



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS**

**CALIDAD DEL SUELO EN UN SITIO
CONTAMINADO CON
HIDROCARBUROS Y SOMETIDO A UN
PROCESO DE REMEDIACIÓN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS (EDAFOLOGÍA)

P R E S E N T A:

GUILLERMINA PÉREZ CASIMIRO

DIRECTORA DE TESIS: DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES

MEXICO, D.F.

Marzo, 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Con todo mi amor y agradecimiento a:

Mis padres:

Guadalupe (†) y Roberto por su amor y apoyo incondicional.

Mi hermana Gloria y mi cuñado Víctor Manuel por su cariño y apoyo.

Vania y Víctor por alegrar el corazón de la familia.

Rosa María Flores Serrano por ser amiga y compañera.

A mis tíos Palemón y Camerino por sus enseñanzas y apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Rosario Iturbe Argüelles, quien ha guiado mis pasos no solo en el camino de la investigación, y me ha ayudado a superar los obstáculos encontrados. Las palabras no son suficientes para expresar mi gratitud.

A los miembros del jurado: Dra. Norma García Calderón, M. en I. Ana Elisa Silva, Dr. Miguel Ortiz Olguín, Dr. Arturo Aguirre Flores, por su tiempo y contribuciones para mejorar este trabajo.

A la Dra. Susana Saval Bohórquez, por sus observaciones a lo largo de mi transito por la maestría.

Al Dr. Carlos Valdés, por sus consejos a lo largo de mi estancia en la UNAM

Al Dr. Guillermo González Pomposo por apoyo.

Al Dr. Salvador Flores Guido, por sus enseñanzas.

Al Dr. Osvaldo Sánchez Zamora por su apoyo.

A mis amigos, quienes me han acompañado en toda esta etapa de mi vida, en particular a: Ángel Vega, Claudia Chávez, Adriana Ramírez, Alejandra Aguayo, Miriam Martínez, Rutilio Ortiz, Ramón Giles, Reyna Serrano.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas y cobijar mis ilusiones.

RECONOCIMIENTOS

Hago un reconocimiento a todas las personas que de una u otra forma me ayudaron para la realización de este proyecto.

Biol. Ángel Vega López

Ing. Carlos Flores Torres, Jesús Flores Torres, Carlos Flores Vázquez, Ignacio Blanco, David Garivay y Miguel.

Dra. Rosa María Flores Serrano.

M. en C. David Flores.

Ing. Ramón Giles López

Q. Adriana Ramírez González.

Ing. Juan Orozco Martínez.



ÍNDICE	i
RESUMEN	v
1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
2.3 Hipótesis.....	4
3 ANTECEDENTES	5
4 MARCO TEÓRICO	7
4.1 Tecnologías de remediación de suelos contaminados	7
Bioventeo.....	8
4.2 Propiedades del suelo.....	9
4.2.1 Propiedades físicas.....	10
4.2.1.1 Densidad real.....	10
4.2.1.2 Densidad aparente.....	11
4.2.1.3 Porosidad.....	12
4.2.1.3 Textura.....	13
4.2.2 Propiedades químicas.....	14
4.2.2.1 Reacción del suelo (pH).....	14
4.2.2.2 Carbono (C).....	15
4.2.2.3 Relación carbono nitrógeno (C:N).....	17
4.2.2.4 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	17
4.2.2.5 Porcentaje de saturación de bases (%V o SB).....	19
4.2.2.6 Macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S).....	20
Nitrógeno (N).....	21
Nitrógeno total (N total).....	22
Fósforo (P).....	22
Potasio (K).....	24
Calcio (Ca).....	24
Magnesio (Mg).....	25
Azufre (S).....	26
4.2.2.7 Micronutrientes (B, Cl, Mo, Zn, Fe, Cu, Mn, Ni, Na).....	26
Boro (B).....	27
Cloro (Cl).....	27
Molibdeno (Mo).....	27
Zinc (Zn).....	28
Hierro (Fe).....	28
Cobre (Cu).....	29
Manganeso (Mn).....	29
Níquel (Ni).....	29
4.3.7.9 Sodio (Na).....	29



5	ÁREA DE ESTUDIO (MARCO GEOGRÁFICO)	31
5.1	Ubicación.....	31
5.2	Fisiografía.....	34
5.3	Hidrología.....	34
5.4	Clima.....	36
5.5	Flora.....	37
5.6	Geología.....	37
5.7	Clasificación del suelo.....	38
6	METODOLOGÍA	39
6.1	Selección del sitio de estudio.....	39
6.2	Antecedentes de la contaminación y del tratamiento de remediación del sitio de estudio.....	41
6.3	Delimitación del sitio tratado y sitio testigo.....	43
6.4	Descripción de perfiles.....	44
6.5	Muestreo para la caracterización inicial de hidrocarburos y plomo.....	45
6.5.1	Hidrocarburos totales del petróleo (HTP).....	45
6.5.2	Plomo total.....	48
6.5.3	Plomo orgánico.....	48
6.6	Muestreo para la caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo.....	48
6.6.1	Selección de parámetros.....	48
6.6.2	Trazo de la malla de muestreo.....	49
6.6.3	Toma de muestras.....	50
6.6.4	Análisis de las muestras.....	52
6.7	Análisis estadístico de los resultados obtenidos del análisis de las muestras para la caracterización de las propiedades físicas y químicas.....	53
6.7.1	Prueba de normalidad.....	53
6.7.2	Homoscedasticidad (igualdad de varianzas).....	53
7	RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	55
7.1	Descripción de perfiles.....	55
7.1.1	Perfil 1.....	55
7.1.2	Perfil 2.....	56
7.1.3	Perfil 3.....	57
7.1.4	Resultados de los análisis realizados a los perfiles.....	58
7.2	Caracterización inicial de hidrocarburos y plomo.....	61
7.3	Caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo.....	61
7.4	Análisis estadístico.....	65
8	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	67
8.1	Perfiles.....	67
8.2	Propiedades físicas.....	68
8.2.1	Densidad real.....	68
8.2.2	Densidad aparente.....	69
8.2.3	Porosidad.....	70



8.2.4	Textura.....	71
8.3	Propiedades químicas.....	72
8.3.1	pH.....	72
8.3.2	N de nitratos (NO ₃ ⁻).....	73
8.3.3	Fósforo (P).....	74
8.3.4	Calcio (Ca).....	74
8.3.5	Magnesio (Mg).....	75
8.3.6	Sodio (Na).....	76
8.3.7	Porcentaje de saturación de bases (%V).....	76
8.3.8	Cobre (Cu).....	77
8.3.9	Zinc (Zn).....	78
8.4	Calidad del suelo.....	79
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
11	REFERENCIAS CITADAS	85
ANEXOS	97
	ANEXO A. Descripción de los perfiles.....	99
	ANEXO B. Resultados por profundidad.....	111



PÁGINA EN BLANCO



RESUMEN

Uno de los problemas prioritarios en México en materia ambiental son los suelos contaminados con hidrocarburos. En los últimos años se ha procurado establecer estándares para la remediación de estos suelos, siendo relevante la publicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-138-ECOL-SEMARNAT/SS-2003, que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación, de donde se establecen las concentraciones máximas permisibles de fracciones de hidrocarburos, BETEX (Benceno, tolueno, Etilbenceno y Xileno) y algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Para cumplir con estos estándares se han aplicado de manera exitosa diversas tecnologías de remediación, midiendo su eficiencia en función de la disminución de la concentración de los contaminantes en el suelo, sin embargo, no se ha prestado atención a las condiciones en las que queda el suelo después de que se ha sometido a estas tecnologías.

Puesto que el suelo se manipula durante el proceso de remediación, es posible que sufra cambios en sus propiedades físicas y químicas, las cuales pueden influir en su productividad. Es por esto que en este trabajo se midió el cambio en algunas de estas propiedades en un sitio ubicado en San Agustín Tlaxco, Puebla, el cual fue contaminado por un derrame de gasolina Nova y posteriormente se remedió a través de la tecnología de venteo y biorremediación. Las propiedades medidas fueron: densidad aparente, densidad real, porosidad, textura (porcentaje de arenas, limos y arcillas), pH, nitritos, nitratos, nitrógeno total, cationes intercambiables, capacidad de intercambio catiónico, fósforo, sulfatos, boro, hierro, cobre, zinc, porcentaje de saturación de bases, porcentaje de carbono orgánico y relación C:N.

Se tomaron muestras de suelo en el área tratada (sitio tratado) y en un sitio testigo perteneciente a la misma unidad edafológica. Para ello se dividió cada zona en 32 cuadrantes de 20x20 m. Cada cuadrante se muestreó a 3 profundidades: 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm, de cada cuadrante se tomaron 10 muestras con nucleador para



formar una muestra compuesta. De cada sitio se obtuvieron un total de 84 muestras compuestas. A cada muestra se le analizaron los 26 parámetros mencionados anteriormente. Las muestras se analizaron por triplicado. Posteriormente se hizo un análisis estadístico de los datos a través de la prueba U de Mann-Whitman, con el propósito de establecer diferencias significativas en las propiedades medidas en ambos sitios. Los resultados obtenidos indicaron diferencias significativas en las propiedades físicas y en algunas químicas; las diferencias de las propiedades físicas se atribuyen al movimiento de tierras durante en tratamiento de limpieza (venteo). En lo referente a las propiedades químicas las diferencias se atribuyen a la adición de nutrientes durante el proceso de biorremediación. Por lo tanto se concluye que la tecnología de remediación de venteo y biorremediación sí tuvo un efecto estadísticamente significativo en las propiedades físicas y químicas del suelo estudiadas.



1. INTRODUCCIÓN

El hombre a lo largo de su existencia ha hecho uso de los recursos naturales como el petróleo y no siempre de manera sustentable o racional. Dicho uso inadecuado de los recursos ha traído como consecuencia el deterioro de algunos ecosistemas y la desaparición de otros.

Greenpeace (1997) señala que las actividades de exploración y producción petrolera han significado un deterioro dramático de ecosistemas de gran diversidad biológica y enorme productividad.

México es un importante productor de petróleo y desafortunadamente también aquí se ha hecho un mal manejo de este recurso, tanto en su explotación como en el almacenamiento de los productos derivados de él, dando como resultado la contaminación de suelos, aguas subterráneas y superficiales. Se sabe que Pemex Refinación, Pemex Petroquímica y Pemex Exploración y Producción seguidas de Ferrocarriles Nacionales de México y Aeropuertos y Servicios Auxiliares, son las instituciones que tienen el mayor manejo de productos derivados del petróleo en México y que han realizado actividades de limpieza de sitios contaminados por fugas o derrames (Cortinas, 2002; Madrigal, 1998).

Una vez que se han aplicado las tecnologías necesarias para reducir las concentraciones de contaminantes, se hacen estudios de caracterización para verificar si efectivamente se han alcanzado las concentraciones de remediación establecidas en la normatividad vigente; sin embargo, no se presta atención a las propiedades físicas, químicas y biológicas que, dependiendo de la tecnología utilizada, podrían ser afectadas.

El propósito de este estudio es conocer las propiedades físicas y químicas de un suelo contaminado después de su saneamiento, ya que como algunos autores manifiestan, el suelo es la vía de comunicación entre los contaminantes y los mantos acuíferos y su contaminación reduce el potencial agrícola del mismo (Weber y Singh, 1995). Hasta



ahora no se ha encontrado información de sitios tratados en México sobre el seguimiento de las propiedades físicas y químicas del suelo después de un proceso de remediación ya que los informes existentes se enfocan en los contaminantes, que es lo que más interesa a nivel ambiental.

En este trabajo se plantea la comparación de las propiedades físicas y químicas de un suelo que fue contaminado por un derrame de gasolina (Nova) y posteriormente tratado con la tecnología de venteo, y un suelo testigo con características edafológicas similares pero que no fue contaminado ni tratado.



2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo general

Determinar, a través de un método estadístico, la variación de las propiedades físicas y químicas de un suelo de uso agrícola contaminado con gasolina y sometido a una tecnología de remediación.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar, a través de la descripción de perfiles edafológicos, si los suelos del sitio testigo y del sitio tratado presentan características semejantes.
- Determinar, a través de análisis químicos, si el suelo del sitio de estudio se encuentra contaminado.
- Evaluar, a través de un método estadístico, el efecto de la tecnología de remediación en las propiedades físicas del suelo (densidad real, densidad aparente, textura y porosidad).
- Evaluar, a través de un método estadístico, el efecto de la tecnología de remediación en las propiedades químicas del suelo (nitrógeno amoniacal, nitritos totales, nitratos totales, nitrógeno total, calcio, magnesio, sodio, potasio, sulfatos, boro, hierro, cobre, zinc, manganeso, pH, capacidad de intercambio catiónico, relación carbono-nitrógeno, porcentaje de saturación de bases y porcentaje de carbono orgánico).
- Recomendar acciones para mejorar las propiedades químicas y físicas del suelo para preservar su productividad.



2.3. Hipótesis

Las propiedades físicas y químicas del suelo varían debido a la aplicación de una tecnología de remediación.



3. ANTECEDENTES

En los últimos años los compuestos químicos orgánicos e inorgánicos producto de la actividad humana han jugado un papel importante sobre la calidad de los recursos naturales, particularmente en los suelos, vegetación y aguas superficiales y subterráneas. Entre las sustancias que han causado mayores problemas ambientales en los últimos años se encuentran los plaguicidas, los metales pesados y los hidrocarburos (Adriano y Berthelin, 1998; Cortinas, 2002). En México para el año 2000 la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) reportó que los principales residuos peligrosos abandonados en sitios que han sido contaminados son los metales pesados (cromo, plomo, mercurio, arsénico, zinc), cianuro, los residuos biológico-infecciosos, las escorias, las grasas y los aceites usados, los solventes y los hidrocarburos (Cortinas, 2002).

Por lo general, el primer recurso natural afectado cuando ocurre el derrame de alguna sustancia tóxica es el suelo, y puesto que éste es el puente entre el contaminante y los mantos acuíferos, existe la necesidad de eliminar los contaminantes lo antes posible, para así evitar problemas mayores. Además, autores como Weber y Singh (1995) han establecido que la contaminación del suelo reduce el potencial agrícola del mismo.

Por otra parte, el suelo tiene funciones variadas e importantes dentro del ciclo de la vida; por ejemplo, actúa como un amortiguador ambiental, interviene en la filtración del agua y la retención de los contaminantes, es la base para el crecimiento de plantas y animales, y por ende interviene en la producción de alimentos y en la salud humana. Por lo tanto, para asegurar la capacidad agrícola del suelo es necesario mantener su calidad, la cual está determinada por las propiedades físicas, químicas y biológicas inherentes a él (Acton y Padbury, 1993; Lewandowski y Zumwinkle, 1999).

Se sabe que con las tecnologías de saneamiento para suelos contaminados con hidrocarburos se eliminan o al menos se reducen las concentraciones de los contaminantes, pero poco se sabe respecto a los cambios que pueden ocurrir en sus



propiedades físicas y químicas, y los mecanismos que pueden dar lugar a estos cambios.

En la bibliografía se han encontrado trabajos como el de Ekundayo y Obuekwe (2000) quienes estudian los efectos del derrame de aceite en un suelo nigeriano, el de Escribano y Paz (2003) quienes hacen un estudio de la variabilidad estadística de algunas propiedades de un suelo en España a través del tiempo, el de Al-Sarawi *et al.* (1998) y Massoud *et al.* (1998) quienes presentan estudios referentes a las propiedades físicas y químicas como indicadores de la penetración de aceites en un suelo contaminado y el de Martínez y López (2001) que estudian el efecto de los hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas del suelo; sin embargo, hasta ahora no se han encontrado estudios de casos de evaluación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que puedan dar idea de su condición después de un proceso de remediación.

Por lo anterior se propuso este proyecto, en el cual se planteó estudiar las variaciones de las propiedades físicas y químicas que sufre un suelo contaminado con hidrocarburos después de ser sometido a una tecnología de remediación.

Para la realización de este estudio se consideraron dos sitios pertenecientes a una misma unidad edafológica (sitio tratado y sitio testigo); el primero un sitio cuyo suelo fue contaminado con hidrocarburos (gasolina Nova) que se remedió; el segundo es un sitio que no fue afectado por la contaminación ni por la remediación.



4. MARCO TEÓRICO

Los derrames de hidrocarburos ocasionados por la industria petrolera ocurren generalmente de manera accidental. Dichos derrames han impactado el ambiente causando el deterioro de los suelos y cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Las consecuencias ecológicas de la contaminación dependen de la magnitud del derrame, de la composición química del contaminante y de la naturaleza del ecosistema contaminado (Domínguez, 2001).

Asimismo, los suelos son heterogéneos y susceptibles de interactuar y verse afectados por diferentes ajustes naturales y antropogénicos como son los contaminantes. El impacto ocasionado por este agente puede ser revertido con la aplicación de técnicas de remediación.

A continuación se da una breve descripción de la tecnología de remediación utilizada en el sitio de estudio así como de las propiedades del suelo observadas para este estudio.

4.1. Tecnologías de remediación de suelos contaminados

El término técnica de remediación o tecnología de tratamiento es cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que alteran la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (U.S.EPA, 2001; Volke y Velasco, 2002).

Las tecnologías de remediación se pueden clasificar dependiendo de (Volke y Velasco, 2002):

1. La estrategia de remediación, que puede ser: a) por destrucción o modificación de los contaminantes, b) por extracción o separación del contaminante



- (volatilidad, solubilidad, carga eléctrica), y c) por aislamiento o inmovilización del contaminante.
2. El lugar en que se realiza el proceso, siendo: a) *in situ*, (sin necesidad de excavación), b) *ex situ* (requiere excavación), en cuyo caso, el tratamiento puede realizarse en el mismo lugar siendo (“on-site” por sus siglas en inglés) o en otro sitio.
 3. El tipo de remediación: a) por tratamiento biológico (biorremediación), que aprovecha la actividad metabólica de los organismos para degradar los contaminantes a formas más inocuas, b) por tratamiento fisicoquímico, que aprovecha las propiedades fisicoquímicas del contaminante o el medio contaminado para destruir, separar o contener el contaminante, c) por tratamiento térmico, que utiliza la temperatura para volatilizar (separar), quemar, descomponer o fundir (inmovilizar) los contaminantes en el suelo.

En el proceso de biorremediación se encuentran los sistemas que utilizan organismos vivos como plantas, hongos bacterias etc., para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos menos tóxicos y en el mejor de los casos a productos inocuos. Este proceso depende de las actividades catabólicas de los organismos para utilizar al contaminante como fuente de alimento y energía (Volke y Velasco, 2002).

La ruta de biodegradación depende del tipo de contaminante y del organismo degradador, dentro del proceso existen reacciones de óxido-reducción, intercambio iónico y también reacciones de complejación y quelación (inmovilización de metales) (Volke y Velasco, 2002).

En cuanto a los organismos se refiere, se pueden emplear organismos propios del sitio (autóctonos); o de otro sitio (exógenos), y puede ser bajo condiciones aerobias o anaerobias (Volke y Velasco, 2002).

A continuación se habla en particular de la tecnología de biorremediación denominada bioventeo, que fue aplicada en el sitio de estudio de esta tesis.

Bioventeo

El bioventeo, es una más de las tecnologías de tratamiento de suelos contaminados con la que se cuenta para poder lograr una reducción de los niveles de contaminantes.

El bioventeo es una tecnología de biorremediación que se realiza en el sitio mismo (*in situ*), donde se estimula la biodegradación natural de cualquier compuesto biodegradable en condiciones aerobias. El aire se suministra en el sitio contaminado a través de pozos de extracción o por movimiento forzado (extracción o inyección), con bajas velocidades de flujo, para proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores (Volke y Velasco, 2002).



El bioventeo se aplica en la degradación de compuestos orgánicos semivolátiles (COVs), hidrocarburos totales del petróleo (HTPs), solventes no clorados, plaguicidas y conservadores de madera.

Las limitaciones para la aplicación del bioventeo son (Volke y Velasco, 2002):

- Tipo y concentración del contaminante.
- Falta de nutrientes.
- Bajo contenido de humedad.
- Dificultad para alcanzar el flujo de aire necesario.

Generalmente esta tecnología se combina con la bioestimulación, a través de la cual se hacen circular soluciones acuosas ricas en nutrientes y oxígeno para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos y mejorar la biodegradación del contaminante orgánico o la inmovilización del contaminante inorgánico.

El bioventeo se puede dividir en activo y pasivo; el activo requiere de la inyección de aire dentro del suelo contaminado; el pasivo utiliza la presión diferencial que hay entre la atmósfera y el subsuelo. Los pozos que se instalan y que llegan a la zona vadosa permiten la penetración de aire así como la extracción (o salida) de aire debido a los cambios en la presión barométrica. Si la presión del suelo es baja y la atmosférica alta entonces el aire se mueve hacia dentro del suelo, si la barométrica es más baja que la del suelo, entonces pasa del suelo a la atmósfera (Batelle-NFESC, 2003).

A pesar de que el bioventeo es una buena opción de remediación de suelos contaminados, éste no puede ser aplicado en todos los sitios ni en todos los casos. Es por esto que se recomienda hacer estudios de factibilidad para la aplicación de dicha tecnología.

4.2 Propiedades del suelo

El suelo es una mezcla de materiales sólidos, agua y aire, la relación existente entre estos componentes determina la capacidad del suelo para poder sustentar a las plantas y le da al mismo ciertas propiedades. Las propiedades que afectan a la totalidad del suelo y reflejan su comportamiento físico se conocen como propiedades físicas o mecánicas del suelo. Aquellas propiedades que dependen de su composición química se denominan precisamente propiedades químicas del suelo (Brack y Mendiola, 2006; Rodríguez, 2003; UE, 2005).

A continuación se da una descripción de las propiedades que se utilizaron para la realización de este trabajo.



4.2.1 Propiedades físicas

4.2.1.1 Densidad real (dr)

La densidad de las partículas, conocida también como densidad real del suelo es la densidad media de la fase sólida o densidad de los componentes individuales que lo forman (Aguilera, 1989; FitzPatrick, 1987; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994). Para Millar *et al.* (1972) la densidad real está definida como la masa por unidad de volumen de las partículas del suelo expresada en gramos sobre centímetro cúbico, como se indica en la ecuación 1 (Porta *et al.*, 1994).

$$dr = \frac{m_s}{V_s} \quad (1)$$

Donde:

dr = Densidad real del suelo (g cm^{-3})

m_s = Masa de los sólidos del suelo (g)

V_s = Volumen de los sólidos del suelo (cm^3)

En la determinación de la densidad real del suelo se considera únicamente la densidad de las partículas sólidas, y de esta forma es constante y no varía con la cantidad de espacio poroso (Millar *et al.*, 1972). Es decir, la densidad real es una función aditiva de las densidades de los constituyentes del suelo (Aguilera, 1989; Porta *et al.*, 1994; Robinson, 1967).

Los componentes inorgánicos del suelo, se encuentran dentro de un número pequeño de minerales (Robinson, 1967). La mayor parte del material mineral de los suelos consta de cuarzo, feldspatos y arcillas. La densidad del suelo mineral, libre de materia orgánica se toma como de 2.65 g cm^{-3} en promedio. Ante la presencia de materia orgánica, la densidad real disminuye aunque puede aumentar por la presencia de óxidos de hierro, magnetita y hematita, o por minerales ferromagnesianos y micas (Ortiz y Ortiz, 1990; Robinson, 1967). En la tabla 4.1 se muestran los valores típicos de densidad real propuestos por el Instituto de Estructuras y Transporte (IET, 2005) para varios tipos de suelo.

La densidad real permite diferenciar la evolución de los horizontes con base en sus horizontes líticos, y también permite conocer la movilidad del agua en el perfil (Aguilera, 1989). Asimismo, la densidad real permite el cálculo de la porosidad total del suelo, de la concentración de sólidos suspendidos para la evaluación de la densidad de la suspensión, y de la velocidad de sedimentación de las partículas en líquidos o gases (Forsythe, 1975).

En los suelos, conforme se avanza en profundidad, la densidad real aumenta. Relacionando la densidad real con la densidad aparente se conoce el porcentaje de porosidad (Aguilera, 1989; FitzPatrick, 1987; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994).



TABLA 4.1. DENSIDAD REAL (g cm ⁻³) DE VARIOS TIPOS DE SUELOS		
Tipo de suelo		Densidad real (g cm ⁻³)
Inorgánico	Grava	2.65
	Arena gruesa a media	2.65
	Arena fina (limosa)	2.65
	Loess, polvo de piedra y limo arenoso	2.67
	Arena limosa	2.65
	Limo arenoso	2.66
	Limo	2.67-2.70
	Arena arcillosa	2.67
	Limo arcillo arenoso	2.67
	Arcilla arenosa	2.70
	Arcilla limosa	2.75
	Arcilla	2.72-2.80
Orgánico	Limos con trazos de materia orgánica	2.30
	Lodos aluviales orgánicos	2.13-2.60
	Turba	1.5-2.15

Fuente: IET (2005)

4.2.1.2 Densidad aparente (*dap*)

La densidad aparente se define como la masa por unidad volumen de suelo seco, el volumen incluye el de las partículas y de los poros del suelo (Brady, 1990). La NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002a) la establece como la relación de la masa del suelo al volumen total, expresada en g cm⁻³, donde el volumen total incluye el espacio poroso. Esta densidad varía con el estado de agregación del suelo y la proporción del volumen ocupado por los espacios intersticiales.

La relación que expresa el valor de la densidad es la que se indica en la ecuación 2 (Aguilera, 1989; Baver *et al.*, 1991; Brady, 1990; FitzPatrick, 1987; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994).

$$dap = \frac{\text{Peso suelo seco}}{\text{Volumen}} \quad (2)$$

Donde:

dap = Densidad aparente del suelo (g cm⁻³)

Peso suelo seco = Peso del suelo en base seca (g)

Volumen = Volumen de las partículas más el volumen de los poros del suelo (cm³)

La densidad aparente está relacionada con el peso específico de los minerales, la parte orgánica y la porosidad del suelo. En general la variación de la densidad aparente en los suelos se encuentra entre 0.4 y 2 g cm⁻³; en horizontes arenosos se tiene una densidad de 1.6 g cm⁻³; en horizontes arcillosos con estructura es de 1.05 a 1.1 g cm⁻³; en horizontes compactos es de 1.9 a 1.95 g cm⁻³; en horizontes de suelos volcánicos es de 0.85 g cm⁻³; y en suelos turbosos es de 0.25 g cm⁻³ (Porta *et al.*, 1994).



La densidad aparente siempre es menor a la densidad real, y los valores de densidad menores a la unidad se encuentran en suelos ricos en materia orgánica, ricos en pómez o en cenizas volcánicas (Reyes, 1996).

La densidad aparente sirve para calcular los movimientos de humedad, acumulación de carbonatos, y el grado de intemperización. Así mismo permite estimar capas endurecidas que generalmente presentan valores de densidad mayores de 2 g cm^{-3} , y la presencia de minerales amorfos (Andosoles). Al relacionarla con la densidad real es posible calcular el espacio poroso y el porcentaje de porosidad; al relacionarla con el porcentaje de humedad se puede estimar la fertilidad (Aguilera, 1989; Baver *et al.*, 1991; FitzPatrick, 1987; Ortiz y Ortiz, 1990).

La densidad aparente permite conocer el espacio poroso del suelo, pero no proporciona información del tamaño de los huecos, su conexión, o de la fuerza que da lugar a determinadas estructuras; permite también calcular láminas de riego (Aguilera, 1987; Baver *et al.*, 1991; FitzPatrick, 1987; Ortiz y Ortiz, 1990;).

4.2.1.3 Porosidad

El arreglo de las partículas sólidas del suelo determina la cantidad de espacio poroso. El espacio poroso está ocupado por agua y aire (Ortiz y Ortiz, 1990). Los poros pueden ser discretos o formar una fase continua en que puede haber movimiento (FitzPatrick, 1987).

El espacio poroso se expresa en porcentaje y se calcula a partir de los valores de densidad aparente y densidad real como se indica en la ecuación 3 (Aguilera, 1989; Baver *et al.*, 1991; FitzPatrick, 1987; León, 1991; Ortiz y Ortiz, 1990).

$$\text{Porosidad (\%)} = 100 \left(1 - \frac{dap}{dr} \right) \quad (3)$$

Donde:

Porosidad (%) = Porcentaje de espacio poroso del suelo

dap = Densidad aparente del suelo (g cm^{-3})

dr = Densidad real del suelo (g cm^{-3})

El estudio detallado de la porosidad del suelo incluye la cantidad, la continuidad, la orientación, la distribución y la forma de los poros, para ello hay que realizar estudios detallados haciendo uso de láminas delgadas observadas al microscopio petrográfico o microscopio electrónico de barrido. El tamaño de poro se puede determinar con el porosímetro, basado en la intrusión con mercurio (Porta *et al.*, 1994).

El espacio poroso total de un suelo arenoso puede ser bajo, pero una gran proporción de él está compuesta de poros grandes, los cuales hacen muy eficiente el movimiento de agua y aire. El porcentaje del volumen ocupado por poros pequeños en suelos arenosos es bajo, a esto se debe su baja capacidad de retención de agua. Por el



contrario, un suelo superficial de textura fina tiene más espacio poroso total y una proporción relativamente grande de ellos son poros pequeños dando como resultado una mayor retención de agua en el suelo. Tanto el agua como el aire se mueven con dificultad en el suelo debido al tamaño de los poros en el suelo (Millar *et al.*, 1972).

Los espacios porosos grandes se encuentran usualmente llenos de aire y en consecuencia se les llama **poros de aireación o macroporos**. Entre más pequeños son los poros por lo general tienden a estar llenos de agua y son llamados comúnmente **poros capilares o microporos**. El tamaño de poro es de gran importancia en relación con el movimiento del agua tanto dentro (infiltración), como a través (percolación) del suelo. Por el contrario, el movimiento del aire en el suelo está relacionado más con el volumen de poros vacantes del suelo, que con el tamaño de los mismos (Millar *et al.*, 1972).

El tamaño de las partículas en los suelos y el tipo de empaquetamiento influyen en el espacio poroso, de esta forma se tiene que un empaquetado denso disminuye la porosidad. Cualquier trabajo que destruye la estructura grumosa e individualiza las partículas del suelo lleva a la disminución del espacio poroso; dicho cambio puede ser, entre otras causas, por pisoteo, por lluvias fuertes, por procesos químicos, así como por la presencia de agentes dispersantes como el sodio (Robinson, 1967).

De manera general, el espacio poroso disminuye conforme se aumenta la profundidad y puede ser pequeño en un horizonte iluvial, sobre todo si hay zonas de compactación (Robinson, 1967).

4.2.1.4 Textura

El suelo es un sistema disperso en el cual se distinguen tres fases: líquida, sólida y gaseosa. La parte sólida comprende componentes orgánicos e inorgánicos; es muy estable y heterogénea formada por la mezcla de materiales de diferentes características que se pueden separar y clasificar de acuerdo con su tamaño, propiedades y origen, dando al suelo su textura (Aguilera, 1989; FitzPatrick, 1987).

