

33  
29j.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**"DIAGNOSTICO DE LA FERTILIDAD EN SUSTRATOS  
DE TERREROS Y JALES DEPOSITADOS DE LA  
EMPRESA PEÑA COLORADA"**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**B I O L O G O**

P R E S E N T A :

**HECTOR CELEDON MUÑIZ**



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO. D. F.,



**FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCION ESCOLAR**

1994



## **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 está 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.

FACULTAD DE CIENCIAS  
 División de Estudios  
 Profesionales  
 Exp. Núm. 55



UNIVERSIDAD NACIONAL  
 AVENIDA DE  
 MEXICO

M. EN C. VIRGINIA ABRIN BATULE  
 Jefe de la División de Estudios Profesionales  
 Universidad Nacional Autónoma de México.  
 P r e s e n t e .

Por medio de la presente, nos permitimos informar a Usted, que habiendo  
 revisado el trabajo de tesis que realizó el pasante Héctor  
Celedón Muñiz

con número de cuenta 8135644-7 con el título: "Diagnóstico  
de la fertilidad en sustratos de terreros y jales depositados de  
la empresa Peña Colorada"

Consideramos que reúne los méritos necesarios para que pueda conti-  
 nuar el trámite de su Examen Profesional para obtener el título de -  
Biólogo.

GRADO NOMBRE Y APELLIDOS COMPLETOS

FIRMA

M. en C. Francisco Bautista Zuñiga  
 Director de Tesis

Dra. Norma Eugenia García Calderón

M. en C. María de los Angeles Aguilar Santamaría

Biol. Angela Sotelo Sotelo

Suplente  
Biol. Claudia Vallejo Albarrán

Suplente

Claudia Vallejo Albarrán

## **DEDICATORIA**

**A mis padres**

Por la vida y su gran espera

*In memoriam*

Juan Antonio Rolando

Solo y en la oscura tierra iré tras de ustedes.

**A mi pareja**

Te conocí y desde entonces  
camino como loco  
sin tiempo y sin espacio  
tocando tus labios e intrigado  
por el misterio de tus ojos.

Fructificó de esta guerra la vida,  
Balam salvaje,  
ignorante me observo en ese espejo humeante  
y en lo profundo de su mirada  
me he encontrado... sólo un poco, casi nada.

**A mi familia toda**

Alfredo, Elvia, Mireya, Irma, Soledad, José Luis, Javier,  
Manuel y Francisco

**A la buena Banda**

Rocío, Rosa María, Silky, Luisa, Abeló, Lux, Fede, Ale, Leo, Gude,  
don Mauro, doña Cuca y todos los que se me escapan

**A la Facultad de Ciencias**

Entregando un pedido más

## AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento a todo el personal del Instituto de Geografía que tuvo que ver con la realización de este trabajo, muy especialmente a las siguientes personas:

M. en C. Margarita Gutierrez  
Dra. Cristina Siebe  
Q.F.B. Rocío Aranda  
M. en C. Rosa María Guzmán  
Biol. Olga de León  
Sra. Elena Guzmán.

Al personal del Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada:

Ing. Mario Ruiz Sandoval,  
Lic. Rubén E. Arenal Alonso,  
Lic. José L. Ochoa del Río y al  
Ing. Raúl López.

A todo mi Jurado Calificador por su paciencia y ayuda en la realización y revisión de mi Tesis.

M. en C. Francisco Bautista  
Dra. Norma García  
M. en C. María de los Angeles Aguilar  
Biol. Claudia Vallejo  
Biol. Angela Sotelo

Un muy especial agradecimiento a la Mat. Pilar Alonso por su gran ayuda en el tratamiento estadístico de los resultados .

<b>Indice</b>	<b>Pag.</b>
<b>Resumen.</b>	<b>1</b>
<b>I.- Introducción.</b>	<b>3</b>
<b>1.- La minería en México y el daño ambiental</b>	<b>3</b>
1.1.- Importancia de la minería en México.	3
1.2.- Reseña sobre la legislación en México.	5
1.3.- Afectaciones al ambiente ocasionados por las actividades mineras.	8
1.3.1.- Descripción de los impactos.	9
1.3.2.- Aspectos estéticos y paisajísticos	12
<b>2.- Fertilidad del suelo.</b>	<b>14</b>
2.1.- Nutrimientos esenciales.	17
2.2.- Fuentes e interacciones de nutrimentos.	21
2.2.1.- Nitrógeno.	22
2.2.2.- Azufre.	23
2.2.3.- Fósforo.	24
2.2.4.- Calcio.	25
2.2.5.- Magnesio.	27
2.2.6.- Potasio.	27
2.2.7.- Hierro.	28
2.2.8.- Manganeseo.	29
2.2.9.- Cobre.	39
2.3.- Zinc.	30
<b>3.- El Consorcio Minero Benito Juárez-Peña Colorada.</b>	<b>31</b>
3.1.- Generalidades.	31
3.2.- Historia.	33
3.3.- Descripción del medio físico.	36
3.3.1.- Localización.	36
3.3.2.- Clima.	37
3.3.3.- Vegetación.	37
3.3.4.- Geología.	39
3.3.5.- Hidrología.	39
3.3.6.- Suelos.	41
3.4.- Descripción general del proceso productivo.	44

<b>Indice</b>	<b>Pag</b>
3.5.- Problemas relacionados con la disposición de residuos sólidos en el área de la mina	44
4.5.1.- Impactos en área de minas.	44
<b>II.- Justificación.</b>	<b>49</b>
<b>III.- Objetivos.</b>	<b>50</b>
<b>IV.- Material y Método.</b>	<b>50</b>
<b>V.- Resultados.</b>	<b>52</b>
<b>VI.- Análisis estadístico de resultados.</b>	<b>60</b>
<b>VII.- Discusión.</b>	<b>64</b>
<b>VIII.- Conclusiones y Recomendaciones.</b>	<b>75</b>
<b>IX.- Referencias bibliográficas.</b>	<b>79</b>

## RESUMEN

En México la minería es una de las industrias productivas importantes desde el punto de vista económico y que en mayor grado afectan al medio en donde se desarrollan. Los estudios realizados sobre estos problemas son, en su mayoría, muy escasos.

En el presente trabajo se presentan los resultados del análisis físico y químico de los sustratos de áreas formadas por material "estéril" provenientes del proceso de extracción llamados "terreros" y de las áreas de depositación de jales.

El objetivo principal es el diagnóstico de la fertilidad de estos sustratos (terreros y jales), como una necesidad para delinear estrategias de forestación de las áreas de terreros, utilizando los jales provenientes del proceso de concentrado.

La toma de muestras se realizó en tres terreros inactivos permanentes. Las observaciones realizadas en campo permitieron distinguir tres grupos con base en la presencia de vegetación (dos tipos: arbustiva y pastos) y su ausencia.

El levantamiento de las muestras en las áreas de terreros se hizo en pozos que variaron en profundidad de 10 a 30 cm, hechos con pico y pala. Para el caso de los jales, se utilizó una barrena de 1 m formando cinco grupos compuestos a partir de 12 muestras, distribuidos con base en su textura. Posteriormente, fueron trasladados a laboratorio donde se analizaron.

Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis estadístico, utilizando el modelo Kruskal-Wallis, con el propósito de determinar si las diferencias eran o no estadísticamente significativas para los tres grupos de terreros y el grupo de jales.

Las diferencias encontradas a partir del modelo estadístico entre los tres grupos de terreros, fueron en el pH y contenido de aluminio (pH muy ácido y mayor contenido de aluminio en el grupo sin vegetación). Para los cuatro grupos (incluyendo el grupo de jales) hubo diferencias en pH y la presencia de calcio en mayor proporción para el grupo de jales. Los grupos de terreros y jales se diferenciaron en el contenido de partículas que para el caso de los terreros predominan las arenas, mientras que para los jales, su alto contenido de arcillas les confiere un mayor grado de retención de agua.

Se puede concluir, a partir de los resultados obtenidos, que los terreros son zonas sumamente infértiles. Sus propiedades físicas son muy deficientes (alto grado de arenas, baja retención de humedad, altos valores de densidad y gran compactación además de la ausencia casi total de materia orgánica y macronutrientes asimilables, pH muy ácido y altos contenidos de elementos tóxicos como el aluminio.

Las propiedades físicas de los jales son mucho más benignas para un desarrollo vegetal debido a su alto nivel de retención de agua; esto los transforma en material ideal para su utilización en el tratamiento de terreros, los cuales carecen por completo de partículas finas.

Para aumentar el éxito en la introducción de una cobertura vegetal en estas áreas se sugiere la separación del suelo al inicio de las operaciones de extracción y depositación, así como la aplicación de cal para disminuir la acidez existente, de materia orgánica como fuente de nutrimentos. Esto evitaría muchos problemas que se producen debido a la ausencia de vegetación (azolvamiento de cauces de cuerpos de agua, erosión, evapotranspiración, lavado de nutrimentos y elementos tóxicos, entre otros) y, lo más importante, la recuperación de zonas devastadas. Si desde un principio se propusieran programas de recuperación o disminución de los problemas ocasionados por las operaciones, se evitarían daños severos al medio ambiente.

# I.- INTRODUCCION

## 1.- La Minería en México y el daño al ambiente

La minería ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo económico e integración de nuestro país. La economía mexicana ha estado vinculada a la minería desde el siglo XVI hasta nuestros días, por lo que este sector ha tenido una influencia decisiva sobre otros sectores al igual que en la conformación de la economía mexicana. Los gobiernos virreynales y todos los gobiernos posteriores nacionales a pesar de las inestabilidades y las grandes diferencias ideológicas, coincidieron en fomentar la producción y comercialización de los minerales para obtener un crecimiento económico generalizado.

### 1.1.- La importancia de la minería en México

México es un país eminentemente minero por sus características geológicas. A lo largo de todo el territorio nacional, se extienden dos sistemas orográficos paralelos: la Sierra Madre Oriental (1,350 km) y la Sierra Madre Occidental (1,250 km) desde casi la frontera con los Estados Unidos hasta el Río Santiago. En el límite del altiplano atraviesa el país de costa a costa la Cordillera Neovolcánica con una longitud de 880 km. La península de Baja California está cruzada en toda su extensión por la Serranía Californiana, con anchura media de 75 km.

Alrededor de las dos terceras partes del territorio mexicano, cuya extensión total en la superficie continental es de 1,967,183 km<sup>2</sup>, se encuentran formadas por rocas ígneas y metamórficas con las características geológicas adecuadas para la existencia de minerales.

Las condiciones topográficas y geológicas del suelo mexicano en que el espacio cultivable es relativamente reducido (alrededor del 20%), explican por qué prácticamente por todos los ámbitos del territorio se extienden yacimientos de muy variados minerales y sólo con excepción de cuatro estados de la república (Quintana Roo, Yucatán, Campeche y Tabasco) en los que aún no han sido localizados yacimientos de importancia, (aunque, destacan en la producción de petróleo) en los 28 estados restantes, se registran actividades mineras (Madero, 1978).

En lo que se refiere a la producción minera, se extraen 47 minerales diversos, entre los preciosos, oro y plata, 14 no ferrosos, 4 siderúrgicos y 27 no metálicos. Por lo que toca a la dispersión de la industria a lo largo del país, baste destacar que más de 300 localidades desarrollan actividades mineras, destacando 10 centros mineros que son capitales actuales de estados de la República, además que de estas, 7 nacieron por la actividad minera, iniciándose como Reales de Minas, estos son: Pachuca, Guanajuato, Zacatecas, San Luis Potosí, Duintervalo, Chihuahua y Aguascalientes.

México continúa ocupando una posición destacada en la producción mundial minero-metalúrgica al participar dentro de los once primeros lugares como se ve en la Tabla I.1. Se sitúa en la primera posición de la producción de plata y celestita al aportar el 15.5 y 39.1 % del volumen mundial, respectivamente, el segundo lugar en la producción de bismuto con el 20.3 %, el tercer sitio en cadmio, flúorita, antimonio y grafito con el 8.6, 4.6 y 4.5 %, respectivamente, el quinto lugar en la relativa al arsénico con el 10.3 %, el sexto en zinc con el 4.0 %, el séptimo sitio en plomo, la barita, el azufre y molibdeno con el 4.9, 3.7, 3.2 y 1.6 %, la octava posición en sal de consumo humano y el feldespato con el 4.0 y 3.4 %, y la décima primera en la del cobre y yeso con el 3.1 y 2.0%.

Tabla I.1 Participación de México en la producción mundial 1991. (toneladas) (SEMIP, 1992).

Lugar	Producto	Producción nacional	Producción mundial	% de participación
primer	celestita	50,000.4	127,931.3	39.1
	plata	2,223.6	14,324.0	15.5
segundo	bismuto	651.4	3,201.0	20.3
tercero	cadmio	1,796.6	20,896.6	8.6
	flúorita	370,297.1	4,377,800.0	8.5
	antimonio	2,752.5	59,654.0	4.6
	grafito	30,578.9	670,200.0	4.5
quinto	arsénico	4,921.8	47,621.8	10.3
sexto	zinc	300,705.5	7,400,000.0	4.0
· séptimo	plomo	165,182.3	3,355,200.0	4.9
	barita	203,974.7	5,470,279.0	3.7
	azufre	1,814,555.0	56,056,000.0	3.2
	molibdeno	1,716.0	107,816.0	1.6
octavo	sal	7,532,421.0	186,407,747.0	4.0
	feldespato	168,143.0	4,938,143.0	3.4
onceavo	cobre	284,174.4	9,100,000.0	3.1
	yeso	2,338,954.3	114,509,771.0	2.0

Las actividades mineras, y principalmente la extracción a cielo abierto han propiciado transformaciones negativas radicales del entorno donde se desarrollan. Han generado problemas como deforestación, erosión, producción de residuos sólidos y contaminación por polvos, con el consecuente daño sobre la flora y fauna. En este sentido, cabe preguntarse, dada la enorme importancia económica de la minería en nuestro país, ¿ desde cuando se han considerado los daños provocados por tales actividades?, ¿ como son regulados desde un punto de vista legislativo? y cuales han sido las acciones o propuestas a seguir en este campo. En el siguiente inciso se trata de hacer un seguimiento sobre la normatividad en general del medio ambiente, con el propósito de puntualizar a partir de este seguimiento lo referente a la minería en este rubro.

## 1.2.- Reseña sobre la legislación en Minería

Desde un punto de vista legislativo, la preocupación por el ambiente en general y su preservación, tuvo en México sus comienzos a partir de que el constituyente en 1917, incluyó en el artículo 27 de la Ley Suprema, el principio de la conservación de los recursos naturales. Sin embargo, el primer antecedente legal y formal en esta materia de protección ambiental fue la Ley Federal para prevenir y controlar la Contaminación. Esta ley fue expedida en el año de 1971, gracias a la enorme influencia que ejerció en México la Conferencia Mundial relativa al Ambiente celebrada en Estocolmo, Suecia. (Paredes, 1989)

Esta Ley se fundamentó en la creciente industrialización del país causante de la liberación de sustancias contaminantes al ambiente, el considerable aumento de vehículos, el empleo cada vez más generalizado de plaguicidas y de otras sustancias susceptibles de alterar y lesionar el equilibrio ecológico, además respondió a la necesidad de legislar un problema tan complejo desde todos los puntos de vista, en específico en los órdenes científico, económico y social en cuya solución debían de intervenir las autoridades federales. La Ley regulaba no sólo la prevención y control de la contaminación ambiental, sino también el "mejoramiento, conservación y restauración del medio ambiente" (Cabrera, 1981).

En el artículo tercero de dicha Ley se lee lo siguiente: "seran motivo de prevención, regulación control, y prohibición por parte del Ejecutivo Federal, los contaminantes y sus causas, cualesquiera que sea su procedencia u origen, que en forma directa o indirecta, sean capaces de producir contaminación o degradación de los ecosistemas". (Ley Federal para prevenir y controlar la Contaminación, 1971)

A pesar de que se marca muy en lo general los pasos a seguir, la Ley representaba ya un antecedente en esta materia. Además, se exigió a través del Ejecutivo Federal, el fomento de propuestas y programas de estudio, investigación y otras actividades para el desarrollo de nuevos métodos, sistemas, equipos, aditamentos, dispositivos y demás que permitieran prevenir, controlar y abatir la contaminación, se invitaba, también, a la cooperación para la solución de este

problema a las instituciones de alto nivel educativo, al sector privado y a los particulares en general.

La Ley tenía carácter federal y correspondía al Ejecutivo Federal, por conducto de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, a través de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente y el Consejo de Salubridad General, la aplicación de sus preceptos. Dicha Ley señalaba, en lo que se refería a la materia de suelos, a las Secretarías de Agricultura y Ganadería y de Industria y Comercio, las autoridades competentes para la consideración de las actividades industriales o comerciales que pudieran dañar el ambiente. (Paredes, 1989)

Aunado a todo lo anterior, se llevó a cabo la formación de un equipo de trabajo constituido por varias dependencias federales, teniendo como objetivo fundamental, desarrollar acciones coordinadas dentro del ámbito de competencia de cada una, para proteger el equilibrio ecológico y mejorar el medio ambiente. El organismo fue nombrado Comité Central Coordinador de Programas para el Mejoramiento del Ambiente.

El segundo antecedente legal en materia de protección al ambiente fue la Ley Federal de Protección al Ambiente, decretada por el Ejecutivo Federal el día 11 de diciembre de 1981, fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de enero de 1982, entrando en vigor 30 días después y sustituyó a la anterior Ley Federal para prevenir y controlar la Contaminación.

Esta nueva Ley consideraba abarcar todos los ámbitos en que la contaminación pudiera estar presente y causar daños. La Ley tuvo naturaleza federal, restando por lo tanto poder y eficacia a los gobiernos estatales y municipales, al no otorgarseles responsabilidades ni facultades específicas para proteger su propio medio ambiente. (Paredes, 1989)

La aplicación de esta ley era responsabilidad de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, a través de la Subsecretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, el Departamento de Pesca y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

El objetivo real de la Ley, estaba inscrito en su artículo primero que a la letra dice: "Las disposiciones de esta Ley son de orden público e interés social, rigen en todo el territorio nacional y tienen por objeto establecer las normas para la conservación, protección, preservación, mejoramiento y restauración del medio ambiente, de los recursos que lo integran y para la prevención y control sobre los contaminantes y las causas reales que los originan".

En el año de 1982, se introdujeron una serie de reformas a la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, desapareciendo la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, así como la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, creándose la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, otorgándosele a

esta nueva dependencia gubernamental las facultades para formular y conducir las políticas generales sobre ecología y saneamiento ambiental entre otras cosas.

Durante este sexenio presidencial 82-88, se incluyó en el Plan Nacional de Desarrollo, una nueva disposición en materia de protección del medio ambiente, posteriormente tomó cuerpo en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, el primero de marzo de 1988. que en lo general contenía todos los preceptos de las dos leyes anteriores, pero aunado, puntualizó aún más lo referente a los efectos de la exploración y explotación de los recursos naturales no renovables en el equilibrio ecológico. Se establece en su artículo 108 del capítulo tercero:..."la prevención y control de los efectos nocivos de la exploración y explotación de los recursos naturales no renovables en el equilibrio e integridad de los ecosistemas. La Secretaría expedirá las normas técnicas ecológicas que permiten:

- a) la protección de las aguas que sean utilizadas o sean el resultado de esas actividades, de modo que puedan ser objeto de otros usos.
- b) la protección de los suelos y de la flora y fauna silvestres de manera, que las alteraciones topográficas que generen esas actividades sean oportuna y debidamente tratadas.
- c) la adecuada ubicación y formas de los depósitos de desmonte relaves y escorias de las minas y establecimientos de beneficio de los minerales".

Esta Ley se derivó de la concepción integradora del problema ecológico cada vez más creciente y en la decisión política de hacerle frente. Además se pretendió con esta Ley, establecer las bases firmes de una política ecológica integral. Llevó a la par a la emisión del Reglamento en materia de Impacto Ambiental, siendo éste último de suma importancia en lo que concierne a la actividad minera en lo particular, ya que en dicho Reglamento se establece la necesidad de llevar a la práctica los estudios conducentes a cuantificar todas las actividades industriales que afecten o impacten el medio ambiente.

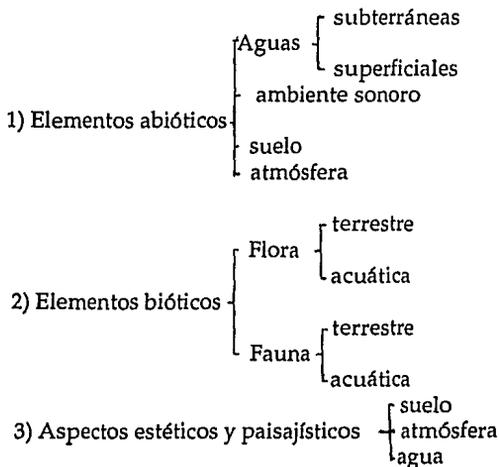
En la actualidad la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente es aplicada en esta materia, sin embargo, existen aún hoy en día Leyes que contienen rubros en materia ecológica como el caso de la Ley de Obras Públicas la cual exige condiciones de conservación y restructuración a empresas que impacten el entorno donde realizan sus actividades, por lo que la integración total de las leyes que normen desde un cuerpo conjunto las medidas de protección al medio ambiente todavía no se lleva a cabo. Un ejemplo claro de esto es la normatividad en cuestión de minas no sólo la regula la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente sino también la Ley de Obras Públicas.

### 1.3.- Afectaciones al ambiente ocasionadas por las actividades mineras

Como anteriormente se mencionó, la explotación de los recursos minerales en nuestro país ha sido de suma importancia desde épocas anteriores a la llegada de los españoles. Durante la colonia aumentó y actualmente se ha incrementado de manera intensa como consecuencia de la creciente demanda de minerales para la satisfacción de las necesidades industriales.

La explotación de yacimientos minerales, especialmente de tipo superficial, derivada de una planeación inadecuada conlleva a daños irreversibles que limitan otros aspectos del desarrollo regional actual y futuro. El impacto ambiental provocado por la minería, daña a los elementos bióticos y abióticos del entorno donde son situados. La construcción de carreteras, excavaciones, la introducción de maquinaria pesada, el movimiento de grandes cantidades de materiales sólidos, la construcción de edificios utilizados para el procesamiento de los minerales (instalaciones de beneficio), la construcción de poblados, en muchos casos la introducción del ferrocarril, la disposición de los materiales sólidos de desecho (descapotes, jales y gravillas), el ruido, los polvos provenientes de la extracción y el procesamiento del mineral, entre otras muchas cosas más, deterioran en algunos casos de manera irreversible el entorno ambiental. En el siguiente esquema se exponen los elementos afectados

Fig. I.1. Elementos bióticos, abióticos y paisajísticos impactados por la minería (Napoleón, 1984b).



