienen más de 10% de manganeso en sedimento. En Tetzintla se muestrearon sólo 3 puntos, de los cuáles 1 presenta los valores más altos en cantidad (0.14 mg/l) y porcentaje de manganeso (7.8%). En Naopa se muestrearon 13 puntos, en donde sólo dos sitios tienen valores mayores a 1 mg/l y 3 sitios que presentan más de 2% de manganeso en sedimento. En la cuenca de Malila se muestreó un total de 6 puntos. En este sitio no se presentaron variaciones en la cantidad de manganeso en agua, mientras que el manganeso en sedimento tiene una concentración de 16%. En la cuenca de Nonoalco se muestrearon 23 puntos, de los cuáles 5 sitios presentaron más de 20% de manganeso en sedimento y en la cantidad de manganeso en agua no se presentaron variaciones para la época de lluvias.

Cuadro 5.2 Resultados de la cantidad de manganeso en agua (mg/l) y sedimento (%) en época de lluvias

Cuenca	No. de sitio	Río	Coordenadas		Agua	Sedim
			X	Y	Mn (mg/l)	Mn (%)
Otongo	4	250 m antes del depósito de polvos	527189	2319124	<0.03	2.8
	5	50 m antes del depósito de polvos	528218	2317386	<0.03	12.2
	6	Afluente Arroyo Cuate	528012	2317447	<0.03	4.4
	8	Entrada de la cuenca Otongo	527257	2318964	<0.03	3.8
	9	Depósito de polvos	526381	2316998	0.07	20.4
	10	Arroyo Cuate abajo mina Coyoles	520408	2315434	<0.03	10.6
Tetzintla	62	100 m antes de mina subterránea	528735	2320939	<0.03	1.5
	63	abajo de la zona de minas	528999	2320321	0.14	7.8
	65	Afluente de río Chipoco	529430	2328093	<0.03	1.9
Naopa	19	2 km abajo del tajo Naopa	523793	2305561	0.16	0.4
	20	Río Xaltetla después del tajo	522822	2305918	0.06	0.3
	21	Río Xaltetla – entrada de la cuenca	522636	2305885	<0.03	0.5
	24	Río Xaltetla antes del tajo	524338	2305447	1.02	3.1
	25	Afluente del Río Xaltetla	525594	2304616	<0.03	2.4
	26	Río que baja de Pemuxtitla	525031	2304940	0.36	0.2
	27	Cruce de río Xaltetla y un afluente	521011	2308781	<0.03	*nm
	30	Arroyo 1 abajo del tajo Naopa	524750	2306500	0.69	1.0
	31	Arroyo 2 abajo del tajo Naopa	524647	2306750	<0.03	0.1
	33	200 m abajo del punto R32	525000	2306850	<0.03	2.5
	34	Sobre el tajo Naopa	525157	2306744	4.43	1.2

Malila	14	Sobre la planta Malila	528419	2292108	<0.02	*nm
	15	50 m abajo de la planta Malila	528689	2291977	<0.02	*nm
	57	río Malila y río Puente Alto	529098	2292150	<0.02	16.5
	58	250 m abajo de la planta Malila	529726	2292723	<0.02	3.7
	59	500 m abajo de la planta Malila	531191	2291058	<0.02	2.2
Nonoalco	35	Puente Alto sin influencia de minas	532467	2287943	<0.02	0.1
	37	Puente Alto antes de Cerro Prieto 1	532101	2288758	<0.02	0.3
	38	Afluente abajo de Cerro Prieto 1	532379	2289139	<0.02	2.0
	39	Puente Alto abajo de Cerro Prieto 1	532157	2289479	<0.02	2.0
	40	200 m abajo de Cerro Prieto 2	531312	2289175	<0.02	3.0
	41	Antes del tajo de Cerro Prieto 2	531627	2289284	<0.02	0.2
	42	50 m abajo de Cerro Prieto 2	531900	2289423	<0.02	3.5
	43	Sobre el tajo de Cerro Prieto 2	532235	2290110	<0.02	3.8
	44	Puente Alto pasando Cerro Prieto 2	532121	2290383	<0.02	4.6
	45	200 m abajo de presa Stock 7	532121	2291130	<0.02	2.7
	46	P. Alto pasando presa Stock 7	532333	2291534	<0.02	7.8
	47	1 km abajo de planta Nonoalco	532272	2291619	<0.02	5.0
	48	P. Alto antes de río Cañada	531784	2290435	<0.02	21.5
	49	Abajo de la presa de lodos Stock 7	531637	2290514	<0.02	7.8
	50	Sobre la presa Stock 7	531918	2291674	0.1	5.0
	51	800 m abajo de la planta Nonoalco	530196	2290068	<0.02	22.6
	52	200 m antes de la planta Nonoalco	530001	2289812	<0.02	*nm
	53	400 m antes de la planta Nonoalco	530727	2290447	<0.02	*nm
	54	En la presa de regulación	533017	2293782	<0.02	23.2
	55	Puente Alto y Río Malila	533473	2293539	<0.02	5.9
	60	100 m abajo de presa Patio 7	530943	2290806	<0.02	25.4
61	Sobre presa Patio 7	529197	2320225	<0.02	21	

*nm= no muestreado

El cuadro 5.3 muestra los porcentajes de la superficie en la que aflora la facies manganesífera y los usos de suelo que ocupan las áreas de captación (ha) para cada uno de los sitios donde se realizó el muestreo de agua y sedimento, tanto en época de secas como en época de lluvias.

En la cuenca de Otongo todos los sitios presentan porcentajes altos de manganeso en agua en el uso de suelo forestal, los puntos muestreados aguas arriba de la planta de nodulación presentan un 100% de cobertura vegetal. La franja de facies manganesífera que pasa por el área de captación de estos sitios presenta porcentajes bajos a excepción de los puntos 3, 4 y 13. Tetzintla cuenta con un importante porcentaje de uso de suelo minero en la mayoría de los sitios. El uso de suelo que tienen las áreas de captación en esta cuenca es pecuario y forestal, ya que no presenta actividad agrícola. La cuenca de Naopa presenta un considerable porcentaje de facies manganesífera en algunos de sus

sitios. El uso de suelo agrícola cubre gran parte del área de captación de estos sitios. Malila y Nonoalco son las cuencas que presentan los mayores porcentajes de cobertura de la facies manganésifera.

Cuadro 5.3 Porcentajes de facies manganésifera y usos de suelos en superficies de área de captación de los sitios muestreados.

Cuenca	No.de sitio	Áreas de Captación (ha)	Facies Manganésifera (%)	Uso de suelo (%)			
				Agrícola	Pecuario	Forestal	Minero
Otongo	3	37.57	17.54	0.00	0.00	100.00	0.00
	4	57.16	16.29	0.00	0.00	100.00	0.00
	5	132.12	9.35	0.00	0.00	100.00	0.00
	6	2162.60	4.13	10.60	29.90	59.50	0.00
	7	46.02	0.56	23.62	0.00	76.38	0.00
	8	2506.62	4.91	9.68	29.40	60.88	0.04
	9	225.47	8.75	0.00	0.00	96.99	3.01
	10	3179.32	5.78	7.78	23.18	68.39	0.64
	13	351.82	10.10	0.00	0.00	94.42	5.58
Tetzintla	62	80.11	0.00	0.00	32.29	67.68	0.02
	63	533.48	11.93	0.00	19.95	61.75	18.29
	64	357.40	16.42	0.00	19.15	53.54	27.31
	65	170.12	26.38	0.00	15.76	26.88	57.36
Naopa	19	153.85	5.91	71.19	0.00	13.73	15.08
	20	45.84	23.25	74.91	0.00	25.09	0.00
	21	2211.48	2.99	35.78	25.55	37.39	1.28
	24	1771.58	2.28	24.82	31.90	42.99	0.29
	25	47.45	19.39	80.55	0.00	19.45	0.00
	26	59.91	23.40	73.86	0.00	26.14	0.00
	27	1243.94	0.00	19.73	42.03	38.24	0.00
	30	1.43	0.00	50.35	0.00	39.16	10.49
	31	33.08	18.41	35.10	0.00	15.45	49.46
	32	39.42	7.61	73.97	0.00	26.03	0.00
	33	45.88	6.54	77.64	0.00	22.36	0.00
	34	11.38	16.61	22.58	0.00	42.36	35.06
Malila	14	609.19	29.39	0.00	4.70	95.30	0.00
	15	648.32	27.88	0.00	9.19	90.34	0.48
	16	672.26	27.37	0.00	10.85	87.97	1.18
	17	655.12	27.59	0.00	9.67	89.42	0.91
	18	24.14	17.56	0.00	12.72	87.28	0.00
	58	1597.10	18.15	2.26	13.93	83.32	0.50
	59	1994.27	16.82	3.25	23.90	72.45	0.40
Nonoalco	35	302.50	1.50	91.53	0.02	8.45	0.00
	36	50.13	0.00	0.00	58.01	41.99	0.00
	37	722.25	11.00	52.81	26.81	20.38	0.00
	38	130.32	26.34	11.41	23.26	65.33	0.00
	39	1341.80	8.48	29.53	37.03	33.43	0.00

Nonoalco	40	134.16	30.16	0.00	44.01	51.30	4.69
	41	44.57	20.48	0.00	4.26	95.74	0.00
	42	108.37	37.34	0.00	34.90	63.50	1.60
	43	86.39	37.64	0.00	20.62	79.38	0.00
	44	1660.52	9.29	23.87	36.99	38.77	0.38
	45	1826.76	10.18	21.91	37.98	38.81	1.30
	46	1922.00	9.68	21.54	38.71	38.29	1.46
	47	2412.88	11.73	21.69	36.59	37.72	4.00
	48	436.56	22.23	23.94	25.26	35.11	15.69
	49	26.24	5.45	14.90	18.83	0.00	66.27
	50	8.20	0.00	8.41	0.00	0.00	91.59
	51	423.78	22.90	24.66	23.02	36.16	16.16
	52	113.21	16.27	30.05	0.00	69.95	0.00
	53	82.13	9.50	18.79	0.00	81.21	0.00
	54	239.24	26.41	26.06	10.06	60.88	3.00
	60	339.45	28.59	22.12	16.90	43.27	17.71
	61	296.59	29.96	25.27	13.86	49.52	11.33

5.1.3 Análisis de los resultados

El análisis de los resultados se realizó en cada una de las 5 cuencas estudiadas, con el propósito de conocer la concentración de manganeso en agua y sedimento en los ríos muestreados.

a) Cuenca de Otongo

La figura 5.4a muestra las concentraciones de manganeso en aguas de río en la cuenca Otongo, en época de secas y lluvias. Los sitios 3, 4 y 5 se encuentran aguas arriba de la planta de nodulación de Otongo y presentan concentraciones elevadas de manganeso en agua (5.52, 1.26 y 3.82 mg/l) para la época de secas. Ésto se debe a que las emisiones atmosféricas producidas por la planta van en dirección a estos sitios y su área de captación se encuentra sobre una importante franja de la facies manganesífera (cuadro 5.3). Los demás sitios se encuentran dentro de los límites permisibles, entre 0.004 – 0.094 mg/L⁻¹ (Reinmann y Caritat, 1998), a excepción de los sitios 8 y 9. Para la época de lluvias todos los sitios están debajo del límite.

Los sitios 6 y 8 presentan concentraciones ligeramente altas de manganeso en sedimento en ambas épocas (figura 5.4b). A pesar de que estos sitios no tienen influencia minera, el 4% de su área de captación se encuentra sobre la facies manganesífera.

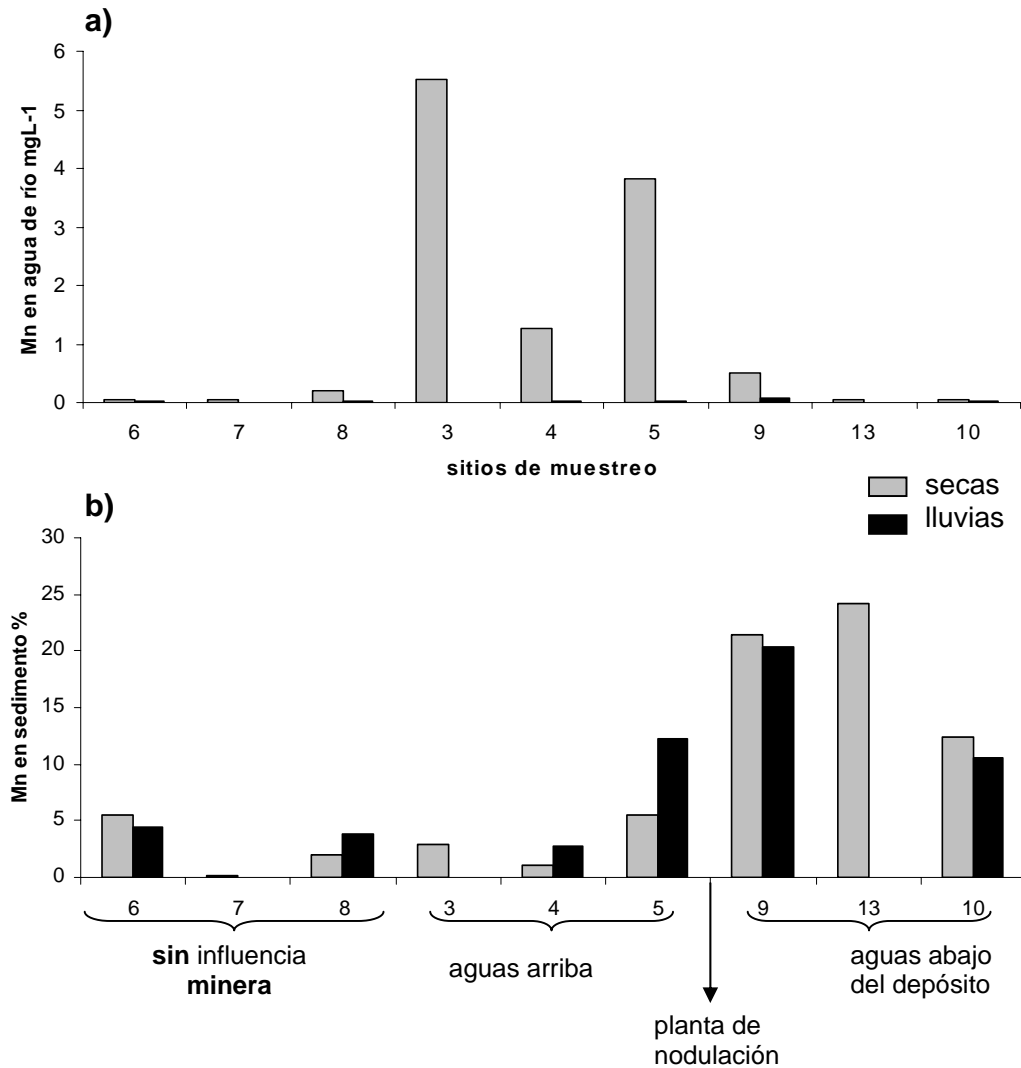


Figura 5.4 Concentraciones de manganeso en a) agua y b) sedimento de río en la cuenca de Otongo.

Esta ligera concentración de manganeso se puede atribuir a la erosión que sufren los suelos formados a partir de la facies y por el uso de suelo (40% de terrenos agropecuarios del área de captación). Los sitios 3 y 4 no presentan concentraciones elevadas de manganeso en sedimento. Estos sitios tienen 100% de uso forestal (predominantemente bosque mesófilo), lo que impide que los suelos sean erosionados.

Los sitios que se encuentran debajo del depósito de polvos registran concentraciones altas de manganeso en sedimentos, (en el sitio 9 con 21.45% en secas y 20.4% en lluvias) y se mantienen elevadas, aguas abajo hasta el sitio 10 con 12.39% en secas y 10.6% en lluvias (figura 5.4b).

Este porcentaje de manganeso en sedimento se debe a que el material del depósito de polvos carece de cobertura vegetal, es material no consolidado y se encuentra sobre una ladera con pendiente abrupta que asociado con las precipitaciones acelera el transporte del material al río.

b) Cuenca Tetzintla

En la figura 5.5a se muestran las concentraciones de manganeso en agua de río de la cuenca Tetzintla en ambas épocas. Todos los puntos de muestreo se encuentran en la parte alta de la cuenca, afectados por la extracción de manganeso a cielo abierto en el tajo Tetzintla. Estos sitios presentan concentraciones bajas de manganeso en agua (<0.05 mg/L) y se encuentran dentro de los límites permisibles, tanto en época de secas como en época de lluvias. Las concentraciones de manganeso en sedimento son altas en los sitios 65, 63 y 62 para la época de secas, debido a que se encuentran sobre la zona de extracción (figura 5.5b). Esta zona presenta un alto porcentaje de uso de suelo minero el cuál carece de vegetación, lo que genera que el material del tajo sea más vulnerable a la erosión hídrica. En época de lluvias el sitio 63 presenta el mayor porcentaje de los sitios de esta cuenca.

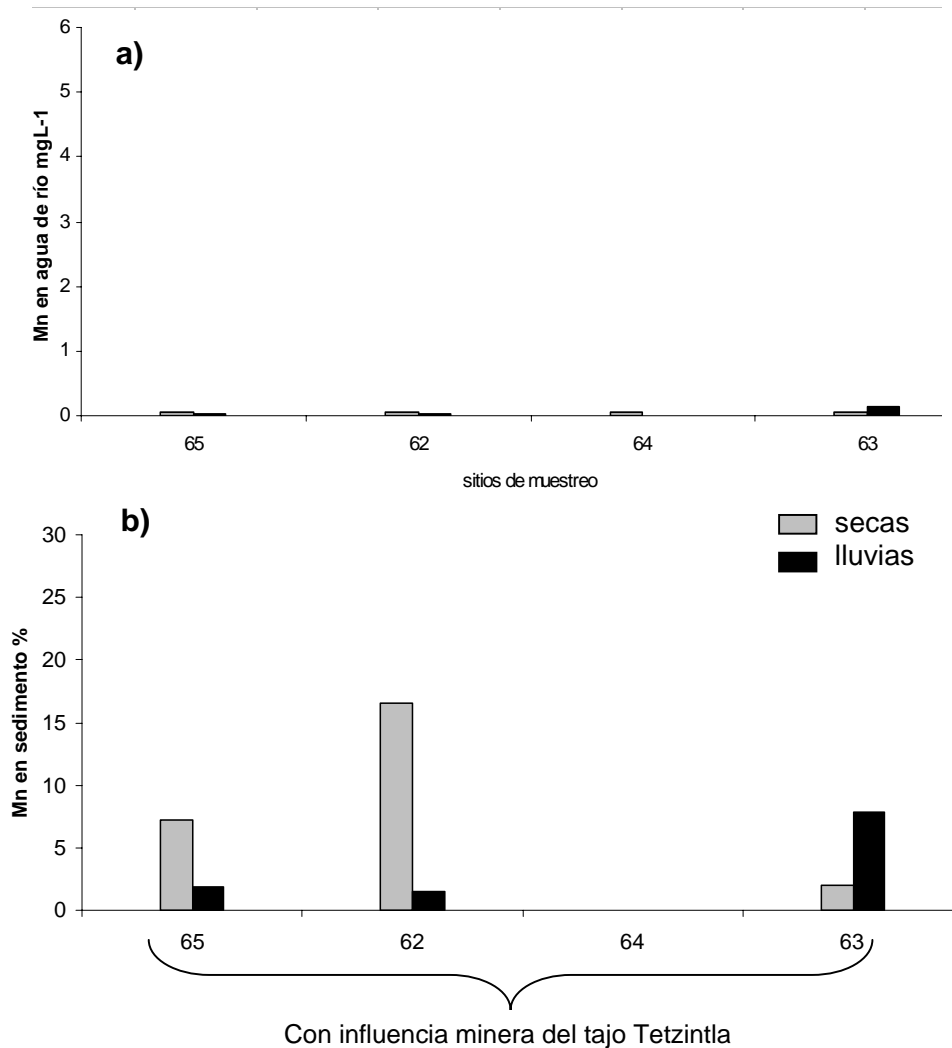


Figura 5.5 Concentraciones de manganeso en a) agua y b) sedimento de río en la cuenca de Tetzintla.

c) Cuenca Naopa

En la figura 5.6a se muestran las concentraciones de manganeso en agua de río de la cuenca Naopa, tanto en época de secas como en época de lluvias. Las concentraciones de manganeso en agua de río en la temporada de lluvias son más altas que las muestras tomadas en los mismos sitios en época de estiaje. Los sitios que se encuentran en el río que baja de Pemuxtitla (26, 25 y 24), registraron concentraciones altas de manganeso en

agua en la época de lluvia. En este lado de la cuenca no se realiza ninguna actividad minera, pero se encuentran importantes afloramientos de la facies manganesífera. La mayor concentración de Mn en agua se presentó en el sitio 34 con 2.18 mg/L en secas y 4.43 mg/L en lluvias, este sitio se encuentra ubicado en la presa que está dentro del tajo Naopa. En la época de lluvia también se registraron concentraciones de Mn en el agua aguas abajo del tajo, dentro de la subcuenca en la que se encuentra la mina.

En la cuenca Naopa, las concentraciones de manganeso en sedimento son menores a 5% en ambas épocas. Los sitios que se encuentran sin ninguna influencia minera (27, 26, 25 y 24) presentan concentraciones mayores que algunos sitios que están influenciados por las actividades mineras (figura 5.6b); ésto se debe a que su área de captación está sobre una importante franja de la facies manganesífera que aún no ha sido explotada. Estos sitios están ubicados en la ladera opuesta de la zona minera, en donde sólo el uso de suelo agrícola está sobre la facies. Por tal motivo, estas concentraciones en sedimento se deben a la erosión que sufren los suelos formados a partir de la facies manganesífera. El sitio 33 se encuentra en la subcuenca paralela al tajo Naopa y presenta en época de lluvias una concentración de manganeso de 2.5 %. Este porcentaje es uno de los más altos en esta cuenca y se debe a que el área en donde se encuentra la facies está sobre terrenos agrícolas. Los sitios que están influenciados directamente por la mina presentan concentraciones ligeras de manganeso en sedimento, en especial el sitio 34 con 4.89% en secas. Ésto se debe a que el sitio se encuentra debajo del tajo Naopa. En los sitios 30, 31, 19 y 20 el porcentaje de manganeso disminuye conforme se aleja de la zona minera y sucede en ambas épocas.