La textura del suelo se define como la proporción relativa de arenas limos y arcillas en el suelo (Ortiz y Ortiz, 1990) y es la sensación que da al tacto el suelo húmedo como resultado de la mezcla de las partículas minerales (arcillas, limos y arenas) y la materia orgánica, presentes en el suelo (Aguilera, 1989; FitzPatrick, 1987). La determinación de la cantidad de las partículas presentes en el suelo se llama análisis mecánico o análisis del tamaño de las partículas. Las partículas del suelo han sido divididas exclusivamente en función de su tamaño, sin importar su composición, peso o color. A los grupos de las partículas se le llama separados del suelo (Aguilera, 1989; Cuanalo, 1975; FitzPatrick, 1987; Millar *et al.*, 1972; Ortiz y Ortiz, 1990). En función del predominio de alguno de estos separados, los suelos se dividen en suelos de textura fina, media o gruesa en su forma más general (Aguilera, 1989; Cuanalo, 1975; FitzPatrick, 1987; Ortiz y Ortiz, 1990).



Muchas de las reacciones físicoquímicas del suelo están regidas por la textura, ya que ésta determina el tamaño de la superficie sobre la cual ocurren las reacciones. Algunas características donde influye la textura del suelo son porosidad, capacidad de adsorción, deficiencia o eficiencia de drenaje y mayor capacidad de retención de agua. La textura dentro de un perfil puede ser igual o diferente en todos sus horizontes, dando lugar a un perfil de texturas (Millar *et al.*, 1972).

Para realizar la clasificación textural del suelo, se utiliza el triángulo de textura, el cual presenta 12 clases texturales básicas (tabla 4.2) que dependen del porcentaje de arenas, limos y arcillas presentes en el suelo (Aguilera, 1989; Cuanalo, 1975; FitzPatrick, 1987; Ortiz y Ortiz, 1990, Ortiz y Gutiérrez, 1994).

Clase textural		Porcentajes		
Nombre	Símbolo	Arena	Limo	Arcillas
Arena	A	85-100	0-15	0-10
Arena migajosa	Am	70-90	0-30	0-15
Migajón arenoso	Ma	43-80	0-50	0-20
Franco	F	23-52	28-50	7-27
Migajón limoso	MI	0-50	50-88	0-27
Limo	L	0-20	80-100	0-12
Migajón arcillo-arenoso	Mra	45-80	0-28	20-35
Migajón arcilloso	Mr	20-45	15-53	27-40
Migajón arcillo-limoso	Mrl	0-20	40-73	27-40
Arcilla arenosa	Ra	45-65	0-20	35-45
Arcilla limosa	RI	0-20	40-60	40-60
Arcilla	R	0-45	0-40	40-100

Fuente: Aguilera (1987); Cuanalo (1975); FitzPatrick (1987); Ortiz y Gutiérrez (1994); Ortiz y Ortiz (1990)

4.2.2 Propiedades Químicas

4.2.2.1 Reacción del suelo (pH)

Una característica importante del suelo es su reacción expresada como un valor de pH, dicha reacción indica el grado de acidez, alcalinidad o neutralidad del mismo (Brady, 1990).



El concepto de pH se deriva de la disociación del H₂O, y lo que indica es la concentración de iones [H⁺]. Asociado a este concepto se encuentra el de pOH que indica la concentración de iones [OH⁻] en la solución (Bohn *et al.*, 1993; Brady, 1990; Fassbender y Bornemisza, 1987; Flores, 1996; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994).

Por definición el pH es el logaritmo decimal del inverso de la concentración de iones [H⁺] en moles por litro (Garzón, 1990). Cuando el suelo contiene igual cantidad de [H⁺] y [OH⁻] ([H⁺] = [OH⁻] = 1.0 x 10⁻⁷) se tiene un pH neutro; cuando es mayor la cantidad de [H⁺] que de [OH⁻] la solución es ácida y cuando hay menos [H⁺] que [OH⁻] la solución es básica o alcalina. De esta forma se tienen diferentes grados de acidez o alcalinidad expresada en términos de pH que se conoce como *reacción del suelo* (Bohn *et al.*, 1993; Brady, 1990; Fassbender y Bornemisza, 1987; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994).

De acuerdo con la NOM 021-RECNAT-2003 (DOF, 2002a), un valor de pH menor que 5 indica condiciones fuertemente ácidas, si el valor es entre 5.1 y 6.5 las condiciones son moderadamente ácidas, si el valor se encuentra entre 6.6 y 7.3 las condiciones son de un pH neutro, si el valor está entre 7.4 y 8.5 se encuentran condiciones medianamente alcalinas y si el valor de pH es mayor que 8.5 las condiciones que se presentan son fuertemente alcalinas.

Dentro de los efectos esperados en el suelo en función del pH que este presenta se encuentran los mencionados en la tabla 4.3.

TABLA 4.3. EFECTOS DEL pH EN EL SUELO	
Valor de pH	Ambiente
4.5	Condiciones muy desfavorables.
4.5 - 5.0	Posible toxicidad por Al ³⁺
5.5 - 5.5	Exceso de Co, Cu, Fe, Mn, Zn; deficiencia de Ca, N, Mg, Mo, P, S; suelos sin carbonato de calcio, actividad bacteriana escasa.
5.6 - 6.0	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos.
6.1 - 6.5	Máxima disponibilidad de nutrientes.
6.6 - 7.3	Mínimos efectos tóxicos, por debajo de pH 7 no hay carbonato de calcio.
7.4 - 7.8	Suelos generalmente con Carbonato de calcio
7.9 - 8.4	Disminuye la disponibilidad de fósforo y boro. Deficiencia creciente de Co, Cu, Fe, Mn, Zn. Clorosis férrica.
8.5 - 9	En suelos con carbonatos estos pH altos pueden deberse al carbonato de magnesio, no hay sodio intercambiable.
9.1 - 10	Presencia de carbonato sódico.
mayor de 10	Elevado porcentaje de sodio intercambiable. Toxicidad por sodio y B. Movilidad del fósforo como fosfato de sodio. Actividad microbiana escasa. Macronutrientes poco disponibles excepto molibdeno.

Fuente: Aguilera (1989); Cuanalo (1975); FitzPatrick (1987); Ortiz y Ortiz (1990), Porta *et al.* (1994)



4.2.2.2 Carbono (C)

El carbono presente en los suelos forma parte del material orgánico e inorgánico, la suma de ambos es lo que se conoce como Carbono total y se divide de la siguiente forma (Jackson, 1982):

1. Carbono mineral, principalmente de CaCO_3 y MgCO_3 , cantidades pequeñas de CO_2 y también de HCO_3^- y $\text{CO}_3^{=}$.
2. Formas condensadas de composiciones próximas al carbono mineral elemental (carbón vegetal, grafito, hulla).
3. Residuos de plantas, animales y microorganismos, resistentes y alterados (humus y humatos).
4. Residuos orgánicos poco alterados, de plantas, animales y microorganismos vivos y muertos que sufren descomposición rápida en el suelo.

El carbono orgánico total incluye las formas 2, 3 y 4 de la lista anterior; en el suelo se encuentra en la materia orgánica y varía aproximadamente entre el 48 y el 58 % en peso de la misma (Jackson, 1982).

El carbono se considera un nutriente esencial, interviene en todo el proceso esencial de la vida, es por ello que su ciclo es llamado “Ciclo del carbono”, “biociclo” o “ciclo de vida” que inicia con la asimilación de CO_2 por las plantas; las plantas son consumidas por el hombre y otros animales, y más tarde retorna al suelo en residuos que son mineralizados y liberan CO_2 , cerrando el ciclo de esta forma (Brady, 1990). En la tabla 4.4 se muestra la interpretación para el contenido de carbono orgánico en suelos.

TABLA 4.4. CLASIFICACIÓN PARA EL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO Y MATERIA ORGÁNICA		
Interpretación	Porcentaje de C	Porcentaje de M.O.
Muy bajos	Menor de 1.2	Menor de 2
Bajos	1.2 a 2.9	2 a 5
Medios	2.9 a 4.6	5 a 8
Altos	4.6 a 8.7	8 a 15
Muy altos	Mayor de 8.7	Mayor de 15

Fuente: Fassbender y Bornemisza(1987)

La norma NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002a) establece la siguiente interpretación para los contenidos de materia orgánica en suelos volcánicos y en suelos no volcánicos.

TABLA 4.5. CLASIFICACIÓN PARA EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA		
Interpretación	Porcentaje de M.O. Suelos volcánicos	Porcentaje de M.O. Suelos no volcánicos
Muy bajos	Menor de 4.0	Menor de 0.5
Bajos	4.1 a 6.0	0.6 a 1.5
Medios	6.1 a 10.9	1.6 a 3.5
Altos	11.0 a 16.0	3.6 – a 6.0
Muy altos	Mayor de 16.1	Mayor de 6.0

Fuente: DOF 2002a



4.2.2.3 Relación carbono nitrógeno (C:N)

La relación C:N, es la relación entre el peso del C orgánico y el peso del Nitrógeno total del suelo, se obtiene al dividir el porcentaje de C orgánico entre el porcentaje de N total (PPI, 1997). Los valores utilizados son los obtenidos con los métodos de Walkley-Black para el caso de C orgánico y el Kjeldahl para el caso del N total.

La relación C:N es un indicador de la velocidad de degradación de los residuos orgánicos incorporados al suelo; valores altos indican una lenta descomposición lo que se ve reflejado en la poca cantidad de nutrimentos disponibles e incluso puede haber inmovilización del N. Por el contrario los valores bajos indican una velocidad alta de descomposición y una buena cantidad de nutrimentos disponible (Agroecology, 2001; Falen, 1998, Lexer *et al.*, 2000; Shannon, 1999). Algunos valores estimados para la relación C:N son los que se presentan en la tabla 4.6 (STA,1998).

Relación C:N		Relación C:N		Velocidad de descomposición de M.O.
Mayor de 13	Alta	Mayor de 25	Alta	Poca o no hay descomposición
11 a 13	Ligeramente alta	16 a 25	Ligeramente alta	Baja
9 a 11	Normal	11 a 15	Normal	Normal
De 8 a 9	Baja	De 8 a 10	Baja	Rápida
Menor de 8	Muy baja	Menor de 8	Muy baja	Rápida

Fuente: STA (1998); Shannon (1999)

4.2.2.4 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), se refiere sobre todo a cationes básicos como (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+1} , Na^{+1}) y cationes ácidos como (H^{+1} , Al^{+3}). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es conocida también como capacidad de intercambio de bases o capacidad de adsorción de bases, es la cantidad de cationes intercambiables que un suelo puede adsorber a pH de 7, algunos de los cationes son nutrimentos para las plantas. El proceso de intercambio se da de manera reversible y rápida, es decir, se adsorben cationes de la fase líquida y se desadsorben al mismo tiempo cantidades equivalentes de otros cationes. Entre más alto es el contenido de arcillas y humus en el suelo, mayor es la capacidad de intercambio (Aguilera, 1989; Bolt y Bruggenwert, 1976; FitzPatrick, 1987; Lippert, 2005; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994; Rivera Díaz, 1998; USDA, 1990).

Existen dos tipos de intercambio iónico, el intercambio catiónico y el intercambio aniónico. Ambos dependen de las cargas que se encuentran en las arcillas y los componentes orgánicos. Se deben tanto a la carga permanente que es independiente



del pH y que se da por sustitución isomórfica (los cationes que debían formar los cristales de la matriz se sustituyeron por otros cationes de igual tamaño pero de valencia menor), o a la carga variable que depende directamente del pH. El intercambio de aniones es menos frecuente que el intercambio catiónico, los valores son expresados en meq (100 g)⁻¹ de suelo o cmol(+) kg⁻¹ de suelo; el valor numérico en ambos es el mismo (Aguilera, 1989; Bolt y Bruggenwert, 1976; FitzPatrick, 1987; Lippert, 2005; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994; Rivera Díaz, 1998; USDA, 1990).

La CIC es un índice de fertilidad del suelo, valores de 8 a 10 cmol(+) kg⁻¹ se consideran como mínimo aceptable para un horizonte Ap para producción satisfactoria con riego; los suelos que tienen una baja capacidad de intercambio retienen muy pocos cationes y puede requerir aplicaciones más frecuentes de fertilizantes que los suelos que tienen una alta capacidad de intercambio. Los suelos que tienen una alta capacidad de intercambio tienen un mayor potencial de retener cationes, lo cual reduce el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas (Aguilera, 1989; Bolt y Bruggenwert, 1976; FitzPatrick, 1987; Lippert, 2005; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994; Rivera Díaz, 1998; USDA, 1990).

Existen tres categorías principales de iones en el suelo; *de fase sólida* que precipitan nuevamente como minerales formados por el suelo; *iones intercambiables* que permanecen en la solución del suelo asociados con las superficies de la fase sólida, estos son difíciles de remover por lavado a menos que la solución contenga sales neutras que suministren cationes que se intercambien con los adsorbidos por los coloides, y los *iones solubles* que permanecen de manera predominante en la fase soluble, ya que son competidores deficientes por la carga superficial y son fácilmente arrastrados por lavado (Aguilera, 1989; FitzPatrick, 1987; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994).

El poder de reemplazamiento en el complejo coloidal por los cationes no es el mismo para todos, éste depende del radio iónico, de su carga y de su grado de hidratación. Se ha encontrado experimentalmente un orden descendente para el intercambio catiónico y es conocida como serie liotrópica que de acuerdo con Aguilera (1987), FitzPatrick (1987) y Ortiz y Ortiz (1990) es: H>Sr>Ba>Ca>Mg>Rb>K>NH⁴>Na>Li. Otros autores mencionan que la distribución de cationes en el suelo es diferente; para Bohn *et al.* (1993) los principales cationes intercambiables en suelos agrícolas son Ca⁺² > Mg⁺² > K⁺ ≈ NH⁴ ≈ Na⁺; para Porta *et al.* (1994) no existe una secuencia de adsorción que tenga validez general.

Una de las clasificaciones de valores para la CIC es la siguiente (tabla 4.7):

TABLA 4.7. VALORES DE CIC DEL SUELO	
Clasificación	CIC (meq (100 g) ⁻¹)
Muy baja	Menor de 5
Baja	5 – 15
Media	15 – 25
Alta	25 – 40
Muy alta	Mayor de 40

Fuente: DOF (2002a); Vázquez y Bautista (1993)



4.2.2.5 Porcentaje de saturación de bases (%V o SB)

La saturación de bases es la estimación en porcentaje del grado en que el complejo de intercambio está saturado con cationes básicos (cationes intercambiables diferentes del H^+ y Al^{+3}); si el valor es mayor que el 50% es un suelo éutrico (fértil), si es menor del 50% es un suelo dístrico (infértil). Se sabe que la cantidad de bases intercambiables aumenta con la disminución de la precipitación. Los porcentajes bajos de saturación de bases se usan como un criterio de lixiviación intensa.

La fórmula para el cálculo del porcentaje de saturación de bases es la que se muestra en la ecuación 4.

$$\% V = \frac{\sum(Ca, Mg, Na, K) 100}{CIC \text{ a pH de } 7 \text{ ó } 8.2} \quad (4)$$

Donde:

% V = Porcentaje de saturación de bases del suelo

$\Sigma(Ca, Mg, Na, K)$ = Sumatoria de las concentraciones de calcio, magnesio, sodio y potasio ($cmol \text{ kg}^{-1}$ o $meq (100 \text{ g})^{-1}$)

CIC = Capacidad de intercambio catiónico ($cmol \text{ kg}^{-1}$ o $meq (100 \text{ g})^{-1}$)

Como se indica en el párrafo anterior, para aplicar la ecuación 4 se requiere saber las cantidades presentes en el suelo de cada catión y conocer además el valor de la capacidad de intercambio catiónico (Aguilera, 1989; FitzPatrick, 1987; Lippert, 2005; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994).

En la tabla 4.8 se observan los intervalos para clasificar el porcentaje de saturación de bases.

TABLA 4.8. VALORES DE PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE BASES	
Clase	% V
Baja	Menor de 35
Media	35 - 80
Alta	Mayor de 80

Fuente: Vázquez y Bautista (1993)

Anteriormente, en los trabajos de acidez del suelo, estos se caracterizaban por su porcentaje de saturación básica a un pH específico. Se consideraba que en suelos con bajos niveles de saturación básica predominaba la caolinita y los minerales de óxidos hidratados, por el contrario los altos niveles indicaban predominio de los minerales del tipo 2:1 como la montmorillonita, vermiculita, clorita, y las micas. Actualmente la saturación de bases es un criterio para la taxonomía de suelos en el esquema de clasificación de suelos de los Estados Unidos (Bohn *et al.*, 1993).



4.2.2.6 Macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S)

De acuerdo con lo dicho en la NOM-182-SSA1-1998, nutrimento es el elemento químico esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas (DOF, 2000a).

Para establecer si un elemento es esencial o no, dicho elemento debe cumplir con lo siguiente (Hernández, 2001):

- Que la deficiencia del elemento impida que la planta complete su ciclo vital.
- El elemento no puede ser reemplazado por otro elemento con propiedades similares.
- El elemento debe participar directamente en el metabolismo de la planta y su beneficio no debe estar relacionado solamente al hecho de mejorar las características del suelo.

Con diversos estudios se ha establecido que 16 son los nutrimentos esenciales para las plantas que pueden ser minerales y no minerales; los no minerales están involucrados en la fotosíntesis de las plantas. Los nutrimentos minerales se dividen en tres grupos, esenciales, secundarios y micronutrientes. En la tabla 4.9 se muestran los elementos que corresponden a cada grupo citado (AGROPECSTAR, 2003; Hernández, 2001; PPI, 1997).

No minerales	Minerales		
	Esenciales	Secundarios	Micronutrientes
Carbono Hidrógeno Oxígeno	Nitrógeno Fósforo Potasio	Calcio Magnesio Azufre	Boro Cloro Cobre Hierro Manganeso Molibdeno Zinc

Fuente: AGROPECSTAR (2003); Hernández (2001); PPI (1997)

Se define como macronutrimento al elemento que la planta requiere en grandes cantidades, usualmente en cantidades mayores a 500 mg kg^{-1} . Nutrimento secundario es el nutrimento mineral que las plantas requieren en cantidades intermedias, a los nutrimentos primarios y secundarios se les llama también macronutrientes. Micronutrimento, llamado también oligoelemento, es aquel nutrimento mineral que las plantas requieren en pequeñas cantidades, usualmente menores a 50 mg kg^{-1} (AGROPECSTAR, 2003; DOF, 2000a; DOF, 2000b; Hernández, 2001; PPI, 1997).

Generalmente los nutrimentos primarios son los primeros en ser deficientes. Los nutrimentos secundarios y los micronutrientes, son generalmente menos deficientes en el suelo (PPI, 1997).



Nitrógeno (N)

En nitrógeno es considerado un nutrimento primario esencial, su presencia en el suelo puede ser de forma orgánica e inorgánica (ver tabla 4.10) (Fassbender y Bornemisza, 1987; DOF, 2000b; PPI, 1997).

TABLA 4.10. FORMAS DE NITRÓGENO PRESENTES EN EL SUELO		
N Total	N-orgánico	Proteínico
		Nucléico
		Azúcares aminados
		Otros
	N-inorgánico	NH ₄ ⁺ nativo fijo
		NH ₄ ⁺ intercambiable (asimilable)
		NO ₃ ⁻ (asimilable) y otro N-Mineralizado

Fuente: Fassbender y Bornemisza (1987)

Los organismos emplean el nitrógeno (N) en la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos y otras moléculas fundamentales del metabolismo. La reserva más grande de N es la atmósfera donde se encuentra de forma molecular (N₂), la cual no puede ser utilizada de manera directa por los seres vivos a excepción de algunas bacterias. Dichos organismos son importantes en la fijación del nitrógeno para que sea asimilable por las plantas. Otro proceso que se da es la mineralización y dentro de éste, la nitrificación (Echarri, 1999).

La fijación del nitrógeno es el proceso por el cual el nitrógeno elemental pasa a formas orgánicas e inorgánicas en el suelo. La asimilación del N por los microorganismos para la formación de compuestos de N disponible para las plantas, ocurre cuando el N₂ se combina con H₂ u O₂, lo cual es necesario para que pueda ser utilizado por las plantas. La fijación puede ocurrir de manera biológica y esta puede ser simbiótica o no simbiótica; la simbiótica es por medio de bacterias que fijan el N mientras crecen asociadas con alguna planta huésped (ejemplo, Rhizobium y las raíces de las leguminosas); la fijación no simbiótica se lleva a cabo mediante bacterias que viven libremente en el suelo (Jackson, 1982). La oxidación natural es otro proceso de fijación, las descargas eléctricas permiten que el O₂ reaccione con el N₂ formando así NO₃⁻. Otro proceso es la fijación industrial, donde se combina N₂ y H₂ para formar el amoníaco anhidro (PPI, 1997).

En sí el proceso de transformación del N se resume a la mineralización (paso de formas orgánicas a inorgánicas) que se da de manera simultánea con la inmovilización (paso de formas inorgánicas a orgánicas). Dentro de la mineralización, el N orgánico es transformado a NH₄⁺ en lo que se conoce como amonificación y después, dicho amonio es convertido a NO₃⁻ o a NO₂⁻ en lo que se conoce como nitrificación, ambos procesos son realizados por organismos heterótrofos y autótrofos (PPI, 1997).

De manera general se estima que el N orgánico representa entre el 85 y 95% de N total del suelo, en gran parte su naturaleza química es desconocida. Los compuestos



nitrogenados que se acumulan en forma de restos de plantas y animales tienen en su mayoría naturaleza protéica (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Las formas presentes de N inorgánico en el suelo son NH_4^+ (amonio), NO_3^- (nitrato), NO_2^- (nitrito), N_2O (óxido nitroso), NO (óxido nítrico) y N elemental (Lomelí y Tamayo, 2003a). Las formas de nitrógeno asimilable por las plantas son NH_4^+ y NO_3^- , los cuales pueden ser perdidos por lixiviación o desnitrificación, por lo que es necesario que se encuentre en el suelo suficiente materia orgánica que asegure la presencia de N que pueda ser transformado a formas disponibles para las plantas. La relación C:N es importante, ya que relaciones altas (30:1) favorecen la inmovilización; relaciones de 20:1 tienden a una más rápida mineralización y entre 20:1 y 30:1 favorecen tanto la mineralización como la inmovilización (PPI, 1997).

En N es importante en las plantas ya que interviene en la fotosíntesis; mejora la eficiencia en el uso de nutrientes, es un componente en el sistema de energía de la planta, es el responsable del incremento de las proteínas en las plantas (PPI, 1997).

Nitrógeno total (N total)

De acuerdo con la NMX-AA-24-1984 (DOF, 1984), el nitrógeno total es la suma del nitrógeno orgánico y amoniacal presente en la muestra.

Los valores estimados para N total presente en suelos se clasifican como se muestra en la tabla 4.11.

TABLA 4.11. CLASIFICACIÓN DEL PORCENTAJE DE N PRESENTE EN EL SUELO	
% de N	Clasificación
Mayor de 0.18 %	Alto
0.15 a 0.18 %	Ligeramente alto
0.10 a 0.15 %	Normal
0.08 a 0.10 %	Ligeramente bajo
0.05 a 0.08 %	Bajo
Menor de 0.05 %	Muy Bajo

Fuente: STA (1998)

Este porcentaje es importante, ya que representa la cantidad posible de N que puede ser disponible por las plantas, se relaciona además con el C para establecer la relación C:N que es un indicador de la fertilidad del suelo (ver relación C:N).

Fósforo (P)

El fósforo pertenece al grupo de los macronutrientes. Es el segundo en importancia después del hidrógeno, es necesario en todas las formas de vida ya que es un elemento clave en muchos procesos fisiológicos y bioquímicos; aparece en las estructuras complejas de ADN y ARN que controlan todos los procesos biológicos tanto



en el reino vegetal como animal. Es además un componente fundamental en el sistema de transporte de energía (EFMA, 2000; Stevenson, 2005).

La ocurrencia del fósforo en la naturaleza se da de forma combinada con otros elementos con los que forma fosfatos que pueden ser muy complejos y presentarse de diversas formas en rocas, suelo, agua, plantas y animales (EFMA, 2000; Stevenson, 2005). Químicamente el fósforo puede encontrarse como fósforo inorgánico, orgánico, adsorbido y asimilable (García, 2004).

El fósforo inorgánico se encuentra en los minerales primarios (apatita), adsorbido en las arcillas (lábil), en la solución del suelo (aprovechable o asimilable por las plantas en forma de fosfatos HPO_4^- y H_2PO_4^-), y en forma no lábil (poco disponible ya que se encuentra precipitado u ocluido) (EPF-INTA, 2005).

Dentro de las formas de fosfato inorgánico se pueden encontrar las que se observan en la tabla 4.12.

TABLA 4.12. FORMAS DEL FOSFATO			
	Denominación	Composición	Características
Fosfatos de calcio	Hidroxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{OH})_2$	Mayor abundancia
	Oxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaO}$	-
	Fluorapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaF}_2$	Mayor abundancia
	Carbonatoapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaCO}_3$	-
	Fosfato tricálcico	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	-
	Fosfato bicálcico	CaHPO_4	Mayor solubilidad
	Fosfato monocálcico	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	Mayor solubilidad
Fosfatos de hierro	Vivianita	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	-
	Estrengita	$\text{Fe}_3\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-
Fosfatos de aluminio	Variscita	$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-

Nota: Todas son de menor solubilidad que los fosfatos orgánicos
 Fuente: Montecillos (1997)

Las raíces de las plantas absorben el fósforo de la solución acuosa del suelo por difusión y lo absorben en suelos ácidos en forma de H_2PO_4^- (ortofosfato primario), o si se trata de suelos calcáreos en forma de HPO_4^{2-} (ortofosfato secundario); estas formas quedan disponibles al solubilizarse o romperse cualquiera de los compuestos fosfatados (EFMA, 2000; Montecillos, 1997).

Las raíces de las plantas solo absorben una parte del fósforo aplicado en forma de fertilizante, el resto es retenido en la superficie de las partículas del suelo y de aquí puede pasar nuevamente a la solución acuosa o quedar absorbido, con lo que el fósforo se hace menos aprovechable; en esta parte es importante el tamaño y tipo de partícula de suelo así como la presencia de Al, Fe, Ca, la materia orgánica y la acidez del suelo. La mayor cantidad de fósforo disponible se encuentra a un pH de 6.5 (EFMA, 2000; SSC, 2002a)

El fósforo orgánico se encuentra asociado a la materia orgánica del suelo o a los detritos orgánicos frescos procedentes de las plantas o animales. Los estiércoles son



una fuente rica en fósforo. El fósforo orgánico no puede ser absorbido por la planta, tiene que pasar a formas de fosfato inorgánico. Las principales formas de fósforo orgánico son el fosfato de inositol y los ácidos nucleicos. El porcentaje de fósforo orgánico presente en el suelo varía del 3 al 85 % del fósforo total (EFMA, 2000; Montecillos, 1997).

Potasio (K)

El potasio (K) pertenece al grupo de los macronutrientes, es un elemento esencial para los organismos vivos. Desempeña un papel importante en la activación enzimática que actúa en el metabolismo para la fotosíntesis, síntesis de proteínas y carbohidratos; actúa en el balance de agua y el crecimiento meristemático, mejora la nodulación de las leguminosas, contribuyendo con todo ello al crecimiento vegetativo, la fructificación la maduración y la calidad de los frutos, ayudando además a la resistencia de la planta a condiciones adversas. Los cultivos tienen aproximadamente la misma cantidad de nitrógeno y potasio, pero también tienen más potasio que fósforo. El potasio además de ser un macronutriente, se encuentra también dentro de lo que se conoce como bases intercambiables (Na, K, Ca, Mg) (Conti, 2004; Torres, 2005; PPI, 1997; Sparks *et al.*, 1996).

La demanda de las plantas por el potasio es muy similar entre diferentes especies, un exceso de K lleva a la acumulación del mismo en los órganos vegetativos; en las semillas la concentración es constante de aproximadamente 0.3%. El exceso de K puede intervenir en la absorción de algunos nutrientes y su carencia puede llevar a una mayor susceptibilidad a enfermedades, una menor resistencia a la sequía y un descenso en la calidad de la cosecha (González, 2003).

El potasio es un elemento abundante en la corteza terrestre que se encuentra ampliamente distribuido en muchas rocas en concentraciones pequeñas. Generalmente el contenido de K es el reflejo del tipo de material parental, de esta forma se tiene que las rocas ígneas contienen de 46 a 54 g kg⁻¹ de K; en rocas sedimentarias se tiene en promedio 30 g kg⁻¹ de K; pero los depósitos de sal son los que se pueden explotar para la extracción comercial. Dichos depósitos son una compleja mezcla de sales que contienen potasio, sodio y magnesio (Johnston, 1997). La mayor parte de las sales de K son muy solubles (García, 2004; Sparks *et al.*, 1996).

El K es absorbido por las plantas en forma de K⁺; este no forma en la planta compuestos orgánicos (AGROPECSTAR, 2003). La absorción se encuentra influenciada por la presencia de Ca²⁺ y Mg²⁺ en suelos neutros (normales), por Al³⁺ en suelos ácidos y por Na⁺ en suelos afectados con sales (SSC, 2002a; SSC, 2002b).

Calcio (Ca)

El calcio se considera ya un nutriente secundario, dado que la demanda de las plantas por este es menor que la de los primarios. El calcio es absorbido por la planta en forma



de catión Ca^{+2} ; ayuda en el desarrollo de las raíces y hojas, fortalece la estructura de la planta ayudando a formar compuestos que son parte de las paredes celulares, activa varias enzimas, reduce la presencia de nitrato, y neutraliza los ácidos orgánicos. Influye de manera indirecta en el rendimiento al reducir la acidez del suelo, al mejorar las condiciones de crecimiento de las raíces, estimular la actividad microbiana, y se requiere en grandes cantidades por las bacterias fijadoras de N. Los síntomas de deficiencia de calcio se presentan en un pobre desarrollo de raíces y la consistencia gelatinosa de los filos de hojas y puntos (PPI, 1997).

La presencia del calcio en suelo está entre 0.1 y 25 % ; el Ca existe como un catión y se mantiene adherido como Ca^{2+} intercambiable en la superficie de los coloides; ocupa generalmente el 70% o un poco más de los lugares de intercambio; se encuentra presente en la solución del suelo. Las fuentes principales de Ca son la dolomita, calcita, apatita y feldespatos (PPI, 1997).

Se puede decir que en el suelo hay tres tipos de compuestos de Ca (FENALCE, 2000):

- Fracción mineral: que forma parte de las partículas de suelo como feldespatos, calizas (carbonato de Ca), apatita (roca fosfórica) y yeso. Todos ellos son insolubles y requieren de condiciones especiales para poder hacerse solubles.
- Fracción intercambiable: absorbida por el complejo coloidal y que por las reacciones de intercambio puede pasar a la solución del suelo y ser absorbido por las plantas.
- Fracción intercambiable: se encuentra en la solución del suelo.