### 1.3.1 Descripción de los impactos

#### 1.3.1.1.- Factores abióticos

##### a) Agua.

Durante el proceso de la preparación de los sitios a explotar, las características del drenaje superficial son alteradas, así como durante las operaciones de extracción. El consumo elevado de volúmenes de agua en los procesos relacionados, hace variar el flujo de las corrientes superficiales. Las características de la calidad del agua se modifican durante la preparación de los sitios destinados a la construcción de plantas de servicios, la disposición inadecuada de los residuos sólidos y las excavaciones. La transportación de residuos sólidos en las temporadas de lluvias a los cauces de ríos y cuerpos de aguas como lagos o lagunas provocan serios problemas por asolvamiento. La utilización de grandes cantidades de agua para los procesos de beneficio, su envío a las áreas de depósito de residuos, pueden provocar escurrimientos por lixiviación y afectar las aguas subterráneas. (Napoleón, 1984b)

##### b) Ambiente sonoro.

El impacto al medio sonoro es producido por el ruido, el cual está asociado con la construcción de caminos, carreteras, vías de ferrocarril, excavaciones, explosiones, perforaciones, cortes y rellenos, construcción de presas de aguas y residuos provenientes de las áreas de beneficio (jales o colas), en las etapas iniciales de los procesos de beneficio que involucran operaciones de molienda y en la extracción y transportación de minerales. El ruido impacta seriamente a los seres vivos en general y sobre todo al hombre.

##### c) Suelo.

El impacto más obvio de la minería (sobre todo la minería a cielo abierto), es la completa alteración de la superficie de la tierra. El suelo y el subsuelo son totalmente removidos. Las excavaciones masivas crean grandes depresiones y los materiales de desecho son depositados indiscriminadamente en áreas con abundante vegetación. El resultado es un drástico cambio de la tierra y la alteración de los patrones de drenaje superficial y subsuperficial. La producción de sedimentos reduce la capacidad de las presas, lagos y estanques, de esta manera son alteradas las corrientes de los cauces de los ríos, por lo que la destrucción de los hábitats acuáticos es total a corto y mediano plazo. (Gilchirst, 1977)

La realización de obras necesarias para las actividades de beneficio, involucra necesariamente actividades de desmonte, esto consecuentemente genera material suelto que al ser removido por las lluvias provoca graves problemas de erosión. Las nivelaciones de tierra y la construcción de depósitos de agua y jales, provocan

cambios en la topografía, escurrimientos y alteraciones generales del medio ambiente. Por otro lado la generación de polvos altera la calidad y compatibilidad de uso del agua. Todos los residuos líquidos desechados que posean reactivos tóxicos o materiales traza de minerales tóxicos, alteran la calidad del suelo, corriéndose el riesgo de al lixiviarse, contaminen las aguas subterráneas. (Napoleón, 1984a)

En 1977, se depositaron materiales de desecho que contenían cantidades considerables de Cu, Ni, Pb, Zn y Cr, así como fibras asbestiformes, provocando graves daños a las poblaciones cercanas a la Bahía Silver en el estado de Minnesota, ya que tales metales alcanzaron la red de agua potable. (Gilchirst, 1977)

#### d) Atmósfera.

Asociado con las perforaciones, los cortes, el transporte y actos de almacenamiento, viene un deterioro significativo de la calidad del aire, debido al desprendimiento de polvos. La explotación superficial de grandes extensiones puede disminuir la visibilidad en forma permanente. La intensidad de esta disminución depende del tipo de polvo y de la acción del viento.

Durante las etapas de beneficio, el aire puede actuar como agente dispersante de los polvos generados en las etapas de trituración dispersándose por acción eólica, afectando las zonas circunvecinas, como áreas de cultivo o en su caso zonas pobladas.

#### 1.3.1.2.-Factores bióticos

##### a) Flora.

Las actividades mineras impactan principalmente la flora terrestre, aunque la flora acuática también se ve afectada.

La minería a cielo abierto modifica dramáticamente grandes extensiones de vegetación terrestre. En las etapas iniciales de la explotación, la construcción de caminos, carreteras y vías de ferrocarril afectan significativamente este factor. Sin embargo, la extracción de minerales implica la desaparición total de la vegetación existente, ya que remueve por completo las capas superficiales de la corteza, eliminando el suelo (Howard y Benson, 1978).

La construcción de áreas de depósito de jales o colas involucra el mismo efecto de desaparición total de la flora.

Los desechos líquidos, fugas y derrames, modifican la flora en composición y estructura, ya que pueden contener residuos de minerales y reactivos que pueden ser tóxicos (aunque no siempre contienen este tipo de residuos). Estos residuos también modifican significativamente la composición estructural de las especies florísticas acuáticas. (Napoleón, 1984a)

## b) Fauna.

Al igual que la flora, la fauna terrestre se ve seriamente afectada por las actividades mineras.

La flora y la fauna son dos elementos que dependen el uno del otro, si alguno de los dos factores recibe alteraciones, irremediamente el segundo es afectado. Para el caso de la minería al impactar la flora, la fauna se ve también alterada al mismo nivel.

Las áreas de nidificación, territorialidad, refugios, alimentos, que son claves en el desarrollo de las especies animales son alteradas. Esto tiene consecuencias finales dramáticas, con la desaparición total de las poblaciones de especies, algunas importantes por su endemismo.

La construcción de vías de comunicación, el tendido de líneas y la construcción de vías férreas representan barreras para los corredores faunísticos.

La fauna acuática es dañada también al presentarse derrames o lixiviados de los productos o residuos sólidos, o en su caso asolvamiento de rios y cuerpos de aguas como lagos y lagunas.

### 1.3.2.- Aspectos estéticos y paisajísticos

Las actividades mineras, en especial la de tipo superficial, afectan las características estéticas y paisajísticas de la zona. Esto, obviamente está en relación al valor que desde este punto de vista revista la zona a explotar, de cualquier forma, por poco o mucho valor estético que represente el entorno afectado, se deben considerar desde el principio de las operaciones, las obras de restauración.

La minería afecta desde el punto de vista estético y paisajístico los tres factores más importantes del medio ambiente, estos son: el suelo, la atmósfera y el agua.

El suelo es afectado en su relieve y en sus características topográficas. Esto desde, los inicios de las actividades hasta su término, un ejemplo de esto, es lo sucedido en los Estados Unidos, donde hasta 1975 la superficie afectada ascendía a 13,000 km<sup>2</sup>.

De las medidas de rehabilitación propuestas para estos fines, se ha destacado el rescate de la capa superficial o suelo, para posteriormente usarse recuperando el aspecto estético y aminorar la erosión provocada sobre la roca desnuda. (Gilchirst, 1977)

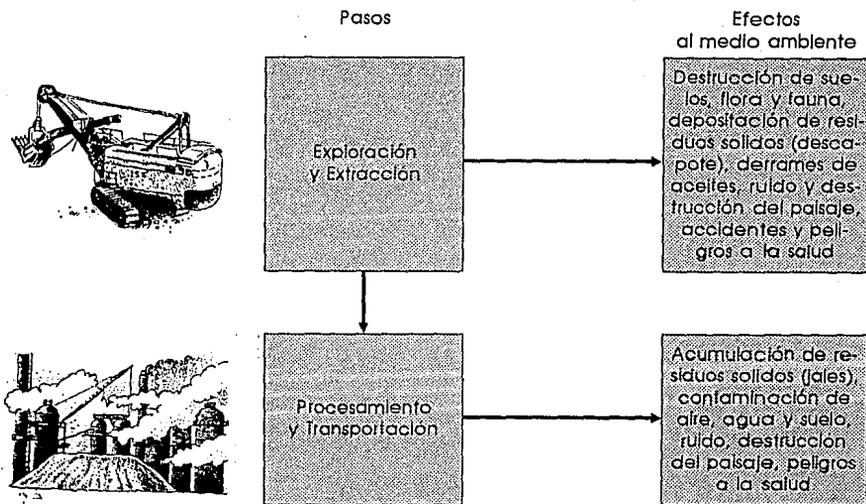
La generación de polvos, afecta severamente la visibilidad en la zona de explotación, esto toma significado real al desarrollarse las actividades mineras en

grandes proporciones. Las partículas son movidas por las corrientes de vientos propicias, afectando poblados o zonas turísticas cercanas a las áreas de explotación.

El deterioro de los cuerpos de agua es provocado por las descargas de sedimentos provenientes de las áreas de explotación, así como las descargas de basura industrial. En los Estados Unidos la descarga de desechos provenientes de actividades mineras a los grandes lagos fue de alrededor de 1.8 millones de toneladas en 1977. (Gilchirst, 1977).

La minería afecta globalmente toda la biósfera. En el siguiente esquema se describen de manera muy general los diferentes factores afectados por la minería.

Fig. I.2. Principales efectos de la industria minera.



De esta manera, es necesario que la aplicación de las leyes sobre la materia se lleven a la realidad. Los estudios encaminados a la recuperación de las áreas afectadas son de suma importancia, ya que a partir de ellos se puede pensar en recuperación si no total por lo menos parcial.

Dentro de los estudios que legalmente se exigen actualmente en nuestro país, destacan aquellos que conducen a la recuperación de los lugares. De estos estudios, de particular importancia para el presente trabajo, destacan los relacionados con la dinámica de formación de suelos, considerando que este factor es de vital importancia para la repoblación vegetal y una quizás lenta recuperación de los entornos afectados. El siguiente capítulo trata aspectos relacionados con la fertilidad de suelos, englobando formación de los mismos y aspectos sobre física y química de suelos.

## 2.- FERTILIDAD DEL SUELO

El diagnóstico de las propiedades físicas y químicas de un suelo conduce a elaborar criterios sobre su origen, clasificación y su fertilidad en el sentido agrícola actual y a futuro. Permite de esta manera, plantear estrategias de manejo, y de resolución de problemas que afecten directamente su estabilidad, tal es el caso de la erosión. El conocimiento de los factores formadores de suelos y los elementos que permiten (nutrimentos) la interacción con organismos vivos como los vegetales o microorganismos, es desde este punto de vista muy importante.

La fertilidad de un suelo es definida por diversos autores, como "la capacidad del suelo para suministrar todos los nutrimentos esenciales de la planta en forma obtenible y en equilibrio adecuado". (Buckman y Brady, 1985, Tamhane y Motiramami, 1986, Foth, 1990). La definición es aplicable a ciertos casos, no creo sin embargo, que sea la generalidad. Este concepto bien pudiera ser aplicable a suelos destinados a la agricultura o prácticas de productividad vegetal, en este sentido es bastante viable. Sin embargo, la fertilidad como una variable determinante en la dinámica del suelo, es el resultado de toda una serie de procesos ( como veremos más adelante), físicos, químicos y biológicos que actúan sobre las propiedades del suelo para junto con ellas rendir las condiciones adecuadas para la vida. Esta influencia determina que los elementos esenciales mencionados en las definiciones, esten en condiciones para su óptima absorción por las diferentes formas de vida que habitan el suelo.

La fertilidad es por lo tanto, la resultante de toda esa serie de procesos que confluyen con las propiedades mismas del suelo para proporcionar los elementos adecuados esenciales a la vida existente no sólo las plantas. (Velasco de Pedro, 1989). Es por esto que el suelo no es un simple soporte físico de anclaje para los vegetales. El suelo es un medio complejo que influye en la vida de los organismos (flora y fauna) de muchas maneras (reproducción, desarrollo, y alimentación entre otros), las propiedades físicas y químicas del suelo afectadas por elementos ambientales como el viento, el agua, y la temperatura, interactúan fuertemente con los organismos ofreciendo entre otras cosas los elementos esenciales para su pleno desarrollo.

Los procesos para la génesis de un suelo a partir de la roca madre se pueden dividir en términos generales en dos etapas:

- a) la meteorización de la roca madre
- b) la formación del suelo

a) El intemperismo físico es en general el proceso que lleva a cabo esta etapa de resquebrajamiento de la roca madre

b) La formación del suelo se inicia con los procesos de meteorización químicos y físicos en interacción con la acción de los organismos vivos. Posteriormente con la

formación de minerales secundarios derivados de los minerales primarios de la roca madre. Estos procesos deben ser visualizados como eventos que llevan mucho tiempo para su realización, los intervalos de tiempo van de los cientos a los miles de años. (Thompson y Troeh, 1984), la Tabla I.2 nos muestra los intervalos de tiempo en años que lleva la formación de distintos tipos de éstos.

Tabla I.2 Intervalos estimados de formación de suelo (Zinck, 1990).

Suelo	Formación tiempo (años)	Profundidad de suelo (cm)	Intervalo de formación (años/cm)
Horizonte A (Mollisol)	400	33	12
Horizonte A+B (Alfisol)	4,000	100	40
Horizonte A+B (Oxisol)	75,000	100	750

Existe una clasificación de las etapas de meteorización de un suelo que marcan su juventud, madurez temprana, madurez tardía y senectud. En las etapas tempranas de la formación de un suelo ocurren la mayor parte de las transformaciones importantes para la obtención de nutrientes y su posterior absorción por las plantas. Sin embargo, las etapas finales del suelo se orientan hacia la pérdida de su fertilidad. En realidad es muy raro aquel suelo capaz de proporcionar todos los elementos esenciales durante largos periodos y en cantidades necesarias para producir altos rendimientos. (Aguilera, 1989)

La materia orgánica puede ser definida como "la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo (Bornemisza, 1982). La mayor cantidad de aporte de macronutrientes tales como nitrógeno, azufre y fósforo son suministrados en su gran mayoría por ésta.

Entre otras funciones, la materia orgánica actúa sobre el pH, regulando de esta manera las cantidades de nutrientes asimilables por las plantas. Actúa sobre las propiedades físicas del suelo sobre todo en la estructura de las capas superficiales mejorando la permeabilidad y la capilaridad ya que retiene grandes cantidades de agua (Aguilera, 1989), lleva el papel de agente cementante aumentando la cantidad de agregados y los estabiliza, dando como resultado una mayor aireación y retención de los elementos nutritivos, evitando su rápida pérdida por percolación (Velasco de Pedro, 1989).

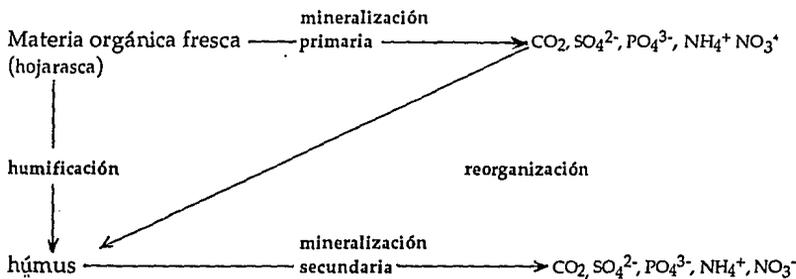
La materia orgánica es un factor importantísimo en el aporte de nutrimentos involucrando además procesos como mineralización y humificación. El primer proceso se refiere a la formación de compuestos minerales en general solubles (fosfatos, sulfatos, nitratos, etc.) o gaseosos (dióxido de carbono y amoníaco), por la acción de microorganismos particularmente activos. Este proceso implica la degradación total de la materia orgánica para el aprovechamiento por las plantas y organismos del suelo.

La reorganización de los compuestos previamente mineralizados tales como el fósforo y el nitrógeno, es visualizado como un proceso biológico inverso del que rige la mineralización y se produce junto con la biosíntesis de los microorganismos vivos, por este procedimiento una parte de los compuestos minerales liberados se reincorpora a los compuestos húmicos (Duchaufour, 1984).

A través de la humificación se forman de nuevo productos orgánicos coloidales a partir de la síntesis de microbiana, por esta razón es contraria a la mineralización, es decir la materia orgánica no desaparece es transformada. (Guzmán, 1988)

La siguiente figura ilustra los principales procesos que sufre la materia orgánica.

Fig I.3 Transformaciones de la materia orgánica (Duchaufour, 1984).



A través del tiempo los ecosistemas han evolucionado de acuerdo a factores físicos ambientales en interacción con las transformaciones químicas, físicas y biológicas de los suelos, propiciando como consecuencia una flora y fauna específica para cada uno de ellos. En este sentido, la fertilidad de un suelo se restringe a las condiciones imperativas de cada ecosistema, no se puede generalizar con el término ya que se correría el riesgo de caer en confusiones. Por ejemplo, algunos suelos pueden poseer cantidades de nutrimentos digamos normales para su flora en

especial, tal es el caso de algunos aridisoles con una flora tan especial como las cactáceas, pero para otro tipo de flora los aridisoles podrían ser no fértiles.

El diagnóstico de la fertilidad de un suelo comprende la determinación de sus propiedades físicas tales como la permeabilidad, su capacidad de campo, la proporción de partículas (arenas, limos y arcillas), entre otras, y la determinación de los elementos esenciales (nutrimentos) que contenga. Esto proporciona elementos de juicio y como se mencionó anteriormente rinde estrategias de manejo para los fines particulares en que se ocupe.

## 2.1.- NUTRIMENTOS ESENCIALES

Derivados del intemperismo físico, químico y biológico sobre la roca madre, la composición de un suelo evoluciona hacia la obtención de los minerales más estables como óxidos. La ausencia de agua, aire, cambios de temperatura y presión, y organismos, transforman a través del tiempo los minerales primarios ocurriendo cambios importantes en la capacidad del suelo para el almacenaje de algunos nutrimentos esenciales.

La Tabla I.3. muestra los principales minerales primarios de los cuales derivan los elementos esenciales o nutrimentos.

Tabla I.3. Principales minerales primarios. (Aguilera,1989)

Minerales	Elementos
Ferromagnesianos	
Anfiboles	$\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^+, \text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Al}^{3+}, \text{OH}^-$
Piroxenos	$\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^+, \text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$
Olivino	$\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$
Silicatos laminares	
Micas:	
Muscovita	$\text{K}^+, \text{Al}^{3+}, \text{OH}^-$
Biotita	$\text{K}^+, \text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Al}^{3+}, \text{OH}^-$
Clorita	$\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Al}^{3+}, \text{OH}^-, \text{Si}^{4+}$
Cuarzo	
Feldespatos	
Ortoclasa	$\text{K}^+, \text{Al}^{3+}, \text{Si}^{4+}$
Plagioclasa	$\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^+, \text{Al}^{3+}, \text{Si}^{4+}$
Apatita	$\text{Ca}^{2+}, \text{OH}^-, \text{H}_2\text{PO}_4, \text{HPO}_4^-, \text{PO}_4^-, \text{F}^-, \text{Cl}^-$

Los elementos esenciales son clasificados como macro y micronutrientes de acuerdo a la cantidad que se requiere de ellos para el desarrollo de la flora y fauna. Existen otro tipo de clasificaciones, como aquella que se basa en las propiedades fisicoquímicas de los nutrientes y los divide en metales (potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, zinc, cobre y molibdeno) y no metales (nitrógeno, azufre, fósforo, boro y cloro). Estas clasificaciones son realizadas de acuerdo a los intereses particulares de cada investigador en este sentido no quiere decir que sean erróneas, sin embargo, cada nutriente puede llevar a cabo una gran variedad de funciones que no necesariamente tienen que estar relacionadas con su cantidad o con sus propiedades fisicoquímicas. Un nutriente puede llevar a cabo funciones electroquímicas, estructurales y catalíticas.

En el presente trabajo se dividirán los nutrientes en macro y micronutrientes por la conveniencia del generalizado uso de tales términos. Los macronutrientes comprenden al N, P, S, Ca, Mg y K. Mientras que los micronutrientes son el Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Co y Cl.

La función principal del N, S y P, está relacionada con la estructura de proteínas y ácidos nucleicos, otros como el Mg, pueden funcionar como constituyentes de estructuras orgánicas predominantemente de estructuras enzimáticas, donde esta directa o indirectamente relacionado con su función catalítica. El K y presumiblemente el Cl son constituyentes estructurales, involucrados al parecer en la nutrición mineral, además de poseer funciones osmoreguladoras (en vacuolas), así como funciones electroquímicas y catalíticas (Horst, 1990).

Las funciones, como se ha visto, son variadas para cada elemento. Con el objetivo de evitar confusiones sobre esencialidad de algún elemento en particular, hace algunos años, autores como D. I. Arnon y P. R. Stout, propusieron los siguientes criterios de esencialidad para juzgar el estado exacto de un mineral en la nutrición de las plantas:

- el elemento debe ser primordial para el crecimiento o reproducción normal que no pueden proseguir en su ausencia.
- el elemento no puede ser reemplazado por ningún otro.
- el requerimiento debe ser directo, es decir que no sea el resultado de algún efecto indirecto como toxicidad relevante, causada por algún otro elemento (Mengel y Kirby, 1987).

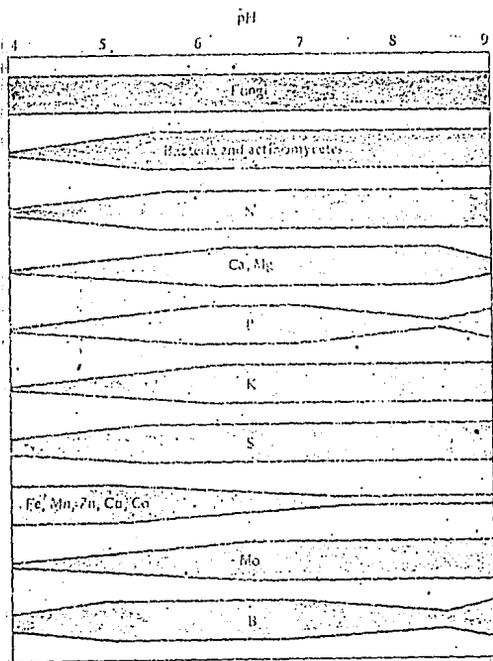
Esto quiere decir que existen otros elementos, tales como el silicio, el vanadio, el níquel y el sodio, que son auxiliares de algunas plantas. Otros como el cromo, el yodo y el flúor, que aunque han sido determinados como esenciales para el desarrollo de los animales, no son requeridos por las plantas. He aquí la importancia del establecimiento de los criterios de esencialidad mencionados anteriormente.

Del pH del suelo depende la disponibilidad de la mayoría de los elementos químicos de importancia para los organismos. La relación general entre pH y niveles de cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ) así como  $\text{Al}^{3+}$  es alta. A pH ácido frecuentemente existen niveles tóxicos de Fe, Mn y Al. Contrariamente, a pH alcalino hay serias deficiencias de Fe y Mn. La disponibilidad de N, S y Mo está algunas veces restringida a pH ácido, mientras que el P se encuentra más disponible a pH neutro.

En general las bacterias y actinomicetes se desarrollan mejor a pH intermedio y alto. Los hongos parecen ser más versátiles, desarrollándose satisfactoriamente sobre un amplio intervalo, desde moderadamente ácido hasta débilmente alcalino. Las plantas varían considerablemente en su tolerancia a la acidez y alcalinidad, por ejemplo: alfalfa y trébol dulce se desarrollan mejor a pH neutro y alcalino. El Rododendro y la Azalea requieren aparentemente mayores cantidades de Fe a pH bajo (Rowell, 1988).

El pH influye en la morfogénesis y en los niveles de fertilidad, condicionando los tipos de asociaciones vegetales, por ejemplo, en zonas con Entisoles o Inceptisoles se puede encontrar en transectos edáficos suelos ácidos con vegetación acidófila, suelos neutros con vegetación neutrófila y suelos alcalinos con vegetación basófila (Aguilera, 1989). Ya que la fertilidad de un suelo depende entre otras cosas de las concentraciones de nutrimentos en solución y no de los elementos que contenga, el pH puede influir de manera determinante en las cantidades aprovechables de nutrimentos por las plantas. La figura I.4 muestra los intervalos de disponibilidad de los distintos nutrimentos.

Fig. I.4.- Efectos del pH en la disponibilidad de algunos nutrientes (Brady, 1990).