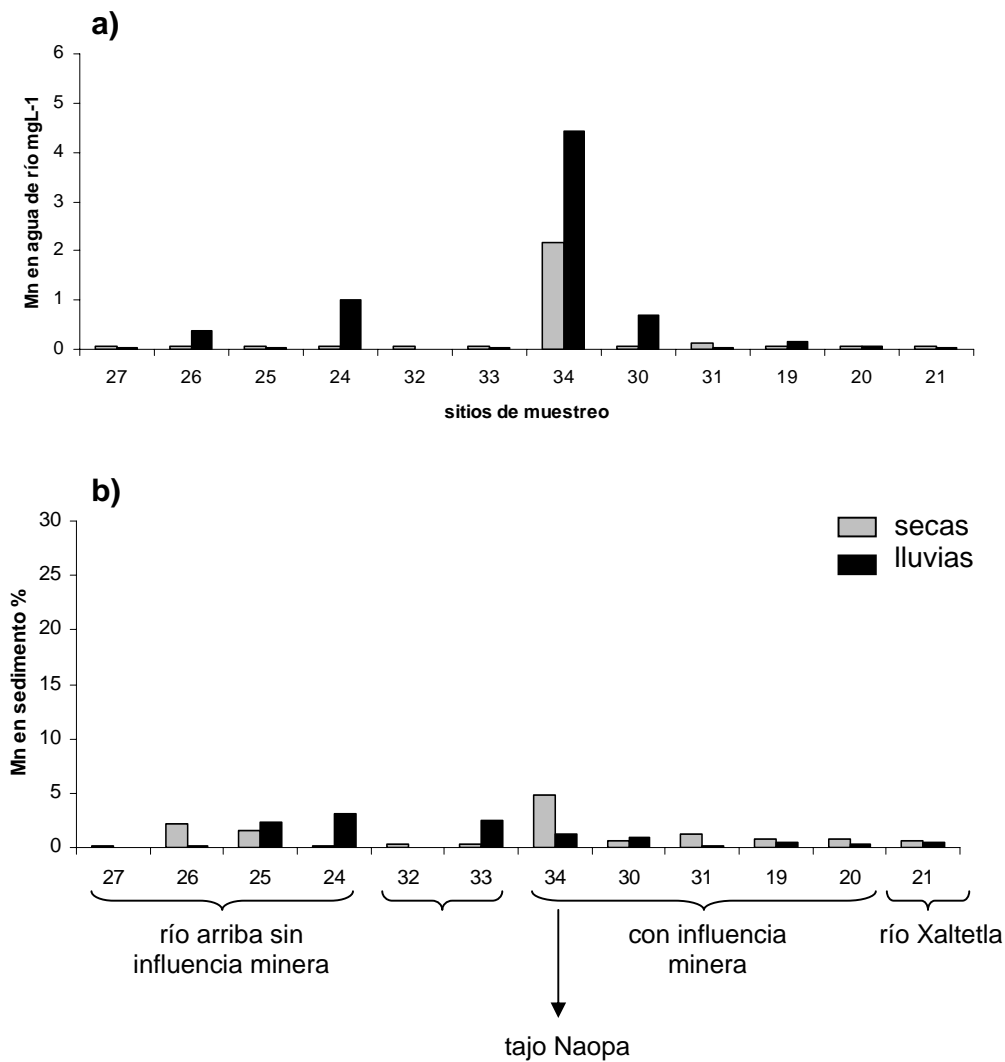


Figura 5.6 Concentraciones de manganeso en a) agua y b) sedimento de río en la cuenca de Naopa.

d) Cuenca Malila

La figura 5.7a muestra las concentraciones de manganeso en agua de río de la cuenca Malila, en época de secas y en época de lluvias. En todos los sitio de muestreo las concentraciones de Mn en agua de río son bajas y especialmente en la época de lluvias, ya que se encontraron debajo del límite de cuantificación, con registros menores a 0.02 mg/L. En la época de estiaje sólo el sitio 59 registró 0.35 mg/L de Mn en el agua.

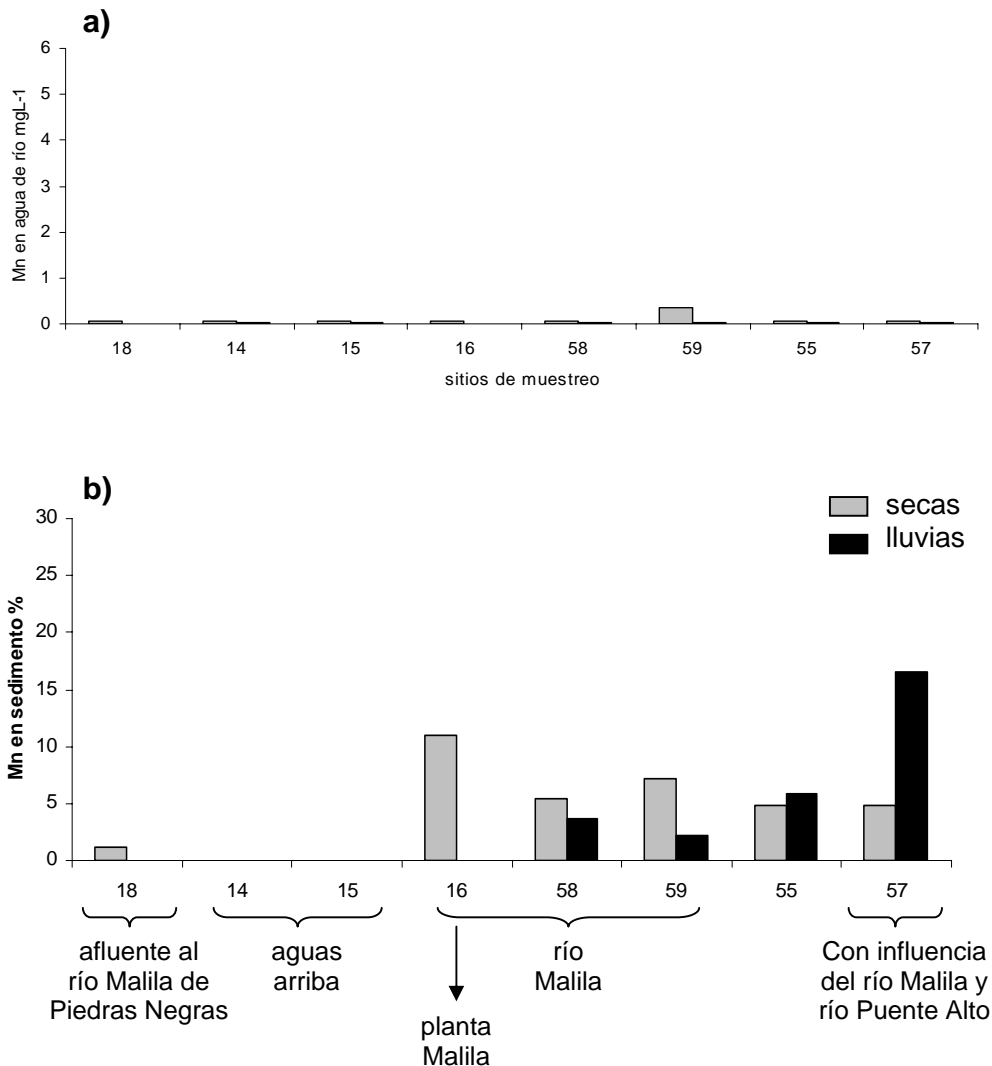


Figura 5.7 Concentración de manganeso en a) agua y b) sedimento de río en la cuenca de Malila.

El porcentaje de manganeso en sedimento del sitio 18 es el más bajo de la cuenca Malila en época de secas con 1.15 %, que a pesar de tener 17 % de su área de captación sobre la facies manganesífera, está cubierta por zonas forestales que protegen al suelo de ser erosionado. Los sitios 16, 58 y 59 presentan concentraciones ligeramente altas de manganeso en sedimento en época de secas. Estos sitios están influenciados directamente por la planta Malila, además de estar ubicados sobre una franja de la facies manganesífera, lo que genera estas concentraciones. Para época de lluvias, en estos sitios disminuye el contenido de manganeso en sedimento (figura 5.7b).

e) Cuenca Nonoalco – Río La Cañada

La figura 5.8a muestra las concentraciones de manganeso en agua de río de la subcuenca del río La Cañada, en época de secas y en la época de lluvias. Todos estos sitios presentan concentraciones debajo de los límites de cuantificación, con $<0.07\text{mg/L}$ en secas y $<0.02\text{ mg/L}$ en lluvias.

En los sitios 52 y 53 que se encuentran aguas arriba de la planta Nonoalco, no se determinó la concentración de manganeso en sedimento debido a que no había sedimento. Esta zona, a pesar de tener una superficie sobre la facies manganesífera, se encuentra cubierta por áreas forestales, lo que evita que se erosione el suelo. Los sitios 54, 61 y 60, que se encuentran sobre la planta de regulación de Nonoalco, presentan concentraciones de manganeso en sedimento ligeramente alta (8.14%, 18.11% y 8.38% respectivamente) para la época de secas. Para la época de lluvias, en estos mismos sitios, sube el contenido de manganeso a 23.2% en el sitio 54, 21% en el sitio 61 y 25.4% en el sitio 60. Estos sitios, además de tener una cuarta parte de su área de captación sobre la facies manganesífera y estar sobre uso de suelo minero, no tienen áreas forestales que protejan al suelo y a las zonas de jales de la lluvia. Los sitios 51 y 48, que se ubican aguas abajo de la planta de nodulación, presentan una de las mayores concentraciones de Mn de la cuenca, tanto en época de secas como en lluvias (figura 5.8b).

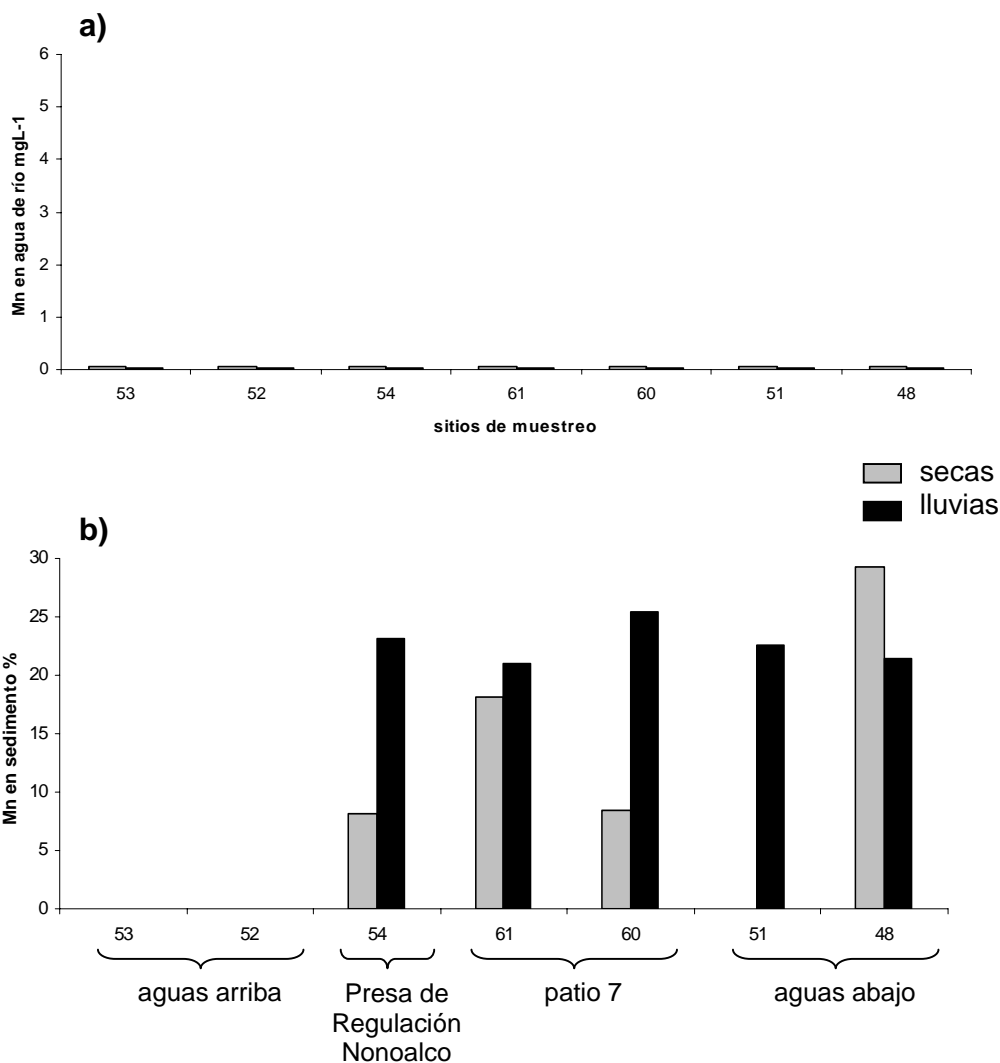


Figura 5.8 Concentración de manganeso en a) agua y b) sedimento de río en la subcuenca del río La Cañada, Nonoalco.

f) Cuenca Nonoalco – Río Puente Alto

En la figura 5.9a se muestran las concentraciones de manganeso en agua de río de la subcuenca del río Puente Alto, para la época de secas y lluvias. En todos los sitios muestreados se obtuvieron registros que se encuentran debajo de los límites de cuantificación (<0.08 mg/L) en secas y <0.02 mg/L en lluvias.

Las concentraciones de manganeso en sedimento de los sitios 35, 36 y 37 presentan los valores más bajos de la cuenca Nonoalco, ya que no tienen ninguna influencia minera y cuentan con un bajo porcentaje de su área de captación sobre la facies manganesífera. Los sitios 38 y 39 presentan concentraciones, de 5% y 11% respectivamente, en época de secas, disminuyendo ligeramente para época de lluvias. Estos sitios se encuentran influenciados por la mina de Cerro Prieto II, que es un tajo a cielo abierto abandonado y que actualmente son potreros.

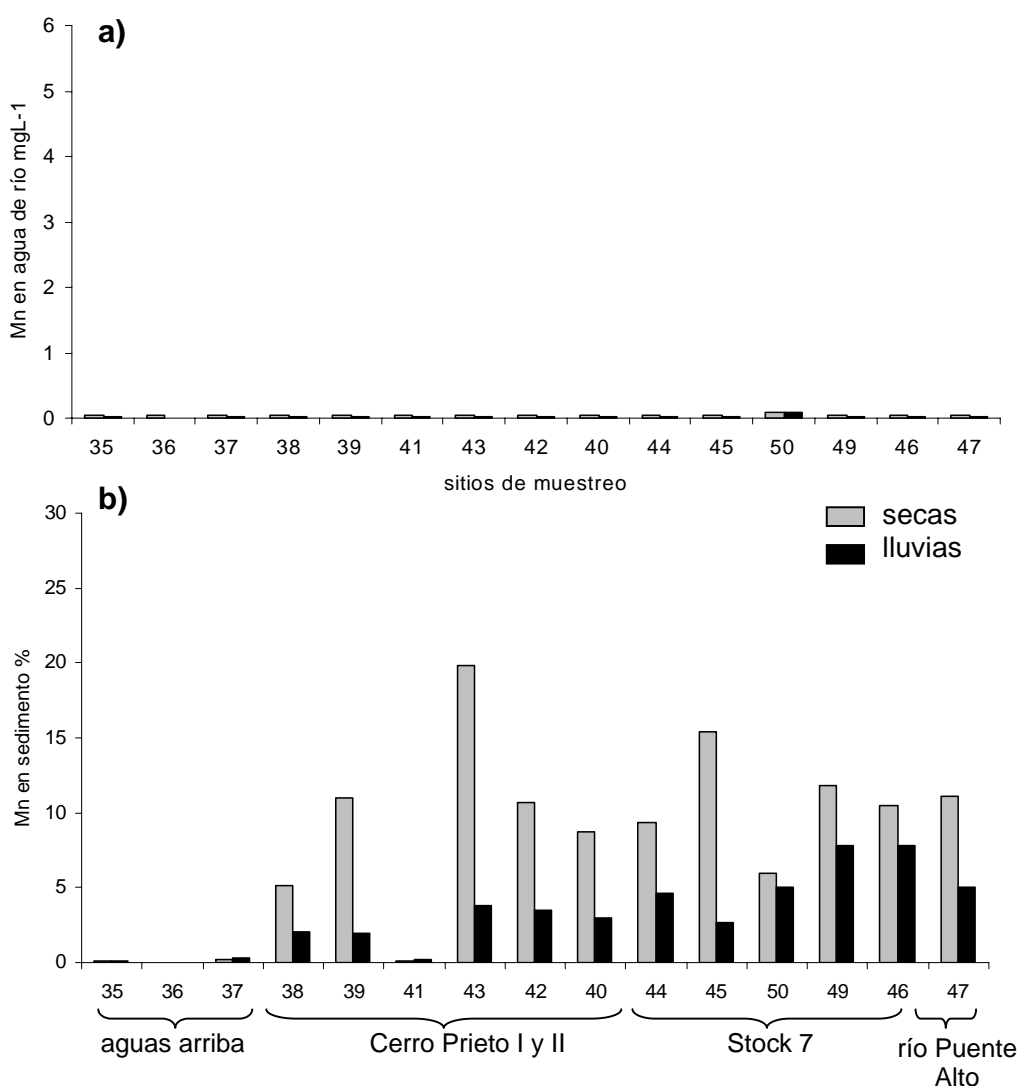


Figura 5.9 Concentraciones de Manganeso en a) agua y b) sedimento de río en la subcuenca del río Puente Alto, Nonoalco.

Los sitios 41, 43, 42 y 40 se encuentran sobre el río que baja de Cerro Prieto I. El sitio 41 está aguas arriba del tajo y presenta una concentración de manganeso en sedimento de 0.06 % en secas y 0.2 % en lluvias. Esta baja concentración se debe a que el 95% de su área de captación se encuentra con uso forestal. En cuanto a los sitios 43, 42 y 40 que están influenciados directamente por el tajo presentan concentraciones ligeramente altas en la época de secas (20%, 11% y 9% respectivamente). Para la época de lluvias el porcentaje disminuye hasta el 3% en todos los sitios. Los sitios 50, 49 y 45 se ubican aguas debajo de la presa de lodos Stock 7. Estos sitios presentan concentraciones ligeramente altas y se debe a que su área de captación tiene poco más de 90% de uso minero y están desprovistos de cobertura vegetal (figura 5.9b).

La cuenca de Otongo es la que presentó en época de secas, mayor número de puntos con concentración altas de manganeso en agua. Ésto se debe a la influencia del depósito de polvos y a las emisiones de la planta de Nodulación de la Zona Industrial. En las cuencas de Naopa y Malila, los sitios que también presentan concentraciones elevadas en agua son sitios que están influenciados por las actividades mineras. Las cuencas de Nonoalco y Tetzintla a pesar de tener un área importante de uso de suelo minero presentaron valores dentro de los límites permisibles. En la época de lluvias disminuyeron los sitios con concentraciones altas de manganeso en agua en las cinco cuencas. En estos sitios la distribución es diferente que en la época de secas, ya que se registraron en sitios con influencia y sin influencia minera, pero todos sobre la facies manganesífera.

En cuanto a las concentraciones de manganeso en sedimento en la época de secas, la cuenca de Nonoalco es la que presentó el mayor número de sitios de muestreo con contenidos que van de 5% a 29%. La mayoría de estos sitios está influenciada por uso de suelo minero; ésto indica que las actividades mineras intervienen directamente con la erosión y el aporte de sedimentos ricos en manganeso a los ríos. En las cuencas de Malila y Tetzintla, los sitios que presentaron concentraciones altas de manganeso en sedimento, están influenciados por las actividades mineras. Para la cuenca de Otongo hay sitios que no tienen uso de suelo minero y que presentaron concentraciones elevadas de manganeso. Ésto se atribuye a que el área de captación de estos sitios se encuentra

sobre la facies manganesífera. En la cuenca de Naopa sólo se registraron dos sitios con concentraciones elevadas de manganeso y uno de ellos está ubicado debajo del tajo a cielo abierto. En la época de lluvias, todas las cuencas presentaron una disminución en el número de sitios con porcentajes elevados de manganeso en sedimento y el 80% de estos sitios están sobre uso de suelo minero.

5.2 Cubetas de captación de sedimento

Este método experimental es sencillo y práctico y tiene el propósito de captar los sedimentos que acarrea un río en alguna crecida.

5.2.1 Metodología

Definición y caracterización de los sitios de muestreo

Los sitios de muestreo fueron seleccionados de la misma manera que el muestreo de agua y sedimento, es decir, se ubicaron ríos que estuvieran directamente influenciados por alguna actividad minera, y ríos ubicados en zonas conservadas o poco perturbadas, zonas agrícolas o pastizales que no estuvieran influenciadas por actividades mineras y que se encontrara alguna parte de su área de captación sobre la facies manganesífera. Esta selección se realizó con la sobreposición del mapa de uso de suelo y vegetación (figura 2.10) y el mapa hidrológico (figura 2.7).

Los sitios seleccionados se ubican dentro de 3 cuencas. En la cuenca de Otongo, para el uso de suelo minero, se colocó una cubeta de captación en el cauce del río que pasa debajo del depósito de polvos de la Zona Industrial Acatitla. Para el uso de suelo forestal la cubeta de captación se colocó arriba de la Zona Industrial sobre el mismo río.

En la cuenca de Tetzintla, la cubeta de captación se colocó en el río que pasa sobre la zona de extracción de manganeso (tajo a cielo abierto), debido a que el uso de suelo minero cubre la mayoría del área de captación del sitio. En esta cuenca se colocó otra

cubeta de captación sobre el río Chipoco y el área de captación de este sitio es, predominantemente, pastizal y forestal.

En la cuenca de Nonoalco la cubeta de captación se colocó en el río La Cañada antes de la planta Nonoalco, que cubre el área forestal. En la zona minera, la cubeta de captación se colocó sobre el mismo río, pasando la planta de regulación y varias presas de lodos.

Instalación de cubetas de captación

Una vez seleccionados los puntos de muestreo, la cubeta de captación se colocó en la parte central del cauce del río y consta de una cubeta de 20 litros que debía estar fija y sin movimiento para que no fuera arrastrada por la corriente. Al lado de cada cubeta se enterró un palo de 1 metro con el fin de que marcara en cada evento de lluvia el nivel máximo de la crecida del río (figura 5.10).