El calcio que es más utilizable por la nutrición de la planta incluye las fracciones soluble en agua e intercambiable. En suelos fértiles el calcio intercambiable puede constituir de 70 a 80% de las bases cambiables totales. Se determina generalmente lavando el suelo con sales neutras (Hernández, 2001).

Magnesio (Mg)

El magnesio se considera también un nutrimento secundario pero aún dentro del grupo de los macronutrientes, debido a la menor demanda de las plantas por él. Es absorbido por las plantas como catión Mg^{+2} , una vez en la planta interviene en el metabolismo del fósforo, en la respiración y en la activación de muchas enzimas en la planta; también, junto con el nitrógeno, es el único nutrimento proveniente del suelo que forma parte de la clorofila, por lo cual se encuentra involucrado en la fotosíntesis. El movimiento del Mg en la planta es de tejidos viejos a jóvenes. Las deficiencias de Mg se ven primero en las hojas viejas, que presentan color amarillento, bronceado o rojizo y las vainas se mantienen verdes. El Mg se encuentra sujeto a intercambio catiónico, se encuentra en la solución del suelo, se adsorbe con menos fuerza a las partículas que el Ca, por lo que se puede perder por lixiviación (PPI, 1997).

El Mg proviene de la meteorización de rocas con minerales como biotita, hornblenda, dolomita y clorita (PPI, 1997). El contenido promedio de magnesio en la litosfera es de 2.68 %, variando según el origen geológico del suelo. El magnesio se encuentra



presente en el suelo bajo las formas no-intercambiable y soluble en agua. El magnesio en la forma no-intercambiable se encuentra principalmente en los minerales primarios y secundarios (biotita, augita, hornblenda, olivina, serpentina, clorita, montmorillonita, illita, vermiculita) y en los carbonatos minerales (dolomita, magnesita y sal de Epsom), las cuales predominan en las regiones áridas y semiáridas. Una pequeña parte de Mg se asocia con la materia orgánica del suelo. El contenido de magnesio total en los suelos no calcáreos varía entre 0.1 y 1% (AGROPECSTAR, 2003; Hernández, 2001; PPI, 1997).

El contenido total de magnesio en un suelo no es un índice de su disponibilidad. La disponibilidad de magnesio en un suelo depende no solamente de la cantidad total presente, sino de la cantidad en relación a la capacidad de intercambio de los coloides del suelo y de la naturaleza de los iones complementarios. Las pérdidas de magnesio del suelo son, en general, menores que las de calcio; estimándose que las cosechas extraen entre 10 y 60 kg por hectárea por cosecha (Hernández, 2001).

Azufre (S)

El azufre, ya sea como sulfuro, sulfato o azufre elemental, constituye aproximadamente el 0.06% de la corteza terrestre. El azufre nativo se encuentra en depósitos volcánicos sedimentarios o donde existe actividad termal. En los suelos se encuentra de forma orgánica e inorgánica, algunos de los minerales en que se encuentra son la piritita, la blenda, la calcopiritita, la cobaltina, algunas variedades de yeso y sal de Epsom (Hernández, 2001).

El azufre es asimilado por las plantas como ión sulfato (SO_4^{2-}) o también puede entrar por las hojas como dióxido de azufre (SO_2), posteriormente es reducido e incorporado a compuestos orgánicos, retorna al suelo en forma orgánica donde se mineraliza por los microorganismos antes de ser utilizado por las plantas (AGROPECSTAR, 2003; Hernández, 2001).

El azufre es parte de las células y forma parte de 2 de los 21 aminoácidos que constituyen las proteínas, ayuda al desarrollo de enzimas y vitaminas, promueve la nodulación en las leguminosas, ayuda en la producción de semillas, es necesario en la producción de clorofila aún cuando no forma parte de este compuesto, forma parte de compuestos que dan olor característico al ajo, mostaza y cebolla (Hernández, 2001).

El ión sulfato, debido a su carga negativa no es atraído por los coloides o las arcillas, generalmente se mantiene en la solución del suelo y se mueve con el flujo de agua, por lo que es muy fácil de lixiviar (AGROPECSTAR, 2003).

4.2.2.7 Micronutrientos (B, Cl, Mo, Zn, Fe, Cu, Mn, Ni, Na)

Los micronutrientos llamados también oligoelementos son aquellos nutrientes minerales que las plantas requieren en pequeñas cantidades, usualmente menores a 50



mg kg⁻¹ (AGROPECSTAR, 2003; DOF, 2000b; DOF, 2002b; Hernández, 2001; PPI, 1997). Los oligoelementos se pueden dividir en aniónicos (boro, cloro, molibdeno) y catiónicos (zinc, hierro, cobre, manganeso y níquel). La ausencia de alguno de estos puede limitar el crecimiento de las plantas. En fechas recientes se ha subsanado la deficiencia de estos, aplicándolos en forma de fertilizantes (AGROPECSTAR, 2003; PPI, 1997).

Boro

El boro no se encuentra solo en estado natural, se presenta como bórax. La turmalina es el mineral que mayor contenido de boro, es insoluble y se meteoriza lentamente. En rocas ígneas son otra fuente de boro para los suelos y en el agua de mar se encuentra en promedio de 4 a 6 ppm. Los suelos costeros son más ricos en boro, al igual que los suelos de zonas áridas donde las concentraciones de éste pueden ser de 1000 ppm, presentando en este caso problemas por toxicidad (Hernández, 2001). Otra fuente importante de boro es la materia orgánica. El boro disponible para las plantas se encuentra en la solución del suelo como ácido bórico (BOH)₃ a pH neutro (AGROPECSTAR, 2003; Hernández, 2001; PPI, 1997).

El boro es esencial para la germinación de los granos de polen, el crecimiento del tubo polínico y para la formación de semillas y paredes celulares. Se relaciona con la traslocación de azúcar y es importante en la formación de proteínas (AGROPECSTAR, 2003; Hernández, 2001; PPI, 1997).

Cloro (Cl)

El cloro se encuentra en la naturaleza combinado con otros metales en forma de cloruros. El ión Cl⁻ es el principal anión presente en el agua de mar. En rocas ígneas también se encuentran pequeñas cantidades de cloro, los minerales que mayor cantidad de cloro tienen son la cloroapatita, sodalita y escapolita. La acumulación del cloro en la superficie del suelo genera las costras salinas (Hernández, 2001).

El cloro es absorbido por las plantas como anión, interviene en la regulación de la presión osmótica y produce el balance de los cationes en la savia celular de las células vegetales. Interviene también en el transporte de cationes como K, Ca y Mg dentro de la planta, regulando la apertura y cierre de las células guardianes en los estomas (AGROPECSTAR, 2003; Hernández, 2001; PPI, 1997).

Molibdeno (Mo)

El molibdeno es relativamente raro, su presencia en los suelos varía de 0.2 a 5 ppm, se encuentra disuelto en la solución del suelo como ión molibdato (MoO₄²⁻ ó HMoO₄²⁻), adsorbido de forma intercambiable y no intercambiable, como constituyente de los minerales del suelo y de la materia orgánica.



Las plantas requieren Mo para sintetizar y activar la enzima nitrato-reductasa, que es la que reduce el nitrato a amonio dentro de la planta. Interviene además en la fijación simbiótica del N, e interviene en la transformación del P inorgánico a su forma orgánica dentro de la planta.

Zinc (Zn)

La cantidad de zinc promedio presente en suelos es de 10 a 30 ppm. Se encuentra en suelos y rocas en forma divalente (Zn^{2+}), cuando es fijado por minerales como bentonita, kaolinita, moscovita, biotita, y vermiculita no es disponible para las plantas. Cuando los minerales que contienen zinc son meteorizados, el zinc liberado se absorbe por los coloides o forma complejos con la materia orgánica, lo que permite que no sea lixiviado y permanezca en la zona radicular.

El zinc ayuda en la síntesis de sustancias que permiten el crecimiento de la planta, promueve ciertas reacciones metabólicas e interviene en la producción de clorofila y carbohidratos. Este oligoelemento no se trasloca en las plantas (AGROPECSTAR, 2003; Hernández, 2001; PPI, 1997).

Hierro (Fe)

El hierro es un elemento relativamente abundante en la corteza terrestre, en los suelos se encuentra de forma divalente (Fe^{2+}) (ferroso) o trivalente (Fe^{3+}) (férrico). El hierro en la forma ferrosa entra en el complejo de cambio de los suelos y de esta forma es tomado por las plantas. La forma férrica es adsorbida por los coloides del suelo formando complejos con los ácidos húmicos y coloides orgánicos, pero estos pueden ser transportados por el agua (Hernández, 2001).

El Fe forma parte de citocromos, proteínas y participa en reacciones de óxido-reducción, cataliza la formación de clorofila e interviene en los procesos de respiración ya que forma parte de una gran cantidad de enzimas respiratorias como la peroxidasa, la catalasa, la ferredoxina y la citocromo-oxidasa (AGROPECSTAR, 2003; Hernández, 2001; PPI, 1997).

El pH del suelo interviene en la disponibilidad del hierro, ya que conforme aumenta la acidez del suelo, aumenta el hierro férrico (AGROPECSTAR, 2003; Hernández, 2001; PPI, 1997).

Cobre (Cu)

El cobre se encuentra en los suelos en forma divalente (Cu^{2+}). En su forma intercambiable está firmemente adsorbida a la materia orgánica. El Cu^{2+} es fijado por el humus, en una forma más estable que la forma intercambiable adsorbida, el cobre no



intercambiable está en forma de complejos estables o como parte de residuos de plantas o en minerales primarios y secundarios. El Cu orgánico se hace disponible únicamente después de la mineralización (AGROPECSTAR, 2003; Hernández, 2001).

Manganeso (Mn)

El manganeso en el suelo se encuentra con valencias 2, 3 y 4; en la solución del suelo y en forma intercambiable se presenta como Mn^{2+} , los iones Mn^{+3} y Mn^{+4} forman óxidos que son prácticamente insolubles. Las cantidades presentes de manganeso en suelo oscilan entre 300 a 7000 ppm, y generalmente están en forma no intercambiable. Los factores que afectan su disponibilidad sobre todo son el pH y las condiciones de óxido reducción.

Las plantas utilizan el Mn^{2+} , el cual interviene en la síntesis de la clorofila, en la activación de enzimas como la arginasa y la fosfotransferasa e interviene también en la fotólisis del agua. Acelera la germinación y la maduración de las plantas e incrementa la disponibilidad de P y Ca (AGROPECSTAR, 2003; Hernández, 2001; PPI, 1997).

Níquel (Ni)

El níquel se encuentra sobre todo en rocas ígneas, generalmente se encuentra como Ni^{2+} que es además la forma que absorben las plantas. Generalmente es escaso en los suelos a excepción de aquellos formados por serpentinas, donde puede llegar a ser tóxico.

El níquel forma parte de la metaloenzima ureasa, la cual descompone la urea en amoníaco y dióxido de carbono y participa en el metabolismo del nitrógeno de las leguminosas (Hernández, 2001).

Sodio (Na)

El caso del sodio es particular, ya que no forma parte de los nutrimentos esenciales, más bien forma parte del grupo de bases que se determina en suelos.

El sodio es de interés químico cuando se presenta en exceso, es decir cuando se encuentra en el suelo en más del 5 al 15 % de los cationes intercambiables, bajo estas condiciones su influencia es negativa, ocasiona la defloculación de las arcillas, impide el movimiento del agua. Por otro lado, cuando se tiene alto contenido de sodio intercambiable en suelos expansivos, se favorece la infiltración (Bohn *et al.*, 1993).



PAGINA EN BLANCO



5. ÁREA DE ESTUDIO (MARCO GEOGRÁFICO)

5.1. Ubicación

El área de estudio se ubica en el estado de Puebla, en el municipio de Tepatlaxco de Hidalgo. Este municipio se encuentra al NW del estado de Puebla, colinda al norte con el estado de Tlaxcala, al sur con los municipios de Amozoc de Mota y Acajete; al este con el municipio de Acajete y al oeste con los municipios de Amozoc y Puebla (INEGI, 2000) (figura 5.1).

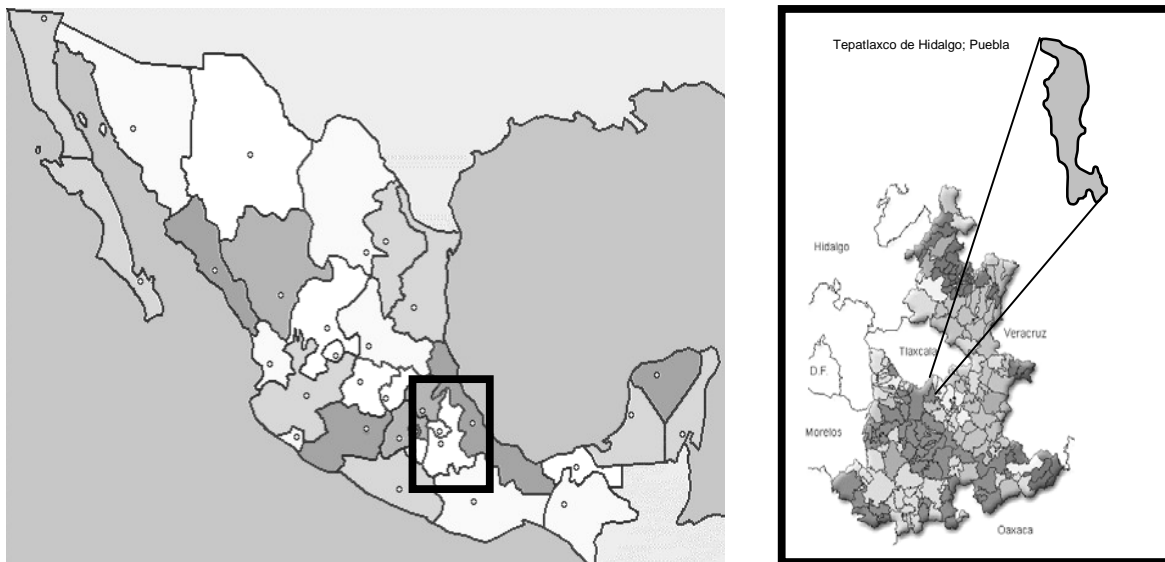


Figura 5.1. Ubicación del municipio de Tepatlaxco de Hidalgo, Puebla donde se encuentra el sitio de estudio (poblado de San Agustín Tlaxco).



Las coordenadas del sitio de estudio son: 19° 02.424' de latitud Norte y 98° 00.714' de longitud oeste (figura 5.2). Se encuentra en los terrenos ejidales del poblado de San Agustín Tlaxco .

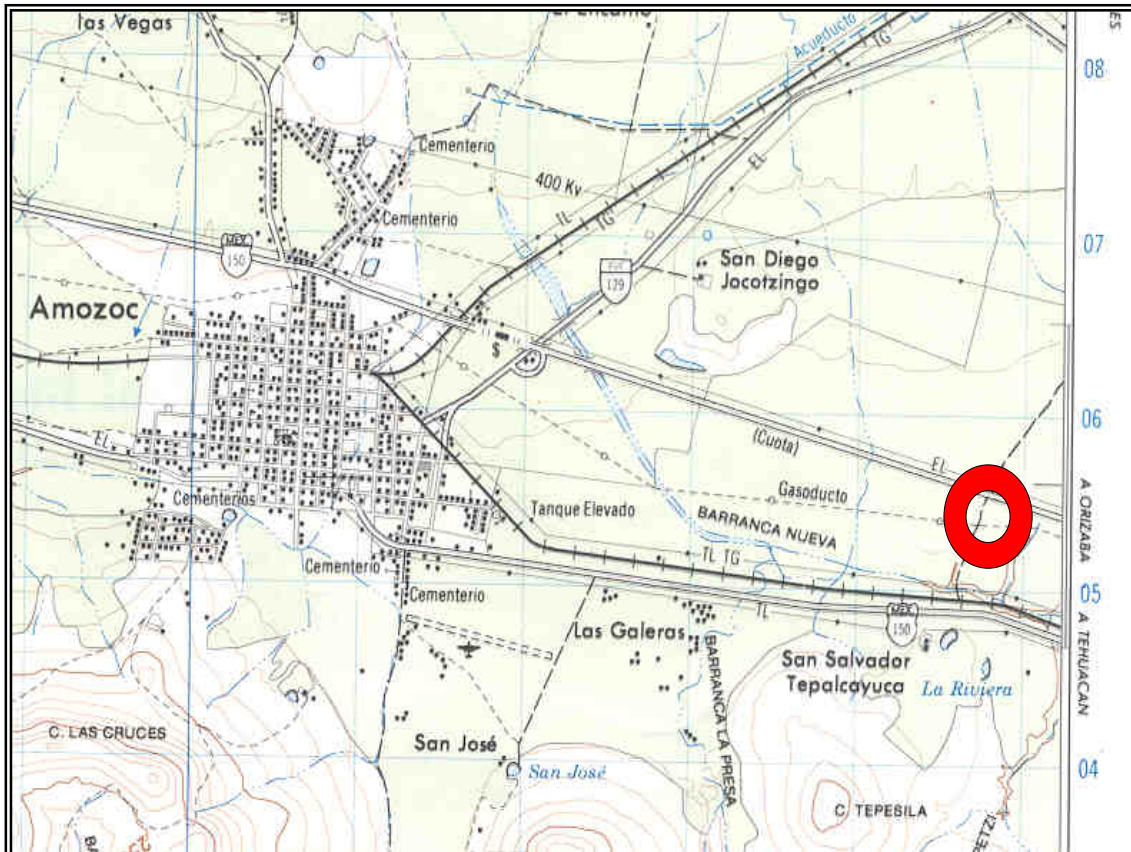


Figura 5.2. Localización sitio de estudio.

El sitio de estudio es un área ligeramente inclinada con un porcentaje de pendiente de 2.9% de acuerdo con lo establecido por Siebe *et al.*, (1996). Está destinado a actividades agrícolas con cultivos de temporal, de los cuales el maíz, el haba y el frijol son los predominantes (figura 5.3).



Figura 5.3. Vistas de la zona de trabajo. a) Sitio tratado, b) Sitio testigo.



5.2. Fisiografía

El Municipio de Tepatlaxco se encuentra en la Región fisiográfica X “Eje Neovolcánico”, también llamada “Faja Volcánica” en la subprovincia 57 “Lagos y Volcanes del Anáhuac”.

El Eje Neovolcánico, abarca los estados de Colima, Nayarit, Zacatecas, Aguascalientes, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y Veracruz. Se caracteriza por sierras, lomeríos y cuencas formadas por la acumulación de lavas generadas por procesos volcánicos iniciados en el Terciario Superior. Esta provincia se encuentra dividida en catorce subprovincias, el estado de Puebla se encuentra dentro de tres de ellas, que son: la subprovincia de Lagos y volcanes de Anáhuac, la subprovincia de Chiconquiaco y la subprovincia de Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo.

La subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac es la más extensa, comprende las ciudades de Puebla, Toluca, Pachuca, Tlaxcala, Cuernavaca y México; abarca el 35.93 % del territorio poblano. En esta subprovincia, se encuentran sierras volcánicas alternadas con llanuras formadas en su mayoría por vasos lacustres; en dirección este-oeste se encuentran las cuencas de Toluca, México, Puebla y Oriental. Se localizan además las tres mayores elevaciones del país: Citlaltepetl (Pico de Orizaba, 5610 msnm), Popocatepetl (5500 msnm) e Iztaccihuatl (Mujer Dormida, 5220 msnm). También se encuentran elevaciones como Atlitzin o cerro Negro (4580 msnm) y Matlalcueye (Malinche, 4420 msnm), todos ellos, entre otros, forman el sistema de topoformas llamada Sierra Volcánica con estratovolcanes aislados.

El área de estudio se encuentra en una llanura aluvial con lomeríos bordeada por lomeríos de aluvión antiguo y mesetas basálticas (INEGI, 2000).

5.3. Hidrología

El estado de Puebla se encuentra comprendido dentro de 4 regiones hidrológicas (RH) con 10 cuencas que las conforman y 31 subcuencas (tabla 5.1).

El municipio de Tepatlaxco de Hidalgo se encuentra dentro de la RH 18 “Río Balsas”, en la cuenca “A”, Río Atoyac, dentro de la subcuenca “B”, Río Atoyac-Balcón del Diablo.

La RH 18, “Río Balsas”, es una de las más importantes del país, ocupa la zona centro y suroccidental del estado de Puebla, extendiéndose hasta Michoacán y Veracruz, limitada por elevaciones como la caldera de los Humeros, el Citlaltepetl, el Cofre de Perote y el Volcan Atlitzin o Sierra Negra (INEGI, 2000).

En lo referente a la hidrología subterránea, ésta es muy importante dado que las corrientes superficiales son escasas y de volumen reducido.



Tabla 5.1 REGIONES HIDROLÓGICAS DEL ESTADO DE PUEBLA		
Región hidrológica (R H)	Cuenca	Subcuenca
RH 18 Río Balsas	18 A Río Atoyac	A Río Atoyac-Tehuiztzingo
		B Río Atoyac-Balcon del Diablo
		C Presa Miguel A. Camacho
		D Río Atoyac-San Martín Texmelucan
		E Río Nexapa
		F Río Mixteco
		G Río Acatlán
		J Río Alseseca
	18B Río Grande de Amacuzac	A Bajo Amacuzac
18C Río Tlapaneco	A Río Tlapaneco	
RH 26 Río Pánuco	26 D Río Moctezuma	V Río Meztitlan
		U Lago Tuchac y Tecocomulco
		G Arroyo Solteros
RH 27 Tuxpan Nautla	27A Río Nautla y otros	H Río María de la Torre
		F Río Nautla
		A Río Tecolutla
	27B Río Tecolutla	B Río Necaxa
		C Río Laxaxalpan
		D Río Tecuantepec
		E Río Apulco
		F Río Joloapan
		A Río Cazones
	27C Río Cazones	B Río San Marcos
		A Río Tuxpan
	27D Río Tuxpan	D Río Pantepec
		E Arroyo Tecomate
		D Río Petlapa
	28A Río Papaloapan	E Río Salado
V Río Blanco		
B Río Jamapa		
28b Río Jamada y otros	F Río Decozalapa	

Fuente: INEGI (2000)

La mayor parte de territorio del estado de Puebla presenta una topografía montañosa o de lomerío y el restante es más o menos plano donde es posible captar el agua subterránea y es aquí donde generalmente se ubican las zonas de aprovechamiento así como las áreas agrícolas. En esta área, la Comisión Nacional del Agua (CNA) marca zonas geohidrológicas de las cuales cinco son de gran importancia: Valle de Puebla, Cuenca de Oriental, Tecamachalco, Atlixco-Izúcar de Matamoros y Tehuacán; dichas zonas a su vez se encuentran divididas en áreas de explotación que son alimentadas por varias zonas de recarga. Tepatlaxco se encuentra en dos de dichas regiones, la del Valle de Puebla y la de Tecamachalco, sin que se presenten límites claros.

Los materiales que conforman el acuífero son generalmente de origen aluvial, con sedimentos del cuaternario no consolidados (gravas, arenas, limos y arcillas)



encontrándose también cenizas volcánicas y lavas basálticas, así como rocas carbonatadas. La mayoría de los acuíferos explotados son de tipo libre y relativamente poco profundos; los niveles estáticos fluctúan entre 2 y 80 m.

En el municipio de Tepatlaxco de Hidalgo se encuentra material consolidado y no consolidado. En la parte norte se encuentra material consolidado de permeabilidad media; en la parte media se encuentra material no consolidado de permeabilidad alta y en la parte sur material no consolidado de permeabilidad alta. Esta última parte se encuentra dentro de una zona sobreexplotada (INEGI, 2000).

El sitio de estudio se encuentra en una zona de material no consolidado de permeabilidad alta, además de ser una zona sobreexplotada.

5.4. Clima

En el estado de Puebla, los climas que se presentan de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por E. García (INEGI, 2000) son: templados, cálidos, semicálidos, semisecos, secos, semifríos y fríos. Predominan los climas templados que se presentan en el 40.24% del territorio. Las condiciones de altitud, latitud, relieve, distribución de tierras y aguas favorecen la variabilidad climática que se presenta en el estado de Puebla.

En los climas templados la temperatura media anual oscila entre 12 °C y 18 °C, la temperatura media del mes más frío es de -3 °C (García, 1989; INEGI, 2000).

El municipio de Tepatlaxco de Hidalgo se encuentra en el grupo de climas templados, con dos subgrupos: el subgrupo de climas templados C(w₂)(w) en el que la temperatura media anual oscila entre los 12 °C y 18 °C y la temperatura media del mes más frío entre -3° y 18°C; con un tipo de clima templado subhúmedo con lluvias en verano y una precipitación del mes más seco menor a los 40 mm y el subtipo de mayor humedad dentro de los templados subhúmedos con un porcentaje de precipitación invernal menor de 5 mm.

El otro subgrupo es el de clima semifrío, C(E)(w₂)(w) con una temperatura media anual entre 5°C y 12°C y una temperatura media del mes más frío de -3° a 18°C, el tipo de clima es semifrío subhúmedo con lluvias en verano y una precipitación en el mes más seco menor a 40 mm y el subtipo de mayor humedad dentro de los semifríos subhúmedos con una precipitación invernal menor a 5 mm (INEGI, 2000).

De acuerdo con los datos de la estación meteorológica Puebla (Echeverría) para el periodo comprendido entre 1944 y 1994, la temperatura media anual fue de 15.2°C, la temperatura del año más frío fue de 13.7°C y la temperatura del año más caluroso fue de 16.0°C; en cuanto a la precipitación para el mismo periodo se tiene que el promedio fue de 888.5 mm, la precipitación del año más seco fue de 456.4 mm y la precipitación del año más lluvioso fue de 1154.2 mm (INEGI, 1997).



5.5. Flora

La distribución de las sierras y sus diferencias altitudinales resultan en un mosaico climático que aunado a la temperatura y la precipitación generan condiciones particulares en el ambiente. Las precipitaciones se presentan de manera constante debido a los masas de aire frío que invaden la entidad, en los meses menos cálidos del año, se presentan en forma de lluvias o como neblinas periódicas que aumentan la humedad atmosférica y favorecen el establecimiento y desarrollo de los bosques de pino-encino, encino-pino, pino, encino, oyamel y mesófilos de montaña que cubren una parte importante del estado. Generalmente estos bosques son densos con árboles perennes y caducifolios y con un gran número de bromeliáceas. En la vertiente del Golfo y la Sierra Madre Oriental con condiciones semejante pero con clima cálido-húmedo se desarrolla la selva alta perennifolia.

Las áreas de agricultura de temporal y de riego se encuentran diseminadas en el estado, pero se encuentran sobre todo en la región centro-sur. En parte de los bosques y selvas se han establecido pastizales inducidos y en menor grado cultivados y debido al crecimiento de áreas sometidas a esta práctica existe la agricultura nómada caracterizada por un alto grado de perturbación del suelo propiciando la reducción de un gran número de comunidades.

La explotación forestal también propicia el deterioro de la vegetación y del suelo debido a la mala planeación para la explotación y también debido a que de manera intencional se propician quemadas o incendios para convertir el terreno en uno de pastoreo o de cultivo, con rendimientos bajos y acelerando la erosión del suelo.

La vegetación en Tepatlaxco de Hidalgo se encuentra muy alterada, la mayor parte ya es de agricultura de temporal, donde se encuentra el sitio de estudio. También se encuentra un poco de bosque de oyamel en la parte norte rodeado de bosque de pino-encino y bosque de pino (INEGI, 2000).

5.6. Geología

En Tepatlaxco de Hidalgo se encuentran rocas ígneas extrusivas intermedias (Ts (Igei)) que son el basamento del paquete de roca volcánica de la Faja Volcánica y provienen del Terciario Superior y se localizan en la parte norte del municipio; en la parte central se encuentra brecha sedimentaria del Terciario superior (Ts(Bs)) formada por fragmentos angulosos de andesitas porfídicas en una matriz arenosa de grano medio y abundante material piroclástico; en la parte sur se encuentra material sedimentario y volcanosedimentario. Estos materiales dan origen a los suelos existentes (INEGI, 2000).



5.7. Clasificación del suelo

De acuerdo con INEGI (2000), en la superficie que ocupa el municipio de Tepatlaxco de Hidalgo el suelo predominante es Regosol éutrico con textura gruesa, presentando además gravosidad (piedras menores de 7.5 cm). Se encuentra también presencia de Cambisol éutrico y Fluvisol éutrico (Re+Be+Je/1G).

Hacia la parte sur del municipio el tipo de suelo que se encuentra es Fluvisol éutrico de textura gruesa y pedregoso (Je/1P), es este último la unidad correspondiente al suelo que se encuentra en el sitio de estudio.

El Fluvisol éutrico es un suelo formado a partir de depósitos aluviales recientes, su estructura presenta una alternancia de diversos materiales, dominando los de textura gruesa (arenosa) presentando además piedras o gravas en todo el perfil (INEGI, 2000).



6. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la manera en que se realizaron los trabajos con el fin de llegar al objetivo establecido (capítulo 2). Para un mejor entendimiento, en la figura 6.1 se presenta la secuencia de dicha metodología.

Como se observa en la figura 6.1, la búsqueda de antecedentes de contaminación y de tratamiento para la remediación se realizó en un solo sitio, que posteriormente se dividió en dos para establecer lo que se manejó como sitio testigo y sitio tratado, a los cuales se les realizó una descripción de perfil edafológico, para determinar si ambos sitios tenían características semejantes. Después de esto se obtuvieron muestras de suelo para análisis de hidrocarburos y de plomo, para establecer si el lugar aún se encontraba contaminado. Posteriormente, se realizó un muestreo con diseño sistemático en rejilla como lo indican Valencia y Hernández (2002) para la determinación de propiedades físicas y químicas.

Finalmente, a los resultados de las propiedades físicas y químicas, se les aplicó una prueba estadística para comparar los valores del sitio tratado con los valores del sitio de estudio.

A continuación se describe a detalle cada paso de la metodología utilizada.

6.1. Selección del sitio de estudio

Para la selección del sitio de estudio, se establecieron las condiciones que se deberían cumplir para lograr el objetivo de este trabajo. Las condiciones que se establecieron fueron las siguientes:

- Que fuera una zona con uso de suelo agrícola.
- Que el lugar hubiera sido contaminado por hidrocarburos.
- Que el lugar hubiera sido sometido a alguna tecnología de remediación.