Otro factor que afecta la disponibilidad de nutrientes en el complejo de intercambio o zona de absorción por las raíces, es el potencial iónico de cada ion, que se define como la medida de la firmeza con la cual los iones están retenidos en alguna estructura de almacenaje o simple adsorción en coloides minerales secundarios. Algunos iones tales como el aluminio y el fósforo tienen enlaces de alta energía y como consecuencia se presentan en bajas concentraciones en la solución del suelo. Los iones calcio, potasio y magnesio poseen energía intermedia de enlace. La mayoría de los aniones (cloruros y sulfatos entre otros), poseen enlaces muy débiles y, como consecuencia, tienden a abundar en el medio de intercambio.

Por regla general los iones con elevado potencial iónico tienden a desplazar a los iones de bajo potencial. En una extracción con bario para determinación de magnesio o calcio entre otras cosas se considera este factor, la determinación del pH también está regida en parte por este principio, los iones hidrógeno e hidroxilo poseen enlaces bastante fuertes, por lo que una buena extracción comprobaría un parámetro real tan importante como el pH.

## 2.2 .- FUENTES E INTERACCIONES DE NUTRIMENTOS

### 2.2.1.- NITROGENO

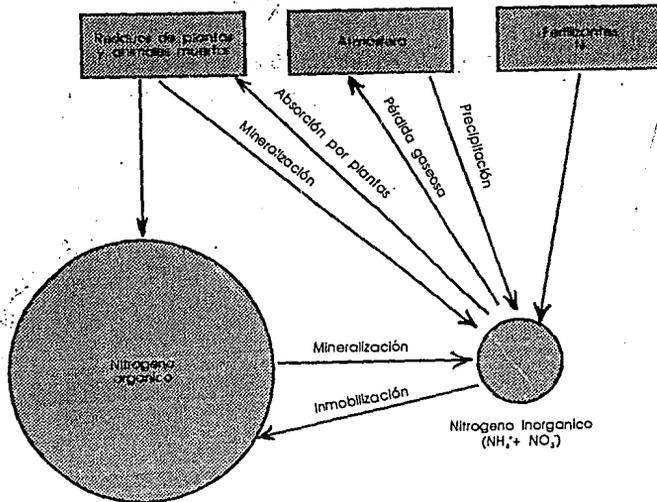
El contenido mineral de nitrógeno en la superficie, normalmente está dentro de los valores de 0.02 a 0.5 %. Una hectárea de suelo, contiene 3.3 mg de nitrógeno, el mismo volumen de aire contendría alrededor de 300,000 mg. El nitrógeno en el suelo no es producto del intemperismo de la roca, sino que tiene como fuente principal a la atmósfera, sin embargo este nitrógeno no es asimilado inmediatamente por las plantas. Existen microorganismos que fijan el nitrógeno atmosférico incorporándolo a su cuerpo. Una vez muertos, el nitrógeno contenido por ellos es asimilado por la planta (Brady, 1993).

El nitrógeno atmosférico forma con el oxígeno, en presencia de energía electromagnética (como UV) o descargas eléctricas, óxidos que posteriormente por efecto de la lluvia se precipitan al suelo (Guiking, 1987). También puede ser fijado químicamente en la industria obteniendo fertilizantes nitrogenados

Las cantidades de nitrógeno aprovechables (como  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), varía entre el 1 y el 2 % del total del nitrógeno existente en el suelo a excepción de cuando son agregados los fertilizantes. El grueso del nitrógeno en el suelo se encuentra orgánicamente enlazado.

La Fig. I.5 muestra las distintas fuentes de nitrógeno y su aporte en nitrógeno orgánico e inorgánico

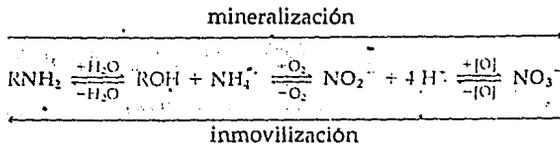
Fig. 1.5. Fuentes de nitrógeno (Brady, 1990)



La inmovilización, uno de los procesos de transferencia se define como la conversión de los iones de nitrógeno inorgánico a formas orgánicas. La mineralización se puede visualizar como el proceso contrario (Duchaufour, 1984).

Obviamente estos dos procesos se llevan a cabo considerando los diferentes cambios que pueden ocurrir en el suelo, por ejemplo la inmovilización se produce al disminuir las formas orgánicas de nitrógeno en el suelo, y entonces ocurre un proceso de asimilación del N inorgánico por parte de los microorganismos existentes, inmovilizando al N al transformarlo en tejido constituyente de ellos mismos. Una vez muertos, el N puede incorporarse al humus o mineralizarse directamente en formas asimilables para las plantas.

Estos procesos pueden ser visualizados en las siguientes formas, utilizando como fuente de nitrógeno la forma  $\text{RNH}_2$  (Brady, 1990).



De los procesos de fijación de nitrógeno para la asimilación por las plantas, la fijación biológica es cualitativamente, el proceso más importante de todos los implicados en el aporte de nitrógeno al suelo. Mientras que los fertilizantes nitrogenados suministran al suelo anualmente 60 millones de toneladas métricas de N y la fijación química natural representa unos 30 millones, la fijación biológica

supone 130 millones de toneladas métricas. De estas algo más de la mitad se deben a la simbiosis *Rhizobium-leguminosa*. La Tabla I.4 muestra distintas especies de *Rhizobium* y su planta hospedera, la velocidad de crecimiento es directamente proporcional a la cantidad de N fijado. El resto del nitrógeno fijado biológicamente, si bien es importante en cantidad, reviste poca importancia agrícola. Este último se debe principalmente, a la acción de microorganismos de vida libre, aerobios o anaerobios, de un escaso rendimiento fijador, aunque bastante abundantes en número (Azcon y Barea, 1983).

Tabla I.4. Algunas especies de *Rhizobium* (Azcon-G y Barea, 1983).

Especie	Vel. de crecimiento	Planta hospedera
<i>R. trifolii</i>	rápida	trebol
<i>R. leguminosarum</i>	rápida	chicharo
<i>R. phaseoli</i>	rápida	frijol
<i>R. meliloti</i>	rápida	alfalfa
<i>R. lupini</i>	lenta	soya
<i>R. japonicum</i>	lenta	altramuz
<i>R. compea</i>	variable	cacahuete

### 2.2.2.- AZUFRE

Existen tres fuentes principales de azufre asimilable:

- a) materia orgánica.
- b) minerales del suelo.
- c) atmósfera.

a) En la región húmeda superficial del suelo, la mayoría del azufre se encuentra en forma orgánica en cantidades de más 90 % del azufre total. La forma combinada con la materia orgánica es muy poco conocida, sin embargo se sabe que la mayoría proviene de proteínas (específicamente de aminoácidos como la cisteína, la cistina y la metionina). El azufre posee las siguientes proporciones en relación con el carbono y el nitrógeno: C:N:S de 125:10:1.2. (Mengel y Kirbky, 1987).

Al estar ligado con la materia orgánica y la fracción arcillosa, el azufre es protegido del ataque microbiano, sin embargo se sabe que los microorganismos pueden simplificar el azufre ligado en moléculas inorgánicas solubles.

b) Las especies químicas inorgánicas quizás no sean tan abundantes en el suelo como las orgánicas, pero, son de extrema importancia considerando que incluyen las formas solubles y asimilables de las cuales dependen las plantas y microorganismos.

El azufre es encontrado en el suelo en varias combinaciones, las cuales comprenden a los sulfitos y sulfatos. De éstos, los sulfatos son más fácilmente solubilizados y el ión  $\text{SO}_4^{2-}$  es en su mayoría asimilado por las plantas. Este ión es más común en suelos de baja precipitación pluvial como lo son los Mollisoles y los Aridisoles, acumulándose en los horizontes más bajos.

Los sulfitos por lo regular son encontrados en suelos con drenaje muy restringido. A menudo poseen sulfuros combinados con hierro ( $\text{FeS}_2$ ), siendo por lo regular muy insolubles (Thompson y Troeh, 1984). Si los suelos aumentan su capacidad de drenaje, se llevan a cabo oxidaciones y liberan de esta forma azufre asimilable transformándose en sulfatos (Brady, 1990).

c) Otra fuente de azufre, es en su mayoría el azufre despedido por procesos industriales. La combustión de compuestos como aceites y carbón, liberan grandes cantidades de dióxido de azufre y otros gases. Estos gases son oxidados en la atmósfera a sulfatos, formando ácido sulfúrico por reacción con el agua y sales tales como el sulfato de magnesio y calcio.

### 2.2.3.- FOSFORO

El fósforo se encuentra en el suelo en forma orgánica e inorgánica. En la materia orgánica, se encuentra ligado a compuestos y sólo es absorbido hasta la descomposición de la materia orgánica, (Thompson y Troeh, 1984). La cantidad relativa de las dos formas varía mucho de suelo a suelo, la fracción orgánica, constituye generalmente del 20 al 80 % del total. Entre los compuestos orgánicos que mayor contenido de fósforo aportan al suelo destacan los siguientes: fosfato de inositol; ácidos nucleicos y fosfolípidos.

Los fosfatos de inositol comprenden del 10 al 50 % del total orgánico. Son de origen microbiano y tienden a ser estables en condiciones alcalinas e interactúan con moléculas húmicas de alto peso molecular.

Los fosfatos derivados de ácidos nucleicos comprenden del 1 al 5 % y los fosfolípidos únicamente del 0.2 al 2.5 % del total conocido. (Brady, 1990)

El fósforo inorgánico proviene por lo regular de la apatita. Aunque existen otras fuentes menos importantes tales como las que se mencionan en la Tabla I.5.

Tabla I.5.- Principales fuentes de fósforo (Mengel y Kibky, 1987).

Fuente	Fórmula
Hidroxiapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$
Flúorapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$
Dicalcioapatita	$\text{CaHPO}_4$
Tricalcioapatita	$\text{Ca}_3\text{HPO}_4$
Variscita	$\text{AlH}_2\text{PO}_4(\text{OH})_2$
Strengita	$\text{FeH}_2\text{PO}_4(\text{OH})_2$

La apatita se presenta como roca en regiones emergidas que anteriormente fueron fondos de mar y mares poco profundos, se le llama también fosfato natural o fosforita.

La disponibilidad de los fosfatos para las plantas depende en gran medida del pH. La solubilidad de los fosfatos de hierro y aluminio se incrementa al aumentar el pH, sin embargo, la solubilidad de los fosfatos de calcio es muy pobre. El pH óptimo para los fosfatos se encuentra entre 6-6.5. En experimentos se ha encontrado que a bajo pH (por debajo de 5) la absorción de fosfatos por las plantas es varias veces más alta que a pH alcalinos (7.7) (Guiking, 1987).

Existen asociaciones simbióticas entre hongos y raíces de plantas superiores llamadas micorrizas que desempeñan un importante papel en la translocación hacia las plantas de iones fosfato, por lo que, en suelos con bajos contenidos en fósforo asimilable, el caso generalizado de la mayoría de los suelos agrícolas, las micorrizas, representan una contribución fundamental para la economía nutritiva de la planta (Azcón y Barea, 1980).

Este tipo de asociaciones al igual que las que ocurren en la fijación del nitrógeno, aumentan la posibilidad de éxito en el desarrollo de los vegetales.

## 2.2.4.- CALCIO

El contenido de calcio en la tierra asciende a un porcentaje de 3.64 %. Es así uno de los nutrimentos más abundantes en la corteza terrestres.

El calcio posee un papel muy importante en la edafogénesis, ya que es factor importante en la evolución de la materia orgánica, la formación de minerales secundarios, la naturaleza del complejo húmicoarcilloso y, por lo tanto, la estructura y su estabilidad.

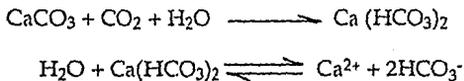
Los feldspatos tales como la anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), los anfíboles de calcio y magnesio ( $(\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Fe})_8\text{Si}_9\text{O}_{26}$ ), como por ejemplo la hornblenda ( $\text{Ca}_3\text{Na}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_8$

(Al,Fe)<sub>4</sub>Si<sub>14</sub>O<sub>44</sub>(OH)<sub>4</sub> tremolita 2CaO 5(Mg,Fe)O 8SiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O y actinolita (Ca,Fe)<sub>2</sub>(Mg,Fe)<sub>5</sub>(OH/Si<sub>4</sub>O<sub>11</sub>)<sub>2</sub>; los piroxenos ((Ca, Fe, Mg)SiO<sub>8</sub>), como la augita CaO 2(Mg,Fe)O (Al,Fe)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3SiO<sub>2</sub> e hiperstena (Mg,Fe)O SiO<sub>2</sub>, están incluidos en diversos tipos de rocas ígneas y metamórficas, por lo que son fuentes originales de calcio existentes en el suelo. Al intemperizarse estos silicatos en presencia de agua y ácido carbónico, mediante hidrólisis, hidratación y/o carbonatación, se forman diversas arcillas y quedan en libertad carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio, sodio y potasio (Krauskopf, 1983).

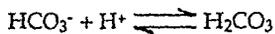
La forma más común de caliza en el suelo es la caliza, otros compuestos de calcio también muy comunes son las combinaciones de calcio y magnesio como la dolomita, (CaCO<sub>3</sub> MgCO<sub>3</sub>) y el yeso o sulfato de calcio dihidratado que, al perder agua de cristalización se denomina anhidrita (Flores, 1987).

En suelos débilmente ácidos, neutros y ligeramente alcalinos el Ca<sup>2+</sup> es el catión dominante en el complejo de adsorción, en suelos ácidos los cationes dominantes son el H<sup>+</sup> y el Al<sup>3+</sup>.

Los minerales que contienen calcio (tales como la calcita (CaCO<sub>3</sub>) o la dolomita (CaCO<sub>3</sub> MgCO<sub>3</sub>)) son muy importantes en la agricultura por su capacidad para la neutralización de la acidez en el suelo. Los carbonatos juegan una función importante en este tipo de reacciones como las siguientes:

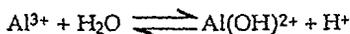


El HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> es el responsable de la neutralización del exceso H<sup>+</sup> en la solución del suelo. Esta reacción se describe de la siguiente forma:



Los iones H<sup>+</sup> removidos de la solución del suelo son parcialmente reemplazados por los iones H<sup>+</sup> del complejo de intercambio, el calcio puede tomar los lugares del H<sup>+</sup> del complejo de intercambio.

Si el complejo de intercambio es dominado por el Al<sup>3+</sup>, se llevará a cabo la siguiente reacción:



Los iones son neutralizados por HCO<sub>3</sub>. Gradualmente el Al<sup>3+</sup> se transforma en el complejo de intercambio a Al(OH)<sup>2+</sup>. Los lugares del complejo de intercambio son ocupados por el calcio. El Al(OH)<sup>2+</sup> puede reaccionar y cerca del pH 5.5 todo el Al<sup>3+</sup> es

precipitado como  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . El reemplazo del  $\text{H}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$  por  $\text{Ca}^{2+}$  deja mejores condiciones para el desarrollo de las plantas (Guiking, 1987).

### 2.2.5.- MAGNESIO

El contenido de magnesio en el suelo varía de 0.05 % en suelos arenosos a 0.5 % en suelos arcillosos. El magnesio se encuentra en varios minerales primarios tales como biotita, serpentina, hornblenda y olivino y en minerales secundarios como la clorita, vermiculita, illita y montmorillonita. La mayoría del magnesio se encuentra en la fracción arcillosa. En regiones áridas o semiáridas, el suelo puede contener grandes cantidades de magnesio como  $\text{MgSO}_4$  (Guiking, 1987).

El magnesio en forma intercambiable casi siempre es minoritario con relación al calcio intercambiable. En realidad son poco comunes las deficiencias o cantidades excesivas de magnesio. Un contenido alto de magnesio intercambiable en los suelos, algunas veces se asocia con condiciones semejantes a los generados en los suelos sódicos (Krauskopf, 1983).

La influencia del pH sobre la disponibilidad es indirecta. A pH bajo el  $\text{Al}^{3+}$  y el  $\text{H}^+$  son dominantes, poniendo al  $\text{Mg}^{2+}$  en posiciones menos competitivas. A pH alto la Capacidad de Intercambio de Cationes (CIC) de los suelos puede ser más alta aumentando así los posibles sitios de intercambio del  $\text{Mg}^{2+}$ , en este forma el Mg es mejor protegido del proceso de lavado (Guiking, 1987).

### 2.2.6.- POTASIO

El contenido de potasio varía en los suelos generalmente entre 0.04 y 3.0 %. La mayor parte de este potasio se encuentra enlazado con los minerales primarios o está presente en minerales secundarios. Por esta razón los suelos arcillosos son ricos en potasio (Mengel y Kirbky, 1987).

Algunos minerales primarios y secundarios, que poseen cantidades relativamente altas de potasio, se exponen en la siguiente Tabla.

**Tabla I.6. Minerales con altos contenidos de potasio (Mengel y Kirbky, 1987).**

Minerales	Contenido en% K <sub>2</sub> O
Feldespatos	4 - 15
Muscovita (K mica)	7 - 11
Biotita (Mg mica)	6 - 10
Illita	4 - 7
Vermiculita	0 - 2
Clorita	0 - 1
Montmorillonita	0 - 0.5

El potasio constituye una red fija entre las capas de los minerales tales como la biotita y muscovita. De los minerales secundarios arcillosos, la illita como se observa en la Tabla I.6, por ejemplo llega a retener de un 4 a 7 % de K<sub>2</sub>O (Flores, 1987).

El incremento del pH no tiene influencia significativa sobre la CIC de las arcillas, pero la CIC de la materia orgánica se incrementa considerablemente. La mineralización de la materia orgánica es mucho más manifiesta a pH alto. A pH bajo el Al<sup>3+</sup> y el H<sup>+</sup> pueden bloquear sitios donde el K<sup>+</sup> es mantenido (Guiking, 1987).

### 2.2.7.- HIERRO

El hierro se presenta en la tierra con un porcentaje de alrededor del 5 % total. Los minerales primarios en los cuales el hierro está presente incluyen los silicatos ferromagnesianos tales como el olivino, la augita, la horblenda y la biotita. Estos minerales junto con las micas, constituyen la mayor fuente de hierro en rocas ígneas. Los óxidos de hierro primarios se presentan en muchos suelos incluyendo la hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), la ilmenita (FeTiO<sub>3</sub>) y la magnetita (FeO Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). En rocas sedimentarias los óxidos de hierro y la siderita (FeCO<sub>3</sub>) son usualmente las formas primarias de hierro. El hierro también puede estar presente en minerales secundarios y en un gran grupo de arcillas minerales (Mengel y Kirbky, 1987).

En rocas sedimentarias se presentan en la forma de hidrosilicatos, cuyos ejemplos más comunes son la glauconita y la chamoisita (Fe,Mg,Al)<sub>6</sub>(OH<sub>2</sub>/(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>). Se presenta como constituyente menor de minerales secundarios tales como la montmorillonita y vermiculita.

El hierro es un elemento cuyo estado en el suelo informa mejor sobre la edafogénesis; por ejemplo, el grado de hidratación de los óxidos de hierro, del cual depende el color, suministra información sobre el microclima del suelo. Así el estado reducido de las sales de hierro imprime un color gris verdoso que indica insuficiencia de aireación en el suelo. La comparación del contenido en hierro de los diferentes horizontes informa sobre el grado de lavado del suelo. El hierro también interviene en la estructura de los suelos, favoreciendo con frecuencia estructuras

muy estables, aún en medio ácido, a condición de que la aireación sea suficiente y que el hierro se halle en estado férrico (Flores, 1987).

La solubilidad del hierro, como la mayoría de los micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo y B), es altamente dependiente del pH. Por lo común, a pH ácido el hierro se encuentra en estado soluble mientras que a pH alcalino es precipitado como hidróxido. Grandes cantidades de  $\text{Ca}^{2+}$  afectan la disponibilidad del hierro.

## 2.2.8.- MANGANESO

El manganeso se presenta en varias rocas primarias y particularmente en materiales ferromagnesianos. El manganeso en minerales secundarios proviene de la pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ) y la manganita ( $\text{MnO}_2 \cdot \text{Mn}(\text{OH})_2$ ). El manganeso es muy semejante al hierro, una de las grandes similitudes del  $\text{Mn}^{2+}$  y del  $\text{Fe}^{2+}$  es el tamaño del radio iónico de ambos, por lo que el manganeso por lo regular sustituye al hierro en silicatos ferromagnesianos.

Se presenta en rocas ígneas, principalmente en los minerales de silicato. Se encuentra en minerales en forma de óxidos, carbonatos, siendo más abundantes en basaltos que en granito.

El manganeso es más abundante en calizas y dolomitas que en esquistos. El intemperismo de silicatos o carbonatos que contienen manganeso, en ambientes con poco oxígeno es limitado, origina la presencia de  $\text{Mn}^{2+}$  en solución (Krauskopf, 1983).

Los niveles en el suelo difieren considerablemente, los contenidos de manganeso se encuentran entre 200 y 300 ppm. Las fracciones más importantes de manganeso en los suelos son los óxidos y las formas iónicas  $\text{Mn}^{2+}$ .

El pH sobre la disponibilidad del manganeso es de suma importancia se ha encontrado que del 75 % al 90 % del total del manganeso en solución está presente como ión libre en suelos con pH de 5.5 a 7.0. Un exceso de manganeso puede provocar deficiencias en la absorción del hierro, fósforo, magnesio y calcio por vegetales (Davis y Jones, 1988).

## 2.2.9.- COBRE

Se presenta en los suelos principalmente como ión  $\text{Cu}^{2+}$  adsorbido en minerales arcillosos y/o ligado por la materia orgánica. Se han realizado estudios que demuestran como la materia orgánica es el factor responsable de la adsorción del cobre por los suelos, (Sanders y Bloomfile, 1980). Además, el pH afecta marcadamente la adsorción del cobre sobre la materia orgánica ya sea soluble e insoluble (Flores, 1987). Sin embargo, su bajo potencial iónico lo hacen susceptible a procesos de lavado.

En forma natural muestra dos valencias, en depósitos minerales se encuentra principalmente, como sulfuros simples o en forma compleja con otros metales.

En rocas ígneas, se han obtenido evidencias de su presencia casi exclusivamente como gránulos submicroscópicos de sulfuro entre los cristales de silicatos, como minerales vestigiales sustituyendo elementos más abundantes en silicatos de Fe y Mg y como iones o sales adsorbidas en película o en superficie de cristales de silicatos.

En rocas sedimentarias la concentración es mucho más marcada en esquistos que en otras rocas. Esto sugiere que el cobre se encuentra adsorbido en partículas de granulación fina. El mineral calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) es muy abundante en este tipo de rocas, habiendo otros minerales sulfurados y minerales oxidados como los carbonatos básicos de malaquita ( $\text{Cu}_2((\text{OH})_2/\text{CO}_3)$ ) y azurita  $\text{Cu}_3(\text{OH}/\text{CO}_3)_2$  y los silicatos de crisocola ( $\text{CuSiO}_3$ ) que se revelan por sus brillantes colores (Krauskopf, 1983).

### 2.3.- ZINC

El único mineral de zinc es el sulfuro de zinc (ZnS) o Esfalerita. El ión  $\text{Zn}^{2+}$ , sin embargo sustituye en cierto grado al  $\text{Mg}^{2+}$  en minerales de silicato, y forma tres minerales de silicato llamados zincita, hemimorfita y willemita (Krauskopf, 1983).