Figura 5.10 Cubeta de captación de sedimentos

Sección transversal

En cada punto de muestreo se realizó una sección transversal con el objetivo de poder calcular la cantidad de agua que pasó sobre el río en el momento de la crecida máxima. Para ésto se necesitó un flexómetro de 3 o 5 m y una cuerda graduada a cada 10 cm que fue colgada en cada lado del río (en forma transversal). Las mediciones se hicieron cada 30 cm o cuando hubiera desniveles considerables en la topografía del fondo del río (figura 5.11). Posteriormente se midió la pendiente del río.



Figura 5.11 Área de la sección trasversal

Según Selby (1982) para obtener la corriente de los cauces de ríos hay que tomar en cuenta el ancho del canal del río, la altura máxima de la crecida (perímetro húmedo), el área de la sección transversal, el radio hidráulico (que se obtiene a partir del área de la sección dividido por la altura máxima de la crecida) y la pendiente. Para obtener el caudal del cauce se necesita aplicar la siguiente fórmula:

$$Q = AV$$

Donde:

Q= caudal (m³/seg)

A = área de la sección transversal (m²)

V = velocidad del río (m/seg)

Para obtener la velocidad del río es necesario utilizar la fórmula de Manning que es la siguiente:

$$V = 1/n R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde:

V = velocidad del río (m³/seg)

n = coeficiente de rugosidad (tabla de valores de Manning)

R = Radio hidráulico.

S = gradiente de la corriente (se obtiene restando el desnivel entre dos puntos dividido por la longitud entre los dos puntos).

El resultado debe de ser expresado en metros cúbicos por segundo y éste dependerá de la longitud y la pendiente del río.

Instalación de pluviómetros

En cada cuenca donde se colocaron las cubetas de captación se instaló un sencillo pluviómetro que consta de un embudo sobre un recipiente de litro, que es sostenido por una base de madera de 1.50 m. Este pluviómetro debe estar ubicado en una zona libre de vegetación para evitar el goteo desde el follaje (figura 4.4). Los registros de precipitación fueron tomados cada 24 horas (Anexo 2).

El agua captada después de cada evento se vertió a una probeta, registrando la cantidad en mL. Para calcular la precipitación se toma en cuenta el radio del embudo y los mililitros obtenidos con la siguiente fórmula:

$$PP = (A / V) 10$$

Donde:

PP = Precipitación (mm).

A = área del embudo (cm²).

V = volumen de agua registrado por evento (mL).

Toma de muestra de sedimento

La toma de la muestra se efectuó cada 24 horas o después de cada evento y se verificó si las cubetas estaban llenas de agua y sedimento. Para tomar la muestra se tuvo que suspender los sedimentos, una vez en suspensión se tomó una alícuota de 1 litro que se mantuvo en refrigeración hasta su análisis en laboratorio. Una vez tomada la muestra, se desecharon los sedimentos sobrantes, se limpió la cubeta y se colocó en el mismo sitio. Posteriormente se midió la altura máxima a la que llegó el río, que estaba marcada en el palo que se colocó junto a la cubeta.

Cuantificación del material suspendido en el litro de agua

En el laboratorio, las muestras se introdujeron en la centrifuga para acelerar la sedimentación. Posteriormente, el agua se decantó y los sedimentos fueron secados en la estufa a 105°C. Cuando los sedimentos estuvieron totalmente secos se procedió a pesarlos y molerlos en un molino "Pulverisette 2".

La cantidad de manganeso en el sedimento se determinó por fluorescencia de rayos X. Para ello se utilizó 5 g de muestra seca y posteriormente se prensaron pastillas para el análisis de manganeso total.

5.2.2 Resultados

En el cuadro 5.4 se presentan los resultados del porcentaje de manganeso en sedimento de las muestras obtenidas con las cubetas de captación. En la cuenca de Tetzintla y Nonoalco, las cubetas de captación que se colocaron sobre la zona forestal y/o pastizal fueron arrastradas por el río, por tal motivo no se obtuvieron muestras de estos sitios.

En la cuenca de Otongo, en el sitio ubicado aguas arriba de la Zona Industrial se obtuvieron 2 mediciones, de las cuáles se observan cantidades bajas de sedimento con contenidos bajos de manganeso. En cambio en el sitio aguas debajo de la Zona Industrial, se presenta cerca de 1 kilogramo de sedimento con un porcentaje alto de manganeso en la primera muestra. En la cuenca de Tetzintla se obtuvieron 2 muestras del uso minero que presentan cantidades bajas en sedimento con baja concentración de manganeso. En la cuenca de Nonoalco sólo se obtuvo una muestra y ésta se localiza aguas abajo de la planta Nonoalco y presas de lodos, presentando 10 gr de sedimento con un alto contenido de manganeso (cuadro 5.4).

Cuadro 5.4 Porcentaje de manganeso en sedimentos

Cuenca	Ubicación	Sedimento (gr)	Mn (%)	PP (mm)	Caudal m ³ /seg
Otongo	Forestal-1	1	2.33	31.5	3.9
Otongo	Forestal-2	1.14	1.04	14.7	2.1
Otongo	Minero-1	968.45	25.85	31.5	7.8
Otongo	Minero-2	99.71	26.35	14.7	4.5
Tetzintla	Minero-1	1.34	2.61	35	6.4
Tetzintla	Minero-2	0.6	2.33	18.9	3.6
Nonoalco	Minero-1	10.71	21.14	32	7.8

5.2.3 Análisis y discusión de los resultados.

Los resultados muestran que las zonas que carecen de cobertura vegetal y que presentan material no consolidado, son altamente susceptibles a la erosión hídrica. Con las cubetas de captación se trató de cuantificar la cantidad de material que es depositado en los cauces de los ríos en diferentes usos de suelos, específicamente en forestal, pecuario y minero. En Otongo se obtuvieron dos muestras para uso forestal. En la primera muestra se cuantificó 1gr de sedimento para un litro, con una concentración de manganeso de

2.33%. Esta muestra presentó una precipitación de 31.5 mm en 24 horas, con la que se obtuvo un caudal de 3.9 m³/seg. La zona donde fue colocada la cubeta tiene un área de captación de 37.57 hectáreas y presenta el 100 % de uso forestal. La segunda muestra presentó 1.14 gr de sedimento en un litro y una concentración de manganeso de 1.04%. Para esta muestra se registró, en 24 horas, una precipitación de 14.7 mm, la que generó un caudal de 2.1 m³/seg. Este punto presenta la misma área de captación, y por lo tanto el mismo porcentaje de cobertura vegetal.

Con estos datos se deduce que las áreas que tienen uso de suelo forestal son menos susceptibles al fenómeno de escurrimiento, evitando así los efectos producidos por la erosividad, especialmente al golpeteo de las gotas de lluvia. También se debe considerar que este uso tiene suelos con características particulares, como son: cantidades altas de materia orgánica, buena estabilidad de agregados, alta conductividad hidráulica, buena infiltración, profundidad del suelo, etc. (en el caso de la zona de estudio se encuentran suelos con profundidades menores a 30 cm debido a las fuertes pendientes que se presentan) (INEGI, 1992). Estas características de los suelos son fundamentales para evitar la erosión.

Las ligeras concentraciones de manganeso en sedimento de estos puntos se deben a que el 17.5 % de su área de captación está sobre una franja de la facies manganesífera. El poco escurrimiento que se genera en estas zonas hace que el suelo, que se ha desarrollado a partir de la facies, llegue al cauce del río. Debe entenderse que en estas zonas, a pesar de tener buena cobertura vegetal, se produce el fenómeno de erosión, aunque la cantidad que se genera es reducida (cuadro 5.4).

Para el uso de suelo minero, en la cuenca de Otongo, se obtuvieron dos muestras en un sólo punto, que se ubicaban debajo del depósito de polvos de la Zona Industrial. Para la primera muestra se cuantificó 968.45 gr en un litro, con una concentración de 25.85 % de manganeso en el sedimento. Esta cantidad fue ocasionada por 31.5 mm de precipitación en 24 horas y se produjo un caudal de 7.8 m³/seg. La segunda muestra tomada presentó 99.71 gr de sedimento en un litro, con una concentración de manganeso de 23.25 %. La

precipitación que se obtuvo fue de 14.7 mm en 24 horas, que generó un caudal de 4.5 m³/seg. Este punto tiene un área de captación 225.4 hectáreas, de las cuáles el 96 % es uso forestal y el 4% es de uso minero, además de estar en un 8.7% en la facies manganesífera.

Estas altas cantidades de sedimento se deben a que el depósito de polvos se encuentra desprovisto de la capa vegetativa, lo que asociado a la no consolidación del material y las fuertes pendientes que se presentan (41°), provoca que cualquier precipitación, por ligera que sea, produzca la erosión del material y la contaminación del río. También se debe considerar que estos sedimentos presentan un porcentaje alto de manganeso (casi una cuarta parte del sedimento es manganeso). Como se ha mencionado anteriormente, en la Zona Industrial se ubica la planta de nodulación, en donde el mineral es calcinado para producir nódulos de manganeso. En este proceso se generan 200 toneladas al día de desechos del mineral que son depositados junto a la mina (comentario del personal de la unidad Molango). El manejo que se les da a los residuos mineros es deficiente, ya que éstos son depositados sobre una ladera con pendiente abrupta y muy cercano al río, por lo cuál se deduce que la vegetación, la precipitación y las características que presentan estos residuos son factores que favorecen la erosión hídrica de los suelos bajo uso minero.

En la cuenca Tetzintla se obtuvieron dos muestras en uso de suelo minero. Para la primera muestra se obtuvieron 1.34 gr de sedimento en un litro, con una concentración de 2.61 % de manganeso. En este punto se registró una precipitación de 35 mm en 24 horas y se produjo un caudal de 6.4 m³/seg. La segunda muestra presentó 0.6 gr de sedimento en un litro, con una concentración de 2.33 % de manganeso. Se registró una precipitación de 18 mm, lo que produjo un caudal de 3.6 m³/seg. Este sitio tiene un área de captación de 357.4 hectáreas, de las cuáles 19 % están ocupadas por pastizales, 53 % de uso forestal y 28 % de uso minero. Además el 16.4 % de esta área se ubica sobre la facies manganesífera.

A pesar de que la cuenca alta de Tetzintla es principalmente de uso de suelo minero, se registraron bajos contenidos de manganeso en sedimento y poca cantidad de sedimentos.

Ésto se atribuye a que la zona es, exclusivamente, de extracción y el material que se encuentra sobre los tajos a cielo abierto es duro y no presenta material fino (sólo se encuentran gravas de más de 2 cm). Sin embargo, esta parte alta de la cuenca sufre de derrumbes y deslizamientos de laderas, ya que la Compañía minera desestabiliza los terrenos con las formas de extracción. En general, esta zona no contribuye con una elevada cantidad de sedimentos por la forma en que se encuentra el mineral. Sin embargo se deben considerar otros problemas de mayor escala como lo son los derrumbes y deslizamientos de laderas inestables.

En la cuenca de Tetzintla se instalaron cubetas de captación en el cauce del río que baja de la comunidad Chipoco. Esta zona tiene un área de captación de 80.1 hectáreas, de las cuáles el 31 % son pastizales, el 67 % es forestal y el 2% es uso de suelo minero. En ese sitio se presentaron varios problemas, ya que los derrumbes y deslizamientos de rocas arrastraban con las cubetas que fueron instaladas. Por tal motivo no se obtuvieron muestras para este uso de suelo.

En la cuenca de Nonoalco se obtuvo una muestra para el uso de suelo minero, la cuál tiene 10.71 gr de sedimento en un litro, con una concentración de manganeso de 21.14 %. En este sitio se registró una precipitación de 32 mm, la que generó un caudal de 7.75 m³/seg. El área de captación es de 339.4 hectáreas, de la cual el 22 % corresponde a uso de suelo agrícola, 16 % a pastizales, 43 % a uso forestal y el 19 % es uso minero. Este sitio está influenciado por la facies manganesífera en un 29 % de su área. En esta zona, como en la cuenca de Otongo, se procesa el manganeso y se generan desechos del mineral. La cubeta fue colocada debajo de la planta procesadora y cubre una importante parte de las presas de lodo.

Los usos de suelo que posee este sitio en su área de captación son variados, en donde menos de la mitad tiene buena cobertura vegetal y el resto es vulnerable a los factores hidrodinámicos y a la esorrentía. En este sitio sucede lo mismo que en el depósito de polvos de Otongo. Es decir, el manejo que se les da a los residuos mineros es deficiente. Los residuos que se generan durante el procesamiento del mineral se contienen en presas

de lodos. Estas presas frecuentemente se saturan y se produce un derrame de los desechos alrededor de la presa, que son arrastrados a los ríos por las lluvias. Con estos resultados se comprueba que el uso de suelo minero, en especial donde se procesa y se desecha el mineral, es el principal causante de la contaminación de los sedimentos de los ríos con manganeso, además de que genera mayor cantidad de sedimentos.

Para el uso de suelo forestal de la cuenca de Nonoalco se presentaron varios problemas en las mediciones, ya que las cubetas que fueron puestas para captar sedimentos fueron robadas, además de que no estuvimos presentes los días en que se registraron fuertes precipitaciones.

Para entender mejor el efecto de la sedimentación y la importancia del tamaño de las partículas, se debe conocer el movimiento de los sedimentos en los ríos que se presenta en dos formas. Los sedimentos (en suspensión) están constituidos por partículas finas mantenidas en suspensión por la corriente y sólo se asientan cuando la velocidad de la corriente disminuye y las partículas sólidas de mayor tamaño son arrastradas a lo largo del lecho de la corriente. Por tal motivo, en la cuenca de Tetzintla se registraron bajas cantidades de sedimento, ya que el material que es arrastrado al río, consiste principalmente de gravas mayores a 2 cm y éstas no pueden ser capturadas por las cubetas de captación. En la cuenca de Otongo y Nonolaco las partículas son finas, debido a la trituración y procesamiento que sufre el mineral, lo que hace que al ser erosionado y depositado en los ríos se mantenga en suspensión. Ésto se puede observar en los ríos que se encuentran aguas debajo de las minas, ya que las aguas presentan una turbidez importante.

5.3 Conclusiones

Con los métodos utilizados en este capítulo se cuantificaron los aportes de sedimento a los cauces que hacen los diferentes usos de suelo en el Distrito Minero de Molango. Varios autores, como Dickinson y Bolton (1992), han escrito que para medir el movimiento de los sedimentos en las corrientes se pueden presentar algunos problemas, como el

tiempo que dura el experimento, las técnicas suelen ser caras, su precisión puede ser baja y que incluso si se dispone de datos correctos sobre el movimiento de una corriente no se sabe de donde procede el suelo y cuándo se produjo el movimiento. Sin embargo, con los resultados que se obtuvieron de los dos métodos, podemos constatar que el uso de suelo minero está aportando más sedimentos a los ríos. En general, estos métodos nos ayudan a localizar las zonas que tienen problemas de erosión y nos da una idea de la magnitud del problema.

Con los dos métodos se demuestra que las actividades mineras contribuyen a la contaminación de los ríos, ya que los sedimentos que son depositados pueden tener una concentración de manganeso hasta del 29 % y esto representa una fuente potencial para la degradación de los ecosistemas acuáticos. Esto se debe a que los depósitos de residuos mineros carecen de un buen manejo, a las características físicas del material y a la ubicación de éstos, ya que la mayoría de estos depósitos se encuentran en terrenos con pendientes fuertes.

Las cantidades de sedimento y las concentraciones de manganeso en sedimento son elevadas a partir de que la corriente cruza algún depósito minero y se reducen aguas abajo. Sin embargo las concentraciones de manganeso en agua son bajas, indicando que el manganeso no se encuentra en formas solubles.

La agricultura y los pastizales también contribuyen en muchas formas a deteriorar la calidad del agua y la sedimentación y la erosión puede estar especialmente asociada a las actividades agropecuarias. Como se demuestra en los resultados de agua y sedimento, los suelos que se han desarrollado a partir de la facies manganesífera y que tienen uso de suelo agrícola, favorecen a la contaminación de los ríos. Se conocen dos tipos de contaminantes a nivel agua: físicos y químicos. Los contaminantes físicos se producen por la pérdida de la capa arable de suelo y la degradación de la tierra como consecuencia de la erosión hídrica y da niveles de turbidez en el agua. Los contaminantes químicos están asociados a la transmisión de productos químicos absorbidos por el suelo, en el caso particular de la zona de estudio, al manganeso.

En esta zona se debe de aplicar medidas de conservación de los suelos para prevenir la sedimentación y contaminación de los ríos. Estas medidas deben ser aplicadas tanto por la Compañía Minera Autlán, como por la gente que practica la agricultura en la zona (FAO, 1997).

CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos con el método de parcelas de clavos de erosión señalan que en la zona estudiada el uso de suelo minero es más susceptible a la erosión hídrica que el uso de suelo agrícola. Sin embargo, la pérdida de suelo que sufrieron las parcelas agrícolas también es alarmante, ya que 50 toneladas de suelo en un lapso de tres meses es considerado alto.
- Los factores que influyen significativamente en el menor grado de erosión en las parcelas con uso de suelo agrícola es la cantidad de materia orgánica, la cubierta vegetal y la capacidad de infiltración que poseen los suelos. El mayor grado de erosión que se presenta en el uso de suelo minero, se debe a la inestabilidad que muestran los depósitos de residuos mineros; a factores naturales como la precipitación, la falta de materia orgánica y la baja capacidad de los materiales para absorber agua; y factores tales como el manejo, la pendiente del terreno y la falta de cubierta vegetal, esta última provocada por la deforestación de los bosques y el cambio en el uso del suelo.
- Con el muestreo de agua y sedimento y las cubetas de captación de sedimentos se demuestra que las actividades mineras contribuyen a la contaminación de los ríos, ya que los sedimentos que son depositados pueden tener una concentración de manganeso hasta del 29 %.
- Los resultados obtenidos con el muestreo de agua y sedimento y las cubetas de captación de sedimento muestran que las mayores concentraciones de manganeso en sedimento se presentan en los sitios localizados aguas abajo de las zonas mineras. Los principales factores a los que se debe que las zonas mineras estén aportando sedimentos ricos en manganeso, es que estos sitios carecen de cobertura vegetal, lo cual aunado a las fuertes pendientes acelera el proceso de erosión. Además se debe considerar el manejo que se les da a estas zonas mineras. Los sedimentos de las zonas agrícolas también contribuyen con la contaminación de los ríos, ya que los

suelos presentan una elevada pérdida, como se demostró en las parcelas de clavos de erosión.

- El Distrito Manganésífero ha estado sujeto a intensos cambios en el uso del suelo en las pasadas décadas. De 1976 al año 2000, se observa un aumento de 12852 ha de uso agrícola, y una pérdida de 18192 ha de cobertura forestal. Esta pérdida en 79% se debió a las actividades agrícolas, mientras que la minería sólo absorbió 0.2 %, las actividades pecuarias 20 % y el resto es atribuible a asentamientos humanos y cuerpos de agua.
- A nivel local las zonas que poseen usos de suelo minero sí sufren mayor erosión, pero a nivel cuenca las zonas agrícolas presentan mayor erosión, debido a que éstas cubren mayor superficie en la cuenca. La hipótesis formulada para el muestreo de agua y sedimentos se comprobó, ya que los resultados obtenidos en este muestreo, muestran que los ríos que se encuentran influenciados por alguna actividad minera presentan mayor sedimentación.
- La erosión de los suelos es un problema que debe ser cuantificado y controlado con medidas y métodos eficientes, ya que no sólo es un problema medio ambiental, sino también está asociado a problemas de tipo social y de degradación de los recursos naturales.
- Este estudio evaluó la erosión hídrica en suelos bajo diferentes usos de suelo y cobertura vegetal en el Distrito Minero de Molango, con el objeto de determinar qué actividad moviliza mayor cantidad de material, y si los sedimentos eran ricos en manganeso. Se sugiere repetir estudios similares a éste, tanto en esta zona como en otras regiones del país, a fin de generar información local sobre la dinámica de la erosión en diferentes condiciones y poder llevar a cabo prácticas de conservación de suelos para controlar la erosión del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandri R., Martínez A. (1988) Geología del Distrito Manganesífero de Molango, Hidalgo. *Geología económica de México*. Fondo de Cultura Económica, México. pp 401-408
- Aponte, D. (1999) Quedó superada la emergencia en Hidalgo; empieza la reconstrucción. Periódico la Jornada, 18 de Octubre 1999, sección Estados.
- ATSDR (2000). *Toxicological profile for lead*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. U.S. Department of Health and Human Services.
- Bennett, H.H. (1965) *Elementos de conservación de suelo*. Fondo de Cultura Económica, México, pp 81-115
- Bergsma, E., P. Charman, F. Gibbons, H. Hurni, W. Moldenhauer y S. Panichapong (2000) *Terminology for erosion and conservation*. ITC. Netherlands, pp 119-122.
- Bocco, G., J.L. Palacio y C.R. Valenzuela (1991) Erosión en cárcavas en el Sistema Volcánico Transmexicano. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM. Núm 22, 1991, pp 1 –19.
- Burrough, P.A. (1986) *Principles of Geographical Information's System for Land Resources Assessment*. Clarendon Press, Oxford.
- Burrough, P.A. y McDonnell (1998) *Principles of Geographical Information's System*. Oxford University Press.
- Chapingo (1991) *Manual de conservación del suelo y agua*. Colegio de postgraduados, Chapingo, México.
- Consejo de Recursos Minerales (1992). *Monografía Geológica - Minera del Estado de Hidalgo*. Publicación M-3e Secretaria de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaria de Minas e Industria Básica 95 pp, 3 mapas.
- Dickinson A. y Bolton P. (1992). A programme of monitoring sediment transport in North Central Luzon, Filipinas. En: *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*. IAHS Publication 210, págs. 483-492
- Dirección General de Estadística (1951). *VII Censo general de población, 1950*. Estado de Hidalgo. México.
- Djorovic M. (1977). Use of runoff plots to evaluate soil loss. En: *Conservation Guide No. 1*, FAO, Roma, págs. 143-146.