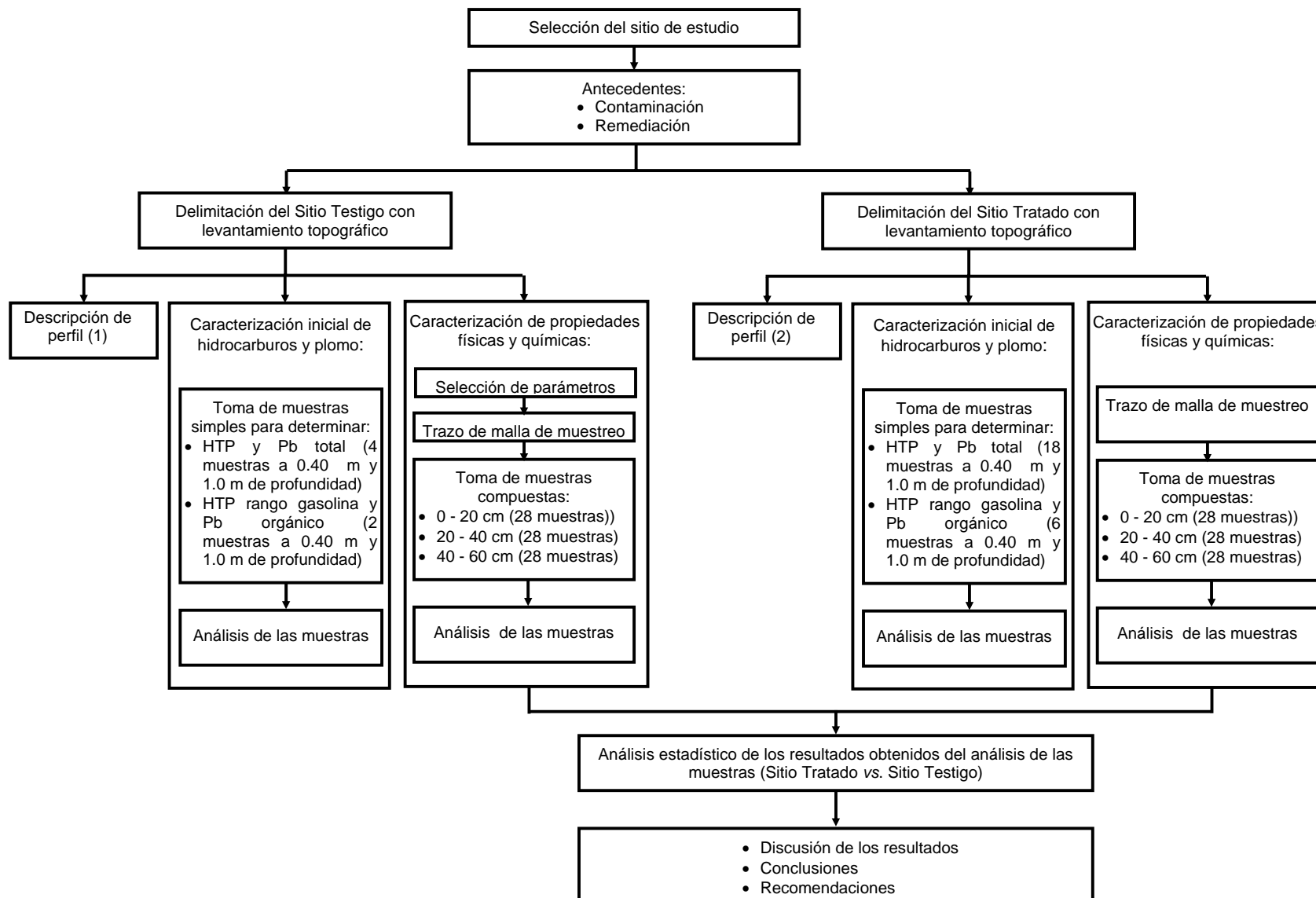


Figura 6.1. Diagrama de la metodología empleada para el desarrollo de este trabajo.



Con el propósito de encontrar el sitio de trabajo que cumpliera con las condiciones antes mencionadas, se acudió a PEMEX y a PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente). PEMEX proporcionó una relación de sitios que poseían algunas de estas características.

Se preseleccionaron 11 sitios que estaban en áreas accesibles y cercanas a la ciudad de México. De estos once, siete no se consideraron por encontrarse en lugares con uso de suelo diferente al agrícola. Los cuatro restantes se visitaron y solo uno cumplía con todas las condiciones establecidas.

El sitio seleccionado se encuentra en el municipio de Tepatlaxco de Hidalgo, estado de Puebla.

6.2. Antecedentes de la contaminación y del tratamiento de remediación del sitio de estudio

El sitio de estudio es un terreno de uso agrícola con cultivo de temporal, perteneciente al ejido La Cruz en el municipio de Tepatlaxco de Hidalgo, Puebla. El terreno está ubicado a un lado del derecho de vía por donde pasan los poliductos de PEMEX que transportan diesel y gasolina. En julio de 1996 ocurrió un derrame de gasolina Nova en el km 408+654 del poliducto de 12" Minatitlan-México (Amozoc), el cual afectó a este terreno.

En agosto de 1996 el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) realizó un estudio para determinar el área y volumen de suelo afectado. De este estudio se estableció un área afectada de 13,372 m² y un volumen de 20,058 m³. Asimismo, se determinó que no existe manto freático somero que pudiera haberse visto afectado y la existencia de una capa de tobas limo arcillosas, a aproximadamente tres metros de profundidad (IMP, 1996).

La caracterización realizada por el IMP incluyó los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), encontrándose una concentración de HTP entre 2.92 y 18.34 mg kg⁻¹; en lo concerniente a COV, los valores variaron entre 1.8 y 61.2 mg kg⁻¹. Los valores de HTP obtenidos se compararon con los criterios de limpieza para suelo sugeridos por ARPEL (Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe) que se presentan en la tabla 6.1 (IMP, 1996).

COMPUESTO	NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III
BTEX	2.55	20.5	252
HTP	40.0	400	2000
PLOMO	50.0	200	600

Nivel I Para uso de suelo residencial

Nivel II para uso de suelo comercial o industrial

Nivel III Para suelo sin uso (áreas no habitadas, no productivas)

Fuente: IMP (1996)



Dadas las características del suelo y del tipo de contaminante, la técnica de remediación recomendada por el IMP fue la remoción del suelo y el venteo del mismo. Para ello, se extrajo el suelo contaminado, se colocó sobre una capa impermeable de polietileno de alta densidad conocida como liner, y se mezcló mecánicamente para volatilizar los hidrocarburos (IMP, 1996).

Posteriormente, el Centro de Estudios Estratégicos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (CEE-BUAP) realizó la evaluación del impacto del derrame en diciembre de 1996. Para dicha evaluación se realizó un monitoreo de COV por cromatografía de gases, se determinaron las concentraciones de BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno); también se realizó un estudio estratigráfico para determinar el área afectada, la concentración y distribución de hidrocarburos en el subsuelo, el volumen de suelo contaminado y la existencia o no de manto freático. De dicho estudio se obtuvo que el área afectada fue de 3,000 m², con un volumen de 16,500 m³. La textura del suelo se clasificó como arenosa altamente permeable. En la tabla 6.2 se presentan las propiedades físicas, químicas y microbiológicas determinadas por CEE-BUAP y en la tabla 6.3 se presentan las concentraciones de contaminantes encontradas. La caracterización de contaminantes se enfocó a los compuestos volátiles, ya que el producto derramado fue gasolina (Monroy, 2002).

PARÁMETROS FÍSICOS	% Limos	12
	% Arenas	79
	% Gravas	9
	pH	6.8 – 7.5
	Tamaño de partícula	0.020 0.2 mm
	Conductividad hidráulica	1.2x10 ⁻³ a 1.1x10 ⁻¹ cm seg ⁻¹
PARÁMETROS QUÍMICOS	Nitrógeno total	20.9 mg kg ⁻¹
	Nitrógeno amoniacal	No detectado
	Fosfatos	0.8 mg kg ⁻¹
PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS	Bacterias heterótrofas aerobias	8.3x10 ⁵ UFC g ⁻¹
	Bacterias degradadoras de hidrocarburos	Detectada

UFC Unidades Formadoras de Colonias
Fuente: Monroy (2002)

El plan de remediación presentado por CEE-BUAP propuso la aplicación de biovente, la cual consiste en la extracción de vapores y aeración pasiva además de la aplicación de nutrientes y agua para humidificar el suelo y provocar un aumento de la actividad microbiana autóctona. Se hincaron tubos ranurados para la inyección y extracción de aire y nutrientes. No se tiene información respecto al número y ubicación de los tubos, presión del aire y tipo de nutrientes aplicados. En dicho plan, se tomaron como referencia los criterios de remediación de suelo propuestos para BTEX por el Consejo Canadiense de los Ministros del Ambiente (CCME por sus siglas en inglés) para suelo agrícola vigentes en 1996. Como objetivo del plan se propuso reducir las concentraciones a niveles menores que los criterios marcados por el CCME como se indica en la tabla 6.4 (Monroy, 2002).



COMPUESTO	CONCENTRACIÓN
COV	10,000
Benceno	96.00
Tolueno	70.9
Etilbenceno	50.4
Xileno	20.1

Fuente: Monroy (2002)

COMPUESTO	CCMA	CONCENTRACIONES OBJETIVO PROPUESTAS POR CEE-BUAP
Benceno	0.05	0.01
Tolueno	0.1	0.05
Etilbenceno	0.1	0.05
Xileno	0.1	0.05

Fuente: Monroy (2002)

CCMA = Consejo Canadiense de los Ministros del Ambiente (vigentes en 1996)

De acuerdo con Monroy (2002) los trabajos para la restauración se iniciaron en octubre de 1997, aplicándose bioventeo. Se hicieron monitoreos para verificar las concentraciones de contaminantes y unidades formadoras de colonias (UFC) en la etapa intermedia (2 meses después de haber iniciado la remediación) y al finalizar (5 meses después del inicio de la remediación). Los resultados de estos monitoreos se presentan en la tabla 6.5.

HIDROCARBUROS			
COMPUESTO	Concentraciones (mg kg ⁻¹)		
	INICIO	2 MESES	5 MESES (FINAL)
Benceno	96.00	28.8	1.92
Tolueno	70.9	21.27	1.42
Etilbenceno	50.4	15.12	1.00
Xileno	20.1	6.03	0.40
BACTERIAS			
TIPO DE BACTERIA	UFC g ⁻¹		
	INICIO	2 MESES	5 MESES (FINAL)
Bacterias heterótrofas aerobias	8.3x10 ⁵	8.8x10 ⁵	1.4x10 ⁶
Bacterias degradadoras de hidrocarburos	Detectada	Detectada	8.7x10 ³

Fuente: Monroy (2002)

6.3. Delimitación del sitio tratado y sitio testigo

Una vez seleccionado el sitio de estudio, con un levantamiento topográfico, se procedió a establecer en campo la poligonal que establece los límites tanto del sitio tratado (lugar



contaminado que fue remediado) como del sitio testigo (lugar que no se vio afectado ni por la contaminación ni por el tratamiento de remediación). Con los datos obtenidos se realizó el plano correspondiente (figura 6.2)

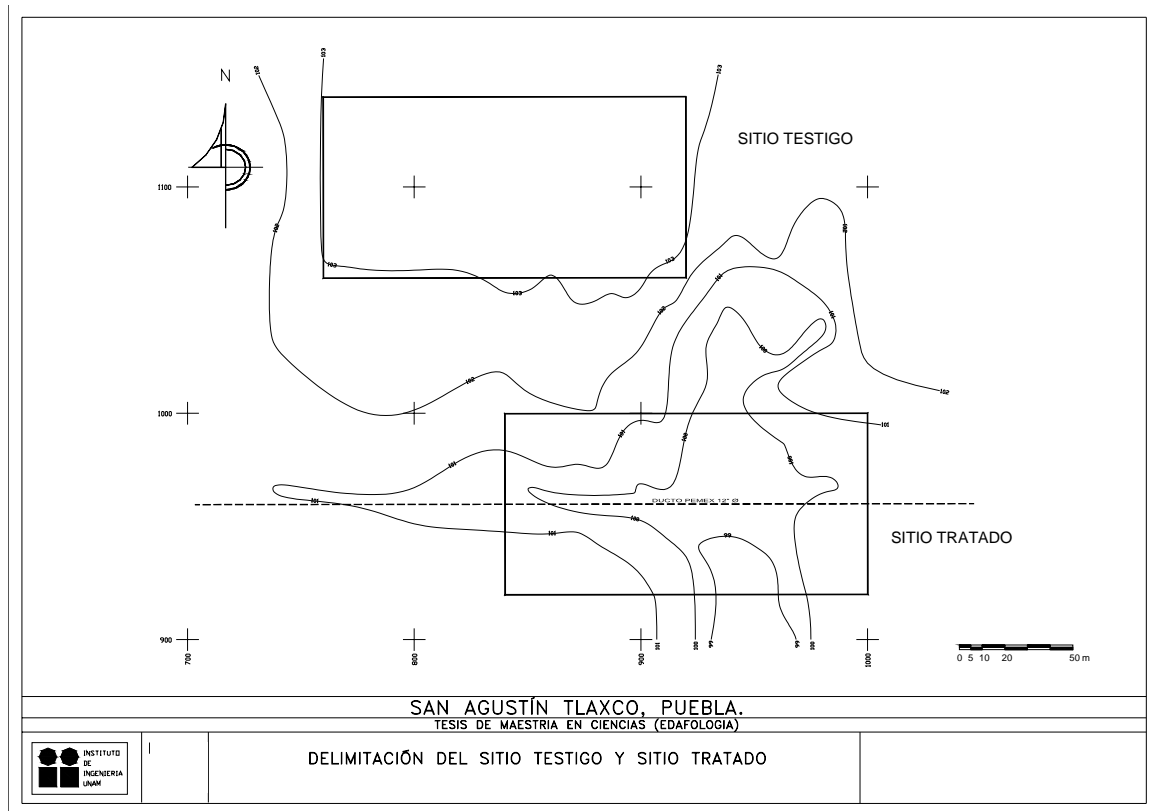


Figura 6.2. Delimitación del sitio testigo y del sitio tratado.

El sitio tratado es un rectángulo de 80x160 m (12, 800 m²) cuyo centroide es el punto de fuga de combustible del poliducto de 12", en el cual ocurrió el derrame. Se midieron 40 m hacia el norte y el sur del centroide y 80 m hacia el este y el oeste del mismo (figura 6.2).

El sitio testigo se ubicó 100 m al norte del sitio tratado, sus dimensiones son de 80x160m (12,800 m²), similares al sitio tratado (figura 6.2).

6.4. Descripción de perfiles

En el sitio de trabajo se hizo la descripción de tres perfiles ubicados uno en el sitio testigo (P-1) y dos en el tratado (P-2 y P-3) (figura 6.3). Para ello se excavaron cepas de 1.5 x 1.5 x 2 m en promedio. La descripción de los perfiles se realizó de acuerdo con el Manual de Cuanalo (1975). Para determinar el color del suelo se usó la carta de color suelos de Munsell (1973).



Las hojas de descripción en campo se encuentran en el Anexo A.

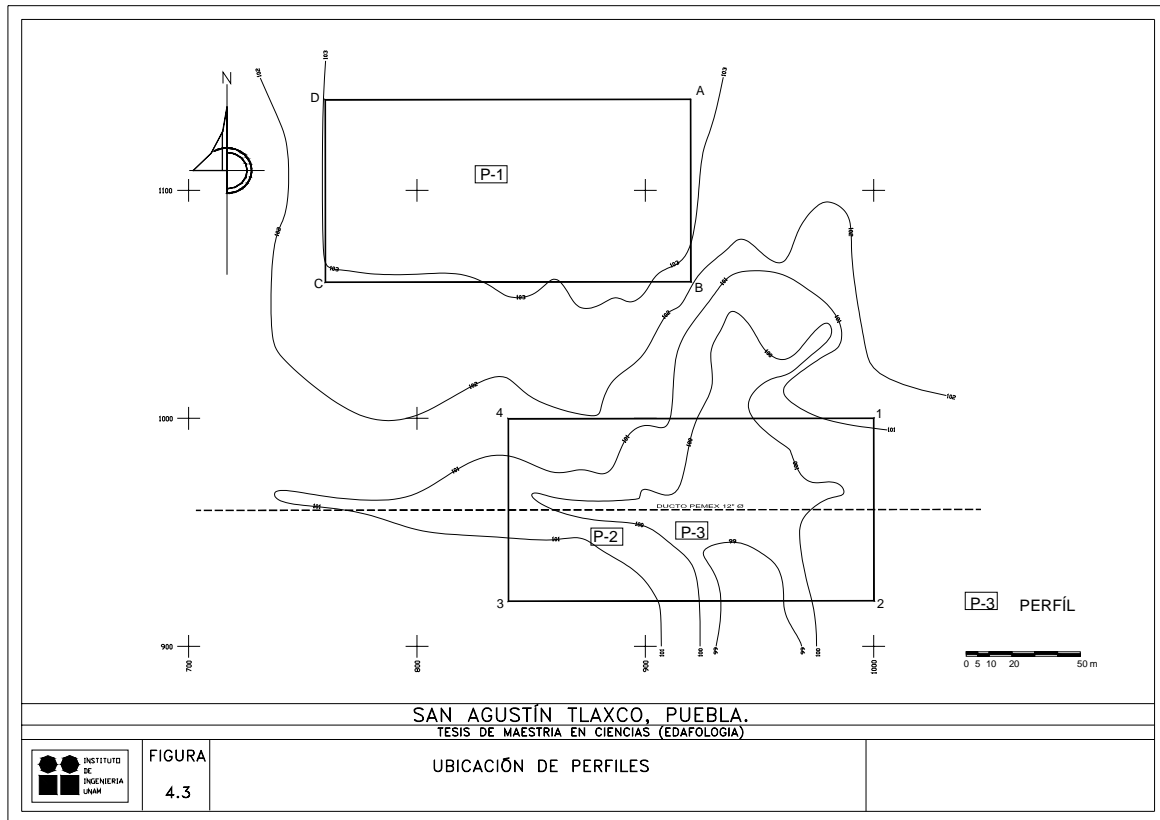


Figura 6.3. Ubicación de los tres perfiles de suelo en el sitio de estudio en San Agustín Tlaxco, Pue.

6.5. Muestreo para la caracterización inicial de hidrocarburos y plomo

Como ya se explicó, el sitio de estudio fue contaminado con hidrocarburos debido al descontrol de una toma clandestina y fue sometido a un proceso de remediación. De acuerdo con Martínez y López (2001) los hidrocarburos pueden influir en las propiedades físicas y químicas del suelo, por lo cual fue necesario realizar un muestreo para saber si el sitio aún se encontraba contaminado. A las muestras colectadas se les determinó hidrocarburos totales del petróleo (HTP), plomo total y plomo orgánico.

6.5.1 Hidrocarburos totales del petróleo (HTP)

Para el muestreo se utilizó un equipo semiportátil, que consta de un tripié, un tubo pistón o martinete, un tubo espiga o golpeador y un tubo muestreador con zapata (figura 6.4).



Se determinaron HTP para verificar los niveles de contaminación en cada sitio, y ver si efectivamente el sitio testigo no fue afectado por el derrame.

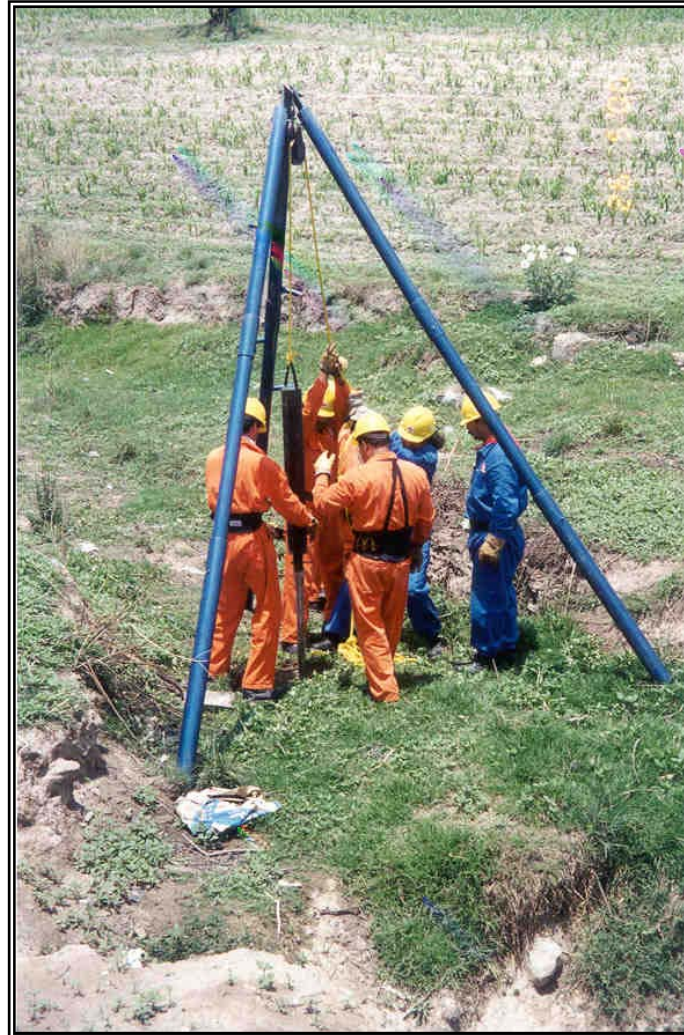


Figura 6.4 Equipo de muestreo para la obtención de muestras para análisis de HTP.

Se ubicaron 23 puntos de muestreo (figura 6.5): 4 en el sitio testigo, 18 en el sitio tratado y uno en el área entre ambos sitios; se ubicaron más puntos en el sitio tratado ya que ahí es donde aún pueden existir contaminantes, y de acuerdo con Martínez y López (2001) los hidrocarburos pudieron haber influido en las propiedades físicas del suelo. La ubicación de los puntos fue al azar. Las muestras se tomaron a 2 profundidades, 0.4 m y 1 m, con un total de 46 muestras.

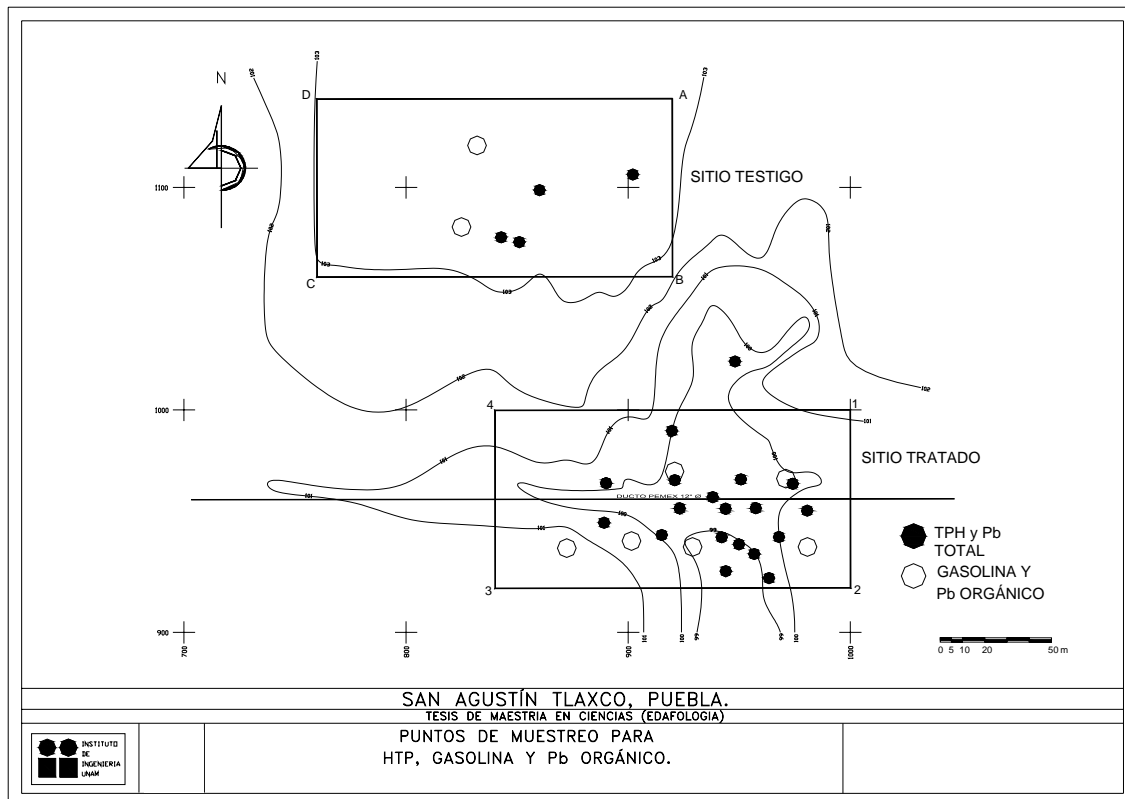


Figura 6.5 Ubicación de puntos de muestreo para determinación de contaminantes.

Si bien el derrame fue de gasolina, se acordó realizar un análisis de HTP en lugar de BTEX (que son los principales compuestos presentes en este combustible) debido a que los HTP abarcan una gama más amplia de hidrocarburos y puesto que había transcurrido mucho tiempo entre el evento y la toma de muestras para este estudio era muy poco probable que aún se detectaran BTEX, ya que estos compuestos son altamente volátiles. Cabe mencionar que se aplicaron los métodos analíticos EPA 418.1 para productos aceitosos, esperando cubrir la fracción pesada de los hidrocarburos que permanecen en el suelo por más tiempo (ya que se trata de un derrame viejo), y el EPA 8015B para la fracción gasolina, para cubrir la fracción más ligera de los hidrocarburos que forman gran parte de las gasolinas (ya que el derrame fue de este producto).

A este respecto Irwin *et al.* (1997) mencionan que hidrocarburos más pesados que los BTEX se encuentran en las gasolinas en un pequeño porcentaje, pero al cabo de unos meses después de un derrame, representan un gran porcentaje de los compuestos que permanecen en el suelo o sedimentos, porque para entonces los BTEX que son más móviles y volátiles, ya han migrado al aire o al agua subterránea.



De los 23 puntos de muestreo considerados, 18 pertenecen al sitio tratado, 4 al sitio testigo y uno se encuentra en un sitio intermedio. Las muestras se tomaron a 2 profundidades, a 0.40 m y a 1 m, haciendo un total de 46 muestras.

La determinación de HTP fracción gasolina se realizó en 8 muestras de suelo, dos en el sitio testigo y 6 en el sitio tratado, a dos profundidades, 0.40 m y 1 m.

Cabe mencionar que la norma NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 establece para suelo agrícola un límite máximo permisible de 200, 1200 y 3000 mg kg⁻¹ para las fracciones ligera, media y pesada, respectivamente, por lo que puede considerarse que el sitio tratado no se encuentra contaminado, si se considera que el hidrocarburo residual pertenece a la fracción media o pesada, pues se presume que la fracción ligera ya se eliminó debido a la técnica de remediación y la volatilización del residual. Asimismo, Martínez y López (2001) encontraron que las concentraciones por abajo de 150,000 mg kg⁻¹ de hidrocarburos pesados (combustóleo) no tienen efecto significativo en las propiedades físicas y químicas del suelo (a excepción de la materia orgánica, ya que el hidrocarburo aporta carbono), por lo que de encontrarse diferencias en las propiedades físicas y químicas, éstas no son atribuibles a la concentración residual de HTP.

6.5.2 Plomo total

La determinación de Plomo se realizó en las mismas muestras que para HTP, también a dos profundidades 0.40 m y 1.0 m, teniendo con ello 46 muestras. El método utilizado fue el EPA 6010.

6.5.3 Plomo orgánico

El plomo orgánico se determinó en 8 muestras de suelo, dos en el sitio testigo y 6 en el sitio tratado. El método utilizado fue el EPA 7240M.

6.6. Muestreo para la caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo

6.6.1 Selección de parámetros

A las muestras colectadas en ambos sitios se les determinaron 26 propiedades físicas y químicas con el objeto de conocer si la aplicación de la tecnología de remediación ejerce un efecto. Las propiedades seleccionadas se muestran en la tabla 6.6



TABLA 6.6. MÉTODOS EMPLEADOS PARA EL ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE SUELO			
Parámetro		Método	Laboratorio
Físicos	Densidad real	Picnómetro (Klute, 1986; ASTM, 1993)	Instituto de Ingeniería, UNAM
	Densidad aparente	Probeta (Domínguez y Aguilera, 1990)	
	Textura	Hidrómetro de Bouyoucos (ASTM, 1993; DOF, 2002b; Klute, 1986)	
	Porosidad (%)	Calculado (de densidad real y densidad aparente)	
Químicos	N Amoniacal	NMX-AA-24-1984	Laboratorios ABC
	Nitritos totales	MSA 1979 62-1 (Sparks <i>et al.</i> , 1996)	
	Nitratos totales	MSA 1979 62-1 (Sparks <i>et al.</i> , 1996)	
	Nitrógeno total	MSA 83.50 (Kjeldahl) (DOF, 2002b; Sparks <i>et al.</i> , 1996)	
	Ca	Extracción Acetato de Amonio y Espectrofotometría de Absorción Atómica (DOF, 2002b)	Laboratorio Central de Suelos de la UACH
	Mg		
	Na	Extracción Acetato de Amonio y Espectrofotometría de Emisión de Flama (DOF, 2002b)	
	K		
	P	Bray P-1 (DOF, 2002b)	
	SO ₄	Turbidimetría con cloruro de Bario (DOF, 2002b)	
	B	Fotocolorimetría de Azomitina-H (DOF, 2002b)	
	Fe	Extracción con DTPA y determinado con Espectrofotometría de Absorción Atómica (DOF, 2002b)	
	Cu		
	Zn		
	Mn		
	pH	En agua medido con Potenciómetro (DOF, 2002b)	
	Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Acetato de amonio por centrifugación (DOF, 2002b)	
Relación C:N	Calculado (de %N total y % C orgánico)	Instituto de Ingeniería, UNAM	
Saturación de bases (%)	Calculado de (CIC y concentraciones de Ca, Mg, Na y K)		
Carbono orgánico (%)	Calculado de %MO		

6.6.2 Trazo de la malla de muestreo

Una vez establecidos en campo los límites tanto del sitio tratado como del sitio testigo (figura 6.2), en ambos sitios se trazó una malla de 20x20 m, dando como resultado 32 cuadrantes (cuadros de 20x20 m) (figura 6.6). Esta malla sirvió de base para la obtención de muestras a las cuales se les realizaron los análisis para la determinación de las propiedades físicas y químicas del suelo de interés.