En rocas ígneas sustituye al  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$  en silicatos. En rocas sedimentarias las mayores concentraciones son en esquistos. El zinc se encuentra adsorbido en gránulos finos y en parte arcillas sustituyendo quizás al  $\text{Mg}^{2+}$

El zinc es un metal altamente dependiente del pH, esto quiere decir que a valores muy bajos, una parte del zinc puede estar presente en el complejo de intercambio. A pH alto el zinc se reduce drásticamente (Krauskopf, 1983).

Con valores de pH menores de 7.7, la especie predominante es el  $\text{Zn}^{2+}$  a valores superiores, las especies predominantes son  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ . El  $\text{ZnCO}_3$  y el  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  son mucho más solubles que los complejos de zinc en el suelo, los cuales son responsables de la estabilización del zinc en la gran mayoría de los suelos (Flores, 1987).

### 3.- EL CONSORCIO MINERO BENITO JUAREZ-PEÑA COLORADA

#### 3.1 Generalidades

La minería se clasifica de acuerdo a su método de extracción en: subterránea, a cielo abierto y minería en fluidos. La minería a cielo abierto, que es el caso particular que nos ocupa, es aplicable a depósitos que poseen gran tonelaje de reserva. En este tipo de minería se considera, desde el principio la gran cantidad de residuos sólidos, por lo que los sitios de explotación y todo lo relacionado con el proceso de producción, se desarrollan a distancias muy cortas, para hacer más económicas las operaciones de movimiento de desechos (Enciclopedia MacGraw-Hill of Science and Technology, 1971).

Las ventajas de la minería superficial sobre los otros tipos de minería, en general son las condiciones más seguras de trabajo, la obtención más completa de depósitos, la explotación de yacimientos de difícil acceso y los bajos costos en las operaciones de extracción (Gilchrist, 1977).

La extracción del mineral se realiza a manera de un cono invertido. Las excepciones son las minas a cielo abierto desarrolladas sobre colinas o montañas. En este caso se realiza la extracción construyendo paredes a manera de terrazas con baches para permitir la entrada de la maquinaria de extracción y de los carros que transportan la roca mineral hasta el área de beneficio (Enciclopedia MacGraw-Hill of Science and Technology, 1971).

Los minerales que se extraen por este tipo de métodos son entre otros el hierro, el carbón y el cobre. La minería del hierro en nuestro país ha sido y es de suma importancia, ya que es la base de la industria siderúrgica y metalúrgica, junto con otros metales como el plomo, cobre, zinc y antimonio, entre otros.

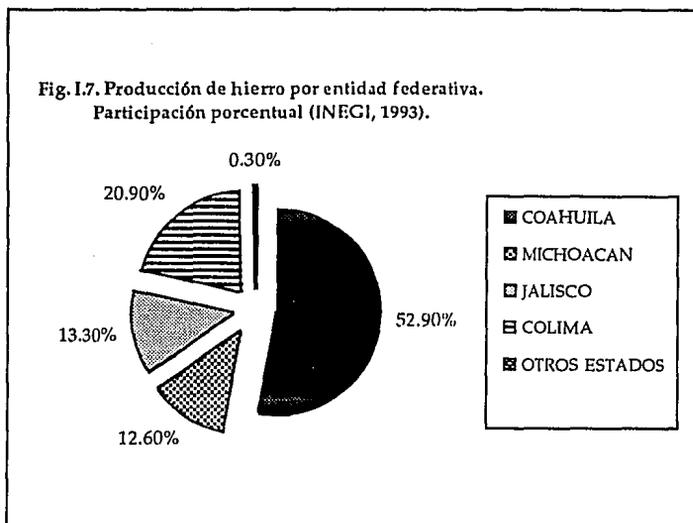
Desde 1975 y a consecuencia de un largo proceso iniciado en 1961 con la "Ley de Mexicanización minera", el gobierno de nuestro país le dió su real peso a la minería por considerarla básica para el desarrollo industrial del país.

México es un país con grandes reservas de mineral de hierro. Se ha determinado que las reservas de este mineral ascienden a 211,000,000 toneladas, de éstas, unas 156,000,000 toneladas son minables (Sariego, 1988). Los depósitos se localizan en ocho estados, que son: Coahuila, Colima, Chihuahua, Duintervalo, Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí y Zacatecas (Fig. I.6)

Fig. I.6 Localización de los principales yacimientos de mineral de hierro.



La producción de hierro en nuestro país hasta noviembre de 1992, ascendía a 543,144 toneladas. De este total el Estado de Coahuila produjo un 52.9%, seguido de Colima con un 20.9%, Jalisco con un 13.3%, Michoacán con un 12.6% y un 0.3% asignado a los de más estados productores (Fig. I.7).



En los últimos años, la minería del hierro ha crecido en importancia a pesar de que no figura dentro de los primeros lugares a nivel mundial, pero la industria siderúrgica y metalúrgica dependen de ella.

### 3.2 Historia

El Consorcio Minero Benito Juárez-Peña Colorada (CMBJPC), quedó constituido en 1967 con un capital inicial de 105 millones de pesos aportados por las principales empresas públicas y privadas de la siderúrgica básica (AHMSA, HYLSA, Fundidora de Hierro y Acero de Monterrey) y el Gobierno Federal, con el fin de explotar y beneficiar los yacimientos de Peña Colorada, localizados en el municipio de Minatitlán, Colima.

Inicialmente, la concesión de los yacimientos de Peña Colorada habían sido otorgados por el presidente Adolfo Ruiz Cortines a la Cía. Impulsora de Industrias Básicas en 1956. Esta compañía cuyos principales accionistas eran los licenciados Miguel Aleman y Agustín García López, hizo exploraciones con el fin de establecer una planta siderúrgica con capacidad de 250,000 ton. de lingotes de acero. Pero el mismo mandatario canceló la concesión meses después al comprobarse que más del

50% de las acciones estaban en manos del capital norteamericano representado por la Colorado Fuel & Iron Co., y el yacimiento pasó a formar parte del patrimonio de la Comisión de Fomento Minero (Sariago, 1988).

De 1959 a 1964 el Consejo de Recursos Naturales No Renovables (CRNNR), realizó reconocimientos geológicos, magnetométricos, gravimétricos y de perforación de barrenas de diamante que delimitaron la magnitud de las reservas de Peña Colorada. Durante sus primeros cuatro años de vida el CMBJPC continuó los estudios geológicos y metalúrgicos. Los estudios fueron concluidos en junio de 1971 y meses más tarde se adquirieron los terrenos, iniciando la construcción de las plantas y demás instalaciones.

La Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP), otorgó a este Consorcio la titularidad de 13 concesiones mineras de explotación, las cuales cubren un territorio de aproximadamente 4,000 has., que en su mayoría se localizan en el estado de Colima. Adicionalmente la Comisión de Fomento Minero, autorizó explotar una superficie de 86,000 has. situadas entre los estados de Colima y Jalisco (Gutiérrez, *et al* 1992).

En 1972, Peña Colorada inició las obras para la instalación de la mina y de las planta y tres años después, en 1975, entró en operación la primera fase comprendiendo una planta de molienda y concentración en el sitio más próximo a la mina, un ferroaducto de 44 km. de longitud para enviar el mineral por gravedad hasta una planta peletizadora con capacidad de 1,500,000 toneladas anuales ubicada en el puerto de Manzanillo, Colima. Para la localización de la peletizadora se consideraron las comunicaciones ferrocarrileras y marítimas con que cuenta el puerto y la posibilidad de que cuando se agotara el yacimiento, la peletizadora pudiera maquilar concentrado proveniente de otros yacimientos del país o del extranjero.

Al tiempo que entró en operación la primera planta peletizadora, se inició la construcción de una planta gemela que empezaría a operar en 1979, aumentando la capacidad productiva a 3,000,000 de toneladas de peletz. A este ritmo de producción, se calcula que la vida del yacimiento queda garantizada hasta el año 2010 o 2015.

Una vez terminada la ampliación, en el área de minas se han explotado yacimientos de menor ley más alejados de la planta lo que ha demandado la paulatina sustitución del equipo pesado original (perforadoras rotarias, palas y camiones) por otro de mayor capacidad. En el área de beneficio, se pretende optimizar el proceso metalúrgico y mejorar la calidad del peletz producido, teniendo como meta alcanzar y sostener la producción a plena capacidad. Lo más significativo ha sido la construcción de una planta preconcentradora y el avance en la automatización de las plantas peletizadoras.

La producción de Peña Colorada representaba en 1974 alrededor del 25% de la oferta nacional de mineral de hierro. Al entrar en operación, Altos Hornos de México, S.A. (AHMSA), aseguró el suministro regular y cuantitativo de peletz a largo plazo. Asimismo se redujo la dependencia nacional con respecto a las importaciones de mineral de hierro y se garantizó la estabilidad de los precios en el mercado local.

A diferencia de las filiales de AHMSA y Fundidora, Peña Colorada no funcionaba como centro de costo sino que se le asignaba un precio de venta a su producto. Este no se fijaba en función de las condiciones del mercado, sino que se acordaba por una serie de criterios contables, resultando 46% inferior por lo regular al que prevalecía en el mercado mundial. Esta política depreciación no evitó la descapitalización a largo plazo del Consorcio (Sariego, 1988).

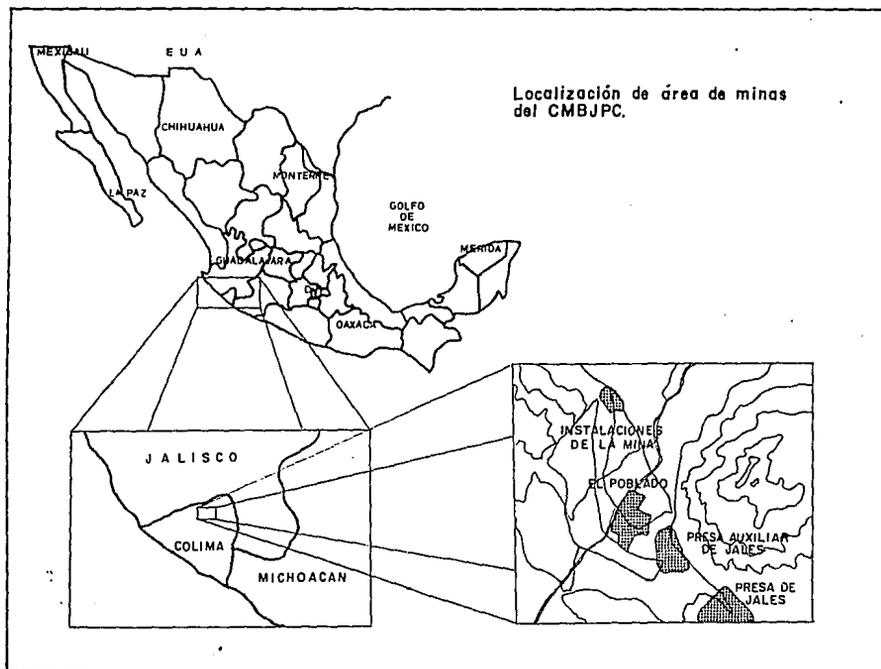
Como consecuencia de la venta de las empresas siderúrgicas del Estado anunciada el 22 de noviembre de 1991 por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, el 58% de las acciones del CMBJPC, que estaban bajo el control del Gobierno Federal, fueron adquiridas por el Grupo Acerero del Norte S.A. de C.V. y Siderúrgica del Balsas, asignada a la empresa Caribbean Ispat, LTD de capital Indio, y el resto de las acciones continúan perteneciendo a HYLSA, S.A. de C.V. y Siderúrgica TAMSA, S.A. (Gutiérrez, *et al*, 1992).

### 3.3 Descripción del medio físico

#### 4.3.1 Localización

El área de minas del CMBJPC, se encuentra localizada en los municipios de Minatitlán, Col., entre las siguientes coordenadas  $104^{\circ} 04'$  y  $104^{\circ} 08'$  grados de longitud oeste y entre los  $40^{\circ}$  y  $42^{\circ}$  grados de latitud norte. Las plantas de peletizado en el municipio de Manzanillo, están ubicadas entre los  $104^{\circ} 17'$  y los  $104^{\circ} 15'$  de longitud oeste y los  $10^{\circ}$  y  $12^{\circ}$  grados de latitud norte. (Fig. I.8).

Fig. I. 8 Localización de área de minas del CMBJPC



### 3.3.2 Clima

Los tipos de climas que se localizan en las áreas de los municipios de Minatitlán y Manzanillo son los siguientes:

**Clima Aw2(w).** La amplitud de su distribución cubre el municipio de Minatitlán, Col, y el Cihuatlán, Jal.

Este tipo de clima está clasificado dentro del grupo de los Cálidos, y también en el subgrupo de los Cálidos, es subhúmedo con lluvias en verano, con porcentaje de lluvia invernal menor al 5%, es el más húmedo de los Cálido Subhúmedos. Su marcha anual de temperatura se define como isotermal (i) y como de poca oscilación térmica con marcha tipo Ganges (en la estación de Cihuatlán, Jal).

**Clima AwO(w).** La amplitud de su distribución va desde la porción costera hasta los 800 msnm, cubriendo casi la totalidad del municipio de Manzanillo, Col. y parte de Cihuatlán, Jal. Cubre la totalidad de la Planicie Costera del estado de Colima y parte de la de Jalisco.

Este tipo de clima pertenece al grupo de los Cálidos y subgrupo de los Cálidos, es Subhúmedo con lluvias de verano, con porcentaje de lluvia invernal menor al 5%, y es el menos húmedo de los Cálido Subhúmedos. Su marcha anual de temperatura se define principalmente como isotermal (i) y solamente como de poca oscilación térmica en una de las cuatro estaciones mencionadas (García, 1987).

### 3.3.3 Vegetación

#### a) Tipos de vegetación en el área de minas:

Cerca del área de explotación existen algunos sitios que conservan la vegetación natural, sobre todo en las laderas de montaña que no han sido usadas para la explotación del mineral de hierro.

De acuerdo a la clasificación realizada por Rzedowski en 1981, los tipos de vegetación que se encuentran en el área de minas, son:

#### **Bosque tropical caducifolio**

Conjunto de bosques dominados por especies arborescentes que pierden casi por completo sus hojas en la época seca del año. Se presenta en clima semiseco o cálidos. Este tipo de vegetación se localiza desde las partes más bajas del área de estudio, 600 msnm aproximadamente, hasta los 1200 msnm. Destacan las siguientes especies: *Otate acuminata*, *Guazuma ulmifolia*, *Pithecellobium dulce*, *Cochlospermum vitifolium*, *Lobelia laxiflora*, *Calliandra houstoniana*, *Physalis nicandroides*, *Spondia purpurea*, *Leucaena sp.* y *Acacia farnesiana*.

## Bosque tropical subcaducifolio

Este tipo de vegetación la constituye especies de Bosque tropical perennifolio y Bosque tropical caducifolio solamente de un 50 a un 75% de sus árboles, pierden sus hojas en la época seca del año. Sin embargo, existen muchos componentes siempre verdes y otros que solo se desfolian por un periodo corto, a veces de unas cuantas semanas. Se presenta en lugares con una precipitación anual de alrededor de 1,200 mm. En el área de estudios este tipo de vegetación se encontró en cañadas húmedas y en zonas de altitud superior a los 1,200 msnm. Entre las especies observadas, destacan: *Enterolobium cyclocarpum*, *Roscodendron donell-smithii*, *Cochlospermum vitifolium*, *Cecropia obtusifolia*, *Bocconia arborea*, *Paullinia sessiliflora*, *Calliandra tetragona* y *Dalhia coccinea*.

## Bosque de encino

Llamado también Bosque de *Quercus* constituye un tipo de vegetación característico de las zonas montañosas de México. En La mina se presenta desde una altitud de 900 a 1 400 m. Se localizaron ejemplares de encinos: *Quercus peduncularis*, *Quercus acutifolia* y *Quercus magnifolia*.

## b) Vegetación en terreros y jales

Tanto en las áreas de terreros como en los caminos interiores de la mina, la vegetación corresponde a matorral secundario o de sucesión secundaria. Este tipo de vegetación es resultado de la destrucción del bosque original. Así mismo se encuentran zonas de pastizales, sobre todo en los terreros, donde algunos pastos se establecen como especies pioneras en la nueva sucesión (Gutiérrez, et al 1992).

En terreros inactivos, es común encontrar una especie arbustiva que se establece como dominante, este es el caso de *Pluchea symphytifolia*. También se encuentran pastos dominantes como el *Rhynchosystrochium repens*. En el talud de los terreros se presentan helechos (*Cheilanthes* spp) y *Wigandia urens*.

En las áreas interiores de acumulación de la presa de jales, donde el material se ha consolidado, se presentan manchones de vegetación, cuya instalación se ha favorecido por la presencia de depósitos de estiércol de bovinos. Las especies observadas son: *Amaranthus spinosus*, *Eryxrostis mexicana*, *Desmodium scorpiurus*, *Pithecellobium dulce*, *Paspalum virgatum*, *Eleusine indica*, *Panicum trichoides*, *Paspalum conjugatum*, *Phaseolus coccineus*, entre otras.

En los estratos arbustivos y arbóreos del interior de la presa, es común encontrar al salix, (*Salix humboltiana*). En las orillas de la presa está establecido, con aparente buen desarrollo, la especie acuática denominada Tule, (*Typha latifolia*). No obstante en estos sitios cuando el material se consolida, se observa el desarrollo de varias especies, entre ellas *Cologonia brossonettii*, y *Crusse longiflora*.

En las inmediaciones de la presa se observa vegetación que corresponde a la Selva baja caducifolia, como : *Pithecellobium dulce*, y otras más.

### 3.3.4 Geología

De acuerdo a su geología, el área de influencia del CMBJPC se localiza en la Sierra Madre del Sur. Esta provincia geológica abarca desde la porción sur de Jalisco hasta Oaxaca. En ella se forma el parteaguas que divide las vertientes del Golfo y del Pacífico y predominan rocas volcánicas y metamórficas, y en último término las sedimentarias (López, 1981).

El basamento de la Sierra Madre del Sur está conformado por rocas cristalinas y metamórficas, calizas plegadas y otros sedimentos clásticos asociados con ellas, además lavas e intrusiones principalmente graníticas. Tectónicamente no tiene relación con la Sierra Madre de Chiapas de la que está aislada por el Istmo de Tehuantepec.

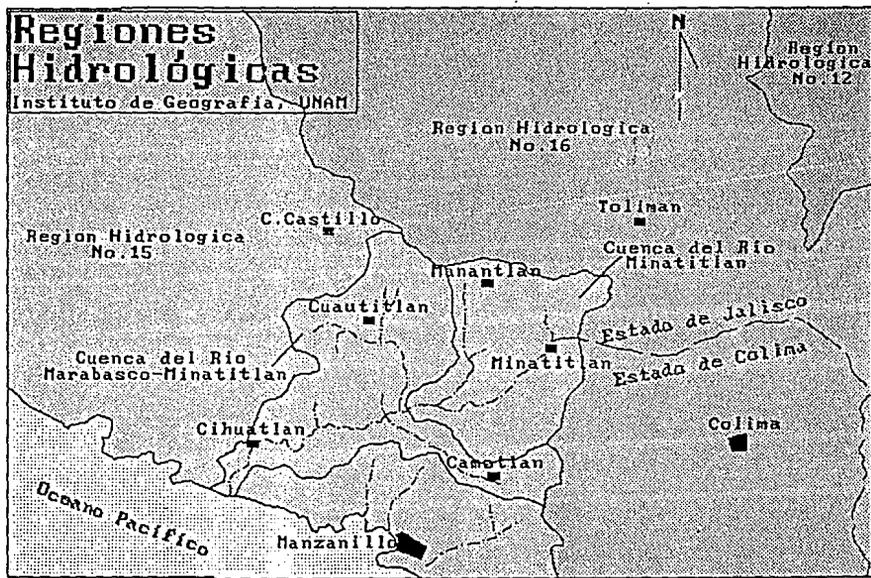
### 3.3.5 Hidrología

El estado de Colima y la porción sur de Jalisco, de acuerdo a sus características hidrológicas conforman las regiones Núm. 15 y 16 (SARH; 1971, 1977). La primera, conocida como "Costa de Jalisco", abarca 13,176 km<sup>2</sup> y la segunda 17,667 km<sup>2</sup>.

La Región Núm. 15 presenta, a lo largo de la Vertiente del Océano Pacífico, características homogéneas de carácter hidrográfico y orográfico. Está constituida por cauces de trayectorias longitudinales cortas, debido a la cercanía de las porciones costeras con respecto a las áreas montañosas constituidas por rocas graníticas. A esta región pertenece la cuenca del río Cihuatlán, la cual recibe las aguas del río Marabasco, en donde se depositan los sedimentos precedentes de los terreros del CMBJP (Fig. 1.9).

El régimen de las corrientes superficiales de estas regiones es variable debido principalmente a la influencia de la presencia de frecuentes ciclones en los meses de agosto a octubre. Las avenidas más importantes se presentan generalmente desde junio hasta octubre, con volúmenes y frecuencias máximas en el mes de septiembre (SARH,1971).

Fig. 19. Areas hidrológicas pertenecientes al área de influencia del CMBJPC (SARH, 1971, 1977).



### 3.3.6 Suelos

Los tipos de suelos localizados en el área de la mina según la clasificación FAO-UNESCO, son principalmente: Litosoles, Regosoles, Cambisoles y Fluvisoles. (Fig. I.10)

Los litosoles son suelos localizados sobre rocas duras, aunque en realidad el límite con el grupo de los regosoles es difícil de definir, existe un mayor grado de materia orgánica en la superficie de estos suelos lo cual los emparenta con los rankers (Duchaufour, 1984). Estos suelos comprenden la mayor extensión superficial del área de estudio, sobre todo en las laderas más abruptas, donde ahora se realiza la explotación del mineral de hierro.

Los regosoles se localizan hacia el norte y el sur del área de la mina, en las partes bajas de las montañas y en los piedemontes. Estos son suelos pobres en materia orgánica, característicos de las pendientes donde el rejuvenecimiento por la erosión interviene en forma intrínseca. Son poco evolucionados y localizados muy frecuentes sobre rocas blandas.

Los cambisoles, suelos pardos templados o tropicales con horizonte B Cámbico (Duchaufour, 1984), están en los piedemontes adyacentes a las planicies del Río Minatitlán y en esta última se localizan los fluvisoles los cuales son suelos aluviales y coluviales.

Los suelos aluviales constituyen los depósitos recientes de los valles, donde ocupan el "lecho mayor"- con frecuencia inundado de los ríos, se caracterizan por la presencia de una capa freática sometida a fuertes oscilaciones estacionales. Los suelos coluviales caracterizan los piedemontes y están formados por un material de aporte procedente de la erosión de las cimas de las pendientes, en general están desprovistos de capa de agua (Duchaufour, 1984).

Las áreas de depositación de jales, se asientan sobre cambisoles, y en menor proporción sobre fluvisoles y regosoles. El tipo de suelos donde se localiza la planta peletizadora es el Feozem.

Los usos del suelo particulares que se presentan en el interior de la mina y del área de depositación de jales, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- \* uso para terreros, descapote, grava y gravilla (explotación del mineral y descarga de material estéril)
- \* uso para la infraestructura empleada en la presa de jales, caminos de acceso, líneas de ductos para el transporte de jales, líneas de conducción eléctrica, áreas de depósito, estaciones de bombeo, etc.

\* uso para infraestructura de procesamiento, laboratorios, administración, alimentación y mantenimiento

\* uso para caminos en las áreas de descapote, proceso administración, presa de jales, línea del ferroaducto, y servicios en general

\* uso urbano en el poblado de Peña Colorada: áreas de vivienda, de esparcimiento, de servicios de salud, transporte, educación, etc.