- FAO (1967) La erosión del suelo por el agua. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, PNUMA. Roma.
- FAO (1997) Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía (*boletín 68*). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma
- Figueroa, S.B. (1991) Agricultura sostenible y deterioro ambiental: la erosión del suelo, en: *Memorias del primer simposium Nacional sobre agricultura sostenible: una opción para el desarrollo sin deterioro ambiental*. Comisión de Estudios Ambientales. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Foucault, A. y Raoult, J. (1985) *Dictionnaire de géologie*. Masson, París.
- Galbao, L. y Corey, G. (1987) Manganese. *Serie vigilancia 6*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. México. pp 1-10
- García E. (1975) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen y sus aplicaciones a la Republica Mexicana*. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- García, N.H, R. García, R. Moreno y A. González (2002) Uso de sensores remotos y SIG para delimitar los cambios en el uso de suelo agrícola de 1970 a 1997 en el estado de Guanajuato. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Núm 47, 2002, pp 92 –112
- García-Lagos, R. (1981) Técnicas de percepción remota para inventarios de erosión de suelos, en: *Ingeniería Agronómica*, Colegio de Ingenieros Agrónomos de México. A.C.
- Geissert, D. y J.P. Rossignol (Coords) (1987). La Morfoedafología de la Ordenación de los paisajes rurales. Conceptos y primeras aplicaciones en México. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (INIREB) e Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTROM). México.
- Gregory, K.L., y Walling, D.E. (1973) *Drainage basin form and process a geomorphological approach*. Arnold Press, U.S.A.
- Gutiérrez, J. (1994) *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Síntesis, España, pp 12-41
- Houghton P.D y P.E.V Charman. (1986) Glossary of terms used in soil conservation. Soil Conservation Service of New South Wales.
- Huerta, M. (2001) *Minería y desarrollo regional: El caso de la explotación de manganeso en el Norte de Hidalgo*. Tesis de Maestría, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Hudson, N. (1982) *Conservación del suelo*. Reverte. España.

- IIASA (1993) Call for proposals, land use and global change: past, present and future. Institute for Applied Systems Analysis. Laxemburg, Austria.
- INEGI (1981). *X Censo general de población y vivienda, 1980*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1990). *XI Censo general de población y vivienda, 1990*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1992). *Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo, Aguascalientes*.
- INEGI (1994). *Cuaderno estadístico municipal. Molango de Escamilla*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1995). *Cuaderno estadístico municipal. Tlanchinol*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1995). *Cuaderno estadístico municipal. Zacualtipán*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1997). *Cuaderno estadístico municipal. Xochicoatlán*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1998). *Cuaderno estadístico municipal. Tepehuacán de Guerrero*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1999). *Cuaderno estadístico municipal. Lolotla*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (2000) Carta Topográfica Metztlán F14 D61 1: 50 000.
- INEGI (2000) Carta Topográfica Molango F14 D51 1: 50 000.
- Instituto de Salud Ambiente y Trabajo, S.C. (ISAT 2003) *Comunicación de Riesgos a la Salud ocasionados por la exposición al manganeso en ocho comunidades de la cuenca manganésifera del Estado de Hidalgo, México*. Programa de Municipios Saludables. SSA, ISAT, SSH.
- ITC (1997). Ilwis 2.1 for Windows. User's Guide. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands.
- Kirkby, M.J. (1993) *Erosión de suelos*. Limusa, México.
- López, J., L. Galicia y F. García (1996) "Aplicación de un SIG para la caracterización morfológica y la delimitación de unidades de laderas de una cuenca tropical estacional en Chamela, Jalisco, México." *Investigaciones geográficas Boletín*, núm. Especial 4, pp. 36-61 México.
- Llamas, J. (1989) *Hidrología general. Principios y aplicaciones*. Universidad Autónoma del Estado de México. México.

- Lugo, J. (1989) *Diccionario de geomorfología*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, México.
- Maguire, J.D. (1993) *Geographical Information Systems*. Longman Scientific and Technical.
- Meijerink, A.M.J. (1985) Background information for watershed management aspects of applied, dynamic geomorphology. Chapter VI. Erosion and sediment yields. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Netherlands. pp 20-32.
- Mitchell, J.K. y G.D. Bubenzer (1980) Estimación de la pérdida del suelo, en: *Erosión de suelos*. Kirby y Morgan. México. 35 – 87 p.
- Millar, C., L.M. Turk y H.D. Foth (1975) *Fundamentos de la ciencia del suelo*. Continental, México.
- Monroy, M. (2002) *Evaluación por contaminación de 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, U.A.S.L.P.
- Mwalyosi R., B. B. (1992) *Land use change and resource degradation in South West Masailand, Tanzania*. Environmental conservation 19 (2), pp 145- 152
- Nuñez, S. J. (2001) *Manejo y conservación de suelos*. Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica.
- Oropeza, M.J. (1980) *Evaluación de la erosión hídrica en las cuencas de los ríos Texcoco y Chapingo*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México.
- Ozemoy, V.M. (1981) *Evaluating computerized geographic information system using decisión análisis*. Interfaces.
- Pizarro, R. (1997) "Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos de la Pre-Cordillera Andina y el Valle Central de la VII región". *VI Jornada del CONAPHI-Chile*, pp 1- 16 Chile.
- Phondekar, D. J. y V. S. Phadke (1993). *Impact of deforestation on rural land use: a case study of Budhawale*, en Onkar S., N. Prithvish, V. K. Kumra y S. Jagadish (Eds, *Frontiers in environmental geography*, concept publishing company, New Delhi, India, p.p 125 - 136
- Reinmann, C. and Caritat, P. (1998). *Chemical elements in the environment*. Springer, Germany. 198 – 201.

- Sánchez, A. y Sánchez, M. T. (1992) *Los mineros del manganeso: aspectos de la organización territorial de la explotación de ferrosos en el Norte de Hidalgo*, Instituto Hidalguense de la cultura, Pachuca, México.
- Santos_Burgoa C, Mercado LA, Arechiga-Serrano R, Cano-Valle F, Eden-Wynter RA, Texcalac-Sangrador JL, Villa-Barragán JP, Rodríguez-Agudelo Y, Montes S (2001). *Exposure to manganese: health effects on the general population, a pilot study in central Mexico*. Environ Res. Feb; 85 (2): 90-104.
- SARH (1975). Conservación del Suelo y el Agua. Dirección General de Conservación del Suelo y Agua. México.
- Schlichting, E., H.P. Blume and K.Stahr. (1995) *Bodenkundliches Praktikum*. 2a ed., Verlag Paul Perey, Hamburg and Berlín, Alemania.
- Secretaría de Economía. Diario Oficial del día miércoles 15 de mayo de 2002.
- Secretaría de Industria y Comercio (1964). VIII Censo general de población, 1960. Estado de Hidalgo. México.
- Secretaría de Industria y Comercio (1971). IX Censo general de población, 1970. Estado de Hidalgo. México.
- S.P.P (1981). Atlas Nacional del Medio Físico. Escala 1:1, 000,000. Volumen I y II. Secretaria de programación y presupuesto, México.
- Selby, M.J. (1982) *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press. Oxford.
- Siebe. C y S. Cram (2003) Proyecto "Comportamiento del manganeso en los suelos, aguas y plantas del Distrito Minero de Molango, Edo, Hidalgo" Informe final. Laboratorio de Edafología Ambiental, Instituto de Geología, UNAM.
- Siebe. C., R. Jahn y K. Stahr (1996) *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., Publicación especial 4, México.
- Smith, T.R. (1987) *Requirement and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems*. International Journal Geographic Information Systems 1, 1987.
- Star y Estes (1990) *Of maps and myths*, International Journal Geographic Information Systems.
- Takei A., Kobaski S. y Fukushima Y. (1981). Erosion and sediment transport measurement in a weathered granite mountain area. En: *Erosion and Sediment Transport Measurement*, Actas del Simposio de Florencia, IAHS Publ. No. 133, págs. 493-502.

- Terrazas, J.G (1983) Obtención de Modelos matemáticos para predecir erosión en función del clima en la República Mexicana. Revista Chapingo. Universidad Autónoma de Chapingo. Sec. Génesis, Morfología y Suelos. Chapingo, México.
- Zachar, D. (1982) *Soil erosion*. Elsevier Scientific Publishing Company. Canadá.
- Valenzuela, C. R. (1988) "Ilwis Overview", *ITC Journal*, (1), pp 3-14.

INTERNET

- Basan, R. Manganese "Exposure in General population resident in a Mining District, Mexico" <http://web.idre.ca/es/ev-41180-201-1-00_topic.html> (fecha de consulta 11 Feb. 2004).
- CONACYT Gobierno del Estado de Hidalgo. "Determinar y valorar los riesgos y posibles daños a la salud de la población de la región minera de Molango, ocasionado por la exposición antropogénica y natural al manganeso". "Demanda 2.2 Área Salud". 18 Feb. 2004 <http://www.conacyt.mx/fondos/hidalgo/india_hidalgo.html> (fecha de consulta 30 Mar. 2004).
- "Manganese and water quality" <<http://state.ky.us/nrepc/water/ramp/mmag.htm>> (fecha de consulta 20 Sep. 2003).
- Minera Autlán. "Unidades Nonoalco, Naopa y Molango". "Unidades Mineras". <<http://www.autlan.com.mx/inicio.htm>> (fecha de consulta 15 Nov. 2003).
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. "Degradación del suelo". "El medio ambiente en México". <http://www.semarnat.gob.mx/wps/portal/.cmd/cs/.ce/155/.s/3515/_s.155/3512> (fecha de consulta 15 Feb. 2004).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandri R., Martínez A. (1988) Geología del Distrito Manganesífero de Molango, Hidalgo. *Geología económica de México*. Fondo de Cultura Económica, México. pp 401-408
- Aponte, D. (1999) Quedó superada la emergencia en Hidalgo; empieza la reconstrucción. Periódico la Jornada, 18 de Octubre 1999, sección Estados.
- ATSDR (2000). *Toxicological profile for lead*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. U.S. Department of Health and Human Services.
- Bennett, H.H. (1965) *Elementos de conservación de suelo*. Fondo de Cultura Económica, México, pp 81-115
- Bergsma, E., P. Charman, F. Gibbons, H. Hurni, W. Moldenhauer y S. Panichapong (2000) *Terminology for erosion and conservation*. ITC. Netherlands, pp 119-122.
- Bocco, G., J.L. Palacio y C.R. Valenzuela (1991) Erosión en cárcavas en el Sistema Volcánico Transmexicano. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM. Núm 22, 1991, pp 1 –19.
- Burrough, P.A. (1986) *Principles of Geographical Information's System for Land Resources Assessment*. Clarendon Press, Oxford.
- Burrough, P.A. y McDonnell (1998) *Principles of Geographical Information's System*. Oxford University Press.
- Chapingo (1991) *Manual de conservación del suelo y agua*. Colegio de postgraduados, Chapingo, México.
- Consejo de Recursos Minerales (1992). *Monografía Geológica - Minera del Estado de Hidalgo*. Publicación M-3e Secretaria de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaria de Minas e Industria Básica 95 pp, 3 mapas.
- Dickinson A. y Bolton P. (1992). A programme of monitoring sediment transport in North Central Luzon, Filipinas. En: *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*. IAHS Publication 210, págs. 483-492
- Dirección General de Estadística (1951). *VII Censo general de población, 1950*. Estado de Hidalgo. México.
- Djorovic M. (1977). Use of runoff plots to evaluate soil loss. En: *Conservation Guide No. 1*, FAO, Roma, págs. 143-146.

- FAO (1967) La erosión del suelo por el agua. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, PNUMA. Roma.
- FAO (1997) Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía (*boletín 68*). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma
- Figueroa, S.B. (1991) Agricultura sostenible y deterioro ambiental: la erosión del suelo, en: *Memorias del primer simposium Nacional sobre agricultura sostenible: una opción para el desarrollo sin deterioro ambiental*. Comisión de Estudios Ambientales. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Foucault, A. y Raoult, J. (1985) *Dictionnaire de géologie*. Masson, París.
- Galbao, L. y Corey, G. (1987) Manganese. *Serie vigilancia 6*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. México. pp 1-10
- García E. (1975) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen y sus aplicaciones a la Republica Mexicana*. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- García, N.H, R. García, R. Moreno y A. González (2002) Uso de sensores remotos y SIG para delimitar los cambios en el uso de suelo agrícola de 1970 a 1997 en el estado de Guanajuato. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Núm 47, 2002, pp 92 –112
- García-Lagos, R. (1981) Técnicas de percepción remota para inventarios de erosión de suelos, en: *Ingeniería Agronómica*, Colegio de Ingenieros Agrónomos de México. A.C.
- Geissert, D. y J.P. Rossignol (Coords) (1987). La Morfoedafología de la Ordenación de los paisajes rurales. Conceptos y primeras aplicaciones en México. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (INIREB) e Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTROM). México.
- Gregory, K.L., y Walling, D.E. (1973) *Drainage basin form and process a geomorphological approach*. Arnold Press, U.S.A.
- Gutiérrez, J. (1994) *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Síntesis, España, pp 12-41
- Houghton P.D y P.E.V Charman. (1986) Glossary of terms used in soil conservation. Soil Conservation Service of New South Wales.
- Huerta, M. (2001) *Minería y desarrollo regional: El caso de la explotación de manganeso en el Norte de Hidalgo*. Tesis de Maestría, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Hudson, N. (1982) *Conservación del suelo*. Reverte. España.

- IIASA (1993) Call for proposals, land use and global change: past, present and future. Institute for Applied Systems Analysis. Laxemburg, Austria.
- INEGI (1981). *X Censo general de población y vivienda, 1980*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1990). *XI Censo general de población y vivienda, 1990*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1992). *Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo, Aguascalientes*.
- INEGI (1994). *Cuaderno estadístico municipal. Molango de Escamilla*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1995). *Cuaderno estadístico municipal. Tlanchinol*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1995). *Cuaderno estadístico municipal. Zacualtipán*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1997). *Cuaderno estadístico municipal. Xochicoatlán*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1998). *Cuaderno estadístico municipal. Tepehuacán de Guerrero*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (1999). *Cuaderno estadístico municipal. Lolotla*. Estado de Hidalgo, México.
- INEGI (2000) Carta Topográfica Metztlán F14 D61 1: 50 000.
- INEGI (2000) Carta Topográfica Molango F14 D51 1: 50 000.
- Instituto de Salud Ambiente y Trabajo, S.C. (ISAT 2003) *Comunicación de Riesgos a la Salud ocasionados por la exposición al manganeso en ocho comunidades de la cuenca manganésifera del Estado de Hidalgo, México*. Programa de Municipios Saludables. SSA, ISAT, SSH.
- ITC (1997). Ilwis 2.1 for Windows. User's Guide. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands.
- Kirkby, M.J. (1993) *Erosión de suelos*. Limusa, México.
- López, J., L. Galicia y F. García (1996) "Aplicación de un SIG para la caracterización morfológica y la delimitación de unidades de laderas de una cuenca tropical estacional en Chamela, Jalisco, México." *Investigaciones geográficas Boletín*, núm. Especial 4, pp. 36-61 México.
- Llamas, J. (1989) *Hidrología general. Principios y aplicaciones*. Universidad Autónoma del Estado de México. México.

- Lugo, J. (1989) *Diccionario de geomorfología*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, México.
- Maguire, J.D. (1993) *Geographical Information Systems*. Longman Scientific and Technical.
- Meijerink, A.M.J. (1985) Background information for watershed management aspects of applied, dynamic geomorphology. Chapter VI. Erosion and sediment yields. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Netherlands. pp 20-32.
- Mitchell, J.K. y G.D. Bubenzer (1980) Estimación de la pérdida del suelo, en: *Erosión de suelos*. Kirby y Morgan. México. 35 – 87 p.
- Millar, C., L.M. Turk y H.D. Foth (1975) *Fundamentos de la ciencia del suelo*. Continental, México.
- Monroy, M. (2002) *Evaluación por contaminación de 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, U.A.S.L.P.
- Mwalyosi R., B. B. (1992) *Land use change and resource degradation in South West Masailand, Tanzania*. Environmental conservation 19 (2), pp 145- 152
- Nuñez, S. J. (2001) *Manejo y conservación de suelos*. Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica.
- Oropeza, M.J. (1980) *Evaluación de la erosión hídrica en las cuencas de los ríos Texcoco y Chapingo*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México.
- Ozemoy, V.M. (1981) *Evaluating computerized geographic information system using decisión análisis*. Interfaces.
- Pizarro, R. (1997) "Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos de la Pre-Cordillera Andina y el Valle Central de la VII región". *VI Jornada del CONAPHI-Chile*, pp 1- 16 Chile.
- Phondekar, D. J. y V. S. Phadke (1993). *Impact of deforestation on rural land use: a case study of Budhawale*, en Onkar S., N. Prithvish, V. K. Kumra y S. Jagadish (Eds, *Frontiers in environmental geography*, concept publishing company, New Delhi, India, p.p 125 - 136
- Reinmann, C. and Caritat, P. (1998). *Chemical elements in the environment*. Springer, Germany. 198 – 201.

- Sánchez, A. y Sánchez, M. T. (1992) *Los mineros del manganeso: aspectos de la organización territorial de la explotación de ferrosos en el Norte de Hidalgo*, Instituto Hidalguense de la cultura, Pachuca, México.
- Santos_Burgoa C, Mercado LA, Arechiga-Serrano R, Cano-Valle F, Eden-Wynter RA, Texcalac-Sangrador JL, Villa-Barragán JP, Rodríguez-Agudelo Y, Montes S (2001). *Exposure to manganese: health effects on the general population, a pilot study in central Mexico*. Environ Res. Feb; 85 (2): 90-104.
- SARH (1975). Conservación del Suelo y el Agua. Dirección General de Conservación del Suelo y Agua. México.
- Schlichting, E., H.P. Blume and K.Stahr. (1995) *Bodenkundliches Praktikum*. 2a ed., Verlag Paul Perey, Hamburg and Berlín, Alemania.
- Secretaría de Economía. Diario Oficial del día miércoles 15 de mayo de 2002.
- Secretaría de Industria y Comercio (1964). VIII Censo general de población, 1960. Estado de Hidalgo. México.
- Secretaría de Industria y Comercio (1971). IX Censo general de población, 1970. Estado de Hidalgo. México.
- S.P.P (1981). Atlas Nacional del Medio Físico. Escala 1:1, 000,000. Volumen I y II. Secretaria de programación y presupuesto, México.
- Selby, M.J. (1982) *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press. Oxford.
- Siebe. C y S. Cram (2003) Proyecto "Comportamiento del manganeso en los suelos, aguas y plantas del Distrito Minero de Molango, Edo, Hidalgo" Informe final. Laboratorio de Edafología Ambiental, Instituto de Geología, UNAM.
- Siebe. C., R. Jahn y K. Stahr (1996) *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., Publicación especial 4, México.
- Smith, T.R. (1987) *Requirement and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems*. International Journal Geographic Information Systems 1, 1987.
- Star y Estes (1990) *Of maps and myths*, International Journal Geographic Information Systems.
- Takei A., Kobaski S. y Fukushima Y. (1981). Erosion and sediment transport measurement in a weathered granite mountain area. En: *Erosion and Sediment Transport Measurement*, Actas del Simposio de Florencia, IAHS Publ. No. 133, págs. 493-502.

- Terrazas, J.G (1983) Obtención de Modelos matemáticos para predecir erosión en función del clima en la República Mexicana. Revista Chapingo. Universidad Autónoma de Chapingo. Sec. Génesis, Morfología y Suelos. Chapingo, México.
- Zachar, D. (1982) *Soil erosion*. Elsevier Scientific Publishing Company. Canadá.
- Valenzuela, C. R. (1988) "Ilwis Overview", *ITC Journal*, (1), pp 3-14.

INTERNET

- Basan, R. Manganese "Exposure in General population resident in a Mining District, Mexico" <http://web.idre.ca/es/ev-41180-201-1-00_topic.html> (fecha de consulta 11 Feb. 2004).
- CONACYT Gobierno del Estado de Hidalgo. "Determinar y valorar los riesgos y posibles daños a la salud de la población de la región minera de Molango, ocasionado por la exposición antropogénica y natural al manganeso". "Demanda 2.2 Área Salud". 18 Feb. 2004 <http://www.conacyt.mx/fondos/hidalgo/india_hidalgo.html> (fecha de consulta 30 Mar. 2004).
- "Manganese and water quality" <<http://state.ky.us/nrepc/water/ramp/mmag.htm>> (fecha de consulta 20 Sep. 2003).
- Minera Autlán. "Unidades Nonoalco, Naopa y Molango". "Unidades Mineras". <<http://www.autlan.com.mx/inicio.htm>> (fecha de consulta 15 Nov. 2003).
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. "Degradación del suelo". "El medio ambiente en México". <http://www.semarnat.gob.mx/wps/portal/.cmd/cs/.ce/155/.s/3515/_s.155/3512> (fecha de consulta 15 Feb. 2004).