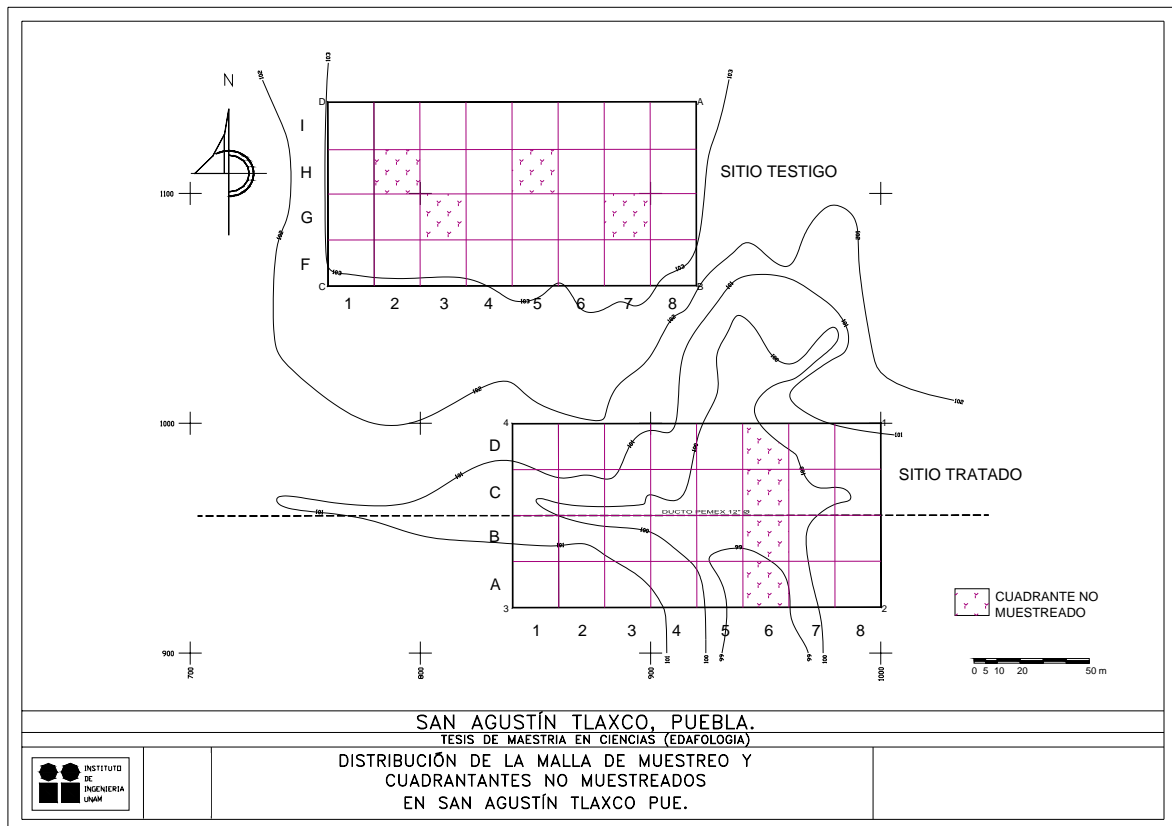


Figura 6.6. Plano que muestra la distribución de la malla y la ubicación de los cuadrantes en los que no se obtuvo muestra en San Agustín Tlaxco, Puebla.

6.6.3 Toma de muestras

De los 32 cuadrantes de muestreo en cada sitio (figura 6.6), sólo se tomaron muestras en 28 de ellos, ya que se descartaron los cuadrantes que caen dentro de una cárcava indicada en la figura 6.6, pues el objetivo de este estudio es el suelo de cultivo. Con el propósito de tener el mismo número de muestras en ambos sitios, se descartaron también cuatro cuadrantes de muestreo en el sitio testigo, los cuales se seleccionaron al azar (ver figura 6.6).

Se obtuvieron muestras compuestas en los primeros 60 cm del suelo, divididos en tres secciones de 20 cm, denominadas superficial (0-20 cm), intermedia (20-40 cm) e inferior (40-60 cm). Cada muestra compuesta tomada a cada profundidad dentro de cada cuadrante se formó con 10 núcleos de suelo tomados al azar (figura 6.7)

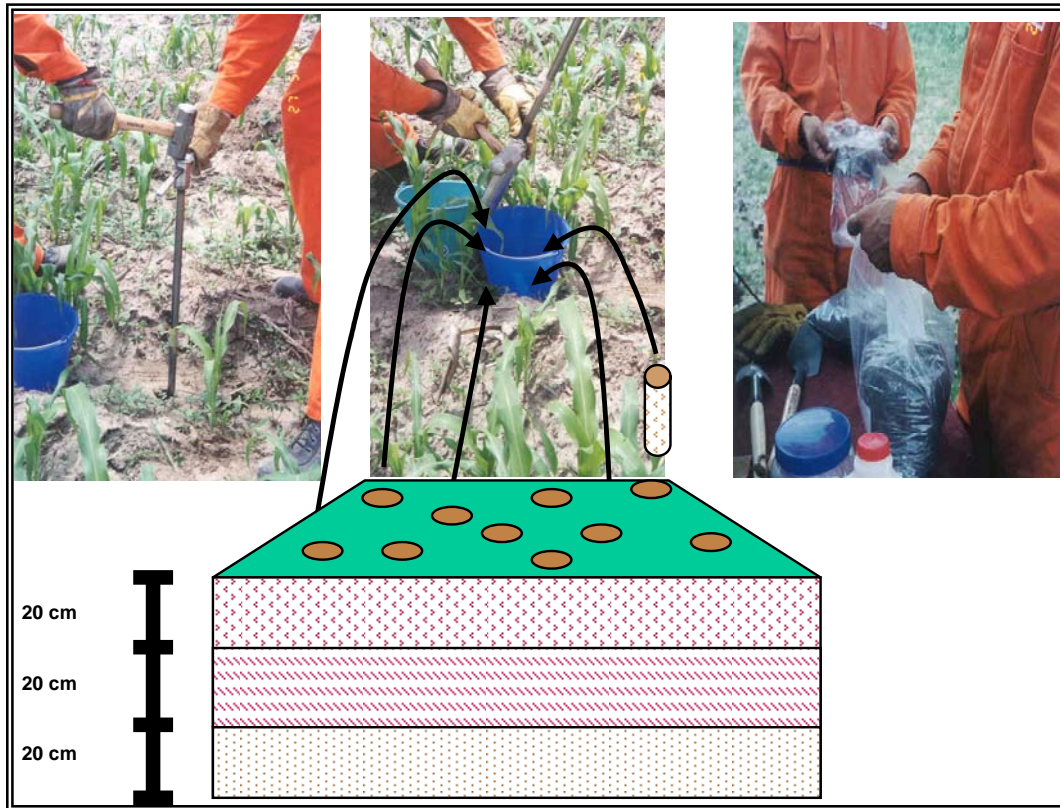


Figura 6.7. Obtención de la muestra compuesta para la determinación de propiedades físicas y químicas del suelo en San Agustín Tlaxco, Pue.

Se trabajó a esta profundidad (60 cm), ya que en este espacio se da el principal desarrollo radicular y es el que determina en gran medida la capacidad productiva de un suelo (Porta *et al.*, 1994). La división de secciones se hizo debido a que en los perfiles realizados en campo no se observaron horizontes bien definidos como corresponde al desarrollo típico de un perfil, sino que se observaron capas intercaladas de arenas y arenas arcillosas con espesores de entre 15 y 20 cm. Asimismo, se sabe que las propiedades físicas y químicas de un suelo varían con la profundidad, y se quiere determinar si la tecnología de remediación tuvo efectos en las propiedades estudiadas no solo a nivel superficial sino también a diferentes profundidades.

Para este muestreo se usó un nucleador de acero inoxidable que se puede observar en la figura 6.8.



Figura 6.8. Nucleador para la toma de muestras compuestas.

6.6.4 Análisis de las muestras

Una vez colectadas las muestras, se transportaron al laboratorio para su análisis.

Las muestras se secaron, tamizaron y almacenaron de acuerdo a lo recomendado por Jackson (1982) y la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002a).

Los métodos utilizados en las determinaciones de las propiedades del suelo se indican en la tabla 6.6 al igual que el laboratorio donde se procesaron las muestras.



6.7. Análisis estadístico de los resultados obtenidos del análisis de las muestras para la caracterización de las propiedades físicas y químicas

Para determinar si la tecnología aplicada (remoción de suelo, venteo y bioventeo) tuvo efectos en los parámetros físicos y químicos del suelo, se aplicó una prueba de hipótesis para comparar las medias de los parámetros obtenidas en el sitio tratado y en el sitio testigo.

Puesto que se trata de muestras independientes se recomienda aplicar una prueba t de Student para muestras independientes. Para dicha prueba se requiere cumplir con las condiciones de normalidad de los datos (ambos grupos a comparar deben tener una distribución normal) e igualdad de varianzas (homoscedasticidad), por lo que fue necesario aplicar otras pruebas estadísticas. Todos los análisis estadísticos se hicieron con el programa Statistica v 5.1 (StatSoft Inc, 1996).

6.7.1 Prueba de normalidad

Las pruebas más empleadas para probar la normalidad de un grupo de datos son la de Kolmogorov-Smirnov y la de Shapiro-Wilk. La primera se recomienda para muestras grandes y la segunda cuando se trata de muestras más pequeñas ($n < 50$). Considerando esto se decidió aplicar la prueba de Shapiro-Wilk, ya que además es más robusta (da resultados confiables a pesar de no cumplir con los requisitos de manera estricta) que la de Kolmogorov-Smirnov (PROPHET, 2004).

6.7.2 Homoscedasticidad (igualdad de varianzas)

Para determinar la igualdad de varianzas de dos grupos de datos se tienen las pruebas de Bartlett, C de Cochran, Fmax de Hartley y la de Levene. De estas, la más recomendable es la de Levene, ya que se ha probado que es poco sensible a la normalidad de los datos (da resultados confiables aún tratándose de muestras con distribuciones no normales), por lo que se decidió aplicar esta prueba (PROPHET, 2004).

De los 75 pares de datos formados, 28 son los que cumplen la condición de normalidad y homoscedasticidad.

La bibliografía (Menéndez, 2002; PROPHET, 2004; Sokal y Rohlf, 1999) indica que en caso de que se estén violando las condiciones de normalidad y homoscedasticidad se tienen dos opciones: 1) transformar los datos de manera que los datos transformados cumplan con los requisitos del análisis y 2) aplicar una prueba no-paramétrica o de distribución libre, las cuales no requieren de los supuestos rechazados.

Las transformaciones de datos más usadas y recomendadas son la logarítmica, la raíz cuadrada y el arcoseno de los datos; esta última se recomienda cuando se trata de porcentajes o proporciones. En este trabajo se procuró corregir la no-normalidad y



heterogeneidad de varianzas aplicando la transformación logarítmica y la de raíz cuadrada, pero no se consiguió corregir ninguna de las dos características.

Por lo anterior se decidió aplicar la prueba no-paramétrica U de Mann-Whitney, la cual es similar a la t de Student, pero para datos no paramétricos. En la tabla 7.9 se presentan los resultados de dicha prueba.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis de estos parámetros a cada profundidad, tanto para el sitio tratado como para el sitio testigo, así como el tratamiento estadístico realizado para determinar si existen diferencias significativas en las propiedades medidas en cada sitio, y la discusión de estos resultados.



7. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El este capítulo se presentan: la descripción de los perfiles realizados en el sitio testigo y el sitio tratado, los resultados del muestreo realizado para establecer si el sitio de estudio era un lugar sin contaminación, los resultados de los análisis de laboratorio realizados a las muestras de suelo obtenidas para determinar las propiedades físicas y químicas del mismo y al final, se presentan los resultados de la prueba estadística aplicada.

7.1. Descripción de perfiles

La descripción de los perfiles se realizó con el Manual de Cuanalo (1975). Para determinar el color del suelo se usó la carta de color de suelos de Munsell (1973).

A continuación se presenta la descripción de los perfiles.

7.1.1 Perfil 1

En el Perfil 1 (figura 7.1) realizado en el sitio testigo, no se puede hablar de la formación de horizontes, más bien de una serie de capas que se clasifican como horizonte A, donde la capa más delgada es de 20 cm y la más amplia de 55 cm. La transición entre capas es ondulada, variando con la profundidad. La coloración del perfil oscila entre 10YR y 7.5 YR que corresponde a colores pardos, no hay presencia de moteado. La textura predominante es arenosa; en todas las capas se observa la presencia de pequeñas piedras y gravas. La estructura se encuentra débil o moderadamente desarrollada, no presenta estratos endurecidos ni hay presencia de nódulos y cutanes. La porosidad en el perfil no es evidente. Su permeabilidad es alta debida a las arenas. En todo el perfil se observan raíces delgadas y medianas. En general el perfil se encuentra bien drenado y el contenido de materia orgánica es bajo.



Figura 7.1 Vista del perfil 1 (P-1).

7.1.2 Perfil 2

El perfil 2 (figura 7.2) ubicado en el sitio tratado consta de una serie de seis capas, por ello se clasifican todas las capas como horizonte A. La transición entre capas es tenue y de forma horizontal. La coloración predominante es 10 YR que corresponde a colores pardos sin presencia de moteado. En cuanto a la textura del perfil, predomina la arenosa (3 de 6 capas), 2 de 6 capas presentan textura de migajón arcillo-arenosa y arena migajosa (1 de 6 capas). La pedregosidad es poca y las piedras existentes son pequeñas. Se observa el poco desarrollo de estructura y el material generalmente es suelto. No existen estratos endurecidos, nódulos o cutanes. No se aprecia porosidad y la permeabilidad va de moderada a muy rápida. La presencia de raíces solo se ve en las tres primeras capas. El perfil se encuentra en general bien drenado y el contenido de materia orgánica es bajo.



Figura 7.2 Vista de perfil 2 (P-2).

7.1.3 Perfil 3

En el perfil 3 (figura 7.3) ubicado en el sitio tratado, también se encuentra una serie de capas. La transición entre capa y capa varía con la profundidad entre tenue y marcada de forma horizontal a irregular. La textura predominante es la arcilla arenosa seguida de arena y arcilla. La pedregosidad es ligera con piedras pequeñas y gravas. La estructura está débilmente desarrollada y únicamente en la capa final se encuentra fuertemente desarrollada. El color predominante es 10YR que corresponde a la coloración parda. El suelo posee una consistencia suelta o blanda. No hay presencia de estratos endurecidos, cutanes o nódulos. Se aprecian pocos poros y muy finos. Las huellas de raíces solo se ven en la primera capa. En general el perfil se encuentra bien drenado. La presencia de materia orgánica es moderada en las dos primeras capas, y en el resto no se aprecia.



Figura 7.3 Vista de perfil 3 (P-3).

7.1.4 Resultados de los análisis realizados a los perfiles

Los resultados de los análisis realizados a las muestras obtenidas de cada uno de los perfiles para propiedades físicas se muestran en la tabla 7.1 y en las tablas 7.2, 7.3 y 7.4 se muestran los resultados de las propiedades químicas.



TABLA 7.1. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS PERFILES

CLAVE MUESTRA	PROF. cm	DENSIDAD		POROSIDAD %	TEXTURA		
		REAL	APARENTE		ARENA	ARCILLA	LIMO
P1Aa	-20	2.650	1.404	47.000	85.42	5.83	8.75
P1Ba	-46	2.638	1.466	44.400	85.42	5.83	8.75
P1Ca	-70	2.628	1.470	44.100	82.42	5.08	12.5
P1Da	-105	2.622	1.332	49.200	78.67	8.58	12.75
P1Ea	-160	2.637	1.394	47.100	80.92	5.83	13.25
P1Fa	-180	2.612	1.428	45.300	82.42	7.69	9.89
P2Aa	-15	2.551	1.331	47.800	76.42	8.05	15.53
P2Ba	-53	2.560	1.242	51.500	68.42	8.05	23.53
P2Ca	-100	2.579	1.163	54.900	52.81	10.80	36.39
P2Da	-124	2.603	1.472	43.400	80.56	8.05	11.39
P2Ea	-160	2.611	1.422	45.500	78.31	8.05	13.64
P2Fa	-190	2.617	1.345	48.600	76.06	8.05	15.89
P3Aa	-35	2.508	1.425	43.200	79.31	8.05	12.64
P3Ba	-57	2.591	1.337	48.400	69.56	8.05	22.39
P3Ca	-78	2.598	1.363	47.500	79.31	7.30	13.39
P3Da	-120	2.583	1.307	49.400	67.06	8.05	24.89
P3Ea	-150	2.622	1.555	40.700	47.81	17.55	34.64
P3Fa	-170	2.566	1.192	53.500	82.45	6.55	11.00

P1= Perfil 1 (Sitio testigo)

P2 = Perfil 2 (Sitio tratado)

P3 = Perfil 3 (Sitio tratado)

TABLA 7.2. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS PERFILES

CLAVE MUESTRA	PROF. cm	pH	N TOTAL %	N de NO ⁻³ mg kg ⁻¹	N de NO ⁻² mg kg ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	Ca cmol kg ⁻¹
P1Ba	-46	4.57	0.020	3.417	0.241	2.750	0.988
P1Ca	-70	5.33	0.005	3.005	0.351	1.060	1.337
P1Da	-105	6.04	0.024	3.222	0.265	3.380	4.122
P1Ea	-160	6.34	0.005	1.308	0.389	2.640	1.477
P1Fa	-180	6.40	0.004	1.483	0.483	2.110	1.881
P2Aa	-15	5.19	0.048	46.996	0.220	2.910	2.799
P2Ba	-53	6.15	0.020	10.308	0.283	2.640	3.179
P2Ca	-100	6.53	0.010	6.517	0.316	3.380	2.789
P2Da	-124	6.57	0.005	1.267	0.649	2.110	1.467
P2Ea	-160	6.55	0.008	1.098	0.347	2.010	1.861
P2Fa	-190	6.60	0.006	2.277	0.473	1.900	1.821
P3Aa	-35	4.37	0.019	24.894	0.207	2.320	1.607
P3Ba	-57	6.57	0.006	7.562	0.297	2.960	2.026
P3Ca	-78	6.65	0.009	3.579	0.423	2.750	2.405
P3Da	-120	6.43	0.005	5.239	0.235	2.960	2.295
P3Ea	-150	6.49	0.004	5.430	0.181	2.110	1.173
P3Fa	-170	6.45	0.009	6.623	1.137	3.480	2.740

P1= Perfil 1 (Sitio testigo)

P2 = Perfil 2 (Sitio tratado)

P3 = Perfil 3 (Sitio tratado)



TABLA 7.3. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS PERFILES

CLAVE MUESTRA	PROF cm	Mg cmol kg ⁻¹	Na cmol kg ⁻¹	K cmol kg ⁻¹	Suma de bases cmol kg ⁻¹	Saturación de bases %	Cu mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹
P1Aa	-20	0.263	0.026	0.238	1.824	61.622	0.160	19.450
P1Ba	-46	0.189	0.035	0.097	1.309	47.600	0.130	24.88
P1Ca	-70	0.156	1.327	0.102	2.922	275.660	0.150	13.870
P1Da	-105	0.354	0.035	0.141	4.652	137.633	0.240	19.600
P1Ea	-160	0.329	0.009	0.131	1.946	73.712	0.240	9.960
P1Fa	-180	0.362	0.299	0.117	2.659	126.019	0.240	8.460
P2Aa	-15	0.346	0.062	0.375	3.582	123.093	0.290	27.030
P2Ba	-53	0.280	0.035	0.126	6.620	137.121	0.400	15.480
P2Ca	-100	0.658	0.167	0.156	3.770	111.538	0.500	8.700
P2Da	-124	0.526	0.062	0.180	2.235	105.924	0.260	7.290
P2Ea	-160	0.625	0.053	0.224	2.763	137.463	0.280	7.910
P2Fa	-190	0.666	0.044	0.272	2.803	147.526	0.210	9.650
P3Aa	-35	0.222	0.044	0.102	1.975	85.129	0.230	22.790
P3Ba	-57	0.551	0.062	0.126	2.765	93.412	0.240	7.310
P3Ca	-78	0.683	0.097	0.194	3.379	122.873	0.420	15.030
P3Da	-120	0.666	1.044	0.185	4.190	141.554	0.370	10.910
P3Ea	-150	0.436	1.018	0.131	2.758	130.711	0.190	7.150
P3Fa	-170	1.374	0.176	0.443	4.733	136.006	1.460	15.120

P1= Perfil 1 (Sitio testigo)

P2 = Perfil 2 (Sitio tratado)

P3 = Perfil 3 (Sitio tratado)

TABLA 7.4 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS PERFILES

CLAVE MUESTRA	PROF cm	Mn mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	Sulfatos meq l ⁻¹	B mg kg ⁻¹	Carbono orgánico	Relación C:N
P1Aa	-20	1.340	0.250	30.960	0.790	1.890	0.516	13.237
P1Ba	-46	0.770	0.200	29.920	0.590	2.150	0.273	13.631
P1Ca	-70	0.730	0.180	23.300	0.270	1.240	0.081	16.241
P1Da	-105	0.180	0.250	116.740	0.270	0.750	0.528	21.993
P1Ea	-160	0.450	0.210	14.120	0.270	0.630	0.099	19.722
P1Fa	-180	0.450	1.770	13.430	0.240	0.860	0.110	27.552
P2Aa	-15	3.710	0.280	118.320	0.890	1.060	0.400	8.338
P2Ba	-53	0.640	0.230	15.520	0.340	0.870	0.418	20.882
P2Ca	-100	0.700	0.350	14.700	0.320	0.310	0.220	22.042
P2Da	-124	0.500	0.240	19.120	0.470	0.580	0.104	20.882
P2Ea	-160	0.670	0.330	18.420	0.570	1.130	0.104	13.051
P2Fa	-190	0.610	0.290	18.190	2.200	0.560	0.110	18.368
P3Aa	-35	2.390	0.200	32.350	6.100	0.890	0.284	14.959
P3Ba	-57	0.580	0.220	20.740	0.8400	0.330	0.116	19.335
P3Ca	-78	0.750	0.450	18.770	1.500	0.260	0.197	21.913
P3Da	-120	0.780	0.420	18.540	2.730	0.650	0.162	32.483
P3Ea	-150	0.400	0.190	16.450	2.600	0.770	0.116	29.002
P3Fa	-170	2.400	0.710	16.910	2.730	0.790	0.174	19.335

P1= Perfil 1 (Sitio testigo)

P2 = Perfil 2 (Sitio tratado)

P3 = Perfil 3 (Sitio tratado)



7.2 Caracterización inicial de hidrocarburos y plomo

En la tabla 7.5 se presentan los resultados de hidrocarburos y plomo que se obtuvieron al analizar las muestras de suelo provenientes del sitio testigo y del sitio tratado.

PARÁMETRO	SITIO TESTIGO		SITIO TRATADO		LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
	0.40 m	1.0 m	0.40 m	1.0 m	NOM-EM-138* CI**
HTP (EPA 418.1) † (Fracción pesada)	ND – 40.98	ND	49.26 – 991.62	ND – 923.61	1000*
Pb Total (EPA 6010)	ND	ND	5.20 – 13.21	4.06 – 15.85	100**
HTP (EPA 8015B) (Fracción ligera)	ND	ND	ND	ND	200*
Pb Orgánico (EPA 7240M)	ND	ND	ND	ND	NE

NOM-EM-138 = NOM-EM-138-ECOL-2002 (DOF, 2002b)

CI = Criterios interinos de restauración de suelos contaminados (PROFEPA, 1998)

ND = No detectado

NE = No existe en la normatividad mexicana

† El método analítico empleado (EPA 418.1) fue el que indicaba la norma emergente NOM-EM-138-ECOL-2002 (DOF,2002b) que estaba vigente al momento en que se hicieron los análisis. Actualmente esta norma emergente ha sido sustituida por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (DOF, 2005) que establece el método EPA 9071B para la fracción pesada, con un límite máximo permisible de 3000 mg/kg.

7.3. Caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo

En la tabla 7.6 se presentan los resultados para el suelo de la capa superficial (0-20 cm) de ambos sitios. En la tabla 7.7 se presentan los resultados correspondientes a la sección intermedia (20-40 cm), y en la tabla 7.8 los de la sección inferior (40-60 cm). En estas tablas se muestra el intervalo obtenido (valores mínimos y máximos) así como las medias aritméticas. En el anexo B se presentan los datos brutos que dieron lugar a estas tablas y los gráficos que describen el comportamiento de cada parámetro.

En la tabla 7.6 se observa que, en la mayoría de los casos, los valores más altos se encuentran en el sitio tratado (a excepción de densidad real, densidad aparente, % de arenas y N total), lo cual podría indicar que la tecnología aplicada sí tuvo efecto en las propiedades medidas.

En las capas intermedia e inferior (tablas 7.7 y 7.8), al igual que en la superficial, se observa que también se encontraron, en general, valores más altos de los parámetros en el sitio tratado; en la sección intermedia se exceptúan densidad aparente, densidad real, porcentaje de arenas y Fe, y en la sección inferior se exceptúan densidad real, densidad aparente y Fe .



Parámetro		Profundidad 0 - 20 cm			
		Sitio testigo		Sitio tratado	
		Intervalo	Media Aritmética	Intervalo	Media Aritmética
Físicas	Densidad real (g cm^{-3})	2.53-2.65	2.59	2.45-2.62	2.55
	Densidad aparente (g cm^{-3})	1.36-1.47	1.41	1.12-1.42	1.30
	Porosidad (%)	42.62-47.71	45.42	44.65-56.13	49.14
	Arenas (%)	77.50-86.89	83.45	51.89-83.14	70.04
	Arcillas (%)	5.83-8.94	6.71	1.98-11.25	8.33
	Limos (%)	6.89-15.5	9.85	9.89-37.25	21.63
Químicas	pH	4.78-5.9	5.16	4.87-6.53	5.66
	N Total %	0.01-0.05	0.03	0.00-0.05	0.02
	N de nitratos (mg kg^{-1})	3.34-15.25	8.58	2.65-19.39	10.05
	N de nitritos (mg kg^{-1})	0.06-0.22	0.13	0.10-0.66	0.23
	CIC ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	3.70-7.92	5.26	5.28-10.03	6.88
	Calcio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	0.078-1.73	1.13	1.21-5.94	2.57
	Magnesio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	0.09-0.17	0.12	0.15-0.42	0.24
	Sodio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	0.07-0.13	0.10	0.05-0.26	0.13
	Potasio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	0.12-0.34	0.18	0.13-0.40	0.21
	Suma de bases ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	1.158-2.13	1.534	1.72-6.46	3.14
	Saturación de base (%)	16.91-40.41	29.61	25.89-71.60	44.98
	Cobre (mg kg^{-1})	0.11-0.44	0.30	0.27-0.87	0.52
	Hierro (mg kg^{-1})	22.49-32.93	28.20	14.40-49.52	31.73
	Manganeso (mg kg^{-1})	1.62-4.01	2.70	1.98-7.26	3.68
	Zinc (mg kg^{-1})	0.17-0.46	0.28	0.22-1.48	0.50
	Fósforo (mg kg^{-1})	12.6-33.67	24.62	10.45-109.81	28.60
	Sulfatos (meq l^{-1})	0.14-0.73	0.40	0.10-1.06	0.51
	Boro (mg kg^{-1})	0.13-0.92	0.55	0.08-0.97	0.54
	Carbono orgánico (%)	0.15-0.52	0.36	0.15-0.95	0.40
	Relación C:N	7.38-44.25	14.33	5.69-84.38	23.32

CIC = Capacidad de intercambio catiónico



TABLA 7.7. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS EN LA CAPA INTERMEDIA

Parámetro		Profundidad 20-40 cm			
		Sitio testigo		Sitio tratado	
		Intervalo	Media Aritmética	Intervalo	Media Aritmética
Físicas	Densidad real (g cm^{-3})	2.53-2.64	2.59	2.50-2.60	2.56
	Densidad aparente (g cm^{-3})	1.26-1.48	1.40	1.12-1.43	1.30
	Porosidad (%)	42.74-51.70	45.69	44.40-55.95	49.31
	Arenas (%)	71.00-86.98	81.58	48.61-83.14	67.82
	Arcillas (%)	5.74-8.22	6.89	2.48-12.36	8.79
	Limos (%)	6.89-20.78	11.53	9.89-41.39	23.39
Químicas	pH	4.74-6.29	5.36	5.13-6.84	6.08
	N Total %	0.00-0.03	0.02	0.00-0.05	0.02
	N de nitratos (mg kg^{-1})	2.16-10.78	5.03	1.58-15.44	6.27
	N de nitritos (mg kg^{-1})	0.05-0.29	0.14	0.13-0.43	0.24
	CIC ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	4.22-8.45	5.69	5.28-9.50	6.88
	Calcio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	0.71-2.72	1.36	1.25-5.29	2.69
	Magnesio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	0.08-0.21	0.13	0.15-0.56	0.28
	Sodio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	0.61-0.16	0.11	0.10-0.23	0.15
	Potasio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	0.12-0.19	0.15	0.10-0.32	0.17
	Suma de bases ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	1.00-3.16	1.74	1.66-6.11	3.29
	Saturación de base (%)	15.77-48.98	30.53	26.26-70.01	46.76
	Cobre (mg kg^{-1})	0.23-0.66	0.39	0.24-0.89	0.59
	Hierro (mg kg^{-1})	23.49-33.77	28.78	9.47-48.23	26.30
	Manganeso (mg kg^{-1})	1.35-3.21	2.05	1.43-6.68	2.69
	Zinc (mg kg^{-1})	0.14-0.43	0.25	0.15-1.21	0.42
	Fósforo (mg kg^{-1})	9.26-27.75	22.47	8.86-101.72	23.58
	Sulfatos (meq l^{-1})	0.10-0.46	0.25	0.12-1.84	0.35
	Boro (mg kg^{-1})	0.05-0.74	0.43	0.07-0.87	0.39
	Carbono orgánico (%)	0.06-0.38	0.25	0.09-0.63	0.32
	Relación C:N	4.04-19.80	12.021	5.77-37.67	14.83

CIC = Capacidad de intercambio catiónico



TABLA 7.8. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS EN LA CAPA INFERIOR

Parámetro		Profundidad 40 – 60 cm			
		Sitio testigo		Sitio tratado	
		Intervalo	Media Aritmética	Intervalo	Media Aritmética
Físicas	Densidad real (g cm ⁻³)	2.53-2.65	2.59	2.51-2.65	2.57
	Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.24-1.48	1.36	1.06-1.44	1.29
	Porosidad (%)	43.18-52.42	47.51	43.98-58.44	49.93
	Arenas (%)	53.89-86.89	76.55	40.00-82.64	65.15
	Arcillas (%)	5.83-10.72	7.45	3.48-12.39	8.95
	Limos (%)	7.25-36.89	16.01	10.39-51.50	25.90
Químicas	pH	4.89-6.65	5.85	5.79-6.86	6.48
	N Total %	0.00-0.03	0.02	0.00-0.03	0.02
	N de nitratos (mg kg ⁻¹)	0.96-4.51	2.13	0.84-7.13	3.74
	N de nitritos (mg kg ⁻¹)	0.03-0.22	0.14	0.09-0.41	0.23
	CIC (cmol(+) kg ⁻¹)	4.22-9.98	6.28	4.75-11.09	7.00
	Calcio (cmol(+) kg ⁻¹)	0.90-4.58	1.91	1.36-6.24	2.77
	Magnesio (cmol(+) kg ⁻¹)	0.10-0.33	0.16	0.19-0.64	0.35
	Sodio (cmol(+) kg ⁻¹)	0.07-0.25	0.12	0.11-0.24	0.18
	Potasio (cmol(+) kg ⁻¹)	0.11-0.21	0.16	0.10-0.32	0.19
	Suma de bases (Cmol(+) kg ⁻¹)	1.23-5.38	2.36	1.95-6.99	3.48
	Saturación de base (%)	23.34-71.58	37.48	28.40-68.09	48.91
	Cobre (mg kg ⁻¹)	0.23-0.80	0.44	0.22-1.00	0.58
	Hierro (mg kg ⁻¹)	17.97-35.41	26.38	7.51-37.32	19.65
	Manganeso (mg kg ⁻¹)	1.21-2.34	1.82	1.16-4.57	2.08
	Zinc (mg kg ⁻¹)	0.12-0.40	0.25	0.18-0.57	0.39
	Fósforo (mg kg ⁻¹)	16.11-30.18	23.86	8.29-57.79	17.13
	Sulfatos (meq l ⁻¹)	0.09-0.90	0.29	0.10-2.24	0.47
	Boro (mg kg ⁻¹)	0.07-1.04	0.36	0.03-0.66	0.32
Carbono orgánico (%)	0.08-0.41	0.27	0.04-0.66	0.26	
Relación C:N	11.09-33.88	18.37	6.03-29.05	15.00	

CIC = Capacidad de intercambio catiónico



7.4. Análisis estadístico

En la tabla 7.9 se presentan los resultados obtenidos (p, probabilidad) al aplicar la prueba U de Mann Whitney a los datos obtenidos del análisis de las propiedades físicas y químicas determinadas a las muestras de suelo.