\* uso agropecuario: en algunas porciones de laderas existen pastizales inducidos para la alimentación del ganado (Gutiérrez, *et al* 1992).

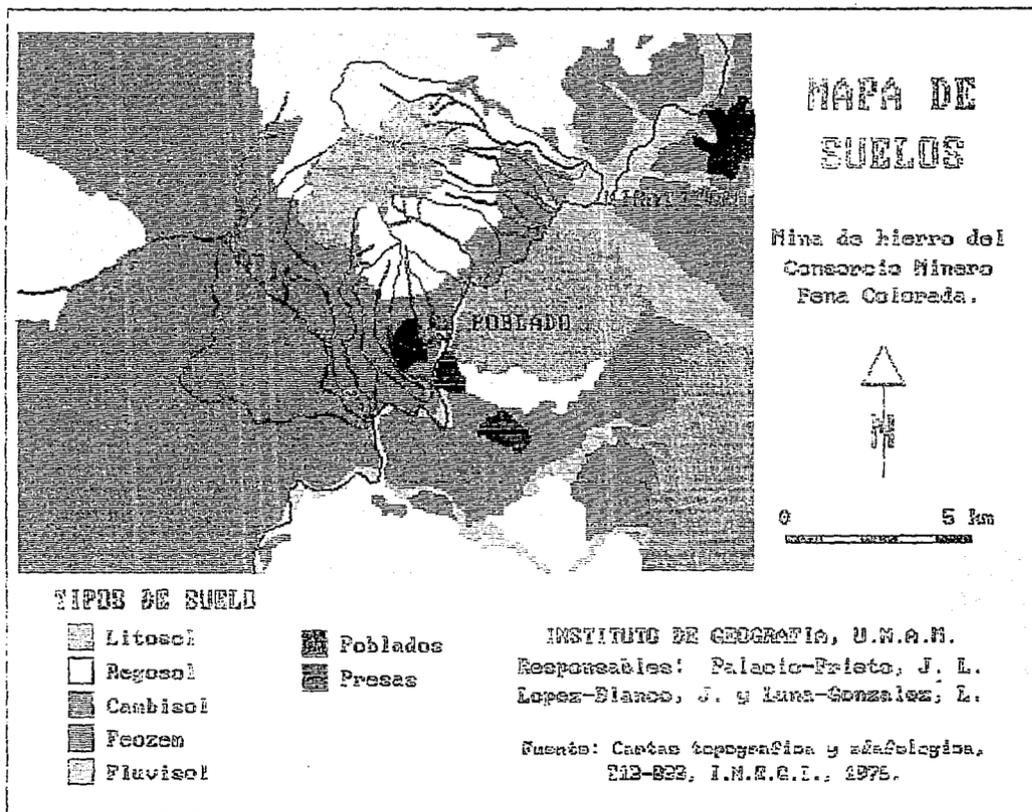


Fig. I.10. Suelos localizados en el área de explotación del CMBJPC

## 3.4 Descripción general del proceso productivo

El CMBJPC, cuenta con dos unidades productivas ubicadas en distintas localidades: la mina y las plantas de concentración en el municipio de Minatitlán y la planta peletizadora en Manzanillo. La primera cuenta con diversa infraestructura de servicios y de un poblado, se realizan las siguientes operaciones: exploración, descapote, trituración y preconcentración, molienda y concentración. Mientras que en la unidad de Manzanillo, se lleva a cabo el peletizado -que incluye la cocción y almacenaje- y el embarque. El diagrama de la Fig. I.11 ilustra este proceso en general, además de puntualizar los problemas relacionados con la disposición de residuos sólidos.

Fig. I.11. Descripción general del proceso productivo (Gutiérrez, *et al* 1992).

## 3.5 Problemas relacionados con la disposición de residuos sólidos en el área de minas

### 3.5.1 Impactos en área de la mina

a) las bolsas de nylon del nitrato de amonio que se utiliza en la voladura, se desechan a cielo abierto, destruyendo la vegetación y favoreciendo la presencia de fauna nociva

El nitrato de amonio se recibe en sacos de 50 kg. se utiliza tanto en las voladuras de descapote (preparación) como en las de disposición de mineral (extracción). Se ha calculado que solo en el año de 1990, el consumo de sacos de nitrato de amonio fue de 141,700. Todos los sacos de plástico vacíos se depositan en terreros inactivos de donde son dispersados por el viento

b) durante el descapote se destruye el suelo y la vegetación de las áreas expuestas y se generan acumulaciones inestables de sedimentos. La acumulación de estos sedimentos ocasiona daños a la infraestructura y modifica de diversas maneras a otros elementos del entorno (cambios en la morfología de lechos fluviales). Se ha calculado que por cada tonelada de mineral que se extrae, se necesitan separar aproximadamente 2.8 toneladas de descapote. El movimiento de material total que se lleva a cabo es de 70,000 toneladas diarias. Todo este material es depositado en los alrededores de la zona de extracción (PIQAyQA, 1991a)

c) el material estéril descartado en este proceso es anguloso y con un tamaño no mayor a 30 cm. Se deposita en terreros localizados en las áreas agotadas de la mina

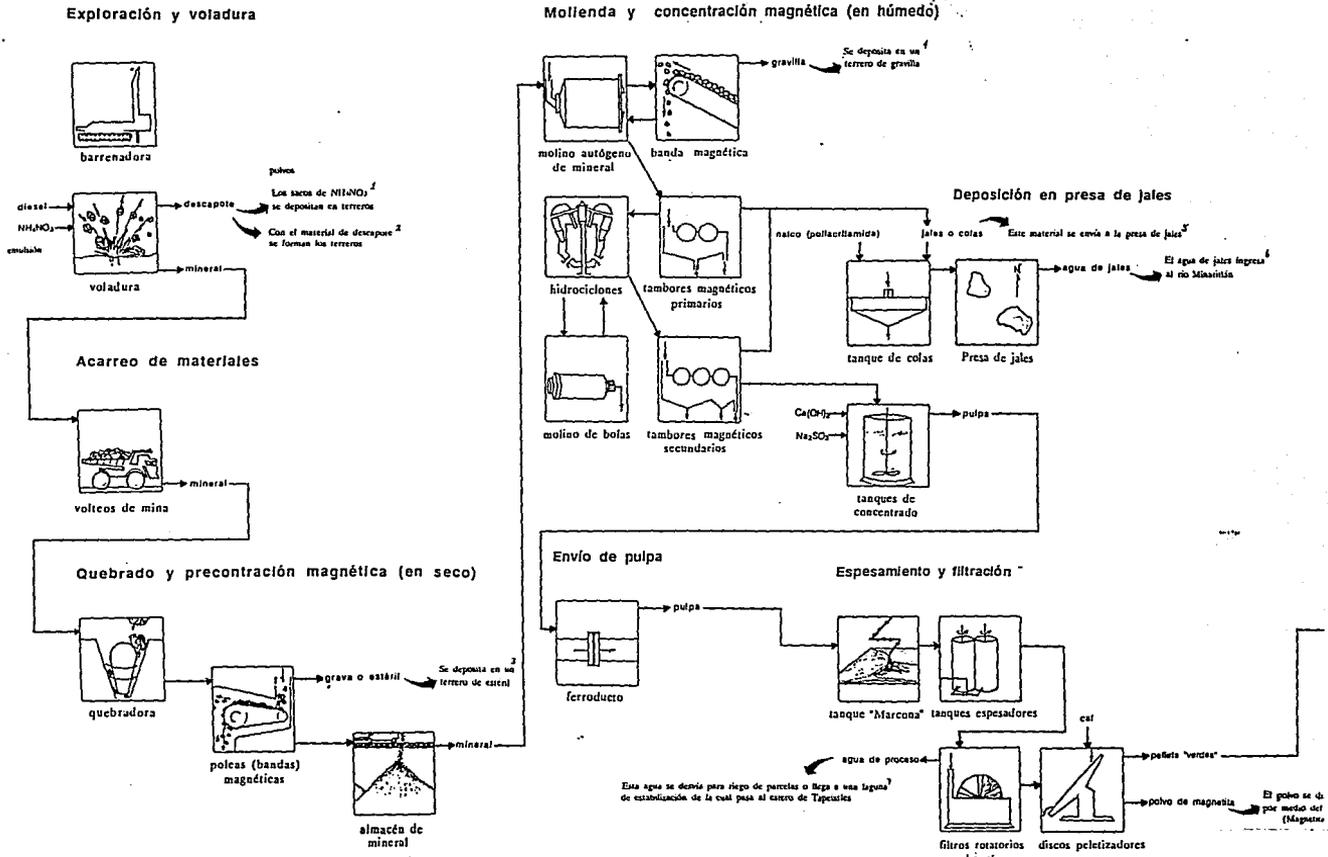


Fig. I.11. Descripción general del proceso productivo (Gutiérrez, et al 1992).

d) la gravilla que se genera durante el molido autógena, es depositada en el terrero de gravilla con una ángulo natural de reposo, en zonas contiguas a las de estéril

e) las colas del proceso de beneficio se envían a la presa de jales, la cuál va creciendo con el continuo aporte de sedimentos. Se estima que la producción diaria de jales alcanza un promedio de 4,000 toneladas diarias

f) el agua que acompaña a los jales, una vez clarificada, ingresa al río Minatitlán, lo mismo que el agua de lluvia que cae sobre la presa.

Tabla 1.7. Elementos ambientales dañados por las distintas etapas del proceso productivo (Gutiérrez, et al 1992).

Proceso	Material	Aire	Agua	Suelo	Fauna	Flora	Hombre	Riesgo
Extracción	descapote	+	++	++++	+	+++	+	++
Preconcentración	Estéril precon.	+	+	++	+	++	+	+
Concentración	gravilla	+	+	+++	+	+++	+	+++
Concentración	jales	+	+	++	++	+++	+	+
Servicios	aguas negras (Poblado)	+	+++	+	++	+	+	++
Servicios	basura de comedor	+	+	++	++	+	+	+
Servicios	basura de "El Poblado"	+	+	++	++	+	+	++
Extracción	Sacos de NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	+	+	++	+	+++	+	+
Mantenimiento	Aceite lubricante	+	++	++	+	++	+	+
Peletizado	Agua de proceso	+	+	+	+	+	+	+
Peletizado	Polvos	++	+	+	+	++	++	+
Proceso global	Aguas residuales		+	+	+	+	+	+
Embarque	basura de góndolas	+	+	++	+	+	+	+
Peletizado	gases de combustión	+++	+	+	++	++	++	+

(+) modificación leve de las condiciones naturales, (++) modificación severa de las condiciones naturales, (+++) daño de extensión e intensidad limitada, (++++) daño de gran intensidad y extensión.

En Gutiérrez, *et al* 1992 se definen dos tipos de depósitos asociados al proceso de extracción: los terreros y los jales.

**a) Terreros:**

Depósitos conformados con el material estéril (ganga) que acompaña al yacimiento de mineral y que es desechado por no contener valor comercial. Existen dos tipos de terreros:

\* terreros conformados con descapote; es decir, con material superficial o interestratificado, que es removido para acceder a las áreas mineralizadas, mismo que es depositado en las laderas cercanas. Comúnmente se le denomina como "descapote"

\* terreros compuestos de grava y gravilla provenientes de los procesos de preconcentrado y molienda autógena. Comúnmente se le llama "estéril".

**b) Presa de jales:**

Lugar donde se acumulan los lodos residuales que se conocen como "colas", y proceden de la separación magnética del mineral de hierro.

Los terreros pueden ser clasificados en 3 categorías: los inactivos permanentes (9 terreros, con una superficie total aproximada de 365,000 m<sup>2</sup>); los inactivos temporales (7 sitios con una superficie total aproximada de 205,000 m<sup>2</sup>) y los activos (4 sitios con una superficie total aproximada de 450,000 m<sup>2</sup>).

Los terreros inactivos permanentes son depósitos que han dejado de recibir material de descapote. Los terreros inactivos temporales son aquellos depósitos en los que actualmente no se arroja descapote pero que se proyecta reactivarlos en un término no mayor de 3 años, de acuerdo a los planes de operación de la empresa. Por último, los terreros activos, son aquellos que reciben actualmente el material de descapote, grava y gravilla.

En la siguiente Tabla se proporcionan las características dimensionales además de la clasificación de los terreros conformados por descapote.

Tabla I.8. Características de los terreros conformados por descapote (Gutiérrez, *et al* 1992).

Número	Clave	Superficie (m <sup>2</sup> )			Talud principal		T	Forestado	Notas	
		Total	Meseta	Talud	Altura	Orient.				(años)
					(a)	Uso				
1	1150 I	54279	9393	44886	100	E	A	4	si	
2	1190 I	46034	15271	30763	90	NE	B		no	1
3	1240 A I	81911	9994	71917	250	NE	A	5	si	
4	1260 I	2859	2859	s/talud	20	NE	A	7	si	
5	1250 I	60340	17224	43116	170	NE	B	6	si	2
6	1240 B I	3690	3690	s/talud	s/talud	s/talud	A	6	si	
7	1230 A I	55516	15885	39631	120	N	A	5	si	
8	1290 I	25944	7126	18819	90	N	A	8	no (nat)	
9	1084 I	36362	4773	31589	120	SE	B	9	no (nat)	3
10	1230 B	13686	8549	5137	50	S	C			
11	1225	7553	2968	4585	45	S	C			
12	1210	7731	3061	4670	30	SW	C			
13	1155	33028	33028	s/talud	s/talud	s/talud	C			
14	1150	82279	26155	56124	90	SW	C			
15	1122	12924	12924	s/talud	s/talud	s/talud	C			
16	1108	48539	15740	32799	38	SW	C			
17	1070	152089	66008	86081	120	SW	D			
18	1030	85825	43750	42075	140	W	D			
19	985	102450	45383	57067	105	W	D			
20	910	113344	43163	70181	60	N,SW	D			
Totales:		1026383	386944							

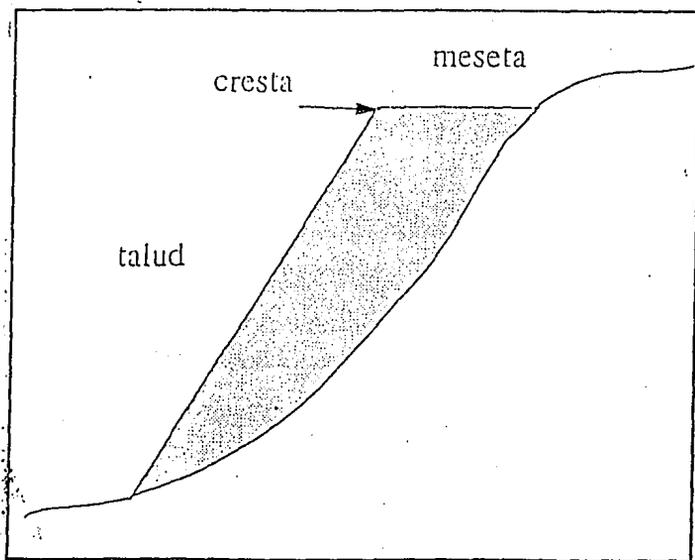
A: Inactivo permanente, sin uso actual. B: Inactivo permanente utilizado como tiradero de basura. C: Inactivo temporal, a reactivarse a futuro. D: Activo, en uso. T: Tiempo sin uso.

Notas: 1) Taller de mantenimiento mecánico de vehículos. 2) Se quena basura. 3) Patio llantas, falta nivel.

En el área de interés existen unos veinte terreros. Considerando el área ocupada por la meseta y talud, abarcan una superficie total aproximada de poco más de un millón de metros cuadrados (poco más de 100 has). Cada uno de los terreros es identificado de acuerdo con la altitud (msnm) donde se localiza su meseta; cuando el valor altitudinal coincide para dos terreros se les diferencia con letras.

Con base en su morfología se pueden distinguir tres elementos en los terreros: el talud, la cresta, y la meseta (ver Fig. I.12 ). En el caso de los taludes existe homogeneidad en cuanto a su pendiente, toda vez que el proceso de su generación es el mismo; el vertido de material por volteo ocasiona que los materiales se acumulen de acuerdo a su ángulo de reposo (ángulo umbral), disponiéndose en pendientes de alrededor de los 45 grados de inclinación, en prácticamente todos los casos. La longitud del talud es variable, ya que además de la cantidad de material vertido, depende de la longitud e inclinación de la ladera del terrero original. Por otro lado la superficie de la meseta, en la mayoría de los casos prácticamente horizontal, es también variable, de menos de una y hasta más de cinco hectáreas.

Fig. I.12. Elementos del terrero: talud, cresta y meseta (Gutiérrez, et al, 1992).



## II.-JUSTIFICACION

El presente trabajo forma parte del proyecto realizado por Investigadores del Instituto de Geografía y la Facultad de Química dentro del marco del Programa de Ingeniería Química y Química Ambiental (PIQAYQA) titulado "Evaluación de las afectaciones al ambiente relacionados con las actividades del Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada. S.A. de C.V".

Como se ha visto a lo largo del presente trabajo, la importancia de la minería para nuestro país en el plano económico es grande, sin embargo, la realización de estudios que expongan los problemas ambientales que este tipo de industrias provocan contradictoriamente son muy escasos. En los subcapítulos 2 y 4 de la introducción de este trabajo, se describen los problemas que provocan las actividades mineras sobre los distintos elementos ambientales (destrucción del suelo y la vegetación, extermínio de fauna local, acumulación de basura, contaminación por polvos y elementos tóxicos de aire y aguas, entre otras cosas).

Desde 1972, la primera Ley sobre la materia resaltaba la urgente necesidad de la planeación en todas las actividades industriales que de alguna forma dañarán el ambiente, a pesar de esto, hoy en día, nuestro país se enfrenta a múltiples problemas de impacto ambiental provocados por el grueso sector industrial y una política tolerante que ha desatendido las normas básicas exigidas en materia de impacto ambiental por las propias leyes del país (ver introducción).

El trabajo desarrollado por el PIQAYQA, posee como objetivos principales plantear las estrategias a seguir para remediar en lo posible los problemas ocasionados por el Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada sobre el ambiente.

De los objetivos contemplados por el proyecto en general del PIQAYQA, este trabajo de tesis se centró en lo relacionado al estudio de las características físicas y químicas de los sustratos de terreros y jales de las zonas de depositación, como un elemento más para poder delinear las posibles opciones de mejoramiento en lo referente a la introducción de una cobertura vegetal en terreros y la posible reutilización de los jales en éstos.

La rehabilitación de zonas alteradas por actividades mineras tiene antecedentes en México muy recientes. Los estudios que se han realizado están relacionados sobre todo con la minería del carbón, (García, 1986 y Valdez, 1986), lo que hace muy grave el problema ya que México es un país minero por excelencia (ver Tabla I.1), además de que tales actividades llevan siglos realizándose en nuestro país.

Es necesario desarrollar una industria acorde con estudios científicos que la vuelvan menos agresiva con el medio ambiente, por lo menos en cuestión de leyes México así la exige, desde este punto de vista, trabajos como el presente en nuestro país son justificables, necesarios y hasta urgentes ya que la industrialización hoy en día va en aumento y las consecuencias que este proceso en cuestiones ambientales provoquen pueden ser fatales si no se prevén soluciones y se acatan las leyes correspondientes.

### III.- OBJETIVO

Evaluar las características físicas y químicas de los sustratos de terreros y jales de las áreas de depositación para el diagnóstico de la fertilidad y analizar las opciones de mejoramiento de ambos sustratos con el fin de acelerar la implantación de una cobertura vegetal.

### IV.- MATERIAL Y METODO

#### Trabajo de Campo

En octubre de 1991 se realizó el muestreo en el área correspondiente a la zona de terreros y de depositación de jales. (ver Fig. 1.8).

#### Zona de terreros.

La selección de los sitios de muestreo, se realizó bajo el criterio de la presencia o ausencia de vegetación (vegetación arbustiva y pastos), con este mismo criterio, se definieron posteriormente los grupos para su análisis, distinguiendo tres para la zona de terreros: sin vegetación, con vegetación y con pastos

Fueron escogidos tres terreros inactivos permanentes estos son los siguientes: 1250, 1246, y el 1150. El muestreo fue realizado elaborando 15 pozos en total, cavados con pico y pala, de profundidad variable entre los 10 y los 30 cm., distribuidos en los tres terreros de la siguiente manera, siete pozos para el 1250, cuatro para el 1246 y cuatro para el 1150. Ya que se encontraron en cuatro pozos del terrero 1250, dos capas diferenciadas se midieron con cinta métrica y cada capa se muestreó por separado

Una vez colectadas las 19 muestras, fueron colocadas en bolsas de plástico con su etiqueta respectiva y trasladadas al laboratorio tres días después.

#### Zona de depositación de jales.

El muestreo en esta zona, se llevó a cabo tomando 12 muestras distribuidas en una área no inundada de la presa de jales. Para la recolección de muestras se utilizó barrena de 1 m y se dividieron en 5 grupos en base a su textura. Las muestras se etiquetaron y fueron trasladadas al laboratorio.

## Trabajo de laboratorio

Una vez en el laboratorio, todas las muestras se colocaron en charolas metálicas individuales y se dejaron secar durante tres días. Posteriormente fueron tamizadas en malla de 2 mm. Una vez realizado lo anterior se procedió a llevar a cabo los análisis correspondientes para su caracterización física y química.

### Determinaciones físicas

Se realizaron las siguientes:

- a) Densidad aparente. Método de la Probeta (Baver, 1956).
- b) Densidad real. Método del Picnómetro (Baver, 1956).
- c) Color. Comparación con Tablas de Munsell (Munsell, 1976).
- d) Textura por el Método del Hidrómetro de Bouyoucos (1951).
- e) Textura por el Método de Campo de Schlichting y Blume (1966).
- f) Capacidad de Campo. Con olla de presión a 0.3 atm. de presión. (En Gutiérrez y Ortíz, 1986).
- g) Porosidad (En Gutiérrez y Ortíz, 1986).

### Determinaciones químicas

- a) pH relación 1:2.5 agua (Houba, *et al* 1988).
- b) Conductividad eléctrica relación 1:2.5 agua (Houba, *et al* 1988).
- c) Materia orgánica por el Método de Walkley-Black (1947).
- d) Capacidad de Intercambio de Cationes. Con Sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ) 0.02 M (Houba, *et al* 1988).
- e) Determinación de  $K^+$  y  $Na^+$ . Con Cloruro de Bario 0.01M (Houba, *et al* 1988).
- f) Determinación de  $Ca^{2+}$ . Por método de Bascomb pH 8.1 (Houba, *et al* 1988).
- g) Determinación de  $Mg^{2+}$   $Mn^{2+}$  y  $PO_4^{3-}$ . Por extracción con Cloruro de Calcio 0.01 M (Houba, *et al* 1988).
- h) Determinación de  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  y  $Zn^{2+}$ . Extracción con EDTA pH 7.0 (En Gutiérrez, 1982).
- i) Determinación cualitativa de sulfatos y nitratos mediante el Método de Morgan. (USDA, 1984).

## V.- RESULTADOS

El total de muestras analizadas de terreros fueron 19 y 5 de los jales. La división posterior de los datos en los tres grupos resultantes (grupo sin vegetación, con vegetación y con pastos), surgió de la necesidad de explicar el porqué se encontraron en las áreas de terreros, zonas cubiertas de vegetación arbutiva, zonas con pastizales y zonas donde sencillamente no había nada (ver punto 3.3.3). Las muestras de jales fueron rotulados como jales.