ANEXO 1
Registros de erosión y sedimentación de las parcelas estudiadas (continúa)

Depósito de polvos Zona Industrial Acatitla		Clavos marcados a 10 cm		1ª Medición		2ª Medición		3ª Medición		4ª Medición		Resultados		
Parte baja	Pendiente 9°	Longitud 100m	Densidad aparente 1.60	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	1	2
				9.1	8.4	8.7	8.4	8.7	8.7	8.7	8.9	8.7	1.6	0.5
				11.2	9.8	1.4	9.8	10.5	10.5	10.5	11	10.5	1.4	2.4
				9.2	8.7	0.5	8.7	9.8	9.8	9.8	9.8	0	1.3	1.1
				8.9	8.9	7.5	8.6	9.6	9.6	9.6	10.6	1	1.4	2
				9.3	9.3	7.5	9.5	8.5	8.5	8.5	8.9	0.4	2.5	1.4
				8.8	10.2	1.4	10.2	10.1	10.1	10.1	10.1	0	0.7	0.4
				10.7	10.7	9.5	1.2	9.9	9.9	9.9	11	1.1	1.2	2.2
				0.8	0.7	0.1	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.1	0.93	0.2
				6.4	6.4	6.8	0.4	6.8	6.9	6.9	7.1	0.2	3.6	0.7
				2.5	2.5	0	0	2.6	2.6	2.6	2.7	0.1	7.5	0.2
				3.1	2.9	0.2	2.9	3.2	3.2	3.2	3.4	0.2	7.1	0.5
				6.3	6.3	5.5	5.5	5.8	5.8	5.8	5.9	0.1	4.5	0.4
				7.5	6.9	0.6	6.9	7.5	7.5	7.5	7.5	0	3.1	0.6
				8.8	8.8	8.4	8.4	8.8	8.8	8.8	9.1	0.3	1.6	0.7
				10.1	10.1	9.6	0.5	9.6	9.8	9.8	10.4	0.6	0.5	0.9
				5.2	5.2	6.1	0.9	6.1	6.1	6.1	5.9	0.2	5	0.9
				5.5	4.7	0.8	4.7	5.5	5.5	5.5	5.6	0.1	5.3	0.9
				6.1	6.1	6.6	0.5	6.6	6.7	6.7	7.5	0.8	3.9	1.4
				8.6	8.6	8.9	0.3	8.9	9.1	9.1	9.1	0	1.4	0.5
				9.7	9.4	0.3	9.4	9.4	9.4	9.4	9.7	0.3	0.6	0.3
				9.3	8.6	0.7	8.6	9	9	9	9.5	0.5	1.4	0.9
				8.1	7.5	0.6	7.5	7.9	7.9	7.9	8	0.1	2.5	0.5
				8.9	8.5	0.4	8.5	8.8	8.8	8.8	9.1	0.3	1.5	0.6
				10.1	10.1	10.9	0.8	10.5	10.5	10.5	10.3	0.2	0.6	0.9
				9.2	9.2	9.1	0.1	9.1	9.1	9.1	9.1	0	0.9	0
				6.7	6.7	5.6	1.1	6.1	6.1	6.1	6.9	0.8	4.4	1.3
				9.6	9.6	8.9	0.7	8.9	9	9	9.7	0.7	1.1	0.8
				9.1	9.1	8.6	0.5	8.6	9.3	9.3	9.4	0.1	1.4	0.8
				8.9	8.9	9.1	0.2	9.1	9.1	9.1	9.1	0	1.1	0.2
				Σ90	2.17	0.07	0.45	0.16	0.02	0.34	0.01	0.29	2.66	0.85
				promedio*10	21.73	0.70	4.53	1.57	0.17	3.43	0.07	2.90	26.57	8.53
				promedio*4a*10	347.73	11.20	72.53	25.07	2.67	54.93	1.07	46.40	425.07	136.53
				Nota										
				1 = Sedimentación										
				2 = Erosión										

Parcela de maíz frente a Zona Industrial Acatitla																
Parte alta																
Pendiente 35° Clavos marcados a 5cm																
Longitud 40m																
Densidad aparente 0.86																
1º Medición			2º Medición				3º Medición				4º Medición				Resultados	
cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	1	2
5.1		0.1	5.1	5.3		0.2	5.3	5.6		0.3	5.6	5.7		0.1	0	0.7
5.5		0.5	5.5	5.4	0.1		5.4	5.4			5.4	5.6		0.2	0.1	0.7
5.1		0.1	5.1	5.1			5.1	5.2		0.1	5.2	5.2			0	0.2
5.3		0.3	5.3	5.6		0.3	5.6	6		0.4	6	6.1		0.1	0	1.1
5.2		0.2	5.2	5.8		0.6	5.8	6.2		0.4	6.2	6.5		0.3	0	1.5
5.4		0.4	5.4	5.2	0.2		5.2	4.9	0.3		4.9	5.2		0.3	0.5	0.7
*			*	*			*	*			*	*			0	0
5.1		0.1	5.1	5.4		0.3	5.4	5.4			5.4	5.6		0.2	0	0.6
5.5		0.5	5.5	5.9		0.4	5.9	6.1		0.2	6.1	6.3		0.2	0	1.3
5.3		0.3	5.3	6		0.7	6	6.5		0.5	6.5	6.8		0.3	0	1.8
*			*	*			*	*			*	*			0	0
5	0	0	5	4.7	0.3		4.7	4.6	0.1		4.6	4.6	0	0	0.4	0
5.2		0.2	5.2	5	0.2		5	4.7	0.3		4.7	4.5	0.2		0.7	0.2
5.6		0.6	5.6	5.7		0.1	5.7	6.2		0.5	6.2	6.6		0.4	0	1.6
5.2		0.2	5.2	5.1	0.1		5.1	4.8	0.3		4.8	5.8		1	0.4	1.2
5.4		0.4	5.4	5.2	0.2		5.2	5.7		0.5	5.7	6.2		0.5	0.2	1.4
6		1	6	5.7	0.3		5.7	5.9		0.2	5.9	5.9	0	0	0.3	1.2
5.4		0.4	5.4	5.1	0.3		5.1	4.7	0.4		4.7	5.1		0.4	0.7	0.8
5.7		0.7	5.7	5.5	0.2		5.5	5.9		0.4	5.9	6.1		0.2	0.2	1.3
5.2		0.2	5.2	5.8		0.6	5.8	6.3		0.5	6.3	6.5		0.2	0	1.5
5.8		0.8	5.8	5.5	0.3		5.5	5.4	0.1		5.4	5.4	0	0	0.4	0.8
5	0	0	5	4.9	0.1		4.9	4.9	0	0	4.9	4.6	0.3		0.4	0
5	0	0	5	4.7	0.3		4.7	4.6	0.1		4.6	4.6	0	0	0.4	0
5.1		0.1	5.1	5.3		0.2	5.3	5.4		0.1	5.4	5.4	0	0	0	0.4
5.2		0.2	5.2	5.7		0.5	5.7	6		0.3	6	6.5		0.5	0	1.5
5.6		0.6	5.6	6		0.4	6	6.4		0.4	6.4	6.6		0.2	0	1.6
5.2		0.2	5.2	4.9	0.3		4.9	4.8	0.1		4.8	5.4		0.6	0.4	0.8
5		0	5	4.8	0.2		4.8	5		0.2	5	5	0	0	0.2	0.2
*			*				*	*			*	*			0	0
5	0	0	5	5	0	0	5	5.1		0.1	5.1	5.2		0.1	0	0.2
$\Sigma/30$	0	0.27			0.10	0.14			0.06	0.17			0.02	0.19	0.18	0.75
promedio*10	0.00	2.70			1.03	1.37			0.57	1.70			0.17	1.90	1.77	7.53
promedio*da*10	0.00	23.22			8.89	11.75			4.87	14.62			1.43	16.34	15.19	64.79
Nota																
1 = Sedimentación																
2 = Erosión																

Parcela de maíz frente a Zona Industrial Acatitla																
Parte baja																
Pendiente 24° Clavos marcados a 7cm																
Longitud 40 m																
Densidad aparente 0.74																
1º medición			2º medición				3º medición				4º Medición				Resultados	
cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	1	2
7.7		0.7	7.7	7.3	0.4		7.3	6.8	0.5		6.8	6.2	0.6		1.5	0.7
7	0	0	7	6.2	0.8		6.2	7.3		1.1	7.3	8.4		1.1	0.8	2.2
7.1		0.1	7.1	6.8	0.3		6.8	6.7	0.1		6.7	6.9		0.2	0.4	0.3
7.5		0.5	7.5	7.2	0.3		7.2	6.5	0.7		6.5	6	0.5		1.5	0.5
7.1		0.1	7.1	7.3		0.2	7.3	7.5		0.2	7.5	7.5	0	0	0	0.5
6.7	0.3		6.7	6	0.7		6	7		1	7	7.5		0.5	1	1.5
7.2		0.2	7.2	7	0.2		7	6.8	0.2		6.8	6.6	0.2		0.6	0.2
7.3		0.3	7.3	7.1	0.2		7.1	7.5		0.4	7.5	8		0.5	0.2	1.2
7.6		0.6	7.6	7.4	0.2		7.4	7.5		0.1	7.5	8.1		0.6	0.2	1.3
7.1		0.1	7.1	7	0.1		7	7	0	0	7	7	0	0	0.1	0.1
7.4		0.4	7.4	6.9	0.5		6.9	6.6	0.3		6.6	6.3	0.3		1.1	0.4
8		1	8	6.9	1.1		6.9	7.1		0.2	7.1	7.6		0.5	1.1	1.7
6.9	0.1		6.9	6.6	0.3		6.6	6.9		0.3	6.9	7.4		0.5	0.4	0.8
6.9	0.1		6.9	6.6	0.3		6.6	6.6	0	0	6.6	6.6	0	0	0.4	0
7			7	6.9	0.1		6.9	7.4		0.5	7.4	8.4		1	0.1	1.5
7.1		0.1	7.1	6.9	0.2		6.9	6.7	0.2		6.7	6.8		0.1	0.4	0.2
6.7	0.3		6.7	7		0.3	7	7.4		0.4	7.4	7.9		0.5	0.3	1.2
6.9	0.1		6.9	6.9	0	0	6.9	6.9	0	0	6.9	6.9	0	0	0.1	0
6.8	0.2		6.8	6.5	0.3		6.5	6.4	0.1		6.4	6.1	0.3		0.9	0
6.7	0.3		6.7	6.6	0.1		6.6	6.4	0.2		6.4	6.4	0	0	0.6	0
7.5		0.5	7.5	7.1	0.4		7.1	8.5		1.4	8.5	10.3		1.8	0.4	3.7
6.9	0.1		6.9	7		0.1	7	7.1		0.1	7.1	7.1			0.1	0.2
7.1		0.1	7.1	6.9	0.2		6.9	7.2		0.3	7.2	7.6		0.4	0.2	0.8
6.9	0.1		6.9	6.7	0.2		6.7	8.8		2.1	8.8	9.7		0.9	0.3	3
7.3		0.3	7.3	7	0.3		7	7.2		0.2	7.2	7.2	0	0	0.3	0.5
7	0	0	7	6.7	0.3		6.7	6.6	0.1		6.6	6.6	0	0	0.4	0
7.4		0.4	7.4	7.1	0.3		7.1	7.3		0.2	7.3	7.5		0.2	0.3	0.8
7.1		0.1	7.1	6.8	0.3		6.8	6.6	0.2		6.6	6.6	0	0	0.5	0.1
7	0	0	7	7.1		0.1	7.1	7.1	0	0	7.1	7.1	0	0	0	0.1
7.1		0.1	7.1	7.3		0.2	7.3	7.6		0.3	7.6	7.6	0	0	0	0.6
$\Sigma/30$	0.05	0.19			0.27	0.03			0.09	0.29			0.06	0.29	0.47	0.80
promedio*10	0.53	1.87			2.70	0.30			0.87	2.93			0.63	2.93	4.73	8.03
promedio*da*10	3.95	13.81			19.98	2.22			6.41	21.71			4.69	21.71	35.03	59.45
Nota																
1 = Sedimentación																
2 = Erosión																

Parcela de maíz en Nonoalco																
Parte alta																
Pendiente 22° Clavos marcados a 3 cm																
Longitud 30m																
Densidad aparente 1.15																
1º medición			2º medición				3º medición				4º medición				Resultados	
cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	1	2
4		1	4	3	1		3	1	2		1				3	1
5		2	5	5.6		0.6	5.6	5.8		0.2	5.8	5.7	0.1		0.1	2.8
4.5		1.5	4.5	4.1	0.4		4.1	4.7		0.6	4.7	4.2	0.5		0.9	2.1
3.8		0.8	3.8	3.9		0.1	3.9	3.8	0.1		3.8	3.4	0.4		0.5	0.9
4.3		1.3	4.3	4	0.3		4	4.1		0.1	4.1	4.2		0.1	0.3	1.5
4.8		1.8	4.8	4.2	0.6		4.2	5.1		0.9	5.1	5.5		0.4	0.6	3.1
3.5		0.5	3.5	3.9		0.4	3.9	4.1		0.2	4.1	3.9	0.2		0.2	1.1
2	1		2	2.3		0.3	2.3	2.6		0.3	2.6	2.5	0.1		1.1	0.6
3.7		0.7	3.7	4.4		0.7	4.4	3.8	0.6		3.8	4.7		0.9	0.6	2.3
3.2		0.2	3.2	3.2	0	0	3.2	3.4		0.2	3.4	3.6		0.2	0	0.6
2.8	0.2		2.8	3.4		0.6	3.4	4.1		0.7	4.1	4.4		0.3	0.2	1.6
2.9	0.1		2.9	3.2		0.3	3.2	3.8		0.6	3.8	3.8		0	0.1	0.9
3.5		0.5	3.5	3.3		0.2	3.3	3.8		0.5	3.8	3.5	0.3		0.3	1.2
3.6		0.6	3.6	3.8		0.2	3.8	4.1		0.3	4.1	3.5	0.6		0.6	1.1
4		1	4	3.5	0.5		3.5	3.9		0.4	3.9	3.8	0.1		0.6	1.4
2.7	0.3		2.7	3.3		0.6	3.3	3.6		0.3	3.6	3.6	0		0.3	0.9
3.4		0.4	3.4	3.4	0	0	3.4	4.6		1.2	4.6	4.6	0		0	1.6
3.9		0.9	3.9	4.1	0.2		4.1	4.6		0.5	4.6	4.9		0.3	0.2	1.7
3.8		0.8	3.8	3.6	0.2		3.6	4.8		1.2	4.8	1	3.8		4	2
3	0	0	3	3.2		0.2	3.2	3.7		0.5	3.7	3.6	0.1		0.1	0.7
4.6		1.6	4.6	4.4	0.2		4.4	5		0.6	5	4.7	0.3		0.5	2.2
5.1		2.1	5.1	4.8	0.3		4.8	5.5		0.7	5.5	6.5		1	0.3	3.8
4.8		1.8	4.8	5.9		1.1	5.9	4.9	1		4.9	4.6	0.3		1.3	2.9
3.8		0.8	3.8	3.5	0.3		3.5	4		0.5	4				0.3	1.3
4.6		1.6	4.6	4.6	0	0	4.6	5.4		0.8	5.4	5.5		0.1	0	2.5
3.5		0.5	3.5	3.6		0.1	3.6	4.8		1.2	4.8	3.6	1.2		1.2	1.8
3.4		0.4	3.4	3	0.4		3	3.5		0.5	3.5	3.4	0.1		0.5	0.9
3.5		0.5	3.5	3.4	0.1		3.4	4.2		0.8	4.2	3.6	0.6		0.7	1.3
3.4		0.4	3.4	3.9		0.5	3.9	3.4	0.5		3.4	5.6		2.2	0.5	3.1
3.1		0.1	3.1	4.1		1	4.1	5		0.9	5	3.9	1.1		1.1	2
$\Sigma/30$	0.05	0.79			0.15	0.23			0.14	0.49			0.33	0.18	0.67	1.70
promedio*10	0.53	7.93			1.50	2.30			1.40	4.90			3.27	1.83	6.70	16.97
promedio*da*10	6.13	91.23			17.25	26.45			16.10	56.35			37.57	21.08	77.05	195.12
Nota																
1 = Sedimentación																
2 = Erosión																

Parcela de maíz en Nonoalco																
Parte baja																
Pendiente 11°																
Clavos marcados a 8 cm																
Longitud 35 m																
Densidad 1.23																
1º medición			2º medición				3º medición				4º Medición				Resultados	
cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	1	2
8.1		0.1	8.1	7.7	0.4		7.7	8		0.3	8	8	0		0.4	0.4
6.2	1.8		6.2	9		2.8	9	8.6	0.4		8.6	5.6	3		5.2	2.8
8.1		0.1	8.1	8.3		0.2	8.3	8.4		0.1	8.4	8.1	0.3		0.3	0.4
9		1	9	8.1	0.9		8.1	8.8		0.7	8.8	8	0.8		1.7	1.7
7.5	0.5		7.5	8.5		1	8.5	7.6	0.9		7.6	7.8		0.2	1.4	1.2
7.6	0.4		7.6	8.7		1.1	8.7	8.7	0	0	8.7	8.5	0.2		0.6	1.1
8	0	0	8	8.1		0.1	8.1	8.2		0.1	8.2	8.6		0.4	0	0.6
6.9	1.1		6.9	8		1.1	8	7.6	0.4		7.6	7.8		0.2	1.5	1.3
7.9	0.1		7.9	8.3		0.4	8.3	7.8	0.5		7.8	7.9		0.1	0.6	0.5
8.2		0.2	8.2	7.6	0.6		7.6	8.8		1.2	8.8	8.3	0.5		1.1	1.4
9.3		1.3	9.3	8.1	1.2		8.1	7.9	0.2		7.9	10.1		2.2	1.4	3.5
9.4		1.4	9.4	7.6	1.6		7.6	8.7		1.1	8.7	8.8		0.1	1.6	2.6
8.4		0.4	8.4	8.4	0	0	8.4	8.1	0.3		8.1	8.3		0.2	0.3	0.6
6.9	1.1		6.9	9.3		2.4	9.3	7.7	1.6		7.7	8.5		0.8	2.7	3.2
7.6	0.4		7.6	10		2.4	10	8.4	1.6		8.4	8.1	0.3		2.3	2.4
8.4		0.4	8.4	7.1	1.3		7.1	7.8		0.7	7.8	8.6		0.8	1.3	1.9
8.6		0.6	8.6	11.5		2.9	11.5	8.7	2.8		8.7	8.3	0.4		3.2	3.5
7.6	0.4		7.6	6.8	0.8		6.8	8.1		1.3	8.1	7.8	0.3		1.5	1.3
7.9	0.1		7.9	9		1.1	9	8.5	0.5		8.5	7.9		0.6	0.6	1.7
8.6		0.6	8.6	8	0.4		8	9		1	9	8.6	0.4		0.8	1.6
7.6	0.4		7.6	9.6		2	9.6	7.7	1.9		7.7	7.8		0.1	2.3	2.1
9		1	9	8.1	0.9		8.1	7.9	0.2		7.9	7.5	0.4		1.5	1
6	2		6	8.1		2.1	8.1	6.3	1.8		6.3	7.2		0.9	3.8	3
12		4	12	8.6	3.4		8.6	11.5		2.9	11.5	11.2	0.3		3.7	6.9
7.9	0.1		7.9	8.6		0.7	8.6	8.1	0.5		8.1	8	0.1		0.7	0.7
6.1	1.9		6.1	7		0.9	7	5.4	1.6		5.4	7		1.6	3.5	2.5
6.2	1.8		6.2	8.2		2	8.2	5.5	2.7		5.5	6.8		1.3	4.5	3.3
8.5		0.5	8.5	8.6		0.1	8.6	7.7	0.9		7.7	7.8		0.1	0.9	0.7
8.2		0.2	8.2	6.5	1.7		6.5	7.1		0.6	7.1	8.1		1	1.7	1.8
8.6		0.6	8.6	5	3.6		5	6		1	6	7		1	3.6	2.6
$\Sigma/30$	0.40	0.41			0.56	0.78			0.63	0.37			0.23	0.39	1.82	1.94
promedio*10	4.03	4.13			5.60	7.77			6.27	3.67			2.33	3.87	18.23	19.43
promedio*da*10	49.61	50.84			68.88	95.53			77.08	45.10			28.70	47.56	224.27	239.03
Nota																
1 = Sedimentación																
2 = Erosión																

Presa de lodos en Nonoalco																	
Parte alta																	
Pendiente 45° Clavos marcados a 4 cm																	
Longitud 15m																	
Densidad aparente 1.2																	
1º Medición			2º Medición				3º Medición				4º medición				Resultados		
cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	1	2	
3.3	0.7		3.3	3.9		0.6	3.9	2.6	1.3		2.6				2	0.6	
4.4		0.4	4.4	4.1	0.3		4.1	3.9	0.2		3.9	4.9		1	0.5	1.4	
4.3		0.3	4.3	4	0.3		4	4.2		0.2	4.2	4.4		0.2	0.3	0.7	
4.4		0.4	4.4	4.5		0.1	4.5	3.5	1		3.5	4.9		1.4	1	1.9	
4.3		0.3	4.3	2.3	2		2.3	2.5		0.2	2.5	3.5		1	2	1.5	
4.7		0.7	4.7	5.2		0.5	5.2	4.4	0.8		4.4	4.5		0.1	0.8	1.3	
3.6	0.4		3.6	3.5	0.1		3.5	4.1		0.6	4.1	3.4	0.7		1.2	0.6	
4	0	0	4	4	0	0	4	3.8	0.2		3.8	3.3	0.5		0.7	0	
3.8	0.2		3.8	3.9		0.1	3.9	3.4	0.5		3.4	2.1	1.3		2	0.1	
4			4	4.2		0.2	4.2	4.1	0.1		4.1				0.1	0.2	
3.8	0.2		3.8	3.7	0.1		3.7	3.6	0.1		3.6				0.4	0	
3.8	0.2		3.8	3.9		0.1	3.9	3.8	0.1		3.8	3.6	0.2		0.5	0.1	
3.7	0.3		3.7	3.9		0.2	3.9	3.1	0.8		3.1	2.3	0.8		1.9	0.2	
4	0	0	4	4.1		0.1	4.1	4	0.1		4	4.6		0.6	0.1	0.7	
4.6		0.6	4.6	4.8		0.2	4.8	4.8	0	0	4.8	4.2	0.6		0.6	0.8	
4.7		0.7	4.7	4.6	0.1		4.6	3.9	0.7		3.9	5.1		1.2	0.8	1.9	
3	1		3	3.1		0.1	3.1	3.6		0.5	3.6	1.4	2.2		3.2	0.6	
3.6	0.4		3.6	3.5	0.1		3.5	3.6		0.1	3.6	2.6	1		1.5	0.1	
3.2	0.8		3.2	3.3		0.1	3.3	3.5	0.2		3.5	3.3	0.2		1.2	0.1	
3.1	0.9		3.1	3.8		0.7	3.8	3.6	0.2		3.6	2.9	0.7		1.8	0.7	
3.1	0.9		3.1	3	0.1		3	3.4		0.4	3.4				1	0.4	
2.8	1.2		2.8	3.1		0.3	3.1	3.2		0.1	3.2	3.1	0.1		1.3	0.4	
3.9	0.1		3.9	4		0.1	4	4	0	0	4	4.1		0.1	0.1	0.2	
4.5		0.5	4.5	4.2	0.3		4.2	4.2	0	0	4.2	4.5		0.3	0.3	0.8	
3.1	0.9		3.1	4		0.9	4	3.5	0.5		3.5	2.6	0.9		2.3	0.9	
3.6	0.4		3.6	4.6		1	4.6	3.8	1.2		3.8	3.5	0.3		1.9	1	
5		1	5	5.2		0.2	5.2	4.5	0.7		4.5	5.1		0.6	0.7	1.8	
4	0	0	4	4.7		0.7	4.7	4.4	0.3		4.4	3.4	1		1.3	0.7	
5		1	5	4.9	0.1		4.9	4.8	0.1		4.8	5		0.2	0.2	1.2	
3.7	0.3		3.7	3.9		0.2	3.9	3.3	0.6	2.1	3.3				0.9	2.3	
$\Sigma/30$	0.29	0.19				0.11	0.21			0.32	0.07			0.4	0.25	1.09	0.77
promedio*10	2.90	1.90				1.10	2.10			3.20	0.70			4.00	2.50	10.87	7.73
promedio*da*10	34.80	22.80				13.20	25.20			38.40	8.40			48.00	30.00	130.40	92.80
Nota																	
1 = Sedimentación																	
2 = Erosión																	