TABLA 7.9. PRUEBA U DE MANN WHITNEY PARA $\alpha = 0.05$			
Parámetro	p		
	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
Densidad real (g cm^{-3})	2.736E-05	6.392E-05	4.830E-04
Densidad aparente (g cm^{-3})	8.059E-09	5.666E-06	6.688E-03
Porosidad %	1.048E-06	6.392E-05	2.696E-02
Arenas %	1.505E-08	8.429E-08	2.339E-04
Arcillas %	2.794E-05	2.018E-05	7.761E-04
Limos %	6.666E-09	8.012E-08	3.387E-04
pH	3.266E-05	2.099E-06	2.672E-07
Nitrógeno T (%)	2.695E-02	7.555E-01	8.763E-01
N de Nitratos. (mg kg^{-1})	2.570E-06	1.178E-04	2.839E-04
N de Nitritos (mg kg^{-1})	3.377E-01	7.147E-02	2.753E-04
CIC ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	2.516E-06	4.753E-04	1.047E-01
Calcio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	8.088E-09	1.459E-06	9.626E-03
Magnesio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	1.672E-10	7.676E-10	2.237E-09
Sodio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	2.902E-02	1.201E-04	3.537E-06
Potasio ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)	9.755E-02	9.050E-02	1.704E-01
Saturación de Bases %	1.237E-06	1.583E-06	2.131E-04
Cobre (mg kg^{-1})	1.100E-08	2.506E-05	8.104E-03
Hierro (mg kg^{-1})	3.503E-01	3.743E-02	4.268E-04
Manganeso (mg kg^{-1})	3.356E-03	6.171E-02	4.078E-01
Zinc (mg kg^{-1})	5.121E-05	1.203E-04	1.394E-05
Fósforo (mg kg^{-1})	3.668E-02	2.423E-04	4.485E-06
Sulfatos (meq l^{-1})	8.670E-02	1.229E-01	1.784E-02
Boro (mg kg^{-1})	7.742E-01	1.610E-01	4.907E-01
Carbono orgánico %	8.351E-02	2.375E-01	5.803E-02
Relación C:N	7.492E-01	4.507E-01	2.942E-01

■ Datos que no presentan diferencia significativa ($\alpha = 0.05$) en cada profundidad
 H_0 = No hay diferencias en la propiedad medida en ambos sitios (sitio tratado y sitio testigo)
 p = Probabilidad
 Se rechaza H_0 si $p < 0.05$
 CIC = Capacidad de intercambio catiónico

Los resultados obtenidos indican que 10 de las 25 propiedades determinadas a cada profundidad no presentan diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) en el sitio tratado y el sitio testigo.



PAGINA EN BLANCO



8. DISCUSIÓN

El presente capítulo se divide en dos secciones; en la primera se hace la discusión de los resultados obtenidos de las muestras de los perfiles. En la segunda sección se hace la discusión de los resultados obtenidos en toda el área de estudio y que presentaron una diferencia significativa, sin disminuir la importancia de cada una de las propiedades medidas así como la interacción entre ellas, que dan al suelo sus características.

8.1 Perfiles

INEGI (2000) establece que el suelo encontrado en la zona de estudio es un Fluvisol éutrico, el cual es un suelo desarrollado a partir de depósitos aluviales, equivalentes a los Fluvents de acuerdo con la Clave para la taxonomía de suelos (Ortiz y Gutiérrez, 1994), los cuales no poseen un horizonte de diagnóstico a menos que se encuentren enterrados por 50 cm o más de material nuevo, su contenido de materia orgánica disminuye de manera irregular conforme se avanza en profundidad, presentan una estratificación fina o que posean material sulfuroso dentro de los 125 cm de profundidad. Las subdivisiones de los fluvisoles son tínicos, mólicos, calcáricos, úmbricos, dístricos y éutricos, todos estos nombres debidos a la presencia de un horizonte de diagnóstico específico, al fluvisol éutrico lo clasifican como "otros fluvisoles" (Ortiz y Ortiz, 1990; Ortiz y Gutiérrez, 1994, FitzPatrick, 1987).

De lo observado en campo y con apoyo de las hojas de descripción de campo se puede decir que en el área de trabajo (tanto en el sitio tratado como en el sitio testigo) no hay edafogénesis, es más bien una secuencia de capas de arena mezcladas con capas de arcilla arenosa producto de la acumulación del material transportado que da origen a los fluvisoles, los resultados del análisis de textura del suelo, indican que las partículas dominantes en los tres perfiles son las arenas con porcentajes que varían entre el 47 al 85 %, seguido de los limos con valores entre 8 y 36 % y los porcentajes de arcillas que se encuentran entre el 5 y 17 % . La porosidad presente se encuentra entre el 40 y 54 %, intervalo que se encuentra dentro del establecido para suelos arenosos que es de



entre 35 y 50% de espacio poroso (Ortiz y Ortiz, 1990). La porosidad presente favorece el drenaje en el suelo, ya que la mayor parte de los poros son macroporos, los cuales son muy eficientes en el movimiento del agua y el aire, por el contrario, los microporos son pocos, lo que conlleva a la baja retención de humedad (León, 1991).

En cuanto al contenido de materia orgánica presente en los perfiles, se observa un comportamiento errático, ya que ésta aumenta y disminuye de manera irregular; el porcentaje de saturación de bases en los tres perfiles varía entre el 47 y 275 % para el perfil 1; del 105 al 137% en el perfil 2 y del 85 al 147 % en el perfil 3, valores que lo ubican dentro de un fluvisol éútrico ya que los porcentajes de saturación de bases presentes son mayores al 50%, que se corrobora con lo reportado por INEGI (2000). Establecer si un suelo es éútrico o dístrico está en función del porcentaje de saturación de bases, cuando el porcentaje de saturación de bases es menor al 50 % se dice que el suelo es dístrico, y si el porcentaje es mayor se dice que el suelo es éútrico (Aguilera, 1989; FitzPatrick, 1987; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994; Lippert, 2005).

En los perfiles tampoco existen capas duras como puede ser el piso de arado, a pesar del uso de maquinaria para las labores agrícolas. Las capas duras generalmente presentan una densidad aparente de 2 g cm^{-3} (Aguilera, 1989; FitzPatrick, 1987; Ortiz y Ortiz, 1990; Baver *et al.*, 1991) y los valores de densidades aparentes encontrados en los perfiles varían entre 1.2 g cm^{-3} y 1.5 g cm^{-3} .

La primera capa, en los tres perfiles puede considerarse un horizonte Ap de acuerdo con Ortiz y Ortiz (1990). Tampoco hay moteado a lo largo de los perfiles que indique condiciones de óxido-reducción debido a la fluctuación del nivel freático, lo cual se confirma por la ausencia en la zona de pozos cercanos para abasto de agua potable o riego.

Tanto el sitio tratado como el testigo presentan características muy semejantes por lo que se puede decir que ambos sitios pertenecen a la misma unidad edafológica y que corresponde a un Fluvisol éútrico

8.2 Propiedades físicas

8.2.1 Densidad real

En el sitio testigo los valores promedio de la densidad real encontrados en cada una de las profundidades estudiadas (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm) fueron de 2.592, 2.593 y 2.591 g cm^{-3} , respectivamente, mientras en el sitio tratado fueron de 2.551, 2.562, 2.569 g cm^{-3} . Como se observa, el sitio testigo presentó valores más altos y la densidad real permaneció casi constante en las tres profundidades con una ligera tendencia a disminuir en la capa más profunda. En el sitio tratado, el valor de la densidad aumenta con la profundidad. Los valores son cercanos a 2.65 g cm^{-3} que es el valor promedio establecido para suelos minerales (Porta *et al.*, 1994; Ortiz y Ortiz, 1990).



De acuerdo con la prueba U de Mann-Whitney aplicada, la densidad real en cada profundidad presenta diferencias significativas en el sitio testigo y el sitio tratado ($\alpha < 0.05$). Si bien las diferencias aparentemente son pequeñas en cada profundidad (0.041, 0.031 y 0.029), son suficientes para denotar una diferencia estadística, aún cuando en campo sean de poco impacto en el suelo.

Se debe considerar que la densidad real depende del tipo de partícula que forma el suelo, es independiente a la estructura del mismo y por lo tanto es constante a lo largo del tiempo en un mismo estrato de suelo (Millar *et al.*, 1972), por lo que debería esperarse un mismo valor de densidad real en ambos sitios. Los cambios que se presentan se atribuyen al mezclado del material durante los trabajos del venteo, ya que el movimiento de tierras ocasionó una redistribución de las partículas.

8.2.2 Densidad aparente

Para el sitio testigo, los valores promedio de densidad aparente determinados en cada una de las profundidades estudiadas fueron de: 1.415, 1.408 y 1.36 g cm⁻³, en tanto que en el sitio tratado, los valores fueron de 1.298, 1.299 y 1.286 g cm⁻³. De acuerdo con los valores encontrados en el sitio testigo, la densidad se puede clasificar como densidad alta, mientras que los encontrados para el tratado la clasifican como densidad media (Rudeforth *et al.*, 1984 citado por Carroll *et al.*, 2004). Las diferencias encontradas fueron de 0.117, 0.11 y 0.074, respectivamente. El sitio testigo presentó los valores más altos y conforme aumenta la profundidad el valor de la densidad aparente disminuyó, por el contrario, en el sitio tratado los valores fueron más bajos y se mantuvieron iguales conforme aumentó la profundidad. En suelos arenosos el intervalo típico del valor para densidad aparente es de 1.45 a 1.6 g cm⁻³ (Porta *et al.*, 1994); como se observa, los valores del sitio testigo sí corresponden a dicho intervalo, no así los del sitio tratado.

De acuerdo con la prueba U de Mann Whitney aplicada, hay una diferencia significativa en el sitio testigo y el sitio tratado a cada una de las profundidades estudiadas. El efecto del cambio de valor de densidad aparente se observa en una mayor resistencia a la penetración de las raíces de las plantas y una menor capacidad de filtración del agua (OCSCD, 2001; UE, 2004).

Considerando que la densidad aparente del suelo se relaciona con el peso específico de los minerales, la materia orgánica presente, el estado de agregación y la proporción del volumen ocupado por los espacios intersticiales (Porta *et al.*, 1994), es de esperar que se encontraran valores más bajos en el sitio tratado que en el sitio testigo; debido a que solamente el peso específico de los minerales es lo que permanece constante, no así el contenido de materia orgánica que es mayor en el sitio tratado (ver tablas 7.6 a 7.8); el estado de agregación también se modificó por el movimiento del suelo como lo reporta Reeve *et al.* (2000) quienes encontraron que la estructura del suelo era mejor antes del movimiento de tierras que después de este. Por otro lado, Logsdon y Douglas (2004) reportan una disminución en la densidad aparente debida a la labranza, a este efecto se encuentran sujetos tanto el sitio testigo como el tratado, y el volumen ocupado



por los espacios intersticiales se vio alterado por el mezclado al que fue sujeto el sitio tratado durante el venteo.

Las alteraciones en la densidad aparente afectan la permeabilidad. La OCSCD (2001) encuentra que el valor crítico de densidad que afecta la permeabilidad es de 1.65 g cm^{-3} , suelos que presentan valores menores a este, muestran una permeabilidad alta, mientras que en suelos con valores mayores de 1.65 g cm^{-3} la infiltración decrece rápidamente.

Otro efecto del cambio de densidad en función del tipo de suelo se refleja en el crecimiento de las raíces de las plantas. Ejercer mayor presión para el crecimiento de la raíz, requiere elevar el suministro de energía, que se traduce en mayores necesidades de agua y nutrimentos (UE, 2004). Para suelos areno-migajosos (sitio testigo) y migajón arenosos (sitio tratado) como es el caso, los intervalos de densidad en los cuales las plantas ejercen mayor presión para crecer son de 1.60 a 1.69 g cm^{-3} para los primeros y 1.40 a 1.63 g cm^{-3} (OCSCD, 2001) para los segundos. Como se observa los valores de densidad tanto del sitio testigo (1.415 , 1.408 y 1.36 g cm^{-3}) como del sitio tratado (1.298 , 1.299 y 1.286 g cm^{-3}) son menores a los establecidos como críticos. Las raíces de las plantas ejercen mayor presión para el crecimiento en el sitio testigo.

8.2.3 Porosidad

La porosidad de un suelo depende de los valores de densidad aparente y densidad real presentes en el mismo (Millar *et al.*, 1972; Porta *et al.*, 1994; Ortiz y Ortiz, 1990). Para suelos arenosos superficiales se establecen valores de porosidad entre 35 y 50 % (Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994); los porcentajes de porosidad reportados para el sitio testigo fueron de 45.421, 45.694 y 47.506 %; y para el sitio tratado de 49.139, 49.307 y 49.929 %. Las diferencias encontradas fueron de 3.718, 3.613 y 2.423. Tanto en el sitio testigo como en el tratado, los valores de porosidad aumentan conforme aumenta la profundidad, que es el comportamiento general que se presenta en los suelos (Johnson-Maynard y Castenson, 2005). Los valores más altos se presentaron en el sitio tratado.

De acuerdo con la prueba U de Mann Whitney aplicada, hay una diferencia significativa en el sitio testigo y el sitio tratado a cada una de las profundidades estudiadas. Las diferencias numéricas también fueron altas y en campo estas diferencias se traducen en una mayor resistencia a la penetración y menor velocidad de filtración de agua (OCSCD, 2001).

Los valores de porosidad fueron más altos en el sitio tratado, y como la porosidad depende de los valores de densidad aparente y densidad real (Millar *et al.*, 1972; Porta *et al.*, 1994; Ortiz y Ortiz, 1990), es de esperarse que al existir modificaciones tanto en la densidad real como en la aparente como es el caso (ver tablas 6.6 a 6.8) existan modificaciones en los porcentajes de porosidad. Por lo tanto, los cambios en la porosidad se pueden atribuir al tratamiento de remediación.



El manejo (labranza) que se le da a los suelos ocasiona también la modificación de la porosidad, Marcano *et al.* (1993) encontraron que en suelos cultivados donde se hace uso de maquinaria pesada y se realizan pases de arado de vertedera entre 30 y 40 cm, se observa un aumento de la densidad aparente y la disminución de la porosidad.

8.2.4 Textura

De acuerdo con los resultados obtenidos, el sitio testigo presentó una textura arenomigajosa de acuerdo con la calificación USDA (United States Department of Agriculture); mientras que para la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) corresponde a una textura media. En el sitio tratado, los porcentajes de las partículas presentes llevan a una textura de migajón arenoso de acuerdo con USDA y para la FAO, corresponde a una textura media.

Los porcentajes de arenas presentes en cada capa estudiada del sitio testigo (83.45, 81.58 y 76.55 %) fueron más altos que los que se encontraron en el sitio tratado (70.04, 67.82 y 65.15 %), los valores reportados por Monroy (2002) para este sitio fueron del 79 %. Como se observa, este valor es más cercano al valor encontrado en el sitio testigo. De acuerdo con la USDA se requiere al menos el 44% de arenas para que el suelo presente características propias de esta fracción (Porta *et al.*, 1994). Gaucher (1971) citado en Porta *et al.* (1994) indica que debe existir al menos tres veces más arena que arcilla, para que la arena condicione el comportamiento del suelo.

La cantidad de arcillas presentes en cada una de las capas del sitio testigo (6.71, 6.89 y 7.45 %) fueron más bajas que las encontradas en el sitio tratado (8.33, 8.79 y 8.95 %). De igual forma el contenido de limos en el sitio testigo (9.85, 11.53 y 16.01 %) fue más bajo que en el sitio tratado (21.63, 23.39 y 25.90 %), los valores reportados por Monroy (2002) para este sitio son de 12 % para limos, este valor es más cercano al encontrado en el sitio testigo.

Con base en los resultados de la prueba U de Mann Whitney, se establece que los porcentajes de arenas, limos y arcillas presentes en el sitio testigo y el sitio tratado, son significativamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

Se sabe que la textura es una propiedad que permanece sin alterar por mucho más tiempo en el suelo, debido a que los cambios en ésta, ocurren de manera muy lenta en condiciones naturales (Baldwin, 2000; GTOS, 2005) y que su modificación solo se logra a través de cambios muy drásticos en el suelo (Baldwin, 2000) por ejemplo, con un mezclado con otro suelo de textura diferente (Miller, 1999; TNAU, 2003), situación que no es práctica en escalas grandes (Coder, 2000). En el sitio tratado durante el venteo sí se mezcló el suelo, que originalmente se presentaba en capas intercaladas de arenas y arenas con arcillas, que produjo una redistribución de las partículas del suelo, tanto de manera horizontal como vertical. Esto se ve reflejado en los valores de arenas, limos y arcillas presentes en el suelo, pero las características debidas al tipo de textura permanecen, ya que la cantidad de arena presente en este sitio tratado fue del 70.04 %



y de acuerdo con Porta *et al.* (1994) se necesita como mínimo un 44 % de arenas para que sea denominado como arenoso.

Los datos reportados indican que el sitio testigo presenta un drenaje más eficiente (presencia de mayor macroporosidad) que en el sitio tratado, una menor superficie de retención tanto de humedad como de nutrimentos, ya que la presencia de arcillas y limos es baja comparada con las cantidades presentes en el sitio tratado.

Las propiedades físicas estudiadas se encuentran estrechamente interrelacionadas, ya que tanto la densidad real como la densidad aparente y la porosidad están en función de las cantidades de partículas en el suelo, de su tamaño y su arreglo. Al ser removido el suelo durante los trabajos iniciales en la colecta del producto derramado y posteriormente en los trabajos correspondientes a la limpieza del sitio, la distribución y arreglo de las partículas se alteró y por consiguiente se alteraron dichas propiedades.

De los datos obtenidos, se establece que el sitio testigo está más compactado, que el tratado, por lo cual las raíces de las plantas encuentran mayor resistencia en él para su crecimiento, sin llegar necesariamente al valor crítico de densidad aparente de 1.60 a 1.69 g cm⁻³, por el contrario, en el sitio tratado, el mezclado del suelo ayudó a quitar dicha compactación al suelo.

Por todo lo anterior se puede decir que en lo concerniente a las propiedades físicas del suelo, el tratamiento de bioventeo fue benéfico.

Cabe mencionar que ambos sitios de encuentran sujetos a una labranza tradicional y que soportan cultivos de ciclo anual como el frijol, maíz y haba; el suministro de agua para dichos cultivos solo es el de la precipitación pluvial y solo en temporada de lluvias.

8.3 Propiedades químicas

8.3.1 pH

La reacción del suelo es una de las propiedades más importantes, ya que ésta determina las condiciones de acidez o alcalinidad del mismo e influye en muchas de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Se evalúa con la determinación del pH del mismo (Brady, 1990; Fasbender y Bornemisza, 1987; León, 1991; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994).

Los valores de pH en el sitio testigo fueron de 5.16, 5.36 y 5.85, en cada una de las profundidades manejadas. Estos valores indican que el suelo es de fuertemente ácido a medianamente ácido de acuerdo con Porta *et al.* (1994), mientras que de acuerdo con Ortiz y Ortiz (1990) y PPI (1997) es medianamente ácido. En el sitio tratado los valores encontrados fueron de 5.66, 6.08 y 6.48 para cada una de las profundidades manejadas, de acuerdo a Porta *et al.* (1994), Ortiz y Ortiz (1990) y PPI (1997) es de mediana a ligeramente ácido. Como se observa, los valores más altos se presentan en el sitio tratado.



De acuerdo con la prueba de U de Mann-Whitney aplicada a los valores de pH, se tienen diferencias significativas en el sitio testigo y el sitio tratado. Las diferencias numéricas (0.5, 0.72 y 0.63) son relativamente pequeñas, pero suficientes para dar una diferencia estadística.

Los valores de pH en suelos contaminados con hidrocarburos en algunos suelos ha permanecido sin cambios como lo reportan Martínez y López (2001) quienes contaminaron suelo a diferentes concentraciones de hidrocarburos y el pH no presentó variaciones. Ekundayo y Obuekwe (2000) encontraron variaciones en el pH del suelo que no fueron significativas. En cambio los valores de pH sí presentan modificaciones ante la aplicación de técnicas de enmienda, como lo reportan Pardo *et al.* (2004) que adicionaron fertilizantes inorgánicos durante la biolabranza para la degradación de hidrocarburos, y el pH del suelo paso de 4.2 a 6.96; Robson *et al.* (2004) encontraron en un estudio de los efectos de revegetación natural de un suelo contaminado con hidrocarburos, que los sitios no contaminados presentaron valores de pH más bajos; Gonzáles *et al.* (2003) indican variaciones de pH en suelo debido a la aplicación de fertilizantes y la aplicación de espumas de azúcar, yeso y dolomita. MSUcares (2005) establece que la aplicación de fertilizante sí afecta el valor de pH.

La diferencia de pH que se presenta en el sitio testigo y el tratado se pueden atribuir a la variación estacional que esta propiedad presenta (Escribano y Paz, 2003) debido a la época en que se tomaron las muestras para el análisis ya que, como se sabe, el intercambio catiónico realizado por las raíces de las plantas, reduce el valor de pH (Lomelí y Tamayo, 2003b). Ante la cosecha de los cultivos, los suelos se tornan más ácidos debido a la remoción de bases (PPI, 1997). La aplicación de fertilizantes como sulfato de amonio, nitrato de amonio, urea, fosfato monoamónico y diamónico, acidifican el suelo (MSUcares, 2005).

8.3.2 N de nitratos (NO_3^-)

Como se mencionó anteriormente el N forma parte de los nutrimentos esenciales y para que éste pueda ser disponible es necesario que se encuentre en las formas de amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) (AGROPECSTAR, 2003; Echarri, 1999; PPI, 1997; Harrison, 2003).

Los valores encontrados en el sitio testigo para cada una de las capas estudiadas fueron de 8.58, 5.03, 2.13 mg kg^{-1} y para el sitio tratado de 10.05, 6.27, 3.74 mg kg^{-1} ; los valores más altos se encontraron en la capa superficial en ambos sitios y de acuerdo con Fassbender y Bornemisza (1987) este es un comportamiento esperado. Los valores encontrados, indican que el suelo es pobre en N de Nitratos, tanto en el sitio de estudio como en el tratado, ya que están por debajo de los 10 mg kg^{-1} (Marx *et al.*, 1999).

Para el caso del nitrógeno en particular, la diferencia que existe en el sitio testigo y el tratado se debe sobre todo al aporte de N en forma de fertilizantes y a la labranza, ya que como se sabe, el nitrógeno en forma de nitrato es altamente soluble y si no es



tomado por las plantas, puede ser arrastrado por el agua; este efecto es mayor en suelos ligeros (GN, 2005).

8.3.3 Fósforo (P)

El fósforo forma parte de los nutrimentos esenciales (AGROPECSTAR, 2003; PPI, 1997; Hernández, 2001; Snyder y Thompson, 2005). Su disponibilidad está en función del pH del suelo; es poco móvil en suelo y se pierde poco por lixiviación aún en suelos arenosos. En la plantas es extremadamente móvil y la forma en que lo toman es como ión ortofosfato primario (H_2PO_4^-) a pH menor de 7.2 o como ión ortofosfato secundario (HPO_4^-) a pH mayor que 7.2; en condiciones ácidas precipita con Al y Fe y en condiciones alcalinas precipita con Ca (AGROPECSTAR, 2003; Bohn *et al.*, 1993; Echeverría *et al.*, 2000; Gilpin, 2005; Hernández, 2001; PPI, 1997; SSC, 2002b).

Los valores encontrados en el sitio testigo (24.62, 22.47 y 23.86 mg kg^{-1}) así como los del sitio tratado (28.60, 23.58 y 17.13 mg kg^{-1}) indican, de acuerdo con Vázquez y Bautista (1993), niveles medios (entre 15 y 30 mg kg^{-1}) en cuanto a la presencia de este nutrimento en el suelo. De igual forma que en los parámetros anteriores, los valores más altos se registraron en el sitio tratado, con excepción de la capa inferior donde el valor es más bajo.

Aún cuando las diferencias numéricas no son grandes, con la aplicación de la prueba estadística U de Mann-Whitney se concluye que existe diferencia significativa en el sitio testigo y en el sitio tratado.

El aumento de las cantidades de fósforo en el sitio tratado se puede atribuir a la aplicación de este nutrimento durante el bioventeo y que no fue consumido totalmente por los microorganismos, también a la aplicación de fertilizantes fosfatados durante los periodos de cultivo del sitio tratado, hechos que generaron la acumulación de fósforo en el suelo. Se estima que del total del fósforo aplicado en forma de fertilizantes, las plantas absorben entre el 10 y el 50 %, otra parte es perdida por lavado y otra más permanece en el suelo como fósforo residual (AGROPECSTAR, 2003; Özdemir *et al.*, 2000; PPI, 1997). Özdemir *et al.* (2000), Gacenet, (2003) y Withers *et al.* (2001) han encontrado acumulación de fósforo en suelos debida a la aplicación de fertilizantes y abonos orgánicos.

8.3.4 Calcio (Ca)

El calcio forma parte de los nutrimentos secundarios, en el suelo se encuentra como ión Ca^{2+} y de esta forma es absorbido por las plantas (AGROPECSTAR, 2003; Brady, 1990; Hernández, 2001; NM, 2005; PPI, 1997; Snyder y Thompson, 2005; SSC, 2002c). En suelos con un pH mayor a 6.5 puede precipitar al combinarse con fósforo y en suelos con un pH muy bajo puede formar complejos y no ser disponible para las plantas (García *et al.*, 2000; Marini, 2005; SSC, 2002c), pero aún así los suelos raramente



presentan deficiencias de Ca (Bohn *et al.*, 1993). El Ca permanece en equilibrio entre la solución del suelo y el complejo coloidal (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Los valores encontrados en el sitio testigo (1.128, 1.355, 1.913 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) y el sitio tratado (2.566, 2.688, 2.771 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$), de acuerdo con Vázquez y Bautista (1993), indican para el sitio testigo niveles muy bajos (menores de 2 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) y para el tratado solo son bajos (entre 2 y 5 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$); como se observa, los valores más altos se encontraron en el sitio tratado.

Con la aplicación de la prueba estadística (U de Mann-Whitney), se establece que existe una diferencia significativa en cuanto a la presencia de Ca en el sitio testigo y el tratado.

Los valores más altos se presentan en el sitio tratado. Esta situación se atribuye al manejo del suelo para el cultivo, ya que durante algún tiempo el sitio tratado no fue sembrado, permitiendo así la acumulación de los nutrientes no utilizados. Por otra parte, el cultivo bajo el que se encontraba sujeto, el terreno en el momento en que se realizó este trabajo, tenía una menor densidad de plantas por unidad de área.

8.3.5 Magnesio (Mg)

El magnesio forma parte de los nutrientes secundarios en la solución del suelo, en el complejo de cambio se encuentra como ión Mg^{2+} y de esta forma es absorbido por las plantas (AGROPECSTAR, 2003; Brady, 1990; Hernández, 2001; NM, 2005; PPI, 1997; SSC, 2002c). En suelos con un pH mayor a 7.2 decrece su disponibilidad y ante la adición de Ca^{+2} , K^+ , NH_4^+ y Na se reduce su disponibilidad (SSC, 2002c). Las pérdidas de Mg son menores a las de calcio (Fassbender y Bornemisza, 1987). Los suelos arenosos tienen por lo general bajos niveles de magnesio y cuando son fertilizados con potasio o amonio presentan deficiencias respecto a este catión, esto no sucede cuando existe más magnesio cambiante que potasio cambiante (Schulte, 2004).

Los valores reportados para el sitio testigo fueron de 0.120, 0.126, 0.164 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ y en el sitio tratado 0.240, 0.280, 0.347 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$. De acuerdo con Vázquez y Bautista (1993) el suelo presenta niveles muy bajos (menores de 0.5 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) de este nutriente tanto en el sitio tratado como en el sitio testigo. Los valores más altos se encontraron en el sitio tratado.

Con la aplicación de la prueba estadística (U de Mann-Whitney), se establece que existe una diferencia significativa en cuanto a la presencia de Mg^{+2} en el sitio testigo y el tratado.

Los valores más altos se presentan en el sitio tratado; situación atribuida a la labranza del suelo para el cultivo, ya que durante algún tiempo, el sitio tratado no fue sembrado, permitiendo así la acumulación de los nutrientes no utilizados. Por otra parte, el cultivo bajo el que se encontraba sujeto, el terreno en el momento en que se realizó este trabajo, tiene una menor densidad de plantas por unidad de área.



8.3.6 Sodio (Na)

El caso del sodio es particular, ya que no forma parte de los nutrimentos esenciales, más bien forma parte del grupo de bases que se determinan en suelos. Este ión es de interés químico cuando se presenta en exceso, es decir cuando se encuentra en el suelo ocupando en más del 15 % los sitios de intercambio, bajo estas condiciones su influencia es negativa, ya que ocasiona la defloculación de las arcillas e impide el movimiento del agua. Por otro lado, cuando se tiene alto contenido de sodio intercambiable en suelos expansivos, se favorece la infiltración (Bohn *et al.*, 1993).

La estimación del porcentaje de sodio intercambiable presente en el suelo se calcula a partir de la concentración.

La bibliografía indica que no es claro el papel del sodio en la nutrición de las plantas, y en vez de establecer un nivel crítico mínimo se establece un valor máximo de este ión en suelo, que es de entre 1 y 2 cmol(+) kg⁻¹ encontrándose ya en riesgo de toxicidad para las plantas (puntas y márgenes de hojas quemadas) cuando se superan lo 4 cmol(+) kg⁻¹ (UE, 2005).

Los valores reportados en el sitio testigo (0.105, 0.107, 0.121 cmol(+)kg⁻¹) y el sitio tratado (0.128, 0.146, 0.177 cmol(+) kg⁻¹) indican valores más altos en el sitio tratado. El porcentaje de sodio intercambiable presente en el suelo testigo se encuentra entre el 1.8 y 1.9% mientras que en el sitio tratado es entre el 1.8 y el 2.5 %.