Los grupos de terreros fueron rotulados como fue la observación al ser muestreados: grupo: sin vegetación, con vegetación y con pastos.

Los cuatro diferentes grupos (terreros y jales) fueron analizados obteniendo sus propiedades físicas y químicas y comparándolos para establecer las recomendaciones a seguir en lo que se refiere a los objetivos planteados.

Los resultados obtenidos de las características físicas de las áreas de terreros y jales, se muestran en las Tablas V.1, V.2, V.3 y V.4. De la misma manera los resultados de los análisis químicos son mostrados en las Tablas V.5, V.6, V.7 y V.8.

Los resultados físicos son los siguientes:

La Tabla V.1, muestra los resultados obtenidos para el grupo sin vegetación. En general la coloración de las muestras son amarillas indicando la presencia de minerales ricos en óxidos de hierro en este caso magnetita. Las densidades aparente y real son altas. El porcentaje de partículas es bastante alto, esto confiere a los sustratos una baja porosidad y capacidad de campo, lo cual en términos reales significa una retención de humedad muy baja.

Tabla V.1. Grupo sin vegetación

m	color seco	húmedo	D.A. g/cc	D.R. g/cc	Poros %	C. C. %	Textura		Clase textura
							Limos %	Arenas %	
1	2.5Y 5/2	5Y 3/2	1.53	2.77	45.11	18.38	20	80	Arena franca
2	2.5Y 5/2	5Y 3/2	1.66	3.06	46.15	16.36	17.5	82.5	Arenoso
3	2.5Y 5/6	2.5Y 5/2	1.78	3.16	43.85	15.18	25	75	Arena franca
4	2.5Y 4/4	7.5Y 3/2	1.63	2.96	42.84	15.8	18	82	Arenoso
5	5Y 4/4	7.5Y 3/2	1.68	3.81	56.06	16.54	7.5	92.5	Arenoso
6	2.5Y 5/2	5Y 3/2	1.49	2.74	45.6	15.48	20	80	Arena franca
p			1.63	3.08	46.60	16.29	18	82	Arenoso
std			0.11	0.39	4.79	1.15	5.79	5.79	

El grupo con vegetación posee coloraciones muy parecidas al grupo sin vegetación, como lo muestra la Tabla V.2. En densidades aparente y real las muestras de este grupo son bastante variables, la desviación estandar es alta como consecuencia de la existencia de valores que van desde 1.13 en la primera muestra hasta 1.96 en la tercera muestra, hay que recordar que los terreros son verdaderos mosaicos de material revuelto entre rocas, suelo y subsuelo. Las capacidades de campo y el porcentaje de porosidad también son muy variable, la primera muestra tiene valores altos de capacidad de campo y porosidad. La textura en general es arenosa por lo que al igual que en el grupo anterior la retención de humedad es muy deficiente. Sin embargo, en la primera muestra aunque con porcentaje alto en arenas su capacidad de campo y porosidad es adecuado, en este caso -como veremos más adelante- la materia orgánica juega un papel importante.

Tabla V.2. Grupo con vegetación

						Textura			
m	color	D.A.	D.R.	Poros	C. C.	Limos	Arenas	Clase textura	
	seco	húmedo	g/cc	g/cc	%	%	%	%	
1	5Y 5/3	7.5Y 5/2	1.13	2.83	60.02	19.56	20	80	Arena franca
1a	5Y 7/1	7.5Y 5/2	1.61	2.53	36.41	19.73	16	84	Arenoso
2	2.5Y 4/2	5Y 4/2	1.44	2.72	47.24	15.18	18	82	Arenoso
2a	2.5Y 5/4	5Y 4/2	1.41	2.7	47.69	16.64	8	92	Arenoso
3	5Y 4/4	7.5Y 3/2	1.96	3.36	42.81	14.13	18	82	Arenoso
4	2.5Y 5/4	5Y 3/2	1.92	3.05	52.5	16.42	12	88	Arenoso
p			1.58	2.87	47.78	16.94	15.33	84.67	Arenoso
std			0.32	0.30	8.08	2.28	4.50	4.50	

Los resultados del grupo con pastos presentados en la Tabla V.3, muestran una gran similitud con el grupo sin vegetación, obviamente con sus restricciones ya que en general los tres grupos comparten características físicas muy parecidas. El color no varía mucho, los amarillos siguen presentes, Las densidades son más parecidas al grupo sin vegetación y la textura sigue la misma tendencia que en los grupos anteriores, es decir gran porcentaje de arenas y bajas capacidades de campo.

Tabla V.3. Grupo con pastos.

m	color		D.A. g/cc	D.R. g/cc	Poros %	C. C. %	Textura		Clase textura
	seco	húmedo					Limos %	Arenas %	
1	25Y 4/4	2.5Y 3/2	1.63	2.92	44.12	18.11	20	80	Arena franca
1a	25Y 4/2	5Y 3/2	1.72	3	42.84	16.67	20	80	Arena franca
2	25Y 4/4	5Y 3/2	1.41	2.82	50.12	16.03	18	82	Arenoso
2a	25Y 5/4	2.5Y 4/2	1.28	2.74	53.41	15.71	17.5	82.5	Arenoso
3	5Y 4/4	10Y 3/2	1.81	3.04	40.55	16.12	16	84	Arenoso
4	5Y 4/4	7.5Y 3/2	1.94	3.42	43.51	15.29	20	80	Arena franca
5	5Y 4/2	2.5Y 3/2	1.92	3.4	43.53	14.02	20	80	Arena franca
p			1.67	3.05	45.76	15.99	18.79	81.42	Arenoso
std			0.25	0.27	4.92	1.25	1.63	1.63	

m = muestra, p = promedio, std = Desviación estandar.

D.A. = Densidad aparente, D.R. = Densidad real.

C. C. = Capacidad de Campo.

La Tabla V.4, muestra coloraciones más oscuras que las de terreros esto indica un ambiente más reductor, con ausencia de oxígeno y mayor contenido de agua. La densidad aparente es mucho más baja que en los grupos de terreros. La clase textural indica que existen porcentajes elevados de partículas finas, este hecho le da a los jales capacidades de campo más óptimas, lo que se traduce en una mayor retención de agua

Tabla V.4. Grupo jales

m	color		D.A. g/cc	D.R. g/cc	Poros %	C. C. %	Clase textural
	seco	húmedo					
1	5Y 4/2	2.5GY 3/2	1.11	2.84	61.09	36.12	Franco arcillo arenoso
2	5Y 4/1	10GY 3/1	1.54	3.13	50.96	22.45	Franco arenoso
3	5Y 4/1	2.5GY 3/2	1.12	2.86	60.79	34.09	Franco arenoso
4	5Y 4/1	5GY 3/1	1.47	3.11	52.82	22.47	Franco arcilloso
5	5Y 4/1	5Y 4/1	1.56	3.11	49.92	22.48	Franco arcilloso
p			1.36	3.01	55.12	27.52	
std			0.23	0.15	5.42	6.96	

m = muestra, p = promedio, std = Desviación estandar.

D.A. = Densidad aparente, D.R. = Densidad real.

C. C. = Capacidad de Campo.

Los resultados de los análisis químicos son los siguientes:

La Tabla V.5, muestra los resultados químicos del grupo sin vegetación. De las variables de mayor importancia en el análisis químico de suelos, destaca el pH, ya que apartir de este factor se puede tener una idea del estado en que se encuentran los distintos elementos químicos que conforman el suelo. (ver Fig. 1.4). El pH para este grupo, no es nada homogéneo, su intervalo de valores van de la fuerte acidez hasta la neutralidad. La acidez de un suelo está íntimamente ligada a la presencia de aluminio y hierro en grandes cantidades, estos elementos son abundantes en el grupo, y de hecho hay una relación bien definida entre el pH, el aluminio y el hierro existente, como se puede observar. La conductividad eléctrica es alta. Los valores de materia orgánica y CIC son bastante bajos. El calcio se encuentra en grandes proporciones y el potasio posee niveles normales, el magnesio rebasa los niveles normales, aunque su interacción sobre todo con el aluminio lo limita en el complejo de intercambio. La presencia de los micronutrientes como el cobre, zinc y manganeso es: normal para el cobre y baja para los dos restantes. Las cantidades de sodio son también muy bajas. La presencia de nitratos no es significativa, sin embargo los sulfatos, se encuentran en grandes cantidades sobre todo en las muestras donde el pH es muy ácido y el aluminio y el hierro son abundantes (Guiking, 1987).

Tabla V.5. Grupo sin vegetación

m	C.E.	pH	M.O	CIC	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	*	*		
	H <sub>2</sub> O 1:2.5 mmhos/cm	H <sub>2</sub> O 1:2.5 g/mL	%	BaCl <sub>2</sub> meq/100g	TEA meq/100g	CaCl <sub>2</sub> meq/100g	BaCl <sub>2</sub> meq/100g	BaCl <sub>2</sub> meq/100g	CaCl <sub>2</sub> mg/Kg	EDTA-NH <sub>4</sub> mg/Kg	EDTA-NH <sub>4</sub> mg/Kg	EDTA-NH <sub>4</sub> mg/Kg	EDTA-NH <sub>4</sub> mg/Kg	b	n	ma	m	b	
1	0.12	5.40	0.31	11.90	5.22	1.30	0.13	0.09	1.95	126.28	33.76	50.54	2.86					X	
2	0.19	6.60	0.34	12.20	3.91	0.92	0.38	0.11	1.26	85.84	35.54	28.71	5.35		X				X
3	1.75	3.55	0.30	12.90	6.46	1.03	0.13	0.09	2.05	427.82	28.10	468.12	3.25	X		X			
4	2.31	5.68	0.25	10.20	7.55	5.53	0.00	0.65	1.62	156.77	51.80	109.50	5.34	X	X				
5	2.79	4.23	0.30	10.20	8.79	3.19	0.00	0.67	0.91	218.96	53.58	274.32	6.74	X	X				
6	0.73	4.48	0.44	16.80	5.74	1.34	0.00	0.75	2.70	136.94	32.63	113.10	2.21	X					X
p	1.32	4.99	0.32	12.37	6.28	2.22	0.11	0.39	1.75	192.10	39.24	174.05	4.29						
std	1.13	1.11	0.06	2.43	1.73	1.82	0.15	0.33	0.63	123.45	10.72	167.80	1.77						

\* En NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, m a=medio alto 25 ppm, m=medio 12 ppm, b=bajo 5 ppm y n=nada.

\* En SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, m a=medio alto 180 ppm, m=medio 120 ppm, b=bajo 60 ppm y n=nada.

m=muestra, p=promedio, std=desviación estandar, C.E.=Conductividad eléctrica, M O=Materia orgánica y CIC=Capacidad de Intercambio de Cationes.

La siguiente Tabla V.6, muestra como a diferencia del grupo anterior los valores de pH en este grupo son débilmente ácidos en lo general. La conductividad eléctrica es baja. Los valores de materia orgánica (M O), aumentan a más del doble que el grupo anterior, aunque no dejan de ser valores bajos (Cortés y Malagón, 1984). La capacidad de intercambio catiónico es baja (ligeramente más alta que el grupo sin vegetación). El contenido de calcio es similar al grupo anterior, el magnesio cae por debajo de los niveles normales y el potasio aumenta al doble a diferencia del grupo sin vegetación. Aunque es realmente bajo el contenido de fosfatos, hay presencia de estos en dos muestras del grupo, el contenido de cobre es muy parecido al primer grupo, también en niveles normales, el manganeso, zinc, hierro y aluminio se encuentran en menores cantidades en este grupo que en el anterior. Se detectaron presencia de nitratos en la mayoría de las muestras y sulfatos en baja proporción.

Tabla V.6. Grupo con vegetación

m	C.E	pH	M O	CIC	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	P	Fe <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>						
	H <sub>2</sub> O 1:2.5	H <sub>2</sub> O 1:2.5		BaCl <sub>2</sub>	TEA	CaCl <sub>2</sub>	BaCl <sub>2</sub>	BaCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>	EDTA-NH <sub>4</sub>	EDTA-NH <sub>4</sub>	EDTA-NH <sub>4</sub>	EDTA-NH <sub>4</sub>	ma	m	n	ma	m	b	n	
	µmhos/cc	g/mL	%	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg								
1	0.14	7.03	0.64	13.60	9.83	1.13	0.70	0.80	1.33	0.23	0.00	20.58	0.00	0.00		X					X	
1a	0.36	7.75	0.25	7.30	2.86	0.28		0.24	0.00	0.00	0.00	11.12	0.00	0.00		X						X
2	0.54	5.70	1.60	13.30	4.18	1.14	0.38	0.52	3.53	0.00	106.81	34.01	29.77	4.76	X						X	
2a	0.22	7.18	1.17	17.20	6.79	1.55	0.62	0.29	1.07	0.16	90.31	33.11	30.35	4.53	X					X		
3	1.79	4.78	0.18	10.00	6.53	0.63	0.00	0.70	0.00	0.00	83.69	83.69	81.71	2.44			X	X				
4	0.77	6.40	0.58	15.35	6.34	2.21	0.00	1.05	0.73	0.00	48.60	48.60	35.64	2.47			X				X	
p	0.64	6.47	0.74	12.79	6.09	1.16	0.34	0.60	1.11	0.07	54.90	38.52	29.58	2.37								
std	0.61	1.09	0.55	3.60	2.40	0.68	0.33	0.31	1.30	0.10	46.57	25.55	30.02	2.08								

\* En NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, m a=medio alto 25 ppm, m=medio 12 ppm, b=bajo 5 ppm y n=nada.

\* En SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, m a=medio alto 180 ppm, m=medio 120 ppm, b=bajo 60 ppm y n=nada.

m=muestra, p=promedio, std=desviación estandar, C.E.=Conductividad eléctrica, M O=Materia orgánica y CIC=Capacidad de Intercambio de Cationes.

El grupo con pastos Tabla V.7, posee valores de pH más alcalinos (aunque existe un valor -la muestra 3-, bastante ácido el cual a su vez posee valores de aluminio muy altos dentro de este mismo grupo). El porcentaje de M.O. es muy parecido al grupo con vegetación, la capacidad de intercambio de cationes es la más alta de los tres grupos de terrenos. El calcio alcanza valores altos, el magnesio, se mantiene al mismo nivel que en el grupo con vegetación y el potasio es mucho más parecido al grupo sin vegetación. Los valores de hierro y aluminio se elevan, sin embargo no son comparables con el primer grupo. El cobre y el zinc se mantienen con los mismos valores que los grupos anteriores y el manganeso baja a concentraciones muy insignificantes. El contenido de nitratos es muy similar al grupo con vegetación y los sulfatos poseen concentraciones significativas por lo menos para tres muestras.

Tabla V.7. Grupo con pastos

m	C.E	pH	M O	CIC	Ca2+	Mg2+	Na+	K+	Mn2+	Fe2+	Cu2+	Al3+	Zn2+	NO3-*	SO42-*					
	H2O 1:2.5	H2O 1:2.5		BaCl2	TEA	CaCl2	BaCl2	BaCl2	CaCl2	EDTA-NH4	EDTA-NH4	EDTA-NH4	EDTA-NH4		ma	m	b	n		
	mmhos/cc	g/mL	%	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg		ma	m	b	n		
1	0.23	7.23	1.11	14.30		1.03	0.21	0.14	0.00	52.57	37.40	19.62	3.46						X	
1a	0.39	7.30	0.55	15.00	6.81	0.79	0.13	0.06	0.00	46.92	51.72	10.53	2.59		X					X
2	0.13	6.75	1.79	17.60	7.74	0.88	0.29	0.27	0.59	141.01	36.58	37.27	5.26	X						X
2a	0.12	7.43	0.95	20.40	10.14		0.00	0.00	0.00	90.13	30.53	24.41	8.91	X						X
3	1.64	4.00	0.25	13.60	5.06	1.93	0.00		4.69	313.33	20.66	293.81	2.21			X			X	
4	1.72	7.35	0.18	12.50	9.96	0.63	0.00	0.67	0.00	57.61	75.98	27.10	2.15				X	X		
5	1.41	7.78	0.30	12.15	6.03	1.73	0.06	0.88	0.00	0.00	87.87	11.59	3.59			X	X			
p	0.81	6.83	0.73	15.08	7.62	1.17	0.10	0.34	0.75	100.22	48.68	60.62	4.02							
std	0.74	1.29	0.59	2.96	2.08	0.53	0.12	0.36	1.75	103.40	24.76	103.24	2.41							

\* En NO3-, m a=medio alto 25 ppm, m=medio 12 ppm, b=bajo 5 ppm y n=nada.

\* En SO42-, m a=medio alto 180 ppm, m=medio 120 ppm, b=bajo 60 ppm y n=nada.

m=muestra, p=promedio, std=desviación estandar, C.E.=Conductividad eléctrica, M O=Materia orgánica y CIC=Capacidad de Intercambio de Cationes.

En los jales Tabla V.8 se pueden encontrar los valores de pH más homogéneos y alcalinos de los cuatro grupos analizados. La conductividad eléctrica es muy similar a la del grupo sin vegetación de los terreros. El porcentaje de materia orgánica es muy similar a los dos últimos grupos de terreros- baja-, la capacidad de intercambio de cationes es deficiente como en todos los grupos, los niveles de calcio son bastante altos obviamente esto tiene que ver con el pH que presentan las muestras. El magnesio es muy bajo y el potasio también, el contenido de sodio no es significativo (Guiking, 1987). No existen contenidos de nitratos los sulfatos se encuentran en fuertes cantidades.

Tabla V.8. Grupo jales

	C.E.	pH	MO	CIC	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> -*	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> *
m	H <sub>2</sub> O 1:2.5	H <sub>2</sub> O 1:2.5		BaCl <sub>2</sub>	TEA	CaCl <sub>2</sub>	BaCl <sub>2</sub>	BaCl <sub>2</sub>		
m	mbhos/cc 1:2.5	g/mL	%	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	n	m a
1	2.17	7.31	0.64	11.50	11.01	1.26	3.64	0.70	X	X
2	1.67	7.34	0.64	11.00	7.93	0.43	3.07	0.47	X	X
3	2.17	7.35	0.84	7.00	10.59	1.40	3.40	0.44	X	X
4	1.60	7.31	0.77	13.00	10.75	1.10	2.99	0.47	X	X
5	1.84	7.45	0.64	11.00	10.49	0.40	3.07	0.44	X	X
p	1.89	7.35	0.71	10.70	10.15	0.92	3.23	0.50		
std	0.27	0.06	0.09	2.22	1.26	0.47	0.28	0.11		

\* En NO<sub>3</sub>-, m a=medio alto 25 ppm, m=medio 12 ppm, b=bajo 5 ppm y n=nada.

\* En SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, m a=medio alto 180 ppm, m=medio 120 ppm, b=bajo 60 ppm y n=nada.

m=muestra, p=promedio, std=desviación estandar, C.E.=Conductividad eléctrica, MO=Materia orgánica y

CIC=Capacidad de Intercambio de Cationes.

## VI.- ANALISIS ESTADISTICO DE RESULTADOS

El análisis de resultados se realizó aplicando un modelo estadístico llamado de Kruskal-Wallis para encontrar diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes grupos apartir de las distintas variables realizadas en los análisis.

El estadístico que Kruskal-Wallis propone está basado en intervalos de las observaciones cuando las muestras se han combinado suponiendo que, si las poblaciones son iguales, los intervalos se distribuyen en forma similar en todas las poblaciones (Mendenhall, 1986).

Se trabajaron dos hipótesis:

Ho=Todos los grupos son iguales para una variable en particular.

Hi=Al menos uno de los grupos es diferente para la variable en particular.

El estadístico de prueba es el siguiente:

$$T = 1/S^2 \left( \sum_{i=1}^K R_i^2/n_i - N(N+1)^2/4 \right) \quad S^2 = 1/N-1 \left( \sum R_{(xij)}^2 - N(N+1)^2/4 \right)$$

Si K= número de grupos es igual a 3 y ni < 5 entonces el estadístico tiene valores Kruskal-Wallis especificados en una Tabla, si alguno de los supuestos no se respeta entonces se consulta una Tabla  $\chi^2_{(K-1)}$  y se rechaza Ho si  $T > \chi^2_{(1-\alpha)}(K-1)$  al nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .

Si los grupos resultan diferentes, se vuelve interesante saber cual de los grupos es el distinto, entonces se aplica el siguiente criterio.

Se dice que los grupos i, j son diferentes si:

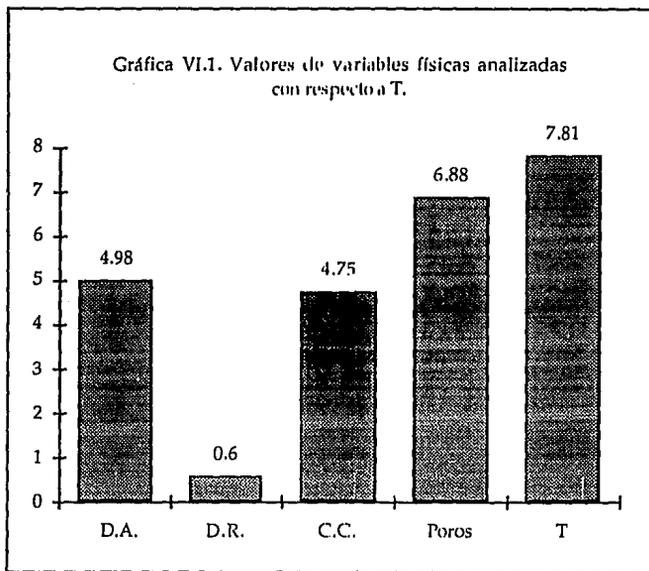
$$\left| R_i/n_i - R_j/n_j \right| > t^{1-\alpha/2}_{(N-K)} (S^2(N-1)/N-K)^{1/2} (1/n_i + 1/n_j)$$

Cabe aclarar que los tres grupos de terreros se analizaron junto con el grupo de los jales con el fin de encontrar diferencias desde el punto de vista estadístico entre los cuatro grupos. En el caso del análisis para metales se incluyen únicamente los tres grupos de terreros.

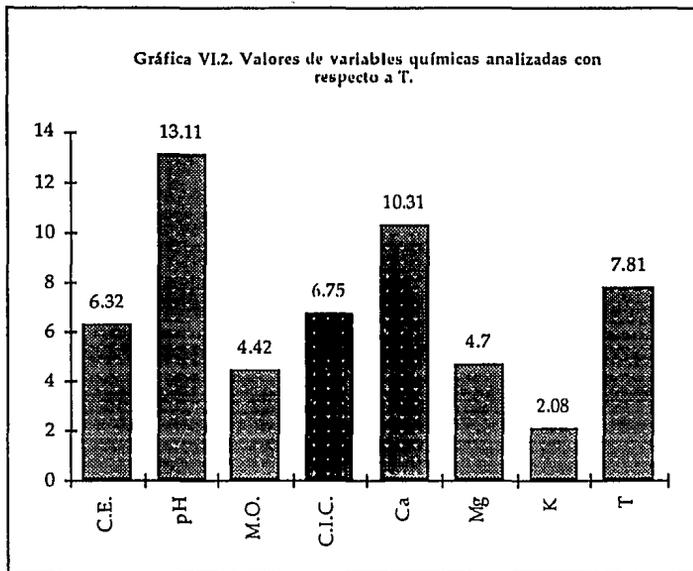
Las siguientes gráficas muestran los resultados obtenidos a partir de la aplicación de este modelo a las distintas variables.