Presa de lodos en Nonoalco																
Parte media																
Pendiente 45°																
Clavos marcados a 5 cm																
Longitud 15 m																
Densidad aparente 1.23																
1º Medición			2º Medición				3º Medición				4º Medición				Resultados	
cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	1	2
3.4	1.6		3.4	4.3		0.9	4.3	5.7		1.4	5.7	3.6	2.1		3.7	2.3
3.7	1.3		3.7	4.3		0.6	4.3	5.9		1.6	5.9	4	1.9		3.2	2.2
4.6	0.4		4.6	5.9		1.3	5.9	6.3		0.4	6.3	7		0.7	0.4	2.4
4.4	0.6		4.4	5.7		1.3	5.7	5.4	0.3		5.4	5.4	0	0	0.9	1.3
4.8	0.2		4.8	5.2		0.4	5.2	4.2	1		4.2	5.1		0.9	1.2	1.3
5.2		0.2	5.2	6		0.8	6	4.6	2.4		4.6	6.4		1.8	2.4	2.8
4.3	0.7		4.3	4.1	0.2		4.1	4.7		0.6	4.7	4.1	0.6		1.5	0.6
3.9	1.1		3.9	5.3		1.4	5.3	7.4		2.1	7.4	5.6	1.8		2.9	3.5
4.6	0.4		4.6	4.8		0.2	4.8	6.5		1.7	6.5	4.4	2.1		2.5	1.9
4.3	0.7		4.3	4.7		0.4	4.7	6.8		2.1	6.8	5.3	1.5		2.2	2.5
4.2	0.8		4.2	4.9		0.7	4.9	5.8		0.9	5.8	4.8	1		1.8	1.6
3.8	1.2		3.8	6.8		3	6.8	5.7	1.1		5.7	6.2		0.5	2.3	3.5
3.8	1.2		3.8	4.6		0.8	4.6	4.9		0.3	4.9	5.8		0.9	1.2	2
4	1		4	5.3		1.3	5.3	6.5		1.2	6.5				1	2.5
4.5	0.5		4.5	5.4		0.9	5.4	6.3		0.9	6.3	4.8	1.5		2	1.8
4.5	0.5		4.5	5.5		1	5.5	3.3	2.2		3.3	5.9		2.6	2.7	3.6
4.2	0.8		4.2	4.6		0.4	4.6	5.6		1	5.6	4.5	1.1		1.9	1.4
4.6	0.4		4.6	5.3		0.7	5.3	5.5		0.2	5.5	4.3	1.2		1.6	0.9
3.8	1.2		3.8	5.3		1.5	5.3	5.2	0.1		5.2	5.5		0.3	1.3	1.8
3.6	1.4		3.6	2.8	0.8		2.8	5.9		3.1	5.9	3.6	2.3		4.5	3.1
7.5		2.5	7.5	7.6		0.1	7.6	7.5	0.1		7.5	7.1	0.4		0.5	2.6
5.2		0.2	5.2	5.2	0	0	5.2	5	0.2		5	4.8	0.2		0.4	0.2
5			5	4.9	0.1		4.9	4.7	0.2		4.7	4.6	0.1		0.4	0
4	1		4	4.4		0.4	4.4	4.6		0.2	4.6	4.4	0.2		1.2	0.6
5.6		0.6	5.6	5.6	0	0	5.6	5.4	0.2		5.4				0.2	0.6
5.8		0.8	5.8	5.4	0.4		5.4	5.5		0.1	5.5				0.4	0.9
4.7	0.3		4.7	5.6		0.9	5.6	5.8		0.2	5.8	5.9		0.1	0.3	1.2
*			*	4	0	0	4	3.8	0.2		3.8	3.9		0.1	0.2	0.1
5.8		0.8	5.8	5.2	0.6		5.2	5.8		0.6	5.8	5.8	0	0	0.6	1.4
4	1		4	3.6	0.4		3.6	4		0.4	4	4.6		0.6	1.4	1
$\Sigma/30$	0.61	0.17			0.08	0.63			0.27	0.63			0.60	0.28	1.56	1.72
promedio*10	6.10	1.70			0.83	6.33			2.67	6.33			6.00	2.83	15.60	17.20
promedio*da*10	75.03	20.91			10.25	77.90			32.80	77.90			73.80	34.85	191.88	211.56
Nota																
1 = Sedimentación																
2 = Erosión																

Presa de lodos en Nonoalco																
Parte baja																
Pendiente 15°		Clavos marcados a 7cm														
Longitud 5 m																
Densidad aparente 1.22																
1ª Medición			2ª Medición				3ª Medición				4ª Medición				Resultados	
cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	cm	cm	1	2	1	2
7.5		0.5	7.5	6.7	0.8		6.7	7.8		1.1	7.8	8.2		0.4	0.8	2
6.9	0.1		6.9	6.6	0.3		6.6	7.6		1	7.6	6.4	1.2		1.6	1
9.7		2.7	9.7	8.4	1.3		8.4								1.3	2.7
6.9	0.1		6.9	7.8		0.9	7.8	8.1		0.3	8.1				0.1	1.2
8		1	8	8.1		0.1	8.1	8.1			8.1	8.2		0.1	0	1.2
8		1	8	7.4	0.6		7.4	10.6		3.2	10.6	7.2	3.4		4	4.2
															0	0
7.8		0.8	7.8	5.3	2.5		5.3	8.4		3.1	8.4				2.5	3.9
8.2		1.2	8.2	7.6	0.6		7.6	6.9	0.7		6.9	7.8		0.9	1.3	2.1
8.6		1.6	8.6	8.4	0.2		8.4	9.6		1.2	9.6	8.1	1.5		1.7	2.8
6.5	0.5		6.5	7.2		0.7	7.2	7.3		0.1	7.3	7.4		0.1	0.5	0.9
															0	0
7.1		0.1	7.1	9.1		2	9.1	7.8	1.3		7.8	8.2		0.4	1.3	2.5
7.5		0.5	7.5	7.7		0.2	7.7	7.9		0.2	7.9	5.8	2.1		2.1	0.9
7.6		0.6	7.6	7.5	0.1		7.5	7.2	0.3		7.2	7	0.2		0.6	0.6
7.3		0.3	7.3	7.3			7.3	7.2	0.1		7.2	7.2			0.1	0.3
8.1		1.1	8.1	7.4	0.7		7.4	8.1		0.7	8.1	7.8	0.3		1	1.8
															0	0
8		1	8	8.2		0.2	8.2	8.2			8.2	8	0.2		0.2	1.2
8		1	8	8.2		0.2	8.2	7.9	0.3		7.9	8.2		0.3	0.3	1.5
7.4		0.4	7.4	9.4		2	9.4	9.1	0.3		9.1	8.4	0.7		1	2.4
6.6	0.4		6.6	6.6			6.6	6.1	0.5		6.1	5.6	0.5		1.4	0
7.7		0.7	7.7	8		0.3	8	8.4		0.4	8.4	8.2	0.2		0.2	1.4
8.3		1.3	8.3	8.6		0.3	8.6	9.1		0.5	9.1	7.8	1.3		1.3	2.1
7.4		0.4	7.4	10.1		2.7	10.1	9.8	0.3		9.8	8.1	1.7		2	3.1
8.5		1.5	8.5	8.7		0.2	8.7	8.9		0.2	8.9	8.3	0.6		0.6	1.9
7.3		0.3	7.3	7.3			7.3	7.6		0.3	7.6	6.5	1.1		1.1	0.6
7.2		0.2	7.2	7.9		0.7	7.9	7.8	0.1		7.8	7.7	0.1		0.2	0.9
7.5		0.5	7.5	7.8		0.3	7.8	7.6	0.2		7.6	7.8		0.2	0.2	1
$\sum/30$	0.04	0.62			0.24	0.36			0.14	0.41			0.50	0.08	0.91	1.47
promedio*10	0.37	6.23			2.37	3.60			1.37	4.10			5.03	0.80	9.13	14.73
promedio*da*10	4.47	76.05			28.87	43.92			16.67	50.02			61.41	9.76	111.43	179.75
Nota																
1 = Sedimentación																
2 = Erosión																

ANEXO 2

Precipitación registrada (mm) en el Distrito Minero de Molango (continúa)

MEDICIÓN PLUVIAL DE LA LOCALIDAD DE NONOALCO (mm)						
Septiembre						
Jueves 5	Viernes 6	Sábado 7	Domingo 8	Lunes 9	Martes 10	Miércoles 11
		0.00	0.00	0.00	0.42	25.25
Jueves 12	Viernes 13	Sábado 14	Domingo 15	Lunes 16	Martes 17	Miércoles 18
22.88	45.34	15.68	0.00	0.00	46.61	0.42
Jueves 19	Viernes 20	Sábado 21	Domingo 22	Lunes 23	Martes 24	Miércoles 25
0.00	0.42	0.00	0.00	0.85	5.04	5.93
					Octubre	
Jueves 26	Viernes 27	Sábado 28	Domingo 29	Lunes 30	Martes 1	Miércoles 2
0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jueves 3	Viernes 4	Sábado 5	Domingo 6	Lunes 7	Martes 8	Miércoles 9
0.00	0.00	1.86	0.00	18.22	2.75	0.00
Jueves 10	Viernes 11	Sábado 12	Domingo 13	Lunes 14	Martes 15	Miércoles 16
0.00	11.86	3.81	0.00	44.07	0.00	3.18
Jueves 17	Viernes 18	Sábado 19	Domingo 20	Lunes 21	Martes 22	Miércoles 23
0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	0.00
Jueves 24	Viernes 25	Sábado 26	Domingo 27	Lunes 28	Martes 29	Miércoles 30
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Noviembre					
Jueves 31	Viernes 1	Sábado 2	Domingo 3	Lunes 4	Martes 5	Miércoles 6
44.92	17.80	8.47	9.32	7.03	0.00	21.19
Jueves 7	Viernes 8	Sábado 9	Domingo 10	Lunes 11	Martes 12	Miércoles 13
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.66	4.19
Jueves 14	Viernes 15	Sábado 16	Domingo 17	Lunes 18	Martes 19	Miércoles 20
0.00	0.00	4.24	0.00	0.00	0.00	0.00
Jueves 21	Viernes 22	Sábado 23	Domingo 24	Lunes 25	Martes 26	Miércoles 27
0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

MEDICIÓN PLUVIAL DE LA LOCALIDAD DE OTONGO (mm)						
Septiembre						
Jueves 5	Viernes 6	Sábado 7	Domingo 8	Lunes 9	Martes 10	Miércoles 11
		7.08	6.57	1.27	0.13	9.28
Jueves 12	Viernes 13	Sábado 14	Domingo 15	Lunes 16	Martes 17	Miércoles 18
24.58	74.32	18.94	0.97	9.75	0.21	0.00
Jueves 19	Viernes 20	Sábado 21	Domingo 22	Lunes 23	Martes 24	Miércoles 25
25.21	21.74	7.03	0.00	0.00	23.94	0.72
					Octubre	
Jueves 26	Viernes 27	Sábado 28	Domingo 29	Lunes 30	Martes 1	Miércoles 2
0.00	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	22.92
Jueves 3	Viernes 4	Sábado 5	Domingo 6	Lunes 7	Martes 8	Miércoles 9
0.00	0.00	0.00	8.81	3.60	0.00	23.56
Jueves 10	Viernes 11	Sábado 12	Domingo 13	Lunes 14	Martes 15	Miércoles 16
0.00	3.26	32.03	14.96	0.00	65.97	0.34
Jueves 17	Viernes 18	Sábado 19	Domingo 20	Lunes 21	Martes 22	Miércoles 23
2.16	1.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
Jueves 24	Viernes 25	Sábado 26	Domingo 27	Lunes 28	Martes 29	Miércoles 30
0.00	0.00	0.00	7.25	0.00	0.00	17.75
	Noviembre					
Jueves 31	Viernes 1	Sábado 2	Domingo 3	Lunes 4	Martes 5	Miércoles 6
21.31	0.00	38.86	6.36	4.66	1.31	30.64
Jueves 7	Viernes 8	Sábado 9	Domingo 10	Lunes 11	Martes 12	Miércoles 13
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.21	6.61
Jueves 14	Viernes 15	Sábado 16	Domingo 17	Lunes 18	Martes 19	Miércoles 20
0.00	0.00	6.61	0.00	0.00	0.00	0.00
Jueves 21	Viernes 22	Sábado 23	Domingo 24	Lunes 25	Martes 26	Miércoles 27
1.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

ANEXO 3

Datos de densidad aparente de las parcelas de clavos de erosión.

Parcelas de maíz				
	Otongo		Nonoalco	
	parte baja	parte alta	parte baja	parte alta
	0.81	1	1.14	1.19
	0.72	0.72	1.18	1.08
	0.83		1.41	1.17
	0.74		1.12	1.14
	0.4		1.46	1.25
	0.97		1.08	1.09
Promedio	0.74	0.86	1.23	1.15

Depósitos de residuos mineros						
	Otongo			Nonoalco		
	parte baja	parte media	parte alta	parte baja	parte media	parte alta
	1.49	1.7	1.55	1.42	1.29	1.24
	1.42	1.71	1.68	1.29	1.13	1.19
	1.66			1.38	1.22	1.2
	1.76			1.35	1.16	1.19
	1.63			0.96	1.34	1.12
	1.65			1.13	1.26	1.26
Promedio	1.6	1.7	1.61	1.22	1.23	1.2

ANEXO 4

Registros de infiltración de las parcelas de clavos de erosión (continúa)

Infiltración por método de anillos									
Localidad: Otongo					Localidad: Otongo				
Depósito de polvos					Depósito de polvos				
Ladera: baja					Ladera: baja				
No. prueba: 1					No. prueba: 2				
Fecha: 13/05/2003					Fecha: 13/05/2003				
tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volumen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volumen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)
0	0	0	0	0	0.68	5	0	0	0.000
0.66	0	0	0	0.000	1.1	5	0	0	0.000
1.33	0.2	0.2	121.2	0.149	1.66	5	0	0	0.000
1.83	0.3	0.1	60.6	0.054	3.66	5.1	0.1	60.6	0.027
2.33	0.4	0.1	60.6	0.043	8.66	5.2	0.1	60.6	0.011
3.33	0.5	0.1	60.6	0.030	13.66	5.3	0.1	60.6	0.007
4.33	0.5	0	0	0.000	18.66	5.4	0.1	60.6	0.005
9.33	0.6	0.1	60.6	0.011	28.66	5.6	0.2	121.2	0.007
14.33	0.7	0.1	60.6	0.007	38.66	5.7	0.1	60.6	0.003
24.33	0.9	0.2	121.2	0.008	48.66	5.8	0.1	60.6	0.002
34.33	1.1	0.2	121.2	0.006	58.66	5.9	0.1	60.6	0.002
44.33	1.2	0.1	60.6	0.002	68.66	6	0.1	60.6	0.001
54.33	1.3	0.1	60.6	0.002	78.66	6.1	0.1	60.6	0.001
64.33	1.4	0.1	60.6	0.002					
74.33	1.5	0.1	60.6	0.001					
84.33	1.6	0.1	60.6	0.001					

Infiltración por método de anillos									
Localidad: Otongo					Localidad: Otongo				
Depósito de polvos					Depósito de polvos				
Ladera: baja					Ladera: media				
No.prueba: 3					No.prueba: 1				
Fecha: 13/05/2003					Fecha: 13/05/2003				
tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)
0.66	5	0	0	0.000	0	0	0	0	0
1.16	5.2	0.2	121.2	0.171	0.5	0.1	0.1	60.6	0.198
2.16	5.3	0.1	60.6	0.046	1	0.2	0.1	60.6	0.099
3.16	5.3	0	0	0.000	1.5	0.3	0.1	60.6	0.066
8.16	5.6	0.3	181.8	0.036	2.5	0.4	0.1	60.6	0.040
13.16	5.9	0.3	181.8	0.023	3.5	0.5	0.1	60.6	0.028
18.66	6	0.1	60.6	0.005	5.5	0.7	0.2	121.2	0.036
28.16	6.1	0.1	60.6	0.004	7.5	0.9	0.2	121.2	0.026
38.16	6.3	0.2	121.2	0.005	9.5	1.1	0.2	121.2	0.021
48.16	6.4	0.1	60.6	0.002	14.5	1.6	0.5	303	0.034
58.16	6.6	0.2	121.2	0.003	19.5	2	0.4	242.4	0.020
68.16	6.8	0.2	121.2	0.003	24.5	2.5	0.5	303	0.020
78.16	6.9	0.1	60.6	0.001	29.5	2.9	0.4	242.4	0.013
					34.5	3.3	0.4	242.4	0.011
					39.5	3.7	0.4	242.4	0.010
					44.5	4.1	0.4	242.4	0.009
					49.5	4.5	0.4	242.4	0.008
					54.5	4.9	0.4	242.4	0.007

Infiltración por método de anillos									
Localidad: Nonoalco					Localidad: Nonoalco				
Presa de lodos					Presa de lodos				
Ladera: alta					Ladera: alta				
No. prueba: 1					No. prueba: 2				
Fecha: 15/05/2003					Fecha: 15/05/2003				
tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)
0	0			0	0	0			0
0.63	0	0	0	0	0.7	0	0.1	60.6	0
1.13	0	0	0	0.000	1.2	0.1	0.1	60.6	0.083
1.63	0.2	0.2	122.272	0.123	1.7	0.2	0.2	121.2	0.117
2.13	0.4	0.2	122.272	0.094	2.7	0.4	0.1	60.6	0.037
3.13	0.6	0.2	122.272	0.064	3.7	0.5	0.1	60.6	0.027
4.13	0.8	0.2	122.272	0.048	4.7	0.6	0.1	60.6	0.021
5.13	0.9	0.1	61.136	0.019	5.7	0.7	0.1	60.6	0.017
6.13	1.1	0.2	122.272	0.033	6.7	0.8	0.1	60.6	0.015
7.13	1.2	0.1	61.136	0.014	7.7	0.9	0.2	121.2	0.026
8.13	1.3	0.1	61.136	0.012	12.7	1.1	0.2	121.2	0.016
9.13	1.4	0.1	61.136	0.011	17.7	1.3	0.2	121.2	0.011
10.13	1.5	0.1	61.136	0.010	22.7	1.5	0.2	121.2	0.009
11.13	1.6	0.1	61.136	0.009	27.7	1.7	0.2	121.2	0.007
12.13	1.7	0.1	61.136	0.008	37.7	1.9	0.2	121.2	0.005
13.13	1.8	0.1	61.136	0.008	47.7	2.1	0.2	121.2	0.004
14.13	1.9	0.1	61.136	0.007	57.7	2.3	0.2	121.2	0.003
19.13	2.1	0.2	122.272	0.010	67.7	2.5		122.272	0.003
26.13	2.5	0.4	244.544	0.015					
31.13	2.7	0.2	122.272	0.006					
36.13	2.9	0.2	122.272	0.006					
41.13	3.1	0.2	122.272	0.005					
51.13	3.5	0.4	244.544	0.008					
61.13	3.9	0.4	244.544	0.007					
71.13	4.2	0.3	183.408	0.004					

Infiltración por método de anillos									
Localidad: Nonoalco Presa de lodos Ladera: baja No. prueba: 1 Fecha: 15/05/2003					Localidad: Nonoalco Presa de lodos Ladera: baja No. prueba: 2 Fecha: 15/05/2003				
tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)
0	0			0	0	0			0
0.41	0	0	0	0	0.41	0	0	0	0
0.91	0	0	0	0.000	0.91	0.1	0.1	60.6	0.109
1.91	0	0	0	0.000	1.41	0.1	0	0	0.000
2.91	0	0	0	0.000	2.41	0.2	0.1	60.6	0.041
3.91	0.1	0.1	60.6	0.025	4.41	0.3	0.1	60.6	0.022
4.91	0.1	0	0	0.000	6.41	0.5	0.2	121.2	0.031
5.91	0.1	0	0	0.000	8.41	0.6	0.1	60.6	0.012
7.91	0.2	0.1	60.6	0.013	10.41	0.7	0.1	60.6	0.010
9.91	0.3	0.1	60.6	0.010	12.41	0.7	0	0	0.000
11.91	0.4	0.1	60.6	0.008	17.41	0.9	0.2	121.2	0.011
13.91	0.4	0	0	0.000	22.41	1	0.1	60.6	0.004
15.91	0.5	0.1	60.6	0.006	27.41	1.1	0.1	60.6	0.004
17.91	0.5	0	0	0.000	32.41	1.2	0.1	60.6	0.003
19.91	0.5	0	0	0.000	37.41	1.3	0.1	60.6	0.003
21.91	0.5	0	0	0.000	42.41	1.4	0.1	60.6	0.002
26.91	0.6	0.1	60.6	0.004					
31.91	0.7	0.1	60.6	0.003					
36.91	0.8	0.1	60.6	0.003					
46.91	1	0.2	121.2	0.004					
56.91	1.2	0.2	121.2	0.003					

Infiltración por método de anillos

Localidad: Nonoalco
 Presa de lodos
 Ladera: media
 No. prueba: 1
 Fecha: 15/05/2003

tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)
0	0			0	22.58	6.1	0.2	121.2	0.009
0.31	0	0	0	0	23.58	6.3	0.2	121.2	0.008
0.81	1.5	1.5	909	1.836	24.58	6.5	0.2	121.2	0.008
1.31	3	1.5	909	1.135	25.58	6.7	0.2	121.2	0.008
1.81	4.2	1.2	727.2	0.657	26.58	6.9	0.2	121.2	0.007
2.81	5.2	1	606	0.353	28.58	7.2	0.3	181.8	0.010
3.81	6.2	1	606	0.260	30.58	7.6	0.4	242.4	0.013
4.81	6.9	0.7	424.2	0.144	32.58	8	0.4	242.4	0.012
5.81	7.7	0.8	484.8	0.136	34.58	8.4	0.4	242.4	0.011
6.81	8.3	0.6	363.6	0.087	36.58	8.8	0.4	242.4	0.011
7.81	8.7	0.4	242.4	0.051	38.58	9.1	0.3	181.8	0.008
8.81	9.1	0.4	242.4	0.045	40.58	9.4	0.3	181.8	0.007
9.81	9.5	0.4	242.4	0.040	42.58	9.7	0.3	181.8	0.007
10.58	3				44.58	10	0.3	181.8	0.007
11.58	3.3	0.3	181.8	0.026	46.58	10.3	0.3	181.8	0.006
12.58	3.6	0.3	181.8	0.024					
13.58	3.9	0.3	181.8	0.022					
14.58	4.2	0.3	181.8	0.020					
15.58	4.5	0.3	181.8	0.019					
16.58	4.8	0.3	181.8	0.018					
17.58	5	0.2	121.2	0.011					
18.58	5.2	0.2	121.2	0.011					
19.58	5.4	0.2	121.2	0.010					
20.58	5.7	0.3	181.8	0.014					
21.58	5.9	0.2	121.2	0.009					