Con la aplicación de la prueba estadística (U de Mann-Whitney), se establece que existe una diferencia significativa en cuanto a la presencia de Na en el sitio testigo y el tratado.

De igual forma que en los apartados anteriores, los valores más altos de sodio se presentaron en el sitio tratado, comportamiento atribuible al uso del suelo para el cultivo, ya que el sitio testigo ha estado sujeto a una mayor demanda de nutrimentos. Las concentraciones no rebasan el límite de sodio intercambiable establecido como riesgoso para suelos no calizos que es del 5% (Porta *et al.*, 1994).

8.3.7 Porcentaje de Saturación de bases (%V)

La saturación de bases es la estimación en porcentaje del grado en que el complejo de intercambio está saturado con cationes básicos. Para su cálculo se utiliza la suma de las concentraciones presentes de cationes (Ca, Mg, Na y K) y la CIC del suelo. Si el valor obtenido es mayor del 50% se dice que el suelo es fértil (éutrico), si está por debajo se establece que el suelo es dístico (infértil) (Aguilera, 1989; FitzPatrick, 1987; Lippert, 2005; Ortiz y Ortiz, 1990; Porta *et al.*, 1994).



Los valores encontrados de %V en el sitio testigo fueron 29.61, 30.53, 37.47 % y en el sitio tratado fueron 44.98, 46.76, 48.91 %; estos valores indican un porcentaje de saturación media (Vázquez y Bautista, 1993). Los valores fueron superiores en el sitio tratado ya que, como se mencionó, el %V es función de las concentraciones de Ca, Mg, Na y K, así como de la CIC, y estos parámetros a su vez fueron superiores en el sitio tratado.

Con la aplicación de la prueba U de Mann-Whitney se concluye que existe diferencia significativa en el sitio testigo y en el sitio tratado. Los valores reportados dependen directamente de la cantidad de bases y CIC presentes en el suelo en cada una de las profundidades manejadas.

8.3.8 Cobre (Cu)

El cobre forma parte de los micronutrientes, en el suelo se encuentra como ión Cu^{2+} y de esta forma es absorbido por las plantas (AGROPECSTAR, 2003; Brady, 1990; Hernández, 2001; NM, 2005; PPI, 1997; Snyder y Thompson, 2005).

Las concentraciones de cobre en suelo consideradas como bajas son de 0 a 0.2 mg kg^{-1} y se consideran adecuadas cuando están por arriba de 2.0 mg kg^{-1} (Soltanpour y Follett, 2005, Knudsen y Frank, 1996). A este respecto Bohn *et al.* (1993) indican que los niveles promedio de Cu en suelo se encuentran en un intervalo de 2 a 100 mg kg^{-1} sin que se presenten problemas por toxicidad tanto en plantas como en animales que se alimentan de dichas plantas.

El Cu se encuentra adherido a la materia orgánica y no es susceptible de ser perdido por lavado, su solubilidad decrece conforme aumenta el pH del suelo (NM, 2005). La aplicación de fertilizantes fosfatados y nitrogenados afecta su disponibilidad para las plantas así como también la presencia de altos niveles de zinc (Gilkes *et al.*, 1975; Solberg *et al.*, 1995; Pasian, 2001).

Los valores encontrados en el sitio testigo fueron 0.30, 0.39, 0.44 mg kg^{-1} y el sitio tratado fueron 0.52, 0.59, 0.58 mg kg^{-1} . Se observa que los valores más altos se encontraron en el sitio tratado. Estos valores de acuerdo Soltanpour y Follett (2005), y Bohn *et al.* (1993), indican que el suelo de ambos sitios presenta valores bajos, pero aún así las concentraciones más altas de Cu se encontraron en el sitio tratado. Esto puede deberse a la utilización de fertilizantes durante el tratamiento de bioventeo y durante la labranza del terreno, ya que la utilización de fertilizantes inhibe la disponibilidad del Cu (Gilkes *et al.*, 1975; Pasian, 2001; Solberg *et al.*, 1995), generando así una acumulación.

Con la aplicación de la prueba U de Mann-Whitney se concluye que existe diferencia significativa en el sitio testigo y en el sitio tratado.



8.3.9 Zinc (Zn)

El zinc forma parte de los micronutrientes. En el suelo se encuentra como ión Zn^{2+} y de esta forma es absorbido por las plantas (AGROPECSTAR, 2003; Brady, 1990; Hernández, 2001; NM, 2005; PPI, 1997; Snyder y Thompson, 2005).

De acuerdo con Bohn *et al.* (1993) y Pasian (2001) los niveles promedio de Zn en el suelo se encuentran en un intervalo de 10 a 300 $mg\ kg^{-1}$ sin que se presenten problemas por toxicidad tanto en plantas como en animales que se alimentan de dichas plantas.

El Zn se encuentra adherido a la materia orgánica, no se pierde por lavado, su solubilidad decrece conforme aumenta el pH del suelo (NM, 2005; UM, 2004). La presencia de altos niveles de Cu y P puede inhibir su disponibilidad (Gilkes *et al.*, 1975; Pasian, 2001).

Los valores encontrados en el sitio testigo fueron de 0.28, 0.25, 0.25 $mg\ kg^{-1}$ y en el sitio tratado fueron de 0.50, 0.42, 0.39 $mg\ kg^{-1}$. Los valores más altos se encontraron en el sitio tratado. Estos valores de acuerdo con Bohn *et al.* (1993) indican que el suelo presenta valores muy bajos, por lo que es posible que los cultivos que sustentan tanto el sitio tratado como el sitio testigo presenten deficiencias por este ión. Las concentraciones más altas de Zn se encontraron en el sitio tratado, esto puede deberse a la utilización de fertilizantes durante el tratamiento de bioventeo y en la labranza del terreno, ya que la utilización de fertilizantes inhibe la disponibilidad del Zn (Gilkes *et al.*, 1975; Pasian, 2001), generando así una acumulación en el suelo.

Con la aplicación de la prueba U de Mann-Whitney se concluye que existe diferencia significativa en el sitio testigo y en el sitio tratado.

Los datos obtenidos con los análisis realizados a las muestras de suelo corresponden a lo esperado en función de la profundidad. Por ejemplo, la densidad aparente y la densidad real aumentan conforme aumenta la profundidad (ver anexo B).

La variación en las propiedades físicas se atribuyen sobre todo al manejo físico que se le dio al suelo durante el tratamiento del mismo para su limpieza, tanto en los trabajos de recuperación del contaminante (gasolina) como en los trabajos de bioventeo, no siendo el mismo caso para las propiedades químicas. Las variaciones de éstas para el caso de los macronutrientes, se pueden atribuir al tratamiento de remediación, debido a la aplicación de nutrientes para estimular la actividad de las bacterias. Para las restantes se debe en gran medida al manejo y explotación que se le da al suelo; el sitio tratado no se cultivó alrededor de dos años, mientras que el testigo ha permanecido bajo explotación continua, habiendo un mayor número de trabajos para la labranza y desgaste del suelo en el sitio testigo que en el tratado; por ejemplo, se observó un mayor número de plantas por m^2 en el sitio testigo, esto lleva a una mayor remoción de los macro y micronutrientes, mientras que en el sitio tratado se observó un menor número de ejemplares por m^2 , lo que implica una menor remoción de los macro y micronutrientes.



8.4 Calidad del suelo

El suelo tiene tres funciones importantes, la función productiva, la función filtrante y la función degradativa. Es por esto que se hace necesario definir indicadores de la calidad del suelo, de fácil análisis y que respondan de manera clara y coherente a cualquier agresión que sufra el suelo y por lo tanto permitan un diagnóstico inmediato de la pérdida de calidad del suelo o de la recuperación de la misma en un suelo deteriorado (TP, 2003).

El Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America define como calidad del suelo a la capacidad del mismo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de las plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat (Karlen *et al.*, 1997 citado en Bautista *et al.*, 2004). Sin embargo existen muchas otras definiciones de calidad de suelo, y de acuerdo con autores como Bautista *et al.* (2004) éstas son subjetivas ya que ninguna considera de manera objetiva y simultánea, todos los posibles indicadores que podrían usarse para evaluar todas las funciones del suelo simultáneamente y aún no hay un consenso de cuales deben ser las propiedades para el diagnóstico integral de la calidad del suelo.

Puesto que el suelo utilizado para el presente estudio es de uso agrícola, se considera más adecuado evaluar su calidad en función de su productividad. Para ello se utilizó el modelo de Escudero (SIAVG, 2006) el cual considera el contenido de materia orgánica, la relación carbono:nitrógeno, el pH y el porcentaje de saturación de bases, relacionando estos parámetros de la siguiente manera:

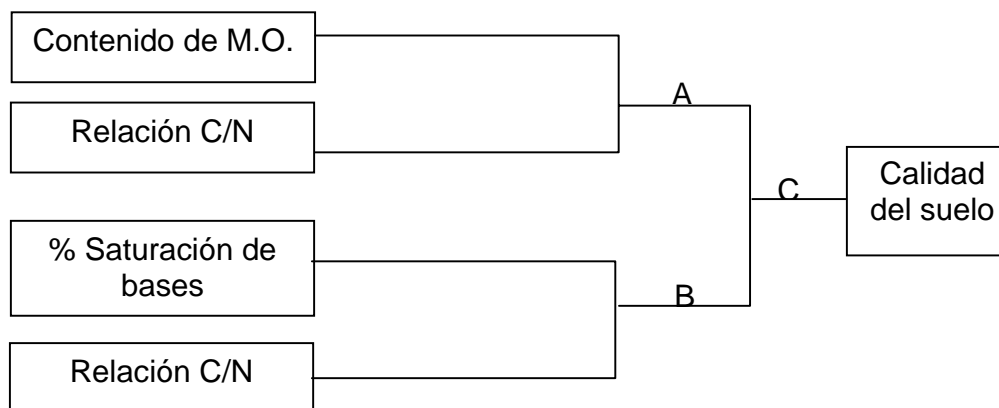


Figura 8. Diagrama para obtener la calidad del suelo desde el punto de vista de productividad (tomado de SIVG, 2006)

El modelo de Escudero (SIAVG, 2006) relaciona el % de M.O. y la relación C:N con la matriz que se muestra en la tabla 8.1, la cual valora la calidad y cantidad de materia orgánica. La matriz asigna un valor de 4 a la condición más favorable (que le da más calidad al suelo) y de 1 a la condición más desfavorable (que le da menor calidad al



suelo) la relación de estos dos parámetros tiene que ver con los aspectos físicos del suelo (estructura, capacidad de filtración, capacidad de retención de humedad), así como de la calidad de la materia orgánica; cuanto menor es la relación C:N, mayor será el grado de mineralización y por lo tanto su calidad es mejor.

% M.O. \ C:N	>20	15-20	12-15	8-12	<8
0-2	1	1	1	2	3
2-4	1	1	2	3	4
4-6	1	2	3	4	4
6-8	2	3	4	4	4
>8	3	4	4	4	4

SIAVG (2006)

Por otra parte la disponibilidad de nutrientes se establece con el pH y el % de saturación de bases de acuerdo con la matriz que se muestra en la tabla 8.2. De igual forma que en el caso anterior, la matriz asigna un valor de 4 a la condición más favorable y un valor de 1 a la condición más desfavorable. De acuerdo con SIAVG (2006) la relación de estos dos parámetros, da idea de la cantidad de nutrimentos que puede tener el suelo y su grado de disponibilidad para la planta.

% V. \ pH	<4	4-4.7	4.8-5.5	5.6-6.5	6.5-7.3	7.4-8	8.1-8.5	>8.5
<15	1	1	1	-	-	-	-	-
15-35	1	1	2	2	-	-	-	-
36-50	1	2	2	3	3			
51-75	-	2	3	4	4	-	-	-
>75	-	2	3	4	4	3	2	1

SIAVG (2006)

Finalmente, el modelo de calidad del suelo relaciona las calificaciones obtenidas de la matriz A (cantidad y calidad de M.O.) y la matriz B (disponibilidad de nutrientes) a través de la matriz C que se muestra en la tabla 8.3, donde se asigna un valor de 4 a la condición más favorable y un valor de 0.5 a la condición más desfavorable.

A \ B	1	2	3	4
1	0.5	1.5	2	2.5
2	1.5	2.0	2.5	3.0
3	2.0	2.5	3.0	3.5
4	2.5	3.0	3.5	4

SIAVG (2006)



Las calificaciones obtenidas de la matriz C, se comparan con los valores de índice de calidad del suelo que se muestra en la tabla 8.4, en ella se observan 4 clases de calidad del suelo, siendo la clase 4 la más favorable y la clase 1 la más desfavorable.

Índice de calidad	Clase
>3	4 (calidad muy alta)
Entre 2 y 3	3 (calidad alta)
Entre 1 y 2	2 (calidad media)
<1	1 (calidad baja)

SIAVG (2006)

Para conocer la calidad de un suelo en su conjunto se debe aplicar esta metodología en cada horizonte estudiado, dentro de los primeros 60 cm de profundidad, obteniéndose la media ponderada de todos los horizontes según su espesor.

Este modelo se aplicó a los promedios de los valores obtenidos para cada parámetro en cada una de las profundidades manejadas tanto en el sitio tratado como en el sitio testigo. En el sitio testigo se obtuvieron valores de calidad de 1.5, 1.5 y 2 para las profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm respectivamente; en el caso del sitio tratado, se obtuvieron valores de calidad de 2, 2 y 2 para las profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm respectivamente

En el sitio testigo la media ponderada de las tres profundidades estudiadas fue de 1.67, que indica una calidad media de acuerdo con lo que se muestra en la tabla 8.4. En el sitio tratado, la media ponderada de las tres profundidades estudiadas fue de 2.0 que de acuerdo con lo que indica la tabla 8.4 también corresponde a una calidad media.

Pese a que ambos sitios tienen una calidad media de acuerdo con la metodología aplicada, es importante hacer notar que el sitio tratado tuvo un valor numérico mayor que el sitio testigo, lo cual indica que el sitio tratado, tiene una calidad un poco mejor en términos de productividad.



PAGINA EN BLANCO



9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se tienen diferencias estadísticamente significativas en la mayoría de las propiedades físicas y químicas determinadas en el sitio testigo y el sitio tratado.
- Las diferencias estadísticas observadas en las propiedades físicas del suelo del sitio tratado y sitio testigo pueden atribuirse a la aplicación de la técnica de remediación (bioventeo), debido al mezclado del suelo durante el tratamiento.
- Las diferencias estadísticamente significativas observadas en los macronutrientes del suelo del sitio tratado y sitio testigo pueden atribuirse a la adición de nutrientes durante el proceso de remediación, mientras que las variaciones observadas en el resto de las propiedades químicas analizadas, puede atribuirse más bien al manejo y explotación agrícola del suelo.
- El suelo del sitio tratado presenta concentraciones de HTP por debajo de los niveles establecidos en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, por lo que se establece que no está contaminado.
- El suelo tratado presenta concentraciones de Pb orgánico por debajo de los límites de detección analítico, y el plomo total presenta concentraciones por debajo de lo establecido en los Criterios Interinos de la PROFEPA.
- El tratamiento de venteo y bioventeo, produjo alteraciones en las propiedades físicas del suelo (densidad aparente, porosidad y textura) atribuibles al movimiento de tierras efectuado durante los trabajos de limpieza, lo que es positivo para el crecimiento de las plantas.
- El suelo de ambos sitios presenta deficiencias en cuanto a macro y micronutrientes.
- El suelo, tanto del sitio testigo como del sitio tratado, presenta una calidad media en términos de productividad.



Recomendaciones

- Conviene evaluar el efecto del tratamiento en la microbiología del suelo para evaluar el efecto en la biomasa microbiana y en la composición de las comunidades microbianas edáficas.
- En estudios posteriores donde se desee evaluar la influencia de los tratamientos de biorremediación en las propiedades químicas del suelo, sería conveniente restringir los análisis químicos a la determinación de pH, N-P-K, Ca, Mg y carbono orgánico.
- En trabajos posteriores similares al presente, se recomienda no considerar la determinación de micronutrientes, ya que estos no se adicionan en los tratamientos de biorremediación.
- Realizar estudios con plantas para evaluar el efecto de un tratamiento de biorremediación en la acumulación de biomasa, desarrollo radicular y velocidad de crecimiento.

Independientemente del tratamiento realizado al sitio contaminado, tanto el sitio testigo como el tratado presentan deficiencias en cuanto a macro y micronutrientes, dichas deficiencias se pueden abatir con las siguientes recomendaciones.

- Adicionar abonos orgánicos para aumentar la cantidad de materia orgánica y mejorar la estructura del suelo; esto también ayudará a aumentar la retención de agua y el contenido de N en el suelo.
- Aplicar fertilizantes que aumenten la cantidad de N, P y K, cuidando los antagonismos que se presentan entre los fertilizantes aplicados y los micronutrientes.
- Aumentar la cantidad de Ca y Mg presentes en el suelo, lo que puede hacerse por encalado.
- Realizar rotación de cultivos para equilibrar en cierta medida la extracción de macro y micronutrientes.



10. REFERENCIAS CITADAS

Acton, D F y Padbury, G A (1993), "A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring" **en** Acton, D F (Ed.) (1993), "A program to assess and monitor soil quality in Canada. Soil quality evaluation program summary (interim)", chapter 2, NSCP (National Soil Conservation Program), Research Branch, Agriculture Canada, http://res2.agr.gc.ca/initiatives/manurenet/env_prog/nscp/download/sqep.pdf.

Adriano, C D y Berthelin, J (1998), "Evaluation et faisabilité de procédés biologiques, chimiques et physiques appliqués à la réhabilitation des sols", *16e Congrès Mondial de Science du Sol*, Simposio No 38, Montpellier.

Agroecology (2001), "*A glossary of terms used in Agroecology*", The Center for Agroecology and Sustainable Food Systems, Agroecology Research Group, California, <http://www.agroecology.org/glossary/index.htm>.

AGROPECSTAR (2003), "Manual de agronomía, capítulo 1: Conceptos de fertilidad y productividad del suelo", AGROPECSTAR, <http://www.agropecstar.com/portal/doctos/agronomia1.html>.

Aguilera, N (1989), *Tratado de edafología de México Tomo I*, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

Al-Sarawi, M, Massoud, M S y Wahba, S A (1998) "Physical properties as indicators oil penetration in soil contaminated with oil lakes in the Greater Burgan oil fields, Kuwait", *Water, Air, Soil Pollution*, v 102, 1-15.

ASTM (American Society of Testing and Materials) (1993), *Annual book of ASTM standards*, v 04.02, American Society of Testing and Materials.

Baldwin, K (2000), "Improving clay soils", *Kitchen Gardener Magazine*, No. 26, 22-24.



Batelle-NFESC (Naval Facilities Engineering Service Center) (2003), "Final report, Addendum-natural pressure-driving passive bioventing", Technical Report TR-2221-ENV, Battelle, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, http://enviro.nfesc.navy.mil/erb/erb_a/restoration/technologies/remed/bio/tr-2221-biovent.pdf.

Bautista, C A, Etchevers, B, del Castillo, R F y Gutiérrez, C (2004), "La calidad del suelo y sus indicadores", *Ecosistemas*, Año XIII, No. 2, <http://www.aeet.org/ecosistemas/documentos/Revision2.pdf>

Baver, L D, Gardner, W G y Gardner, W R (1991), *Física de suelos*, Noriega, México D.F.

Bohn, H L, McNeal, L B y O'Connor, A G (1993), *Química del suelo*, Limusa, México D.F.

Bolt, G L y Bruggenwert, M G M (1976), *Soil Chemistry. A. Basic elements*, Elsevier Scientific Publishing Company, Estados Unidos de América.

Brack, A y Mendiola, C (2006) "Enciclopedia ecología del Perú", Perú ecológico, Embajada de Finlandia Lima, <http://www.peruecologico.com.pe/libro.htm>

Brady, N C (1990), *The nature and properties of soils*, Tenth Ed., Macmillan Publishing Company, New York

Carroll, Z L , Reynolds, B, Emmet, B A, Sinclair, F L y Ruiz de Ona, C (2004), "The effect of stocking density on soil upland Wales. Final Report. February 2004", chapter 5, Centre for Ecology & Hydrology, Natural Environmental Research Council, <http://bangor.ceh.ac.uk/English/reports/Stocking%20density%20report/sd%20chapter%2005.pdf>.

Coder, K D (2000), "Chapter 7: Site assessment and soil improvement" en Duryea, M L, Binelli, E K y Korhnak, L V (Eds.) (2000), "SW140 Restoring the urban forest ecosystem", School of Forest Resources of Florida, <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/FR/FR07100.pdf>.

Conti, M E (2004), "Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo", El sitio agrícola, <http://www.elsitioagricola.com/articulos/conti/liberacion%20y%20fijacion%20potasio.asp>.

Cortinas, C (2002), *Política de remediación de sitios contaminados orientada a prevenir riesgos a la salud y al ambiente*, Proyecto para el desarrollo institucional para la gestión de sitios contaminados, PN: 99.21.34.3, Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México D.F.



Cuanalo, H (1975), *Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo*, Colegio de Posgraduados, Texcoco.

Diele F, Notarnicola F y Sgura I. (2002) "Uniform air velocity field for a bioventing system design: some numerical results", *International Journal of Engineering Science*, v 40, No 11, 1199-1210.

Díez, J A (1999), "Optimización de la fertilización nitrogenada: procedimientos de análisis de suelo, toma de muestra y elección del tipo de fertilizante", *Edafología*, v 6, 73-84.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (1984), "Norma Mexicana NMX-AA-24-1984. Protección al ambiente – contaminación del suelo- residuos sólidos municipales- determinación de nitrógeno total", Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Diario Oficial de la Federación, <http://www.semarnat.gob.mx/sma/html/bimd.html>.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2000a), "Norma Oficial Mexicana NOM-182-SSA1-1998, Etiquetado de nutrientes vegetales", Secretaría de Salud, Subsecretaría de Regulación y Fomento Sanitario, Dirección General de Salud Ambiental, Diario Oficial de la Federación, <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/182ssa18.html>.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2000b), "Norma Oficial Mexicana NOM-077-FITO-2000, Por la que se establecen los requisitos y especificaciones para la realización de estudios de efectividad biológica de los insumos de nutrición vegetal". Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Diario Oficial de la Federación, http://www.qro.sagarpa.gob.mx/Normas_oficiales/Catalogo_de_normas/NOM_FITO/077-fito.htm.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2002a), "Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis", SEMARNAT, *Diario Oficial de la Federación*, México D.F.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2002b), "Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-138-ECOL-2002, Que establece los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimientos para la restauración", SEMARNAT, *Diario Oficial de la Federación*, México D.F.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2005), "Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación", SEMARNAT, *Diario Oficial de la Federación*, México D.F.



Domínguez, A A (2001) "Pruebas de biotratibilidad de un suelo contaminado con diesel mediante el uso de texturizantes orgánicos", Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, México D.F.

Domínguez, R I y Aguilera, H N (1990), "*Manual de prácticas de laboratorio*", Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

Echarri, L (1999), "Ciclo del nitrógeno", Libro electrónico ciencias de la tierra y del medio ambiente, tema 4, ecosistemas- ciclos de los elementos –ciclo del nitrógeno, Escuela de Ingenieros de San Sebastián, Universidad de Navarra, <http://www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/04Ecosis/135CicN.htm>.

Echeverría, N E, Puricelli, C A, Pelta, H R y Grossi, T (2000), "Cambios en el tiempo y relaciones entre algunas propiedades químicas del suelo en la rotación agrícola -- ganadera", *RIA*, v 29, No. 2, 29-44.

EFMA (European Fertilizer Manufacturers Association) (2000), "El fósforo y su utilización en la agricultura (Curso)", http://www.fertiberia.com/servicios_on_line/cursos/fosforo/indexfosforo.html.

Ekundayo, E O y Obuekwe, O (2000), "Effects and oil spill on soil physico-chemical properties of a spill site in a typic udipsamment of the niger delta basin of Nigeria", *Environmental Monitoring and Assessment*, No 60, 235-249.

EPF (Equipo del Proyecto Fertilizar)-INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), (2005), "Movilidad del fósforo en el suelo", <http://www.fertilizar.org/articulos/Movilidad%20del%20Fosforo%20en%20el%20Suelo.htm>.

Escribano, C y Paz, A (2003), "Análisis de la variabilidad estadística de algunas propiedades del suelo", *Memorias de la IX Conferencia Española de Biometría*, La Coruña, España.

Falen, C L (1998), "Organic fertilizers", Crop production and soil management series, College of Rural Alaska, University of Alaska Fairbanks, <http://www.vaf.edu/coop-ext/publications/freepubs/FGV-00349.pdf>.

Fassbender, H W y Bornemisza, E (1987), *Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina*, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José.

FENALCE (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales) (2000), "Importancia del calcio en la nutrición de las plantas", Fondo Nacional Cerealista, *Boletín Informativo de la Subgerencia Técnica*, No.7.

FitzPatrick, E A (1987), *Suelos, su forma, clasificación y distribución*, CECSA, México D.F.



Flores, R M (1996), *Transporte de plomo y cadmio en presencia de lixiviados en sedimentos de la zona del exlago de Texcoco*, Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F..

Forsythe, W (1975), *Manual de laboratorio de física de suelos*, IICA, OEA, San José, Costa Rica.

Gacenet (2003), "La dosificación del fósforo varía según los tipos de suelo", Noticias destacadas, Agrositio.com, <http://www.agrositio.com/principal/vertext.asp?ver=15525>.

García, E (1989), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana*, Enriqueta García, México D.F.

García, I (2004), "Contaminación por Fertilizantes" **en** García y Dorronsoro (2004) "Contaminación del Suelo (Curso)", <http://edafologia.ugr.es/conta/tema14/intro.htm>.

García, J, Angulo, O y González, CA (2000), "Importancia del calcio en la nutrición de las plantas", Tecni-Fenalce, No. 7, Año 2, <http://www.fenalce.org/publica/tecnifenalce/72000.doc>.

Garzón, G (1990), *Fundamentos de química general*, McGraw Hill, México D.F.

Gaucher, G (1971), *El suelo y sus características agronómicas*, Omega, 647 p, Barcelona.

Gilkes, R J, Young, R C y Quirk, J P (1975), "Leaching of copper and zinc from trace element superphosphate", *Australian Journal of Soil Research*, v 13, No. 1, 33-41.

Gilpin, L (2005), "The phosphorus cycle", The Environment, School of Life Sciences, Napier University, Edinburgh, <http://www.lifesciences.napier.ac.uk/teaching/Env/Pcycle.html#TOP>.

GN (Gobierno de Navarra) (2005), "Código de buenas prácticas agrarias de Navarra", http://www.navarra.es/home_es/Navarra/Instituciones/Gobierno+de+Navarra/Organigrama/Los+departamentos/Agricultura+Ganaderia+y+Alimentacion/Publicaciones/Otras+publicaciones/.

González, P (2003), "La fertilización en el laboreo de conservación. Abono fosforado" **en** González, P (2003), "Agricultura de conservación y medidas agroambientales (Curso)", BESANA Portal Agrario, http://www.portalbesana.es/estaticas/servicios/documentacion/abonado_potasico.html.

González-Fernández, P, Ordóñez-Fernández, R, Espejo-Serrano, R y Perogrini-Alonso, F (2003), "Cambios en el pH del perfil de un suelo ácido cultivado y enmendado con diversos materiales para incrementar su fertilidad", *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, v VI, 373-378.



GTOS (Global Terrestrial Observing System) (2005), "Soil texture", http://www.fao.org/gtos/tems/variable_show.jsp?VARIABLE_ID=111.

Harrison, J A (2003), "El cielo del nitrógeno: De microbios y de hombres", Visionlearning, Vol. EAS-2 (4s), http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=98&1=s&c3=.

Hernández, R (2001), "Nutrición mineral de las plantas. LibroBotanicaOnLine", Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/nutricionmineral/>.

IET (Instituto de Estructuras y Transporte) (2005), "Tablas y ábacos para los cursos de Geología de Ingeniería e Introducción a la mecánica de suelos, Departamento de Geotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, http://www.fing.edu.uy/iet/areas/geotecnia/cursos/mcc_suelosdidactico/tablas_abacos_05.pdf.

IMP(Instituto Mexicano del Petróleo) (1996), *Evaluación de la posible contaminación por fuga del poliducto Minatitlan-México en Amozoc, Puebla km 408+654. Estudio Doc 8050. Informe Final*, Grupo de Diagnostico Ambiental de Sistemas Terrestres, IMP, México D.F.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (1997), *Cuaderno estadístico municipal, Puebla, Puebla*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2000), *Síntesis geográfica del estado de Puebla*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes.

Irwin, R J, VanMouwerik, M, Stevens, L, Seese, M D y Basham, W (1997),. "Environmental contaminants encyclopedia. Crude oil enter", National Park Service, Water Resources Division, Fort Collins, Colorado, Distributed within the Federal Government as an Electronic Document (Projected Public Availability on the Internet or NTIS:1998), <http://nature.nps.gov/hazardssafety/toxic/crudeoil.pdf>.

Jackson, M L (1982), *Análisis químico de suelos*, Omega S.A., Barcelona.

Johnson-Maynard y Castenson (2005), "Chapter two: Soil density and porosity", General Soils Laboratory, Department of Plant, Soil, and Entomological Sciences , College of Agricultural and Life Sciences, Soil Science Division, University of Idaho, <http://soils.ag.uidaho.edu/Soils206/Manual/two.htm>.

Johnston, A E (1997), "Understanding potassium and its use in agriculture", European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA), <http://www.efma.org/publications/Potassium/Understanding%20K/K%20in%20nature.asp>.



Karlen, D L, Mausbach, M J, Doran, J W, Cline, R G, Harris, R F y Schuman, G E (1997), "Soil quality: A concept, definition and framework for evaluation", *Soil Science Society of America Journal*, v 61, 4-10.

Klute, A (Ed.) (1986), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, Soil Science Society of America Book Series, madison, W, USA.

Knudsen, D y Frank, K D (1996), "Understanding your soil test: calcium, magnesium, boron, copper, chlorine, molybdenum", Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, G74-165-A, <http://ianrpubs.unl.edu/Soil/g165.htm>.

León, A R (1991), *Nueva edafología. Regiones tropicales y áreas templadas de México*, Fontamara, México D.F.

Lewandowski, A y Zumwinkle, M (1999), "Assessing the soil system. A review of soil quality literature", Energy and Sustainable Agriculture Program, Minnesota Department of Agriculture, <http://www.mda.state.mn.us/esap/sqlitreview.pdf>.

Lexer, J, Hönninger, K y Vacik, H (2000), "Modeling the effects of forest site conditions on the ecological suitability of tree species: An approach based on fuzzy set theory", *Computer and Electronics in Agriculture*, v 27, 393-399.

Lippert, B (2005), "What is the use for the cation exchange capacity (CEC) and the percent base saturation on the soil test reports?", Department of Crop & Soil Environmental Science, Clemson University Extension Service, South Carolina, U.S.A., <http://hubcap.clemson.edu/~blpprt/bobweb/BOBWEB23.HTM>.