La Gráfica VI.1 muestra los valores obtenidos mediante el modelo Kruskal-Wallis para las variables físicas. Como se observa, ninguna variable rebasa el valor T, esto significa que ningún grupo de los cuatro analizados posee valores significativos como para diferenciarse de algún otro, sin embargo, el grupo de jales que posee valores

distintos en características físicas con respecto a los grupos de terreros, ejercen influencia sobre todo en Poros, densidad aparente (D.A.) y capacidad de campo (C.C.).

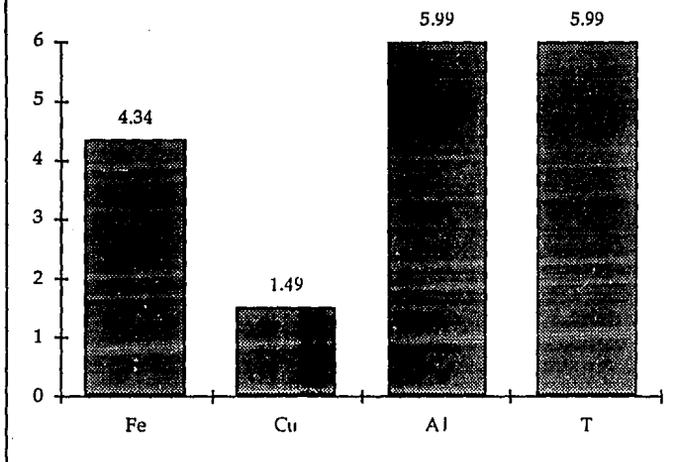


Los valores de las variables químicas analizadas mediante el modelo Kruskal-Wallis se muestran en la Gráfica VI.2. El pH y Ca, rebasan el valor T, esto indica que por lo menos un grupo de los cuatro es diferente. Aplicando el criterio visto anteriormente para saber cual de los cuatro grupos se distingue con respecto a los tres restantes en pH, se obtuvo que el grupo sin vegetación se diferencia de los cuatro grupos. Si se observa la Tabla V.5, se podrá ver que este grupo posee valores bajos con respecto a los grupos de terreros y jales. El grupo diferente en valores de calcio de los cuatro analizados corresponde al grupo de los jales. Observando la Tabla V.8 inmediatamente se encuentra que el resultado para jales en calcio con respecto a los grupos de terreros es mucho mayor. Existen valores cercanos al valor T, esto indica que aunque no sean significativas las diferencias para estas variables, son de tomarse en consideración. La capacidad de intercambio de cationes (C.I.C) es particularmente más alta en el grupo con pastos que en los tres restantes.



Es necesario aclarar una vez más que en la siguiente Gráfica VI.3, no se consideran los jales, ya que no se determinaron estos elementos para este grupo. Sin embargo, es muy interesante observar como por lo menos un grupo es distinto en valores de aluminio. En los resultados se observan valores de aluminio y hierro muy alto en el grupo sin vegetación a diferencia de los otros dos grupos (ver Tabla V.5), al llevar a cabo el análisis estadístico este dato se rectifica. El valor de hierro es bastante cercano al valor T, por lo que se infiere a partir de esto, que también existen diferencias con respecto a este metal aunque no quiere decir que estas sean significativas desde el punto de vista estadístico.

Gráfica VI.3. Valores estadísticos obtenidos en metales con respecto a T.

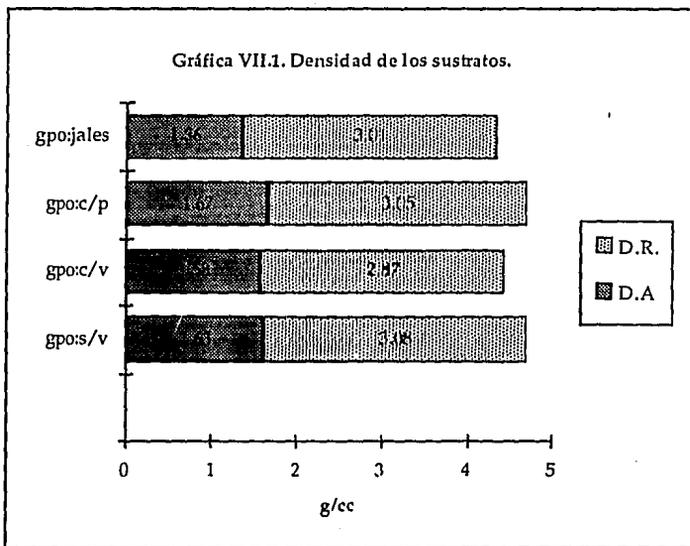


## VII.- DISCUSION

### Análisis Físicos.

Las densidades aparentes en los tres grupos de terreros no difieren mucho. El análisis estadístico no encuentra diferencias significativas como lo muestra la Gráfica VI.1. La bibliografía reporta valores para densidades aparentes de la siguiente forma: altos aquellos superiores a 1.3 g/cc, para suelos de textura fina, los superiores a 1.4 g/cc (texturas medias) o aquellos superiores a 1.6 g/cc para los suelos de textura gruesa. (Cortés y Malagón, 1984).

La Gráfica VII.1 muestra las densidades de los grupos de terreros con valores promedio arriba de 1.6 g/cc. La bibliografía reporta valores arriba de 2.0 g/cc para suelos con cantidades inusuales de magnetita, epidota, zircón, turmalina u hornblenda, (Brady, 1990). Las muestras poseen entre otros minerales magnetita en gran proporción.



La materia orgánica aumenta la retención de agua al aumentar la cantidad de microporos y disminuir el número de macroporos. La bibliografía reporta densidades por debajo de 1.3 g/cc para suelos con mediana cantidad de materia orgánica (Brady, 1990). Para el caso de las muestras de terreros, las cantidades existentes de materia orgánica son tan bajas que no tienen ninguna influencia directa sobre la densidad aparente o alguna otra variable.

Un factor que hay que resaltar es el grado de compactación que en el caso de los terreros es muy pronunciada. Al llevarse a cabo la depositación del material llamado descapote, se va aplanando al mismo tiempo dando forma a las áreas llamadas posteriormente terreros. Los carros que transportan el material son bastante pesados, (carros de volteo de alrededor de 120 ton. de peso) a estos hay que agregarles la carga de material que también asciende a toneladas de peso, la superficie o meseta de los terreros toma características de verdadero concreto.

El hecho es de suma importancia, ya que la densidad aparente fue medida en laboratorio utilizando métodos para muestras alteradas, esto podría meter algo de ruido en la interpretación de los datos, la bibliografía reporta densidades por arriba de 2.0 g/cc para suelos con alto grado de compactación (Brady, 1990).

La compactación tiene implicaciones bastante fuertes en el desarrollo de los vegetales ya que limita el espacio poroso impidiendo la percolación del agua y la circulación del aire. Esto impide la inserción de las raíces en el sustrato, por lo que las plantas no pueden establecerse manteniendo por este motivo desnuda la superficie, aumentando el grado de erosión por viento y agua.

Dentro de las medidas a tomar para remediar la fuerte acción intempérica del medio sobre la superficie de terreros y facilitar la introducción de una cobertura vegetal, es recomendable remover la capa superficial por medio de arado u algún otro medio mecánico, esto facilitaría más el establecimiento de las plantas en estas áreas y disminuiría el efecto de la erosión sobre la superficie de las mismas.

Los jales poseen densidades aparentes más bajas que los grupos de terreros, sin embargo, las densidades reales son más altas. La densidad aparente es más baja ya que el contenido de partículas finas en este último grupo es mayor al de terreros. En el caso o en los valores de la densidad real, influye mucho más el contenido de mineral -para el caso, magnetita- que poseen los jales, los terreros formados por material estéril descartado desde principios del proceso, es de suponerse que posean menores cantidades de estos minerales en particular.

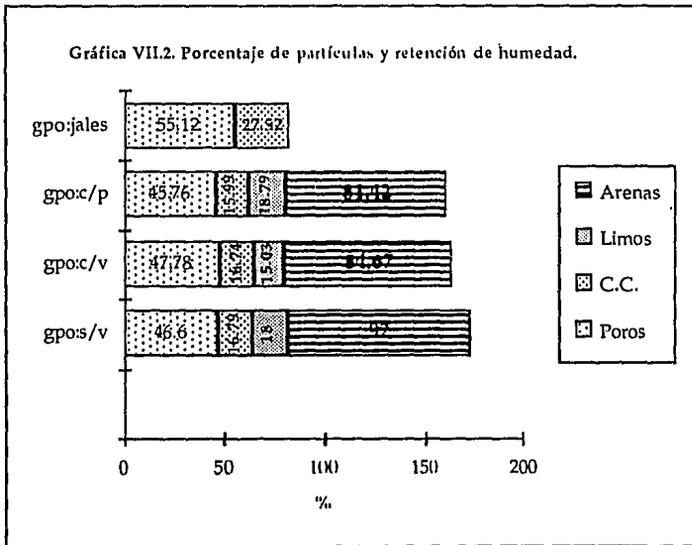
La mayoría de las muestras de terreros poseen colores amarillos en diferentes tonalidades. Se sabe que los colores amarillos en suelos bien drenados son dados por la existencia de óxidos de hierro en condiciones aeróbicas (presencia de hierro en forma férrica ( $Fe^{3+}$ )). Las muestras de terreros según análisis por difracción de rayos X, contienen los siguientes óxidos de hierro: goethita, magnetita, y hematita entre otros. Estos compuestos al interactuar con los factores ambientales como el agua y el aire, toman coloraciones amarillas.

Para el caso de los jales los cuales son producidos y desechados durante el proceso de molienda los colores predominantes son los grises y los minerales que poseen son

casi los mismos que los terreros destacando la magnetita, la calcita, plagioclasa (feldespatos) y la pirita entre otros.

Los colores grises indican ambientes mal drenados por lo que hay saturación de agua y poca circulación de aire, como consecuencia los minerales presentes por lo regular se encuentran en estados reducidos ( el hierro se encuentra en estado ferroso (Fe<sup>2+</sup>). La textura más fina y que más adelante será comentada es uno de los factores principales que influyen en el alto grado de retención de agua. En el caso de los jales al llevarse a cabo su depositación, se forman capas apelmazadas de materiales finos los cuales no permiten la circulación del aire y retienen grandes cantidades de agua.

La proporción de partículas para los tres grupos de terreros tamizados hasta malla de 2 mm es muy parecida (ver Gráfica VII.2), la mayoría alcanza valores arriba del 80 % en arenas, esto los sitúa como sustratos arenosos. La falta de partículas finas y el alto grado de material grueso como gravas y material rocoso, confiere a estas áreas problemas muy fuertes de lavado de nutrimentos y ausencia de humedad debido al bajo grado de retención de agua y el bajo contenido de materia orgánica.



De las variables físicas de mayor importancia destaca la capacidad de campo, ya que podemos saber a través de ella el grado de retención de agua que un suelo puede retener como una consecuencia del contenido de partículas finas que contenga. La gráfica nos muestra como en relación a la ausencia de partículas finas las capacidades de campo en las muestras de terreros son bajas a diferencia de los jales en los cuales su

capacidad de campo es considerablemente más alta, este hecho es lógico que se debe a un mayor contenido de partículas finas.

Por otro lado, la conformación general de los terreros, es una mezcla de suelo y subsuelo con rocas en promedio hasta de 1 m<sup>3</sup> de volumen, este material llamado "estéril", es depositado "al volteo", sin ningún criterio de clasificación del mismo. Como una consecuencia de lo anterior tenemos áreas con una distribución de material rocoso no uniforme y grandes espacios entre rocas hacia el interior del terrero, provocando que el material se reacomode con el paso del tiempo y en su totalidad haya movimientos derrumbes y formación de grietas en las llamadas "mesetas", por lo que el grado de estabilidad para estas áreas es muy bajo (PIQAYQA, 1991b).

Un hecho de importancia, desde el punto de vista estabilidad en los terreros es su pronunciado ángulo de pendiente. Con respecto a este punto se esperan derrumbes en pos de un ángulo de reposo más estable.

La presencia de arenas y materiales más gruesos como rocas en estas áreas involucra una fuerte percolación de agua, además de la fuerte filtración por grietas de tensión que influyen de manera importante en el grado de arrastre de partículas en terreros, proceso que produce consecuencias como socavaciones en la base de terreros, propiciando una disminución en la pendiente de estas áreas.

Este hecho se antojaría ventajoso en lo que se refiere a la disminución del grado de peligrosidad que representan estas áreas por su inestabilidad, ya que el alcanzar su ángulo de reposo natural resta más complicaciones y estabiliza las acumulaciones, sin embargo, la presencia de cauces y cuerpos de agua muy cercanos a los terreros involucra mayores daños al medio, ya que al acumularse el material provoca alteraciones en la hidrología total de la región (PIQAYQA, 1991b).

La textura de los jales es a diferencia de los terreros mucho más fina. Su grado de partículas por su clase textural es mayor en arcillas y limos ( ver Tabla V.4), lo cual le confiere un alto porcentaje de retención de agua entre otras cosas. Como se comentó anteriormente, si se piensa en una rehabilitación de las capas superficiales de las áreas de terreros para facilitar la introducción de una cobertura vegetal, se deben considerar los jales ya que poseen las condiciones físicas adecuadas para el desarrollo vegetal.

Un suelo normal arenoso se caracteriza por la gran cantidad de macroporos que poseen, debido al alto grado de arenas, y por lo mismo la falta de estructura entre las partículas. El espacio poroso total de estos suelos les confiere un drenaje alto, y por lo tanto un nivel de humedad real muy pobre además de todas las repercusiones en lo que se refiere al crecimiento vegetal. El espacio poroso total es pues uno más dentro de la gama de factores que influyen en el buen funcionamiento de un suelo para un desarrollo vegetal exitoso o en su caso un alto rendimiento agrícola en suelos destinados a estos fines.

La abundancia de materia orgánica y materiales finos como arcillas y limos aumenta el grado de retención en suelos ya que se fomenta la formación de agregados que permiten una retención mayor de humedad, además del bajo lavado de nutrimentos y un bajo arrastre de partículas entre otros factores.

Las áreas de terreros, debido a su contenido de partículas gruesas (no solamente arenas, también gravas y materiales más gruesos), poseen valores de porosidad total bajos. Los tres grupos diferenciados como se observa en las Tablas V.1, V.2 y V.3 de análisis físicos, poseen valores promedio menores del 48 %, por lo que la filtración es alta lo cual incrementa el problema de lavado de nutrimentos, concentración de elementos tóxicos y arrastre de materiales como polvos que finalmente son depositados en ríos y lagunas cercanas.

En el caso de los jales los valores de porosidad total son mucho más altos, alcanzando valores de cerca de 56 %, como vimos anteriormente su grado de permeabilidad de agua es también más alto.

En lo que se refiere a la capacidad de campo, los valores que en terreros fueron obtenidos como lo muestra la gráfica VII.2, son bajos. La bibliografía reporta como valores extremadamente bajos a aquellos menores del 15 % para suelos normales a presiones de 1/3 de bar, (Cortés y Malagón, 1984). Los intervalos para terreros ascienden a valores por debajo del 17 % en promedio, los cuales se encuentran dentro del intervalo de niveles bajos de retención de agua.

Los distintos grupos no son significativamente diferentes como se observa en la gráfica VI.1. Las implicaciones que este hecho otorga a los terreros son bastante graves ya que involucra una baja retención de humedad y de todo aquello que sea soluble en ella, llamense nutrimentos necesarios para el desarrollo de las plantas ( elementos como el Ca, Mg, Na y K con bajo potencial iónico ) o en su caso elementos como el aluminio y el hierro, que al reaccionar y ser lavados en cantidades tóxicas afectan por un lado el desarrollo de la vida vegetal y animal donde se depositan finalmente y prolongan el problema de la erosión por vientos en terreros, además de asolar por polvos, cuerpos de aguas como ríos y lagunas cercanas a las áreas de depositación.

Como se observa en la Gráfica VI.2, la capacidad de campo para el caso de las muestras de jales es mucho más alta en comparación con las muestras de terreros, este hecho otorga características reales de una mayor retención de agua a estos residuos. La literatura menciona como valores altos a aquellas muestras que rebasan el 25 % de retención de agua a 1/3 de bar, las muestras de jales en promedio alcanzan valores que rebasan el 25 %, lo cual las sitúa dentro de los valores altos de retención de agua.

El área de depositación de jales recibe una enorme cantidad de agua, esto ha provocado que se produzcan en estas áreas ambientes altamente reductores, debido a la retención por materiales finos que se encuentran en los jales. Estas características en lo que se refiere al crecimiento de vegetación no son limitantes como el caso de los

terreros, a pesar de todo, no se podría afirmar todo lo contrario. Se han desarrollado especies de semillas provenientes del estiércol de vacas, como leguminosas, así como tules y sauces. Se ha intentado llevar a cabo también, siembra de hortalizas por parte de la empresa y se han logrado éxitos en varias especies, sobre todo pepinos y jitomate entre otras (ver punto 3.3.3)

Considerando que las zonas de terreros poseen valores bastante bajos en retención de agua debido a su falta de partículas finas (ver textura en Tablas V.1, V.2, V.3 y V.4 de análisis físicos) y, contrariamente los jales poseen retención de agua eficiente por su contenido de materiales finos, éstos pueden ser aprovechados en este sentido ya que una depositación de estos materiales en áreas de terreros daría mayores posibilidades de incrementar la humedad, lo cual rendiría mayores frutos en lo que se refiere al crecimiento vegetal.

### **Análisis químicos.**

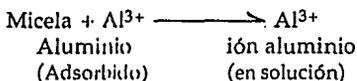
En lo que se refiere a los análisis químicos de las áreas de terreros para los diferentes grupos definidos, el análisis estadístico encontró diferente al grupo sin vegetación en las variables pH y aluminio (ver VI.2 y VI.3), el grupo jales es diferente en contenido de calcio como se observa en la Gráfica VI.2. Existen diferencias más puntuales en otras variables como la capacidad de intercambio de cationes y el hierro ya que estos valores son muy cercanos a su respectiva T. Al observar al grupo sin vegetación, Tabla V.5, inmediatamente se infiere que este grupo posee cantidades mayores de hierro que los dos grupos de terreros restantes de ahí el valor tan cercano a T en el análisis estadístico.

De los factores de mayor influencia en la dinámica de nutrimentos en el suelo, destaca el pH como un indicador de los diferentes elementos disponibles, los no disponibles y los posibles elementos tóxicos, es por esto que este factor es en determinadas situaciones una limitante en el desarrollo de las plantas en suelos normales, pero, también un indicador de las condiciones químicas existentes en el suelo.

El pH para los tres grupos en terreros es variado, en valores promedios. Para el grupo sin vegetación el pH obtenido es considerado muy ácido (valores por debajo de 5; ver Tabla V.5). Por otro lado, para este mismo grupo los valores de aluminio y hierro son también altos en relación a los dos grupos restantes.

La bibliografía otorga especial atención en lo referente al carácter ácido provocado por una abundancia de aluminio en el medio (Rowell, 1988 y Brady, 1990).

En suelos con pH menor de 5, considerados fuertemente ácidos, el aluminio adsorbido está en equilibrio con los iones aluminio de la solución del suelo. Los iones aluminio contribuyen a la acidez del suelo por su tendencia a hidrolizarse. En la siguiente reacción simplificada se explica este proceso



El aluminio tiende a hidrolizarse ya que en soluci3n acuosa no permanece como i3n libre, 3ste es rodeado por seis mol3culas de agua formando  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ . Al incrementarse el pH, los protones son removidos del agua dando una serie de productos de hidr3lisis (Lynsay, 1976). Esta reacci3n se lleva a cabo de la siguiente manera:

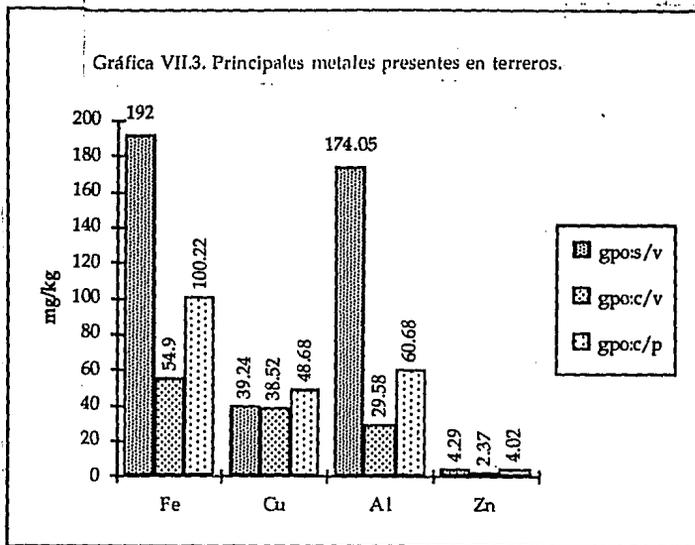


Los iones hidr3genos al estar cargados positivamente acidifican m3s el medio. Para el caso del grupo particular que no posee vegetaci3n el proceso ser3a algo semejante a la reacci3n descrita.

Por otro lado, a pH muy bajo, el aluminio y el hidr3geno provocan una serie de efectos en la adsorci3n de otros elementos como el potasio en arcillas. El magnesio tambi3n sufre este efecto, al dominar el aluminio en la soluci3n del suelo el magnesio no posee posiciones de cambio favorables en el complejo de cambio, sobre todo en suelos ricos en vermiculita (Guiking, 1987).

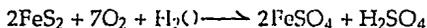
En lo que se refiere al contenido de hierro, este grupo posee altos contenidos en relaci3n a los dos grupos restantes, la Gr3fica VII.3, nos muestra esta diferencia.

Gráfica VII.3. Principales metales presentes en terreros.



La gráfica VII.3 muestra el contenido de metales para los tres grupos de terreros. Inmediatamente se observa la gran diferencia que existe en el contenido de aluminio y hierro en el primer grupo sin vegetación a diferencia de los dos grupos restantes. Obviamente esto influye sobre el pH, obteniendo valores muy ácidos que limitan el crecimiento de las plantas.

En una de las muestras del grupo sin vegetación se realizó un estudio por difracción de rayos X (ver Gutiérrez *et al*, 1992) y se encontraron los siguientes minerales de hierro: goethita, pirita, pirita y hematita, estos minerales son los que dan los tonos amarillos en las muestras de terreros. La bibliografía refiere para ambientes aeróbios la presencia de minerales como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (hematita),  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetita) y  $\text{FeOOH}$  (goethita) (Rowell, 1988). En el caso de la pirita presente en este grupo, su reacción con el oxígeno provoca la producción de ácido sulfúrico como se observa en la siguiente reacción:



La producción de ácido sulfúrico rinde un pH en extremo ácido e impide el desarrollo de las plantas ya que destruye por completo las raíces de estas. Por otra parte al reaccionar con otros elementos como el aluminio, manganeso, calcio y sodio forma sulfatos solubles y en extremo tóxicos como el sulfato de aluminio, este hecho tiene graves repercusiones al ser lavados. Existe un cantidad significativa de sulfatos para el grupo sin vegetación como se observa en la Tabla V.5.

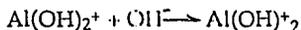
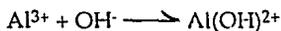
La abundancia de especies solubles incrementa las conductividades eléctricas, en el caso del grupo sin vegetación, las conductividades eléctricas son más altas que los grupos con vegetación y pastos (ver Tabla V.5).