Infiltración por método de anillos									
Localidad: Nonoalco					Localidad: Nonoalco				
Presa de lodos					Parcela: Maíz				
Ladera: media					Ladera: alta				
No. prueba: 2					No. prueba: 1				
Fecha: 15/05/2003					Fecha: 12/05/2003				
tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)
0	0			0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0.68	0	0	0	0.000
1	0.1	0.1	60.6	0.099	1.16	0.9	0.9	545.4	0.769
2	0.1	0	0	0.000	1.6	1.2	0.3	181.8	0.186
3	0.2	0.1	60.6	0.033	2.6	1.5	0.3	181.8	0.114
4	0.2	0	0	0.000	3.6	2	0.5	303	0.138
7.5	0.4	0.2	121.2	0.026	4.6	2.3	0.3	181.8	0.065
9.5	0.5	0.1	60.6	0.010	5.6	2.6	0.3	181.8	0.053
11.5	0.6	0.1	60.6	0.009	6.6	2.8	0.2	121.2	0.030
13.5	0.7	0.1	60.6	0.007	7.6	3.1	0.3	181.8	0.039
18.5	1	0.3	181.8	0.016	8.6	3.5	0.4	242.4	0.046
23.5	1.1	0.1	60.6	0.004	9.6	3.7	0.2	121.2	0.021
28.5	1.3	0.2	121.2	0.007	10.6	3.8	0.1	60.6	0.009
33.5	1.5	0.2	121.2	0.006	11.6	4	0.2	121.2	0.017
38.5	1.7	0.2	121.2	0.005	12.6	4.2	0.2	121.2	0.016
48.5	2	0.3	181.8	0.006	13.6	4.4	0.2	121.2	0.015
58.5	2.3	0.3	181.8	0.005	15.6	4.5	0.1	60.6	0.006
73.5	2.7	0.4	242.4	0.005	17.6	4.7	0.2	121.2	0.011
					19.6	5.1	0.4	242.4	0.020
					21.6	5.4	0.3	181.8	0.014
					23.6	5.6	0.2	121.2	0.008
					25.6	5.8	0.2	121.2	0.008
					27.6	6	0.2	121.2	0.007
					29.6	6.2	0.2	121.2	0.007
					31.6	6.4	0.2	121.2	0.006
					33.6	6.6	0.2	121.2	0.006

Infiltración por método de anillos

Localidad: Nonoalco
 Parcela: Maíz
 Ladera: alta
 No. prueba: 2
 Fecha: 12/05/2003

tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)
0	0	0	0	0	21.83	5.8	0.4	242.4	0.018
0.75	0	0	0	0.000	22.83	6.2	0.4	242.4	0.017
1.25	2.6	2.6	1575.6	2.062	23.83	6.6	0.4	242.4	0.017
1.75	4.5	1.9	1151.4	1.076	24.83	6.9	0.3	181.8	0.012
2.25	5.6	1.1	666.6	0.485	25.83	7.2	0.3	181.8	0.012
3.25	7.4	1.8	1090.8	0.549	26.83	7.5	0.3	181.8	0.011
4.25	8.5	1.1	666.6	0.257	28.83	8.1	0.6	363.6	0.021
5.24	9.5	1	606	0.189	30.83	8.7	0.6	363.6	0.019
6.25	10.3	0.8	484.8	0.127	32.83	9.3	0.6	363.6	0.018
7.25	11	0.7	424.2	0.096	34.83	9.6	0.3	181.8	0.009
8.25	11.6	0.6	363.6	0.072	36.83	10.1	0.5	303	0.013
9.25	12.6	1	606	0.107	38.83	10.6	0.5	303	0.013
10.83	0				40.83	11.1	0.5	303	0.012
11.83	0.7	0.7	424.2	0.059					
12.83	1.5	0.8	484.8	0.062					
13.83	2.1	0.6	363.6	0.043					
14.83	2.7	0.6	363.6	0.040					
15.83	3.2	0.5	303	0.031					
16.83	3.6	0.4	242.4	0.024					
17.83	4.1	0.5	303	0.028					
18.83	4.7	0.6	363.6	0.032					
19.83	5.1	0.4	242.4	0.020					
20.83	5.4	0.3	181.8	0.014					

Infiltración por método de anillos

Localidad: Nonoalco
 Parcela: Maíz
 Ladera: alta
 No. prueba: 3
 Fecha: 12/05/2003

tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)
0	0	0	0	0	23.2	4	1	606	0.043
0.78	0	0	0	0.000	24.2	5	1	606	0.041
1.28	4.5	4.5	2727	3.485	25.2	5.8	0.8	484.8	0.031
1.78	6.7	2.2	1333.2	1.225	26.2	6.5	0.7	424.2	0.026
2.28	8.2	1.5	909	0.652	27.2	7.3	0.8	484.8	0.029
3.28	10.2	2	1212	0.604	28.2	8.1	0.8	484.8	0.028
4.28	12	1.8	1090.8	0.417	29.2	8.9	0.8	484.8	0.027
5.28	13.5	1.5	909	0.282	30.2	9.5	0.6	363.6	0.020
5.83	0				31.2	10.1	0.6	363.6	0.019
6.83	1.5	1.5	909	0.218	32.2	10.7	0.6	363.6	0.018
7.83	3.1	1.6	969.6	0.203	33.2	11.3	0.6	363.6	0.018
8.83	4.5	1.4	848.4	0.157	34.2	11.9	0.6	363.6	0.017
9.83	5.8	1.3	787.8	0.131	35.2	12.5	0.6	363.6	0.017
10.83	6.9	1.1	666.6	0.101	36.2	13	0.5	303	0.014
11.83	7.9	1	606	0.084	37.2	13.6	0.6	363.6	0.016
12.83	8.9	1	606	0.077	37.5	5			
13.83	9.9	1	606	0.072	38.5	5.5	0.5	303	0.013
14.83	10.8	0.9	545.4	0.060	39.5	6.1	0.6	363.6	0.015
15.83	11.5	0.7	424.2	0.044	40.5	6.8	0.7	424.2	0.017
16.83	12.1	0.6	363.6	0.035	41.5	7.4	0.6	363.6	0.014
17.83	12.7	0.6	363.6	0.033	42.5	8	0.6	363.6	0.014
18.83	13.4	0.7	424.2	0.037	43.5	8.6	0.6	363.6	0.014
19.2	0				44.5	9.2	0.6	363.6	0.013
20.2	0.9	0.9	545.4	0.044	45.5	9.7	0.5	303	0.011
21.2	2.1	1.2	727.2	0.056	47.5	10.7	1	606	0.021
22.2	3	0.9	545.4	0.040	49.5	11.7	1	606	0.020
					51.5	12.7	1	606	0.019

Infiltración por método de anillos

Localidad: Nonoalco
 Parcela: Maíz
 Ladera: alta
 No. prueba: 4
 Fecha: 12/05/2003

tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)
0	0	0	0	0	19.33	4.1	1	606	0.051
1.06	0	0	0	0.000	20.33	5.1	1	606	0.049
1.56	2.3	2.3	1393.8	1.461	21.33	6.1	1	606	0.046
2.06	4.2	1.9	1151.4	0.914	22.33	7.1	1	606	0.044
2.56	5.6	1.4	848.4	0.542	24.33	8.7	1.6	969.6	0.065
3.56	7.8	2.2	1333.2	0.613	26.33	10.6	1.9	1151.4	0.072
4.56	9.5	1.7	1030.2	0.370					
5.56	11.6	2.1	1272.6	0.374					
6	0								
7	1.8	1.8	1090.8	0.255					
8	3.4	1.6	969.6	0.198					
9	4.8	1.4	848.4	0.154					
10	6.2	1.4	848.4	0.139					
11	7.4	1.2	727.2	0.108					
12	8.5	1.1	666.6	0.091					
13	9.5	1	606	0.076					
14	10.5	1	606	0.071					
15	11.5	1	606	0.066					
15.33	0								
16.33	1	1	606	0.061					
17.33	2	1	606	0.057					
18.33	3.1	1.1	666.6	0.059					

Infiltración por método de anillos									
Localidad: Nonoalco					Localidad: Nonoalco				
Parcela: Maíz					Parcela: Maíz				
Ladera: baja					Ladera: baja				
No. prueba: 1					No. prueba: 2				
Fecha: 12/05/2003					Fecha: 12/05/2003				
tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.11	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0.000
1.61	1	1	606	0	1.4	1.2	1.2	727.2	0.850
2.11	1.8	0.8	484.8	0.376	1.9	2.2	1	606	0.522
3.11	3.1	1.3	787.8	0.414	2.9	3.8	1.6	969.6	0.547
4.11	4.1	1	606	0.241	3.9	5.1	1.3	787.8	0.330
5.11	5	0.9	545.4	0.175	4.9	6.1	1	606	0.202
6.11	5.8	0.8	484.8	0.130	5.9	7.1	1	606	0.168
7.11	6	0.2	121.2	0.028	6.9	8.1	1	606	0.144
8.13	7.2	1.2	727.2	0.146	7.9	9	0.9	545.4	0.113
9.13	7.8	0.6	363.6	0.065	8.9	9.6	0.6	363.6	0.067
10.13	8.5	0.7	424.2	0.068	9.9	10.2	0.6	363.6	0.060
11.13	9	0.5	303	0.045	10.9	10.8	0.6	363.6	0.055
12.13	9.5	0.5	303	0.041	11.9	11.4	0.6	363.6	0.050
13.13	10	0.5	303	0.038	12.9	12	0.6	363.6	0.046
14.13	10.5	0.5	303	0.035	14.9	13	1	606	0.067
15.13	11	0.5	303	0.033	16.9	14	1	606	0.059
17.13	11.7	0.7	424.2	0.041	18.9	15.3	1.3	787.8	0.068
19.13	12.5	0.8	484.8	0.041	19.3	10			
21.13	13.2	0.7	424.2	0.033	20.3	10.3	0.3	181.8	0.015
23.13	13.9	0.7	424.2	0.030	22.3	10.9	0.6	363.6	0.027
25.13	14.7	0.8	484.8	0.032	24.3	11.6	0.7	424.2	0.029
					26.3	12.5	0.9	545.4	0.034
					28.3	13.1	0.6	363.6	0.021
					30.3	14	0.9	545.4	0.029
					32.3	15.2	1.2	727.2	0.037

Infiltración por método de anillos

Localidad: Nonoalco
 Parcela: Maíz
 Ladera: baja
 No. prueba: 3
 Fecha: 12/05/2003

tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)
0	0	0	0	0	24.3	14.7	0.5	303	0.020
0.83	0	0	0	0.000	25.1	5			
1.3	1.5	1.5	909	1.144	26.1	5.4	0.4	242.4	0.015
1.83	2.3	0.8	484.8	0.433	27.1	5.9	0.5	303	0.018
2.3	3	0.7	424.2	0.302	28.1	6.3	0.4	242.4	0.014
3.3	4	1	606	0.300	29.1	6.8	0.5	303	0.017
4.3	5	1	606	0.231	31.1	7.6	0.8	484.8	0.025
5.3	5.8	0.8	484.8	0.150	33.1	8.3	0.7	424.2	0.021
6.3	6.5	0.7	424.2	0.110	35.1	9.2	0.9	545.4	0.025
7.3	7.2	0.7	424.2	0.095	37.1	9.8	0.6	363.6	0.016
8.3	7.7	0.5	303	0.060	39.1	10.5	0.7	424.2	0.018
9.3	8.3	0.6	363.6	0.064	41.1	11.1	0.6	363.6	0.014
10.3	8.7	0.4	242.4	0.038	43.1	11.7	0.6	363.6	0.014
11.3	9.2	0.5	303	0.044	45.1	12.4	0.7	424.2	0.015
12.3	9.6	0.4	242.4	0.032	47.1	12.9	0.5	303	0.011
13.3	10.4	0.8	484.8	0.060	49.1	13.4	0.5	303	0.010
14.3	10.7	0.3	181.8	0.021					
15.3	11.2	0.5	303	0.032					
16.3	11.5	0.3	181.8	0.018					
17.3	11.9	0.4	242.4	0.023					
18.3	12.3	0.4	242.4	0.022					
19.3	12.6	0.3	181.8	0.015					
20.3	13.1	0.5	303	0.024					
21.3	13.5	0.4	242.4	0.019					
22.3	13.9	0.4	242.4	0.018					
23.3	14.2	0.3	181.8	0.013					

Infiltración por método de anillos

Localidad: Nonoalco
 Parcela: Maíz
 Ladera: baja
 No.prueba:4
 Fecha: 12/05/2003

tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)
0	0	0	0	0	21.8	4.5	0.5	303	0.023
0.86	0	0	0	0.000	22.8	5	0.5	303	0.022
1.3	1	1	606	0.762	23.8	5.5	0.5	303	0.021
1.8	2	1	606	0.551	25.8	6.5	1	606	0.038
2.3	2.8	0.8	484.8	0.345	27.8	7.5	1	606	0.036
3.3	3.9	1.1	666.6	0.330	29.8	8.4	0.9	545.4	0.030
4.3	5	1.1	666.6	0.254	31.8	9.1	0.7	424.2	0.022
5.3	6	1	606	0.187	33.8	9.7	0.6	363.6	0.018
6.3	6.9	0.9	545.4	0.142	35.8	10.3	0.6	363.6	0.017
7.3	7.5	0.6	363.6	0.081	37.8	10.9	0.6	363.6	0.016
8.3	8.3	0.8	484.8	0.096	39.8	11.5	0.6	363.6	0.015
9.3	8.8	0.5	303	0.053	41.8	12.1	0.6	363.6	0.014
10.3	9.3	0.5	303	0.048	43.8	12.7	0.6	363.6	0.014
11.3	10	0.7	424.2	0.061	45.8	13.3	0.6	363.6	0.013
12.3	10.5	0.5	303	0.040					
13.3	11	0.5	303	0.037					
14.3	11.4	0.4	242.4	0.028					
15.3	11.8	0.4	242.4	0.026					
16.3	12.2	0.4	242.4	0.024					
17.3	12.6	0.4	242.4	0.023					
18.3	13	0.4	242.4	0.022					
18.8	3								
19.8	3.5	0.5	303	0.025					
20.8	4	0.5	303	0.024					

Infiltración por método de anillos

Localidad: Otongo Parcela: Maíz Ladera: alta No. prueba: 1 Fecha: 13/05/2003					Localidad: Otongo Parcela: Maíz Ladera: alta No. prueba: 2 Fecha: 13/05/2003				
tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm ³)	C. de infiltración (cm/min)
0.66	0	0	0	0.000	0.5	0	0	0	0.000
1.16	7.8	7.8	4726.8	6.665	1	3	3	1818	2.974
1.66	13	5.2	3151.2	3.105	1.5	5	2	1212	1.322
2	16	3	1818	1.487	2.5	8.3	3.3	1999.8	1.308
2.83	0				3.5	11	2.7	1636.2	0.765
3.83	10.6	10.6	6423.6	2.743	4.5	12.8	1.8	1090.8	0.396
4.58	16	5.4	3272.4	1.169	5.5	14.7	1.9	1151.4	0.342
					6.16	0			
					7.16	1.9	1.9	1151.4	0.263
					8.16	4.4	2.5	1515	0.304
					9.16	6.5	2.1	1272.6	0.227
					10.16	8.3	1.8	1090.8	0.176
					11.16	9.9	1.6	969.6	0.142
					12.16	11.4	1.5	909	0.122
					13.16	12.6	1.2	727.2	0.090
					14.16	13.7	1.1	666.6	0.077
					15.16	14.8	1.1	666.6	0.072
					15.4	10.5			
					16.4	11.8	1.3	787.8	0.079
					17.4	12.9	1.1	666.6	0.063
					18.4	14	1.1	666.6	0.059
					19.4	14.9	0.9	545.4	0.046

Infiltración por método de anillos

Localidad: Otongo Parcela: Maíz Ladera: baja No. prueba: 1 Fecha: 13/05/2003					Localidad: Otongo Parcela: Maíz Ladera: baja No. prueba: 2 Fecha: 13/05/2003				
tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)	tiempo (min)	registro (cm)	diferencia (cm)	volúmen (cm3)	C. de infiltración (cm/min)
0.93	0	0	0	0.000	0.73	0	0	0	0.000
1.43	4.3	4.3	2605.8	2.981	1.4	4.5	4.5	2727	3.186
1.93	8.2	3.9	2363.4	2.003	1.6	8.2	3.7	2242.2	2.292
2.43	11.5	3.3	1999.8	1.346	2.56	10.3	2.1	1272.6	0.813
2.91	3				3.56	13.7	3.4	2060.4	0.947
3.41	6.9	3.9	2363.4	1.134	4.35	15.5	1.8	1090.8	0.410
4.41	13.5	6.6	3999.6	1.483	5	0			
5.66	0				6	4.5	4.5	2727	0.743
6.66	5.9	5.9	3575.4	0.878	7	8.4	3.9	2363.4	0.552
7.66	9	3.1	1878.6	0.401	8	11.5	3.1	1878.6	0.384
8.66	12.5	3.5	2121	0.401	9	14.3	2.8	1696.8	0.308
8.95	5				9.83	16	1.7	1030.2	0.171
9.95	8.9	3.9	2363.4	0.389					
10.95	12.5	3.6	2181.6	0.326					
11.33	14.5	2	1212	0.175					

ANEXO 5
Determinación de carbono orgánico de las muestras compuestas

Clave de Campo	Clave de laboratorio	Localización	Posición dentro de la parcela	Carbono orgánico mg/g	promedio	Materia Orgánica (%)	promedio	desv.est
N.P.M.B. 01	S03-269	Nonoalco parcela de maíz parte baja	alta	19.16		3.30		
N.P.M.B. 02	S03-270		media	19.31		3.33		
N.P.M.B. 03	S03-271		baja	22.84		3.94		
				22.99		3.96		
			baja	22.22		3.83		
				22.38	21.48	3.86	3.70	0.30
N.P.M.A. 01	S03-272	Nonoalco parcela de maíz parte alta	baja	22.22		3.83		
N.P.M.A. 02	S03-273		media	22.38		3.86		
N.P.M.A. 03	S03-274		alta	22.84		3.94		
				22.68		3.91		
			alta	22.38		3.86		
				22.53	22.51	3.88	3.88	0.04
O.D.P.M. 01	S03-275	Otongo depósito de polvos parte media	alta	21		3.62		
O.D.P.M. 02	S03-276		media	21.3		3.67		
O.D.P.M. 03	S03-277		baja	21.15		3.65		
				21.15		3.65		
			baja	20.84		3.59		
				21	21.07	3.62	3.63	0.03
O.D.P.B. 01	S03-278	Otongo depósito de polvos parte baja	baja	22.07		3.80		
O.D.P.B. 02	S03-279		media	21.92		3.78		
O.D.P.B. 03	S03-280		alta	20.84		3.59		
				20.69		3.57		
			alta	21.61		3.73		
				21.61	21.46	3.73	3.70	0.10
O.D.P.A. 01	S03-281	Otongo depósito de polvos parte alta	baja	21.92		3.78		
O.D.P.A. 02	S03-282		media	22.07		3.80		
O.D.P.A. 03	S03-283		alta	20.69		3.57		
				20.84		3.59		
			alta	21.15		3.65		
				21.15	21.30	3.65	3.67	0.10
O.P.M.B. 01	S03-284	Otongo parcela de maíz parte baja	alta	104.03		17.93		
O.P.M.B. 02	S03-285		media	104.03		17.93		
O.P.M.B. 03	S03-286		baja	85.05		14.66		
				84.82		14.62		
			baja	98.41		16.97		
				98.87	95.87	17.05	16.53	1.52
O.P.M.A. 01	S03-287	Otongo parcela de maíz parte alta	alta	74.04		12.76		
O.P.M.A. 01	S03-288		media	74.04		12.76		
O.P.M.A. 03	S03-289		baja	89.74		15.47		
				89.50		15.43		
			alta	72.63		12.52		
				72.40	78.73	12.48	13.57	1.46
N.P.L.A. 01	S03-290	Nonoalco presa de lodos parte alta	baja	27.18		4.69		
N.P.L.A. 02	S03-291		media	27.18		4.69		
N.P.L.A. 03	S03-292		alta	32.80		5.65		
				32.80		5.65		
			alta	26.24		4.52		
				26.24	28.74	4.52	4.95	0.55
N.P.L.M. 01	S03-293	Nonoalco presa de lodos parte media	baja	56.70		9.78		
N.P.L.M. 02	S03-294		media	56.70		9.78		
N.P.L.M. 03	S03-295		alta	53.42		9.21		
				53.42		9.21		
			alta	52.01		8.97		
				52.01	54.04	8.97	9.32	0.37
N.P.L.B. 01	S03-296	Nonoalco presa de lodos parte baja	baja	21.79		3.76		
N.P.L.B. 02	S03-297		media	22.02		3.80		
N.P.L.B. 03	S03-298		alta	29.52		5.09		
				29.52		5.09		
			alta	27.65		4.77		
				27.65	26.36	4.77	4.54	0.61

CAPÍTULO 6. CAMBIOS DE USO DE SUELO COMO FACTOR EN LA PÉRDIDA DE SUELO.

Los principales factores que determinan los cambios ambientales a escala global se han atribuido a las alteraciones en el uso y cobertura del suelo (IIASA, 1993). Sin embargo, existen marcadas variaciones geográficas en la intensidad de los cambios de uso, en las causas que los provocan y en la consecuente degradación de los recursos naturales (García, *et al.*, 2002). Uno de los efectos más importantes provocados por los cambios de uso del suelo es la erosión, el transporte de sedimentos y, posteriormente la sedimentación.

Por ésto, es importante estudiar los cambios de uso de suelo para localizar las zonas que están o pueden degradarse de forma irreversible. Este capítulo tiene el objetivo de ubicar las zonas que han sido deforestadas y que han sufrido cambios en el uso de la tierra, por medio de la sobreposición de mapas de uso anterior y actual. Con base en este análisis se realiza la extrapolación de los resultados del método de parcelas de clavos de erosión a la cuenca, y se estima la magnitud de la erosión en el área de estudio atribuible a los diferentes usos de suelo.