Para el caso de los macronutrientes como el fósforo, nitrógeno, azufre, potasio, magnesio y calcio, la Tabla V.5 muestra las cantidades obtenidas. Los cationes presentes en cantidades significativas es el calcio y el potasio, sin embargo, la interacción de estos cationes a este pH es realmente nula ya que el aluminio y el hidrógeno como cationes dominantes, inhiben su actuación en el complejo de intercambio (Bohn, 1993)

En lo que se refiere a micronutrientes para el grupo sin vegetación. Las cantidades de manganeso son insignificantes esto puede ser debido a su interacción con el hierro presentes en el grupo. El cobre se encuentra en niveles normales, el contenido de zinc es muy bajo. Debido a su movilidad estos dos micronutrientes se ven seriamente afectados por los procesos de lavado ya que el tipo de textura que estas áreas poseen es sumamente arenosa.

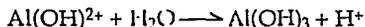
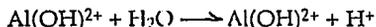
Los cationes como el  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  tienden a permanecer en solución, bajo condiciones normales de drenaje y pH neutro. El  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  y  $Al^{3+}$ , precipitan y se acumulan a pH neutro y alcalino. Los micronutrientes como el  $Cu^{2+}$  y  $Zn^{2+}$ , en condiciones de pH ácido son muy móviles (Bohn, 1993). La baja retención como consecuencia del tipo de textura existente en las áreas de terreros, propicia un excesivo lavado de macro y micronutrientes así como de elementos tóxicos como los sulfatos de aluminio y hierro.

El pH para los grupos restantes con vegetación y con pastos, son en promedio más elevados que el primer grupo y clasificados como débilmente ácidos. Las concentraciones de aluminio y hierro disminuyen de un sexto hasta un tercio en relación al grupo sin vegetación( ver Tablas V.6 y V.7) La bibliografía reporta interacciones de estos metales a este pH, menos dominante (Brady, 1993). Para el caso del aluminio, este elemento es precipitado como hidróxido según la siguiente reacción:



La presencia de estos iones hidratados de aluminio con carga positiva, disminuye la carga negativa neta de los coloides del suelo. Así la formación de estos compuestos influye sobre todo disminuyendo la capacidad de intercambio de cationes en los coloides inorgánicos presentes (Bohn, 1993).

Los iones hidroxidos de aluminio al ser hidratados liberan iones hidrógenos, que son los encargados de mantener el pH débilmente ácido. La siguiente reacción muestra lo dicho anteriormente:



Este pH permite una mayor interacción de macronutrientes como el potasio, calcio, y magnesio. El establecimiento de vegetales es innegablemente con mayor éxito que en el primer grupo, por lo que el porcentaje de materia orgánica aumenta al doble que el grupo anterior, y esto también influye en la presencia de grupos fosfato y nitratos.

El caso del grupo con vegetación como se puede observar en la Tabla V.6, las cantidades de potasio aumentan a casi el doble (la bibliografía reporta niveles normales de potasio intercambiable hasta de 0.2 meq/100 g), que en el grupo sin vegetación (Guiking, 1987). Se lograron medir cantidades significativas de nitratos y sulfatos, aunque hay una ausencia casi total de fosfatos.

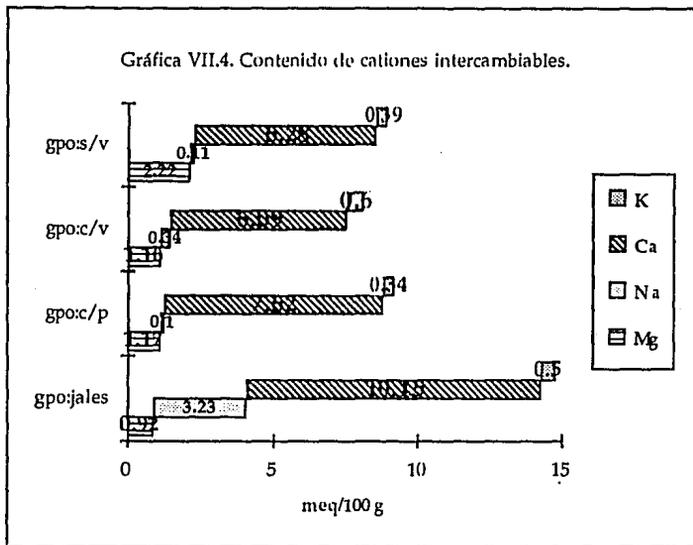
El calcio se encuentra con valor promedio de 6.62 meq/100 g, se encuentra arriba de los niveles normales que son de 4.0 meq/100 g (ver Gráfica VII.4). El magnesio está por debajo de los límites normales de disponibilidad para las plantas (1.6 meq/100 g). El cobre y el zinc se encuentran en niveles normales y hay una total ausencia de manganeso.

La Tabla V.7 muestra los resultados del grupo con pastos, los valores de calcio, magnesio y porcentaje de materia orgánica son relativamente parecidos con el grupo anterior. La capacidad de intercambio de cationes aumenta, aunque no deja de ser baja, la bibliografía menciona como valores bajos a aquellas muestras que posean valores menores a 15 meq/100 g (Cortés y Malagón, 1984). Las cantidades de potasio disminuyen a casi el mismo valor que el grupo sin vegetación, sin embargo, las cantidades de calcio aumentan y por consecuencia el pH aumenta.

Los valores de aluminio y hierro aumentan pero no son comparables con el grupo sin vegetación, sin embargo debe de existir una mayor solubilización por lo que aumenta la conductividad eléctrica. Los micronutrientes como el cobre y el zinc, se asemejan más al grupo sin vegetación. No hay presencia de grupos fosfato y el contenido de nitratos es más reducido que el último grupo, contrariamente sucede con los sulfatos los cuales aumentan, esto puede ser el resultado del aumento del hierro y aluminio.

Los jales a diferencia de las muestras de terreros poseen valores de pH arriba de 7 (Tabla V.8). Este pH es considerado neutro a ligeramente alcalino. La bibliografía

reporta valores de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  como cationes dominantes a este pH (Brady, 1993). Los resultados otorgan para este grupo altos valores de calcio y sodio, las concentraciones de magnesio son muy bajas. La Gráfica VII.4, muestra lo anterior.



En esta gráfica se observan los cationes de importancia para los suelos. Existe un gran cantidad de calcio en jales a diferencia de los demás grupos. En este mismo grupo predomina el sodio. Las mayores cantidades de potasio se encuentran en el grupo con vegetación y las cantidades de magnesio son más acentuadas en el grupo sin vegetación.

Los resultados obtenidos cuantitativamente para nitratos son nulos, aunque hay concentraciones altas de sulfatos.

Por otra parte, los jales poseen capacidades de intercambio de cationes más bajas que las muestras de terreros. Los resultados indican para la mayoría de cationes cantidades más bajas que en terreros, por otro lado, es de esperarse que su contenido total de elementos intercambiables sea menor que en terreros, ya que los jales son literalmente roca molida, además habría que agregar la diferencia en tiempo que tienen los dos tipos de sustratos ya que los terreros tienen en promedio 5 años de estar inactivos, mientras que el depósito de jales es continuo.

## VIII.- CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

Se encontró que las diferencias no fueron significativas para las propiedades físicas de los tres grupos de terreros y jales. (ver Gráfica VI.1). Esto significa que los grupos son muy similares.

Las propiedades físicas de los sustratos de los grupos de terreros son de manera general: valores de densidad aparente y real altos debido a la presencia de minerales como la magnetita, baja retención de humedad y bajos porcentajes de porosidad total gracias al contenido de arenas y materiales gruesos; se observó que los sustratos de terreros se encuentran compactados

Se encontraron diferencias significativas para las propiedades químicas (pH y Al) entre el terrero sin vegetación y los tres grupos restantes, es decir, grupos con vegetación y pastos y el grupo de jales.

Los resultados del análisis de las propiedades químicas de los sustratos de los terreros muestran carencias de formas asimilables de fósforo, nitrógeno, azufre, potasio y magnesio.

Con respecto a los contenidos de cobre se encontró que no existen diferencias significativas para los grupos de terreros. El zinc y el manganeso son detectados en bajas cantidades, por lo que su ausencia es considerada un factor limitante para la inducción de la vegetación.

Se observó que en los terreros sin vegetación y con pastos los contenidos de hierro y aluminio son más altos que en el terrero con vegetación. Debido a esto y a los procesos de oxidación los dos sustratos mencionados son considerablemente más ácidos.

Los valores de la capacidad de intercambio de cationes y la materia orgánica son similares para los tres grupos de terreros.

Las propiedades anteriores determinan a estas áreas como sumamente susceptibles a procesos de percolación y lavado de agua, macro y micronutrientes, elementos tóxicos como sulfatos de aluminio, ácidos derivados de reacciones con compuestos de hierro ( $H_2SO_4$ ) y altas concentraciones de aluminio y sedimentos. Como consecuencia de lo anterior, es de esperar socavación y derrumbes en la base de los terreros, azolvamiento de cuerpos de agua y contaminación por elementos tóxicos. Por todo lo dicho hasta aquí las áreas de terreros son muy deficientes para la implantación de una cobertura vegetal. Aun más en el grupo sin vegetación, las condiciones adversas son extremas.

Las propiedades físicas (D.A., D.R., porosidad, C.C.) de los jales son estadísticamente semejantes a las de los terreros. Sin embargo, observando por separado los valores de CC y porosidad, se encuentran diferencias entre los terreros (16% y 46%) y los jales (27.5 y 55%).

Los contenidos de calcio y el pH de los jales son mayores que en los grupos de terreros, esta diferencia es estadísticamente significativa. El fósforo y el nitrógeno no se detectaron.

Los bajos contenidos y en algunos casos la ausencia de elementos esenciales son factores limitantes para el crecimiento vegetal.

Por lo anterior, se recomienda lo siguiente:

Durante el proceso de extracción y depositación del material "esteril" se destruyen los dos suelos donde se realizan los procesos, como consecuencia se generan dos zonas sin suelo y por lo tanto sin vegetación. Dado que para que se forme el suelo de manera natural es necesario que transcurran grandes periodos de tiempo (decenas y cientos de años) es recomendable separar el suelo del material "esteril" con el fin de colocarlo sobre los terreros inactivos para de esta manera proveer una gran cantidad de problemas que afectan a los terreros posteriormente, entre otros, la regulación de los procesos de percolación y lavado, la retención de micro y macronutrientes, el aumento de la actividad microbiana y la repoblación de vegetación por el aporte de germoplasma contenido en el mismo suelo, además de las consecuencias benéficas en el grado de humedad relativa en el ambiente y la evapotranspiración.

Se puede acelerar el establecimiento de una cobertura vegetal eliminando la compactación del sustrato, esto puede realizarse mediante labranza o con la adición de materiales orgánicos. Posteriormente sería recomendable el depósito de una capa de jales o de otros materiales finos (por ejemplo lodos de la planta de tratamiento) con el fin de aumentar la retención de humedad.

Uno de los principales factores limitantes es la acidez del sustrato por lo que es recomendable aumentar el pH, lo cual puede realizarse mediante la aplicación de cal o de algún otro material que disminuya la acidez (materia orgánica, por ejemplo lodos)\*. Con esta acción se eliminaría la toxicidad del aluminio y el hierro por lo que las condiciones serían más propicias para la inducción de la cobertura vegetal.

Los bajos contenidos y en algunos casos la ausencia de nutrientes como fósforo, nitrógeno, potasio, calcio, magnesio, manganeso, zinc y cobre constituyen

---

\*La cal es un mineral que se encuentra en los alrededores de la zona, por lo que se supone que el gasto en el traslado no será una limitante (CETENAL, 1976)

una seria limitante que se puede disminuir mediante la adición de materia orgánica (lodos).

La inducción de la cobertura vegetal debe realizarse con especies de vegetación originales ( ver punto 3.3.3 inciso b) ya que este tipo de vegetación además de ser nativa de la zona, son resistentes a las condiciones climáticas reinantes en estas áreas.

Por último, es necesario que las leyes que regulan la explotación de minerales en nuestro país se apliquen en toda su extensión. Si bien es cierto que la explotación minera es sumamente importante para el desarrollo del país, se debe asumir que la regulación legal sea en el mismo nivel.

El artículo 108 del capítulo tercero de la Ley General del Equilibrio Ecológico recomienda "la prevención y control de los efectos nocivos de la exploración y explotación de los recursos naturales no renovables en el equilibrio e integridad de los ecosistemas", además que da los preceptos sobre los particulares casos para cada una de las industrias (ver punto 1.1). En México no sólo se deben de considerar, sino de aplicar con todo el rigor legal.

La minería a cielo abierto se utiliza en gran parte del territorio nacional para la explotación no sólo del hierro, también del cobre y carbón, si el Gobierno no controla los graves daños que se producen y que son responsabilidad propia de los capitales particulares se provocará a corto plazo la pérdida total de ecosistemas y desajustes muy fuertes en lo que se refiere a elementos ambientales como el clima e hidrología. En este sentido se perderá mucho más en áreas naturales que lo que se ganó en divisas a partir de la venta de paraestatales que el actual Gobierno realizó a lo largo del sexenio (ver punto 3.2).

Trabajos que involucren una relación entre legislación, investigaciones básicas y desarrollo tecnológico son urgentes no solamente en materia de minería, en todo lo que de alguna forma impacte al ambiente, llámese, explotación minera, forestal, pesquera, petrolera o cualquier otro tipo de industria.

Este trabajo de tesis se asumió desde esa perspectiva, de ahí que no sólo se justifique como trabajo de investigación, sino también se vuelva necesario en el ámbito social. Es indispensable plantear un desarrollo armónico entre la ciencia y la innovación tecnológica para evitar deterioros en el ambiente tan drásticos como los que produce la minería a cielo abierto.

## IX.-REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguilera H. N. 1989. Tratado de Edafología. Tomo I. U.N.A.M.. México. 222 pp.
- Azcón-G de A.C. y Barea, J.M. 1980. Micorrizas. Agosto. En Biología vegetal. Libros de Investigación y Ciencia. 1979-1987. Prensa Científica. España. 205 pp.
- Azcón-G de A.C., Barea, J.M. y Olivares, J. 1983. Simbiosis *Rhizobium*-leguminosa. Julio. En Biología vegetal. Libros de Investigación y Ciencia. 1979-1987. Prensa Científica. España. 205 pp.
- Bohn, H.L., Mc Neal, B.L. y O'connor, G.A. 1993. Química del suelo. LIMUSA. México. 369 pp.
- Bornemisza, E. 1982. Introducción a la química de los suelos. Secretaría General de la O.E.A. Costa Rica. 120 pp.
- Brady, C.N.. 1990. The nature and properties of soils. Macmillan Publishing Company. U.S.A. 621 pp.
- Buckman, H.O. y Brady, N.C. 1985. Naturaleza y propiedades de los suelos. Montaner y Simon. España. 590 pp.
- Cabrera, A.L. 1981. El Derecho de protección al ambiente. U.N.A.M. México. 110 pp.
- Cortés, L.A. y Malagón, C.D. 1984. Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Universidad de Bogotá "Jorge Tadeo Lozano". Colombia. 350 pp.
- Davies, B.E. and Jones, L.H.P.. 1988. Micronutrients and toxic elements. In Russell's (comp.) Soil condition and plant growth. Longman Scientific and Technical. England. 991 pp.
- Duchaufour, P. 1984. Edafología. Tomo I. Edafogénesis y Clasificación. Masson, S.A. España. 493 pp.
- Enciclopedia Mac Graw-Hill of Science and Technology. Tomo 8. 1971. U.S.A. 547-557 pp.
- Flores, D. M<sup>a</sup> de L. 1987. Algunos nutrimentos asimilables en diferentes suelos de México. Tesis Maestría. Facultad de Ciencias. U.N.A.M. México. 155 pp.
- Foth, D.H. 1988. Soil fertility. John Wiley Boyd and Sons (Ed.). U.S.A. 360 pp.
- García, E. 1987. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koppen. Instituto de Geografía, U.N.A.M. México. 246 pp.

García, V.J.J. 1986. Rehabilitación ecológica de minas a cielo abierto de carbón. Anexo A de Exploración y explotación de carbón mineral. In Energía y medio ambiente. Memoria de simposio. U.N.A.M.-S.E.D.U.E. México. 243 pp.

Gilchirst, J.A. y B. Grigg, G. 1977. Geological, hazards, resources and environmental planning. Wadsworth Publishing Company. U.S.A. 621 pp.

Guiking, F.C.T.. 1987. Soil fertility. MSc-Course in Soil Science and Water Management. Agricultural University Wagenigen. Netherland. 41 pp.

Gutiérrez, M., Durán, D.C., Luna, P. V., Villagomez, C.H., Engelman, G., Lemus, J.S., Vergara, S.M., Palacio, P.J.L., López, B.J., Luna, G.L., Montemayor, V.R., Bautista, Z.F., Aranda, R.R., Guzmán, B.R.M<sup>a</sup>, De León, P.N.O., Ponce de León, H.C., Ramírez, B.L.I. y Rosales, O.J. 1992. Evaluación de las afectaciones al ambiente relacionadas con las actividades del Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada, S.A. de C.V.. Instituto de Geografía-Facultad de Química, U.N.A.M. México. 185 pp.

Gutiérrez, M. 1982. Estudio del contenido de iones inorgánicos y sus interacciones en suelos y plantas de los distritos de riego 03 y 88. Tesis Maestría. Facultad de Química. U.N.A.M. México.

Gutiérrez, M. y Ortiz, H. M.L. 1986. Manual de técnicas y procedimientos de análisis físicas y químicas de suelos. Publicaciones internas. UNAM. 109 pp.

Guzmán, B.R.M<sup>a</sup>. 1988. Algunos análisis bromatológicos en tres estratos de la copa arbústica de *Coffea arabica* de una finca cafetalera del municipio del Bosque Chiapas. Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias. U.N.A.M.. México. 104 pp.

Horst, M. 1990. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press Harcourt Brace Javanovich Publishers. U.S.A. 880 pp.

Houba, V.J.G., Van de Lee, J.J., Novozamsky y Walinga, I. 1988. Soil and plant analysis. Part 5 soil analysis procedures. Department of Soil Science and Plant Nutrition. The Netherlands. 56 pp.

Howard, D.A. y Benson, I. 1978. Geology in environmental planning. Mc Graw-Hill. México. 860 pp.

INEGI. 1993. Avances de Información Económica Producción Minero-metalúrgica. México. 28 pp.

Krauskopf, K.B. Geoquímica de los micronutrientes. En Mortvedt, J.J., Giordano, P.M. y Linsay, W.L. (comp.). 1983. Micronutrientes en Agricultura. AGT Editor, S.A.. México.

Ley Federal de Protección al ambiente. Diario Oficial de la Federación. 11/03/81.

Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación. Diario Oficial de la Federación. 23/03/71.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. 1992. Colección Porrúa, "Leyes y Códigos de México". México.

López, R.E. 1981. Geología de México, Tomo III. U.N.A.M.. México. 446 pp.

Lynsay, L-W. 1979. Chemical equilibria in soils. A Wiley-Interscience Publications. U.S.A. 449 pp.

Madero, B.E. 1978. La Minería, su pasado, presente y proyección futura en el panorama de México. En Miguel León-Portilla (comp.). La Minería en México: estudios sobre su desarrollo histórico. U.N.A.M. México. 183 pp.

Mendenhall, W. 1986. Estadística matemática con aplicaciones. Grupo Editorial Iberoamericano. México. 556 pp.

Mengel, K. and Kyrbky, E.B.. 1987. Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Switzerland. 687 pp.

Munsell, H.A. 1976. Munsell Book of Color. Glossy Finish Collection. Removable Samples in Two Binders. 2.5 R - 10 G. Munsell Color, Macbeth Division of Kollmorgen Corporation. U.S.A.

Napoleón, J.J.. 1984a. Identificación y caracterización de los impactos ambientales significativos generados por el beneficio y refinación de minerales metálicos y no metálicos. En Estudios Especiales de Evaluación de Impacto Ambiental para actividades relacionadas con la minería, metalurgia e ingeniería civil. Monografía B.2. S.E.D.U.E., Subsecretaría de Ecología. México.

Napoleón, J.J.. 1984b. Identificación y caracterización de los impactos ambientales significativos generados por la explotación de yacimientos minerales, metálicos y no metálicos. En Estudios Especiales de Evaluación de Impacto Ambiental para actividades relacionadas con la minería, metalurgia e ingeniería civil. Monografía B.1. S.E.D.U.E., Subsecretaría de Ecología. México.

Paredes, L.A.R.. 1989. Regulación jurídica de la ecología y el ambiente en el marco constitucional y legal. TESISNA. U.A.M.-Xochimilco. México. 113 pp.

PIQAYQA, 1991a. Informe sobre auditoría ambiental practicado en las instalaciones de la Empresa. 7 pp.

PIQAYQA, 1991b. Informe de la visita realizada al Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada, Colima, 11 y 12 de septiembre. 5 pp.

Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente en materia de Impacto Ambiental. Diario Oficial de la Federación, 7/06/88.

Rowell, D.L. 1988. Soil acidity and alkalinity. En Russell's (comp.). Soil condition and plant growth. Longman Scientific and Technical. England. 991 pp.

Rzedowsky, J. 1981. Vegetación de México. LIMUSA. México. 432 pp.

Sanders, J.R. y C. Bloomfield. 1980. The influence of pH, ionic strength and reactant concentrations on copper complexing by humified organic matter. *Journal Soil Science*, 31: 53-63. U.S.A.

SARH. 1971. Boletín Hidrológico No. 41 de las Regiones Hidrológicas 13, 14, 15, 16 y 17 (Zona Pacífico-Centro). Vol I y II. México.

SARH. 1977. Boletín Hidrológico No. 41 de las Regiones Hidrológicas 13, 14, 15, 16 y 17 (Zona Pacífico-Centro). Vol III. México.

Sariego, J.L. 1988. El Estado y la minería mexicana: política, trabajo y sociedad durante el siglo XX. Coedición: Instituto Nacional de Antropología e Historia, Comisión de Fomento Minero y Fondo de Cultura Económica. México. 571 pp.

SEDUE. 1983. Lineamientos para el control de residuos minerales. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. México. 7 pp.

SEMIP. 1992. Participación de la minería mexicana en el volumen de la producción mundial durante 1991. SEMIP, Dirección General de Minas, Dirección de Estadística y Análisis Minero. México. 32 pp.

Schlichting, E. y H.- P. Blume. 1966. Bodenkundliches praktikum. Ed. Paul Parey. Alemania. 60 pp.

Tamhane, R.V. y Motiramani, D.P. 1978. Suelos: su química y fertilidad en zonas tropicales. Editorial Diana. México. 481 pp.

Thompson, J. y Troeh, F.R. 1984. Los suelos y su fertilidad. Reverté. España. 649 pp.

United State Department of Agriculture (USDA). 1984. Procedures for collecting soil samples and methods of Analysis for soil survey. Soil survey investigations and Soil conservation service. Report # 1. United States of America. 68 pp.

Valdez, L.H. 1986. Problemas ambientales y medidas de control en la exploración y explotación de yacimientos de carbón mineral. En Energía y medio ambiente. Memoria de Simposio. U.N.A.M.- S.E.D.U.E..México. 249 pp.

Velasco de Pedro, F. 1988. El húmus y las investigaciones sobre fertilización orgánico-mineral. Colaboraciones técnicas. España.

Zinck, J.A.. 1990. Soil Survey Epistemology of a vital discipline. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science (ITC). The Netherlands. 40 pp.