6.1 Cambios de uso de suelo

6.1.1 Metodología

Los mapas de uso de suelo fueron proporcionados por el laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del Instituto de Geografía de la UNAM, los cuáles formaron parte del proyecto “Análisis del cambio de uso del suelo” supervisado por el Instituto Nacional de Ecología. Para el mapa del año 1976 se obtuvieron de imágenes de satélite Landsat MSS y para el mapa del año 2000 de imágenes Landsat TM, para este estudio las imágenes no fueron verificadas en campo. Los mapas nos fueron entregados en formato vectorial (polígonos) con 24 tipos de uso de suelo y vegetación para el año 1976 y 21 para el año 2000, los cuáles fueron sintetizados en 4 usos de suelo (Figuras 2.9 y 2.10). Esta síntesis

se realizó con el objetivo de hacer un análisis simple sobre la cobertura vegetal que tiene cada uso de suelo, ya que en la zona de estudio lo que predomina es a) uso de suelo agrícola: cultivo de maíz; b) uso de suelo pecuario: pastizal inducido y cultivado; y c) uso de suelo forestal: bosque mesófilo de montaña.

Con la ayuda del Sistema de Información Geográfica ILWIS 3.0 (The Integrated Land and Water Information System) se cuantificaron las superficies de los mapas de uso anterior y actual del suelo (Cuadros 6.1 y 6.2). La localización de los cambios en el uso de suelo se obtuvo mediante la sobreposición de los mapas de uso de suelo de 1976 y 2000, obteniendo como resultado un mapa de coincidencias y cambios de usos de suelo (Figura 6.1).

La sobreposición se realizó con el SIG ILWIS 3.0, en donde los mapas de polígonos de uso de suelo fueron convertidos de formato vectorial a raster con una medida por píxel de 20 metros. Se generó una sola georeferencia con las mismas coordenadas para los dos mapas y se sobrepusieron. Se clasificó el uso de suelo de manera general para 1976 con las siguientes categorías: agrícola, pecuario, forestal y cuerpos de agua. Para el año 2000 se incluyó el uso de suelo minero y las zonas urbanas. De esta sobreposición de mapas se obtuvieron la figura 6.1 y el cuadro 6.3, que especifica las coincidencias y el crecimiento de usos de suelo para el lapso de 1976 – 2000 y el área que ocupa cada una.

6.1.2 Uso de suelo en 1976

Para el año 1976 se localizaron 24 tipos de uso, los cuales fueron sintetizados a 4 usos (figura 2.9) de la siguiente manera: 1) Agrícolas: incluye agricultura de humedad, riego y temporal; 2) Pecuario: en donde se registra Matorral crasicaule con cardonal, Matorral crasicaule con vegetación secundaria arbustiva y Matorral submontano con matorral inerte y Pastizal cultivado e inducido; 3) Forestal: con bosque de encino, bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva, bosque de encino-pino, bosque de pino con vegetación secundaria arbustiva, bosque de pino-encino, bosque de pino-encino con vegetación secundaria arbustiva, bosque de táscate con vegetación secundaria arbustiva, bosque

mesófilo de montaña, mesófilo de montaña con vegetación secundaria arbustiva, mesófilo de montaña con vegetación secundaria arbórea, mesófilo de montaña con vegetación secundaria herbácea, Selva alta perennifolia con vegetación secundaria arbórea, perennifolia con vegetación secundaria arbustiva, perennifolia con vegetación secundaria herbácea y Selva baja caducifolia; 4) Cuerpo de agua.

El área que cubre el mapa de uso de suelo del año 1976 es de 103250.9 hectáreas y se observa que el uso forestal ocupaba casi el 70 % de esta zona (cuadro 6.1). La agricultura se practicaba sólo en el 13 % y las actividades pecuarias en el 16 % de la zona; el resto eran ocupadas por cuerpos de agua.

6.1.3 Uso de suelo en el 2000

Para el año 2000 se registraron 21 usos de suelo diferentes, que se simplificaron como los datos de 1976. En este año se incluyen el uso de suelo minero y las zonas urbanas (figura 2.10). En el cuadro 6.2 aparecen 6 categorías que fueron sintetizadas de la siguiente manera: 1) Agrícola: incluye agricultura de humedad, de riego, temporal con cultivos anuales y temporal con cultivos permanentes y semipermanentes; 2) Pecuario: con matorral crasicaule con vegetación secundaria, matorral submontano con vegetación secundaria, pastizal inducido y pastizal cultivado; 3) Forestal: donde se tiene bosque de encino, encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea, bosque de oyamel, pino-encino, pino-encino con vegetación secundaria, bosque de táscate con vegetación arbustiva y herbácea, bosque mesófilo de montaña, mesófilo de montaña con vegetación secundaria arbustiva y herbácea, selva alta y mediana perennifolia, selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea y selva baja caducifolia; 4) Minero; 5) Asentamientos humanos; 6) cuerpos de agua.

Para el año 2000 se tiene un área de 103251.5 hectáreas. En este año el uso agrícola cubre el 26.1 % de toda la zona estudiada (aumentó 13%), las actividades pecuarias tienen 20.6 % (aumentó 4%), las zonas forestales 52.2 % (disminuyó 18%), el uso de suelo minero sólo el 0.26%, los asentamientos humanos 0.04% y los cuerpos de agua el 0.57% (cuadro 6.2).

Cuadro 6.1 Superficie y porcentaje por clase de uso de suelo en la zona de estudio. Año 1976

1976		
Uso	Ha	%
Agrícola	14164.4	13.7
Pecuario	16575.4	16
Forestal	72167.3	69.8
Cuerpos de agua	343.84	0.3
Total	103250.94	100

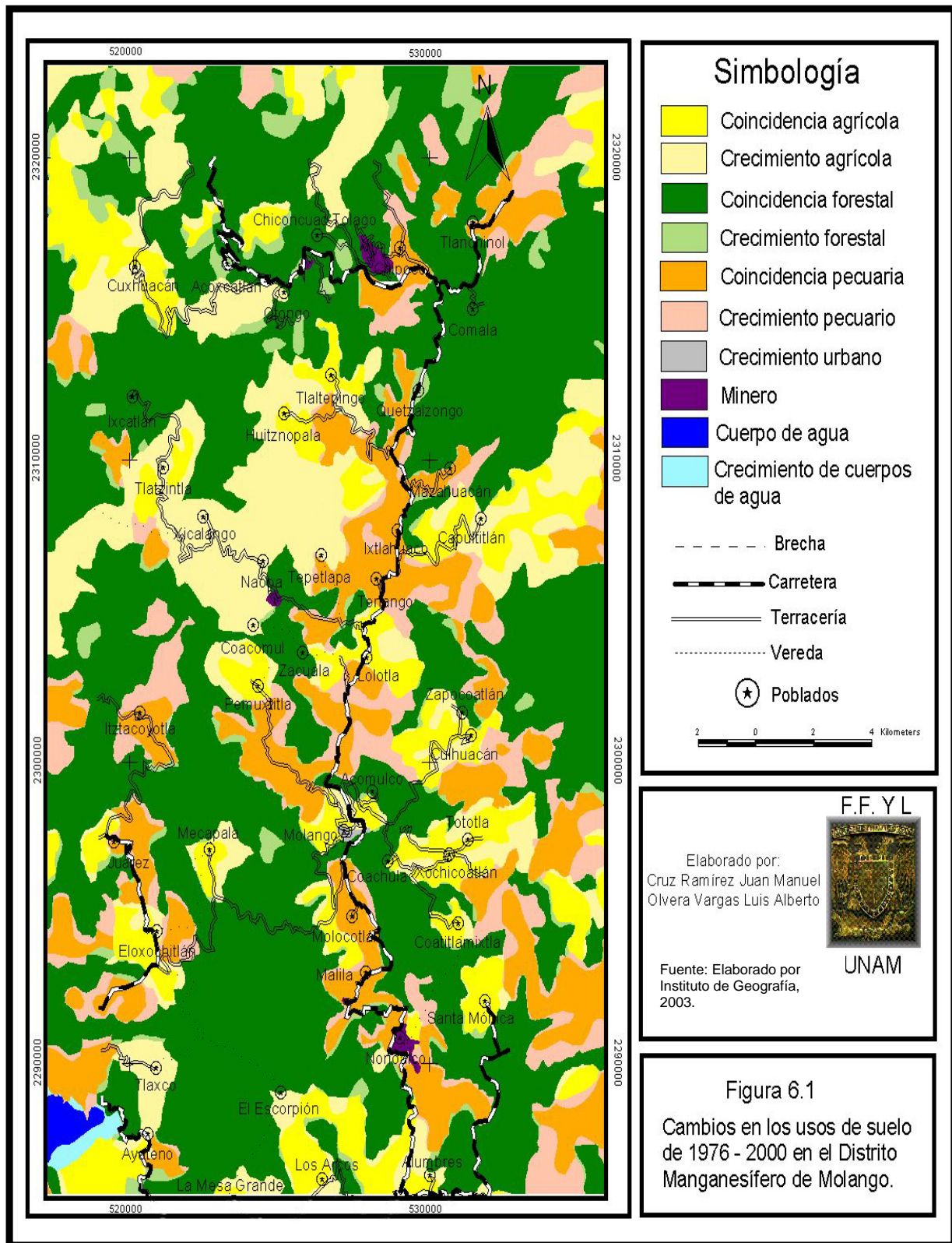
Cuadro 6.2 Superficie y porcentaje por clase de uso de suelo en la zona de estudio. Año 2000

2000		
Uso	Ha	%
Agrícola	27016.45	26.16
Pecuario	21347.89	20.6
Forestal	53975.42	52.2
Minero	271.44	0.26
Asentamientos humanos	44.36	0.04
Cuerpos de agua	595.96	0.57
Total	103251.52	

6.1.4 Comparaciones de las superficies de uso de suelo. 1976-2000

Para el mapa del año de 1976 se tiene un área de 103,250.94 hectáreas, mientras que en el año 2000 se obtuvo un área de 103,251.52 ha. Las diferencias entre estos dos mapas se deben al tamaño de píxel que tiene cada mapa y al error que se produce al momento de la delimitación. Sin embargo, estas diferencias en términos porcentuales son mínimas.

Los resultados de la sobreposición de los mapas de uso de suelo demuestran que las actividades agrícolas de la zona de estudio han aumentado (figura 6.1).



Para el año de 1976 se contaba con un área de 14164 hectáreas de zonas agrícolas y aumentaron 12851 hectáreas más para el año 2000. Del aumento, el 78% se dió sobre zonas forestales y el resto sobre áreas de pastizales (cuadro 6.3). En el Distrito Manganesífero los campos agrícolas se encuentran principalmente sobre suelos de tipo Feozem y Regosol, que son susceptibles a la erosión, porque se desarrollan en laderas con pendientes abruptas; sus rendimientos son muy bajos. Estos tipos de suelo presentan altos porcentajes de materia orgánica en la capa superficial, lo que hace que sean considerados por los agricultores como terrenos aptos para la agricultura. Sin embargo, estos suelos presentan profundidades menores a los 30 cm y si son desprovistos de la cobertura vegetal, se pueden erosionar en pocos años. Con estas características los suelos sólo son aptos para la agricultura si se realizan medidas de conservación.

Las zonas pecuarias (matorrales y pastizales) incrementaron su superficie un 22% (figura 6.1), de las cuáles 7208 hectáreas eran uso forestal y 1118 ha de uso agrícola (cuadro 6.3). El incremento de las zonas pecuarias se debe o bien a que las áreas forestales fueron taladas, o al abandono de tierras agrícolas degradadas para adaptarlas en pequeños potreros, principalmente para ganado bovino.

La actividad minera está presente en la zona de estudio desde los años 60's. En el mapa de uso de suelo del año 1976 no se incluyó este uso (figura 2.9), debido a que las zonas mineras no eran tan extensas y, por lo tanto, no se pudieron cartografiar. Para el año 2000, la explotación del manganeso creció, al igual que las superficies con uso de suelo minero. Para este año se registró un área total de 271 ha, de las cuáles el 29% fueron ganadas a la agricultura, 52% a los terrenos con uso forestal y 18% a los pastizales (cuadro 6.3). El 30% de los terrenos explotados por la Compañía Minera son propios y el 70% son terrenos agrícolas y pastizales, los cuáles son rentados por los dueños y son devueltos al finalizar la explotación (comentado por personal de la Compañía).

Las zonas forestales son las que han sufrido el mayor cambio en su uso de suelo (figura 6.1), teniendo una pérdida neta de 18191.9 ha. Como se ha mencionado anteriormente, las actividades agrícolas son el principal factor en la deforestación de los bosques. Esto

trae consecuencias irreversibles, como son: la pérdida de la capa arable y los nutrientes del suelo, la contaminación de los ríos por las descargas de sedimento, cambios microclimáticos y la degradación del paisaje.

Los cuerpos de agua aparentemente se incrementaron, ya que en el año de 1976 se contaba con 343.84 ha, y para el año 2000 aumentaron a 595.96 ha (figura 6.1). Este aumento se atribuye a las inundaciones que sufrió la laguna de Metztitlán en el año de 1999, por el desbordamiento del río San Cristóbal que cubrió 47 comunidades y desapareciendo los campos agrícolas que se encontraban en este valle. Normalmente la laguna de Metztitlán contenía 52 millones de m³ de agua. Hoy tiene 476 millones de m³, casi diez veces más. (Aponte, 1999).

Cuadro 6.3. Superficies (Ha) de coincidencias y crecimiento de los usos de suelo entre los mapas del 2000 y 1976.

	Coincidencia	Crecimiento agrícola sobre:	Crecimiento pecuario sobre:	Crecimiento forestal sobre:	Crecimiento minero sobre:	Crecimiento urbano sobre:	Crecimiento C. de agua sobre:
Agrícola	11160.91		1118.24	1578.16	79.55	20.32	207.56
Forestal	50346.02	14417.84	7208.36		142.08	24.04	29.04
Pecuario	13011.67	1437.48		2051.28	49.81		25.16
C. de agua	334.2		9.64				

Otros estudios demuestran que la disminución de los bosques, la reducción de las zonas de pastizales, la pérdida de la productividad del suelo y la erosión acelerada, son los principales impactos ambientales de los cambios en el uso de suelo, los cuales se atribuyen a las siguientes causas: a) el rápido incremento de la población, la cual ejerce presión sobre la explotación de los recursos naturales; y b) los cambios tecnológicos que facilitan la explotación de estos recursos (Mwalyosi, 1992).

Phondekar y Phadke (1993), en un estudio de caso sobre la India, señalan tres efectos que ha provocado la deforestación: a) un incremento en la superficie cultivada; b) reducción en la intensidad de cultivo; y c) menor extracción de agua del subsuelo debido al incremento de la profundidad del manto freático.

6.2 Pérdida de suelo a nivel cuenca con el uso de suelo actual

Los resultados obtenidos con las parcelas de clavos de erosión demuestran que el uso de suelo minero es el que sufre mayor erosión que las zonas agrícolas. Estos datos fueron extrapolados a nivel cuenca para confirmar si las actividades mineras contribuyen con mayor material a los ríos que las actividades agrícolas.

La metodología consistió en localizar sitios con características similares a las parcelas de clavos de erosión, en especial con pendientes y usos de suelo, en las cuencas de Otongo y Nonoalco. A los mapas de pendientes de las cuencas de Otongo y Nonoalco se les aplicó un *slicing* (se realizó con el Sistema de Información Geográfica ILWIS) para localizar las zonas con las pendientes que se deseaban. En este caso se obtuvieron 4 diferentes pendientes para el uso de suelo minero y 4 para el uso agrícola. Posteriormente se sobrepuso el mapa de uso de suelo del cuál se obtuvieron los cuadros 6.4 y 6.5.

En el uso de suelo minero de la cuenca de Otongo se obtuvo que los sitios que presentan una pendiente de 9°, sufren una erosión de 712.7 toneladas en un periodo de 3 meses (Septiembre – Noviembre de 2002). Esta pérdida de material es representada a nivel cuenca y cubre parte de la época de lluvias (Cuadro 6.4). El resultado se logró multiplicando el área de uso minero que cubre toda la zona con pendientes de 9° (5.22 hectáreas en la cuenca de Otongo) con el resultado final de la parcela de clavos que presentó esa pendiente (136.53 t/ha) (cuadro 6.4). Los sitios con pendientes de 15° ocupan el 0.23% del total de la cuenca, en donde el proceso de erosión fue 47% más que los suelos que presentan pendientes de 9°. Este resultado se obtuvo de los datos de erosión de la parcela con esa pendiente (179.74 t/ha) y la superficie que ocupa en la cuenca (7.55 ha). Los sitios con pendientes de 41° y 45° ocupan una menor superficie de la cuenca, con 0.43 y 0.16 ha respectivamente. Sin embargo las laderas que tienen 41° de pendiente son las que más erosión presentan en la cuenca de Otongo, mientras que las pendientes de 45° sólo tienen una erosión de 24 toneladas y 25 toneladas de sedimentación en toda la cuenca. Todas las cantidades extrapoladas de la pérdida de

material a nivel cuenca tienen la misma unidad de tiempo, es decir, cubren un periodo de tres meses.

Para la cuenca de Nonoalco con uso de suelo minero, las laderas que se encuentran con un grado de inclinación de 9°, presentan una erosión de 1100.46 toneladas a nivel cuenca en un periodo de tres meses y cubren una superficie de 8.06 ha. Las pendientes de 15° ocupan 5.41 ha de la superficie de la cuenca, en donde el proceso de erosión es 11% menor que las zonas con pendientes de 9°. A pesar de que las pendientes de 41° sólo cubren 0.006% del área de la cuenca, éstas presentaron una erosión de 1915 toneladas a nivel cuenca en el lapso estudiado. Los sitios con pendientes de 45° cubren un área de 400m² de la cuenca, presentando los valores más bajos de erosión (cuadro 6.4). Al igual que la cuenca de Otongo, estos valores representan un periodo de tiempo de 3 meses.

Cuadro 6.4 Estimaciones de la pérdida de material a nivel cuenca bajo uso de suelo minero en laderas con pendientes similares a las parcelas de clavos (Septiembre – Noviembre 2002).

Pérdida de material a nivel:			
Pendiente	Parcela (t/ha)	Cuenca Otongo (t/cuenca)	Cuenca Nonoalco (t/cuenca)
9°	136.53	712.70	1100.46
15°	179.74	1357.09	972.43
41°	11264.68	4843.81	1915.00
45°	152.18	24.35	6.09

En la cuenca de Otongo los sitios bajo uso de suelo agrícola que tienen una pendiente de 11°, sufren una pérdida de suelo de 1333.79 toneladas en tres meses. Esta pérdida se encuentra en una superficie de 5.58 hectáreas de la cuenca. Los sitios con pendientes de 22° cubren una superficie de 0.61 % de la cuenca, en donde la erosión es 65% más que los sitios con pendientes de 11°. En los sitios con pendientes de 24° y 35° el proceso dominante es la erosión y cubren un área de 0.23% y 0.45%, respectivamente, del total de la cuenca (cuadro 6.5). La unidad de tiempo para estas mediciones es de tres meses (Septiembre – Noviembre).

En la cuenca de Nonoalco, para el uso de suelo agrícola, las zonas con pendientes de 11° sufren una pérdida de suelo de más de 5000 toneladas en el área de la cuenca. En los sitios con pendientes de 22° el proceso erosivo es 16% menos que los lugares con pendientes de 11°. Los sitios con pendientes de 24° y 35° sufren una menor pérdida de suelo que los sitios con pendientes de menor grado, ya que sólo pierden 400 y 748 toneladas, respectivamente, en el lapso estudiado (cuadro 6.5).

Cuadro 6.5 Estimación de la pérdida de suelo a nivel cuenca bajo uso de suelo agrícola en laderas con pendientes similares a las parcelas de clavos (Septiembre – Noviembre 2002).

Pendiente	Pérdida de suelo a nivel :		
	Parcela (t/ha)	Cuenca Otongo (t/cuenca)	Cuenca Nonoalco (t/cuenca)
11°	239.03	1333.79	5088.95
22°	195.117	3851.60	4087.69
24°	59.44	444.66	400.08
35°	64.78	944.59	748.29

El crecimiento de las zonas agrícolas en la zona de estudio es considerable, ya que en los últimos 25 años ha aumentado un 47.5 %. Este cambio de uso de suelo puede contribuir a la erosión de los suelos y se puede observar a nivel cuenca. Los cuadros 6.4 y 6.5 nos indican la erosión que sufren los sitios a nivel parcela y a nivel cuenca.

La cantidad de material que perdió el uso de suelo minero (sumando las diferentes inclinaciones) en la cuenca de Otongo, durante el lapso estudiado, es de 6937.95 toneladas. Mientras que para el uso de suelo agrícola, en la misma cuenca, se tiene una erosión de 6574.64 toneladas. Estos resultados nos indican que el uso de suelo minero sufre mayor erosión, tanto a nivel cuenca como a nivel parcela, y por consecuencia contribuye con mayor cantidad de sedimentos a los ríos. Sin embargo, el uso de suelo agrícola presenta cantidades similares a las del uso minero (sólo 5% menos que el

minero), lo que significa que las actividades agrícolas también contribuyen en gran medida a la degradación de los ecosistemas acuáticos de la zona.

En la cuenca de Nonoalco, en el uso de suelo minero presentó una erosión a nivel cuenca de 3393.97 toneladas en un periodo de tres meses. Mientras que para el uso de suelo agrícola se tiene una erosión 10325 toneladas en el mismo periodo. Estos datos son a nivel cuenca. En la cuenca de Nonoalco, las actividades agrícolas presentan 67% más de erosión que las actividades mineras. Con estos resultados se deduce que la agricultura en la cuenca de Nonoalco representa una vía importante de contaminación para los sistemas acuáticos y que las actividades mineras son de menor impacto. Las causas se atribuyen en mayor medida a los cambios de uso de suelo, principalmente a la deforestación de los bosques y el establecimiento de zonas agrícolas.

El proceso de erosión es de mayor impacto en la cuenca de Otongo para el uso de suelo minero, ya que presentó 51% más de erosión que la cuenca de Nonoalco. Esto se debe a las diferencias en el manejo de los residuos mineros, ya que en Nonoalco la instalación de las presas de lodos genera un mejor control de los residuos y disminuyen la contaminación de los ríos cercanos a las zonas mineras. En cuanto a las zonas agrícolas, la cuenca de Nonoalco presenta 36% más de erosión que la cuenca de Otongo, ésto se debe a que las actividades agrícolas ocupan una mayor superficie de la cuenca.

Con estos datos se demuestra que las actividades mineras sufren una mayor erosión a nivel parcela que el uso agrícola, sin embargo a nivel cuenca las actividades agrícolas son similares o de mayor intensidad que en el uso de suelo minero.