Logsdon, S D y Douglas, L K (2004), "Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage", *Soil and Tillage Research*, v 78, 143-149.

Lomelí, G y Tamayo, R (2003a), "Deterioro del suelo. Formas del nitrógeno en el suelo", <http://www.sagan-gea.org/hojaredsuelo/paginas/11hoja.html>.

Lomelí, G y Tamayo, R (2003b), "Deterioro del suelo. El pH y los elementos en el crecimiento de las plantas", <http://www.sagan-gea.org/hojared/CSuelo.html>.

Madrigal, M I (1998), *Alternativas de tratamiento para la rehabilitación de sitios contaminados con hidrocarburos en México*, Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, UNAM, México D.F.

Marcano, F, Ohep, C y Francisco, D (1993), "Efectos de la labranza sobre algunas variables físicas en un suelo Oxic Haplustalfs del Yaracuy medio sembrado con maíz (*Zea mays* L.)", *Venesuelos*, v 1, No. 1, 2-8.

Marini, R (2005), "Virginia fruit notes", Department of Horticulture, Virginia Tech, <http://www.hort.vt.edu/faculty/marini/Calcium%20related%20disorders%20-%20fruit%20notes.doc>



Martínez, V E y López, S F (2001), "Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso", *Terra*, v 19, No 1, 9-17.

Marx, E S, Hart, J y Stevens, R G (1999), "Soil test interpretation guide", EC 1478, Oregon State University Extension Service, <http://eesc.orst.edu/agcomwebfile/edmat/EC1478.pdf>.

Massoud, M, S, Al-Sarawi, M y Wahba, S A (1998), "Variations in the chemical properties of soil contaminated with oil lakes in the Greater Burgan oil fields, Kuwait", *Water, Air, Soil Pollution*, v 118, 281-297.

Menéndez, A (2002), "EDUC 6390: Estadística aplicada a la educación. Laboratorio de Estadísticas: Laboratorio Excel # 12", Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras, Facultad de Educación, Departamento de Estudios Graduados, http://virtual.uprrp.edu/bin/common/category.pl?type=COURSE&category_id=_37_1&start=60.

Millar, C E, Turk, L M y Foth, H D (1972), *Fundamentos de las ciencias del suelo*, CECSA, México D.F.

Miller, R H (1999), "Soil properties. Part two: soils and trees", *Arborist News*, v 8, No. 6, 14-17.

Monroy, J (2002), "Biorremediación de suelos agrícolas contaminados con gasolina, en Amozoc, Puebla", *Memorias del simposio remediación de suelos y acuíferos contaminados*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Centro de Tecnología Educativa, Puebla.

Montecillos, C (1997), "Manejo biológico del fósforo en el suelo", *Agroecología y Desarrollo*, No. 8/9.

MSUcares (Mississippi State University-Coordinated Access to the Research and Extension System) (2005), "Soil pH and fertilizers", <http://msucares.com/pubs/infosheets/is0372.pdf>.

Munsell (1973), *Munsell Soil Color Charts 1973 Edition*, Munsell Color Macbeth Division of Kollmorgen Corporation, Baltimore.

Neira, X y Paz, A (1996), "La porosidad y su acción sobre la reserva hídrica del suelo", *Agricultura ecológica y desarrollo social*, Memorias del II congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica, Pamplona-Iruña, septiembre de 1996, Pamplona, <http://www.agroecologia.net/congresos%20seae/pamplona/38.pdf>.

NM (Nutrient Management) (2005), "Crop nutrient requirements", Nutrient management program, University of Florida, IFAS Extension, <http://nutrients.ifas.ufl.edu/nutrient%20pages/Overview2.htm>.



OCSCD (Ocean County Soil Conservation District) (2001), "Impact of soil disturbance during conservation on bulk density and infiltration in Ocean County, New Jersey", Sechnabel Engineering Associates, Inc., USDA Natural Resources Conservation Service, <http://www.ocscd.org/soil.pdf>.

Ortiz, B y Ortiz, C (1990), *Edafología*, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Patronato Universitario, Texcoco.

Ortiz, S C y Gutiérrez, C M C (1994), *Clave para la taxonomía de suelos*, Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo, Publicación No. 3, México D.F.

Özdemir, O, Ersöz, I K y Alpaya, S (2000), "A study on the increase of soil pollution by using inaccurate fertilizer in Samsun soils", International Symposium On Desertification/2000-Konya, Soil Science Society of Turkey, http://www.toprak.org.tr/isd/isd_47.htm.

Pardo, J L, Perdomo, M C y Benavides, J L (2004), "Efecto de la adición de fertilizantes inorgánicos compuestos en la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados con petróleo", *Nova*, v 2, No. 2, 40-49.

Pasian, C C (2001), "Micronutrient disorders", HYG-1252-98, Ohio State University Extension Fact Sheet, Horticulture and Crop Science, Columbus, <http://ohioline.osu.edu/hyg-fact/1000/1252.html>.

Porta, J, López-Acevedo, R M y Roquero de Laburu, C (1994), *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*, Mundi-Prensa, Madrid.

PPI (Potash and Phosphate Institute) (1997), *Manual internacional de fertilidad de suelos*, Potash and Phosphate Institute, Querétaro.

PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente) (1998), "Criterios interinos de restauración de suelos contaminados", *Memorias 1998 del Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados*, Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, México D.F.

PROPHET Stat Guide (2004), "Possible alternatives if your data violate normality test assumptions", http://quality-control-plan.com/StatGuide/n-dist_alts.htm.

Reeve, M J, Heaven, F W y Duncan, N A (2000), "Evaluation of mineral sites restored to agriculture", Land Research Associates, Lockington, <http://www.defra.gov.uk/enviro/landuse/restore/results.pdf>.

Reyes, J I (1996), *Fundamentos teórico prácticos de temas selectos de la ciencias del suelo. Parte I*, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, México D.F.



Rivera Díaz, J M (1998), *Glosario de términos de la ciencia del suelo. Serie notas de pedología*, Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, Texcoco.

Robinson, G W (1967), *Los suelos, su origen y clasificación. Introducción a la edafología*, Omega, Barcelona.

Robson, D B, Knight, J D, Farrel, RE y Germida, J J (2004), "Natural revegetation of hydrocarbon-contaminated soil in semi-arid grasslands", *Canadian Journal of Botany*, v 82, 23-30.

Rodríguez, R (2003) "El suelo", IES Federico García Benalt, <http://platea.pntic.mec.es/~rrodri1/principal.html>.

Rudolf, C C, Hartnup, R, Lea, J W, Thompson, T R E y Wright, P S (1984), "Soils and their use in Wales", *Soil Survey of England and Wales*, Bulletin No. 11, Rothamsted Environmental Station, Harpenden.

Schulte, E E (2004), "Soil and applied magnesium", Understanding Plant Nutrients Series, A2524, University of Wisconsin, Cooperative Extension, <http://cecommerce.uwex.edu/pdfs/A2524.PDF>.

Shannon P W (1999), "The carbon to nitrogen ratio in soil and measures", Agricultural Testing Services (ATS), New Zealand <http://www4.wave.co.nz/~atstech/articles/ctonatio.htm>.

SIAVG (Sistema de Información Ambiental Victoria Gasteiz) (2006), "Calidad del suelo, metodología del modelo", Atlas ambiental, Sistema de Información Ambiental, Ayuntamiento de Victoria Gasteiz, <http://www.victoria-gasteiz.org/ceac/siam/tabmethod/geoedafo/caledaf.pdf>

Siebe, C, Jahn, R y Stahr, K (1996), *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*, Publicación especial No. 4, Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo, A.C., Chapingo.

Snyder, C y Thompson, B (2005), "The sometimes forgotten secondary nutrients calcium-magnesium-sulfur", Efficient Fertilizer Use Manual, Back to Basics Program, <http://www.back-to-basics.net/efu/pdfs/secondary.pdf>.

Sokal, R R y Rohlf, F J (1999), *Introducción a la bioestadística*, Raverté, México D.F.

Solberg, E Evans, I, Penny, D y Maurice, D (1995), "Copper deficiency in cereal crops", Plant Industry Division, Alberta Agriculture, Food and Rural Development, <http://www.saanendoah.com/cudefsoil.html>.

Soltanpour, P N y Follett, R H (2005), "Soil test explanation", Crop Series No. 0.502, Colorado State University Cooperative Extension, <http://www.ext.colostate.edu/pubs/crops/00502.html>.



Sparks, D L *et al.* (Eds.) (1996), *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*, Soil Science Society of America, Madison.

SSC (Soil Science Courseware) (2002a), "Inorganic soil phosphorus and behavior of P in soil", SSC 341-Soil Fertility and Fertilizer, North Carolina State University, http://courses.soil.ncsu.edu/ssc341/chapters/ch5/main5_3_2.html.

SSC (Soil Science Courseware) (2002b), "Phosphorus: The P cycle, forms and functions of P", SSC 341-Soil Fertility and Fertilizer, North Carolina State University, http://courses.soil.ncsu.edu/ssc341/chapters/ch5/main5_1.html.

SSC (Soil Science Courseware) (2002c), "Calcium and magnesium", SSC 341-Soil Fertility and Fertilizer, North Carolina State University, http://courses.soil.ncsu.edu/ssc341/chapters/ch7/main7_2.html.

STA (Servicio Técnico Agrícola) (1998), "Escala de interpretación de análisis de suelos", http://www4.larural.es/servagro/fertilizacion/sueloagricola/escala_suelos.htm.

StatSoft Inc (1996), *Statistica for Windows (computer program manual) v 5.1*, Tulsa, OK.

Stevenson, F J (2005), "Biochemistry of phosphorus and sulfur transformations in soil" **en** "Introduction to soil biochemistry (course)", http://snr.osu.edu/current/courses/syllabus/pdfs/SS760_ch6Txt.pdf.

TNAU (Tamil Nadu Agricultural University) (2003), "FSS101. Geology and soil science", Resources for Undergraduate Programs, B.Sc. Forestry, <http://www.tnau.ac.in/notesbscag/for/sem1/FFS101.doc>.

TP (Técnica Profesional) (2003), "La protección del suelo: problemas y carencias", *Revista Guardia Civil*, No. 716, <http://www.guardiacivil.org/revista/result.jsp?id=727>.

Torres, M (2005), "Funcionamiento del K en el sistema suelo Planta", INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), Proyecto Fertilizar, <http://www.fertilizar.org.ar/articulos/Funcionamiento%20del%20K%20en%20el%20sistema%20suelo-planta.htm>.

UE (Universidad de Extremadura) (2004), "Gestión y conservación del suelo. Lección 3. Degradación física. Dificultad para la penetración de las raíces", Área de Edafología y Química Agrícola, Facultad de Ciencias, <http://www.unex.es/edafo/GCSP/GCSL3DegFisEnr.htm>.

UE (Universidad de Extremadura) (2005), "Programa de Edafología. Primer Curso de Ciencias Ambientales. Lección 5. Propiedades del suelo. Área de Edafología y Química



Agrícola, Facultad de Ciencias,
<http://www.unex.es/edafo/ECAP/ECAL5Programa.htm>

UM (University of Missouri) (2004), "Management of chlorine, copper, manganese, molybdenum, nickel and zinc", Department of Soil, Environmental and Atmospheric Sciences, A Student Extension Publication of Soil Fertility and Plant Nutrition (Soils/Plant Sci 313), University of Missouri, http://web.missouri.edu/~soilwww/313_W2004/micro1_2004.htm.

U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency) (2001), "Treatment technologies for site cleanup: Annual status report. 10th Edition", Office of Solid Waste and Emergency Response, http://clu-in.org/download/remed/asr/main_doc.pdf.

USDA (United States Department of Agriculture) (1990), "National soil survey handbook (Definition and purpose), Title 430-VI [Online]", Natural Resources Conservation Service, <http://soils.usda.gov/technical/handbook/>.

Valencia, C E y Hernández, A (2002), *Muestreo de suelos, preparación de muestras y guía de campo*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli.

Vázquez, A y Bautista, N (1993), *Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua*, Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, Texcoco.

Volke, T y Velasco, J A (2002), "Tecnologías de remediación para suelos contaminados", Instituto Nacional de Ecología (INE) - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México D.F., <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/372/tecnolog.html>.

Weber, M D y Singh, S S (1995), "Contamination of agricultural soils" en Acton, D F y Gregorich, L J (eds) (1995), "The health of our soils: Toward sustainable agriculture in Canada", Publication 1906/E, Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, http://res2.agr.gc.ca/publications/hs/chap09_e.htm.

Whiters, P J A, Edwards, A C y Foy, R H (2001), "Phosphorus cycling in UK agriculture and implications for phosphorus loss from soil", *Soil Use and Management*, v 17, 139-149.



ANEXOS



PAGINA EN BLANCO



ANEXO A

Descripción de Perfiles



PAGINA EN BLANCO



DESCRIPCIÓN MORFOLOGICA DEL PERFIL DEL SUELO

1 PERFIL No. 1 (Sitio Blanco)		8 Drenaje superficial :											
2 Descrito por : Guillermina Pérez C y Ramón Giles L.		9 Material parental : Material aluvial del Cuaternario											
3 Fecha : 22 marzo 2001		10 Vegetación (flora) : Alterada, uso agrícola de temporal											
4 Localización : Estado de Puebla		11 Fauna :											
5 Localidad : Tepatlaxco de Hidalgo		12 Clima :											
6 Altitud : 2320 msnm		Precipitación :											
7 Relieve : Lomeríos suaves, con pendiente convexa-cóncava suave		Temperatura :											
Observaciones generales : Se adiciona materia orgánica al suelo al incorporar a este el rastrojo.													
13 SUPERFICIE DEL SUELO Formación de costras duras, costras salinas, presencia de piedras y otros		Descubierta debido al uso para la agricultura.											
14 HORIZONTES		A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		A ₆	
15 PROFUNDIDAD (cm)		0-20		20 - 46		45 - 70		64 - 105		105 - 160		160 - en adelante	
16 ESPESOR DE LA CAPA (cm)		20		26		25		41		55		Se excavó a 180	
17 TRANSICIÓN A LA SIGUIENTE CAPA													
Transición (T) Forma (F)													
1 Marcada 1 Horizontal													
2 Media 2 Ondulada													
3 Tenue 3 Irregular													
18 HUMEDAD													
1 Seco													
2 Ligeramente húmedo													
3 Húmedo													
4 Muy húmedo													
5 Mojado													
6 Saturado													
19 COLOR													
En seco (S)													
En húmedo (H)													
Moteado													
Contraste Abundancia Tamaño													
1 Tenue 1 Pocas 1 Finísimas													
2 Marcado 2 Comunes 2 Muy finas													
3 Prominente 3 Muchas 3 Finas													
4 Medias													
5 Grandes													
20 TEXTURA													
21 PEDREGOSIDAD													
Cantidad													
1 Menos del 1%													
2 Muy pocas 1%													
3 Ligeramente 1 - 5%													
4 Pedregoso 5 - 20%													
5 Muy pedregoso 20 - 50%													
6 Extremadamente pedregoso 50 - 75%													
7 Las piedras dominan > 75%													
Tamaño en función del diámetro													
1 Grava													
2 Piedras pequeñas 1 - 5 cm													
3 Piedras medias 5 - 10 cm													
4 Piedras grandes 10 - 20 cm													
5 Piedras muy grandes > 20 cm													
Forma													
1 Angula													
2 Subangular													
3 Redonda													
4 Laminar													
5 Tabular													



HORIZONTE	A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		A ₆	
22 ESTRUCTURA <u>Forma</u> 1 Laminar 2 Columnar 3 Prismática 4 Polédrica angular 5 Polédrica subangular 6 Granular 7 Grumosa <u>Grado</u> 1 Sin estructura 2 Débilmente desarrollada 3 Moderadamente desarrollada 4 Fuertemente desarrollada	No presenta		Prismática subangular		No presenta		Prismática		Subangular		Prismática	
23 CONSISTENCIA <u>En seco (S)</u> 1 Suelto 2 Blando 3 Lig. duro 4 Duro 5 Muy duro 6 Ext. Duro <u>En húmedo (H)</u> 1 Suelto 2 Muy friable 3 Friable 4 Firme 5 Muy firme 6 Ext. firme <u>En muy Húmedo:</u> <u>Adhesividad (A)</u> 1 No adhesivo 2 Lig adhesivo 3 Adhesivo 4 Muy adhesivo <u>Plasticidad (P)</u> 1 No plástico 2 Lig. Plástico 3 Plástico 4 Muy plástico	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
	Suelto	Suelto	Blando	Muy friable	Suelto	Muy friable	Ligeramente duro	Friable	Blando	Friable	Blando	Friable
	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P
	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
24 ESTRATOS ENDURECIDOS Plintita endurecida Capas delgadas ferruginosas Duripanes Estratos petrocálcicos 24 B CÚTANES <u>Composición:</u> • Minerales arcillosos • Minerales arcillosos con óxido e hidróxidos de Fe. • Sesquióxidos • Óxidos e hidróxidos de Manganeseo • Sales solubles • Silicio	No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
24 C NÓDULOS <u>Composición</u> Carbonatos Yeso Compuestos de Fe y Mn. Concreciones negras Manganíferas Sulfuro ferroso Silice	No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
25 POROSIDAD <u>Num. Promedio por dm²</u> 1 Muy pocos 2 Pocos 3 Frecuentes 4 Numerosos <u>Diámetro en mm</u> 1 Microporos menos de 0.075 2 Muy finos 3 Finos 4 Medianos 5 Gruesos <u>Continuidad</u> 1 Continuo 2 Discontinuo <u>Orientación</u> 1 Verticales 2 Horizontales 3 Oblicuos 4 Caóticos <u>Localización</u> 1 Dentro de los agregados 2 Fuera de los agregados <u>Morfología</u> 1 Vesicular 2 Intersticial 3 Tabular	No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
	NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	NA		NA		NA		NA		NA		NA	
26 PERMEABILIDAD 1 Muy lenta 2 Lenta 3 Moderada 4 Rápida 5 Muy rápida NA = No aplica	Rápida		Rápida		Rápida		Rápida		Rápida		Bien drenado	



HORIZONTES		A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		A ₆	
		C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T
27 RAÍCES													
<u>Cantidad (C)</u>	<u>Tamaño (diámetro) (T)</u>												
1 Muy raras	1 Muy finas	Abundantes	Delgadas	Comunes	Delgadas	Raras	Delgadas	Raras	Medianas	Pocas	Medianas	Muy raras	Medianas
2 Raras	- 2 Finas menor de 1 mm												
3 Pocas	3 Delgadas 1 – 3 mm												
4 Comunes	4 Medianas 3 – 10 mm												
5 Abundantes	5 Gruesas 10 – 30 mm												
6 Ext. Abundantes	6 Muy gruesas > 30 mm												
28 FAUNA													
1 Túneles de lombrices													
2 Depositiones de lombrices													
3 Acaros		Insectos, arañas		No se observa		No se observa		No se observa		No se aprecia		No se aprecia	
4 Colémbolos													
5 Miriápodos													
6 Quilópodos													
29 REACCIONES													
pH		6		6		6		6.5		6.5		6.5	
Alofano		ND		ND		ND		ND		ND		ND	
HCl		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
H ₂ O ₂		M.O. poca, en bajo grado de descomposición		M.O. poca, en bajo grado de descomposición		No hay presencia de M-O-		No presenta		M.O. no se aprecia		M.O. no se aprecia	
Determinación de sales (SO ₄ , Cl, CO ₃ ²⁻)		ND		ND		ND		ND		ND		ND	
30 DRENAJE DEL PERFIL													
1 Excesivamente drenado													
2 Bien drenado		Bien drenado		Bien drenado		Excesivamente		Bien drenado		Bien drenado		Bien drenado	
3 Imperfectamente drenado													
4 Pobremente drenado													
5 Muy pobremente drenado													
EROSION													
<u>Clase</u>													
1 Eólica		Eólica		NA		NA		NA		NA		NA	
2 Hidrica laminar													
3 Hidrica en surcos													
4 Hidrica en cárcavas													
<u>Grado</u>													
1 Leve		Leve		NA		NA		NA		NA		NA	
2 Moderada													
3 Fuerte													

ND = No determinado NA = No aplica



DESCRIPCIÓN MORFOLOGICA DEL PERFIL DEL SUELO

1 PERFIL No. 2 (Sitio Tratado)		8 Drenaje superficial :											
2 Descrito por : Guillermina Pérez C y Ramón Giles L.		9 Material parental : Material aluvial del Cuaternario											
3 Fecha : 22 marzo 2001		10 Vegetación (flora) : Alterada, uso agrícola de temporal											
4 Localización : Estado de Puebla		11 Fauna :											
5 Localidad : Tepatlaxco de Hidalgo		12 Clima :											
6 Altitud : 2320 msnm		Precipitación :											
7 Relieve : Lomeríos suaves, con pendiente convexa-cóncava suave		Temperatura :											
Observaciones generales : Se adiciona materia orgánica al suelo al incorporar a este el rastrojo.													
13 SUPERFICIE DEL SUELO Formación de costras duras, costras salinas, presencia de piedras y otros		Descubierta debido al uso para la agricultura.											
14 HORIZONTES		A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		A ₆	
15 PROFUNDIDAD (cm)		0-15		15-53		53-100		100-124		124 - 160		160 - 190	
16 ESPESOR DE LA CAPA (cm)		15		38		47		24		36		30	
17 TRANSICIÓN A LA SIGUIENTE CAPA		T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
Transición (T)		Tenue	Horizon	Tenue	Horizon	Tenue	Horizon	Tenue	Horizon	Tenue	Horizon	Tenue	Horizon
Forma (F)		1 Marcada	1 Horizontal	2 Media	2 Ondulada	3 Tenue	3 Irregular						
18 HUMEDAD		Seco		Ligeramente húmedo		Ligeramente húmedo		Ligeramente húmedo		Ligeramente húmedo		Ligeramente húmedo	
19 COLOR		S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
En seco (S)		10 YR 5/2	10 YR 2/3	10 YR 5/4	10 YR 3/3	10 YR 4/4	10 YR 3/4	10 YR 5/3	10 YR 4/3	10 YR 4/4	10 YR 3/4	10 YR 4/4	10 YR 3/3
En húmedo (H)		Pardo amarillento grisáceo	Negro pardusco	Pardo amarillento grisáceo	Pardo oscuro	Pardo	Pardo oscuro	Pardo amarillento grisáceo	Pardo amarillento grisáceo	Pardo	Pardo oscuro	Pardo	Pardo oscuro
Moteado		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
Contraste		1 Tenue	1 Pocas	1 Finísimas	2 Marcado	2 Comunes	2 Muy finas	3 Prominente	3 Muchas	3 Finas	4 Medias	5 Grandes	
20 TEXTURA		Migajón limo arenoso		Migajón arenoso		Arcilla arenosa		Arenosa		Migajón arenoso		Arcilla arenosa	
21 PEDREGOSIDAD		Ligeramente pedregoso		Pedregoso		Sin pedregosidad		Pedregoso		Sin pedregosidad		Sin pedregosidad	
Cantidad		1 Menos del 1%	2 Muy pocas 1%	3 Ligeramente 1 - 5%	4 Pedregoso 5 - 20 %	5 Muy pedregoso 20 - 50 %	6 Extremadamente pedregoso 50 - 75 %	7 Las piedras dominan > 75 %					
Tamaño en función del diámetro		1 Grava	2 Piedras pequeñas 1 - 5 cm	3 Piedras medias 5 - 10 cm	4 Piedras grandes 10 - 20 cm	5 Piedras muy grandes > 20 cm							
Forma		1 Angular	2 Subangular	3 Redonda	4 Laminar	5 Tabular							



HORIZONTE	A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		A ₆	
22 ESTRUCTURA <u>Forma</u> 1 Laminar 2 Columnar 3 Prismática 4 Poliédrica angular 5 Poliédrica subangular 6 Granular 7 Grumosa <u>Grado</u> 1 Sin estructura 2 Débilmente desarrollada 3 Moderadamente desarrollada 4 Fuertemente desarrollada	Poliédrica Subangular		Poliédrica subangular		Poliédrica subangular		Poliédrica subangular		Poliédrica subangular		Poliédrica subangular	
	Débilmente desarrollada		Débilmente desarrollada		Débilmente desarrollada		Débilmente desarrollada		Débilmente desarrollada		Moderadamente desarrollada	
23 CONSISTENCIA <u>En seco (S)</u> <u>En húmedo (H)</u> 1 Suelto 1 Suelto 2 Blando 2 Muy friable 3 Lig. duro 3 Friable 4 Duro 4 Firme 5 Muy duro 5 Muy firme 6 Ext. Duro 6 Ext. firme	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
	Suelto	Suelto	Blando	Friable	Ligera Mente duro	Friable	Blando	Suelto	Blando	Friable	Ligera mente duro	Friable
<u>En muy Húmedo:</u> <u>Adhesividad (A)</u> <u>Plasticidad (P)</u> 1 No adhesivo 1 No plástico 2 Lig adhesivo 2 Lig. Plástico 3 Adhesivo 3 Plástico 4 Muy adhesivo 4 Muy plástico	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P
	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
24 ESTRATOS ENDURECIDOS Plintita endurecida Capas delgadas ferruginosas Duripanes Estratos petrocálcicos	No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
24 B CUTANES <u>Composición:</u> • Minerales arcillosos • Minerales arcillosos con óxido e hidróxidos de Fe. • Sesquióxidos • Óxidos e hidróxidos de Manganeseo • Sales solubles • Silicio	No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
24 C NODULOS <u>Composición</u> Carbonatos Yeso Compuestos de Fe y Mn. Concreciones negras Manganíferas Sulfuro ferroso Silice	No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
25 POROSIDAD <u>Num. Promedio por dm²</u> 1 Muy pocos 1 2 Pocos 1 - 50 3 Frecuentes 50 - 200 4 Numerosos más de 200 <u>Diámetro en mm</u> 1 Microporos menos de 0.075 2 Muy finos 0.075 - 1 3 Finos 1 - 2 4 Medianos 2 - 5 5 Gruesos más de 5 <u>Continuidad</u> 1 Continuo 2 Discontinuo <u>Orientación</u> 1 Verticales 2 Horizontales 3 Oblicuos 4 Caóticos <u>Localización</u> 1 Dentro de los agregados 2 Fuera de los agregados <u>Morfología</u> 1 Vesicular 2 Intersticial 3 Tabular	No se aprecia		No se aprecia		Pocos		No se aprecia		No se aprecia		Pocos	
	NA		NA		Pocos		NA		NA		Pocos	
	NA		NA		Muy finos		NA		NA		Muy finos	
	NA		NA		NA		NA		NA		Continuos	
	NA		NA		Horizontal		NA		NA		Horizontal	
	NA		NA		Dentro de los agregados		NA		NA		Dentro de los agregados	
	NA		NA		Vesicular		NA		NA		Vesicular	
26 PERMEABILIDAD 1 Muy lenta 2 Lenta 3 Moderada 4 Rápida 5 Muy rápida	Moderada		Rápida		Lenta		Rápida		Muy rápida		Lenta	

NA = No aplica



HORIZONTES		A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		A ₆	
		C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T
27 RAÍCES													
Cantidad (C)	Tamaño (diámetro) (T)	Abundan- tes	Finas y delgadas	Pocas	Finas	Pocas	Finas	No presenta		No presenta		No presenta	
1 Muy raras	1 Muy. finas												
2 Raras	- 2 Finas menor de 1 mm												
3 Pocas	3 Delgadas 1 – 3 mm												
4 Comunes	4 Medianas 3 – 10 mm												
5 Abundantes	5 Gruesas 10 – 30 mm												
6 Ext. Abundan	6 Muy gruesas > 30 mm												
28 FAUNA		No se aprecia		No se aprecia		No se aprecia		No se aprecia		No se aprecia		No se aprecia	
1 Túneles de lombrices													
2 Deposiciones de lombrices													
3 Ácaros													
4 Colémbolos													
5 Miriápodos													
6 Quilópodos													
29 REACCIONES		6		6		6		6.5		7		7	
pH		ND		ND		ND		ND		ND		ND	
Alofano		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
HCl		M.O. poca, en bajo grado de descomposición		M.O. poca, en bajo grado de descomposición		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
H ₂ O ₂		ND		ND		ND		ND		ND		ND	
Determinación de sales (SO ₄ , Cl, CO ₃ ²⁻)		ND		ND		ND		ND		ND		ND	
30 DRENAJE DEL PERFIL		Bien drenado		Bien drenado		Imperfectamente drenado		Bien drenado		Bien drenado		Imperfectamente drenado	
1 Excesivamente drenado													
2 Bien drenado													
3 Imperfectamente drenado													
4 Pobrementemente drenado													
5 Muy pobrementemente drenado													
EROSION		Eólica e hídrica		NA		NA		NA		NA		NA	
Clase													
1 Eólica													
2 Hídrica laminar													
3 Hídrica en surcos													
4 Hídrica en cárcavas													
Grado													
1 Leve													
2 Moderada													
3 Fuerte													

ND = No determinado

NA = No aplica



DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA DEL PERFIL DEL SUELO

1 PERFIL No. 3 (Sitio Tratado)	8 Drenaje superficial
2 Descrito por Ramón Giles L. y Guillermina Pérez C	9 Material parental Material aluvial del cuaternario
3 Fecha 22 marzo 2001	10 Vegetación (flora) alterada, uso agrícola de temporal
4 Localización Estado de Puebla	11 Fauna
5 Localidad Tepatlaxco de Hidalgo	12 Clima
6 Altitud 2320 msnm	Precipitación
7 Relieve Lomeríos suaves, con pendiente convexa-concava suave	Temperatura
Observaciones generales Se adiciona materia orgánica al suelo al incorporar a este el rastrojo.	

13 SUPERFICIE DEL SUELO Formación de costras duras, costras salinas, presencia de piedras y otros	Descubierta debido al uso para la agricultura.											
14 HORIZONTES	A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		A ₆	
15 Profundidad en cm	17 - 35		18 - 57		57 - 78		78 - 120		120 - 150		150 - 170	
16 Espesor de la capa en cm	18		39		21		42		30		20	
17 Transición a la siguiente capa	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
Transición	Marcada	Irregular	Tenue	Horizontal	Tenue	Horizontal	Tenue	Horizontal	Tenue	Horizontal	Marcada	Horizontal
Forma	1 marcada	1 horizontal	2 media	2 ondulada	3 tenue	3 irregular						
18 HUMEDAD	Seco		Húmedo		Húmedo		Húmedo		Húmedo		Húmedo	
1 seco												
2 ligeramente húmedo												
3 húmedo												
4 muy húmedo												
5 mojado												
6 saturado												
19 COLOR	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
Seco	10 YR 5/4	10 YR 3/4	10 YR 4/4	10 YR 3/4 Pardo opaco	10 YR 3/3	10 YR 3/2 Negro pardusco	10 YR 5/4	10 YR 4/3	10 YR 5/4	10 YR 4/3		10 YR 3/4 Pardo obscuro
húmedo	Pardo amarillento opaco	Pardo opaco	Pardo	Pardo opaco	Pardo opaco		Pardo amarillento opaco	Pardo amarillento opaco	Pardo amarillento opaco	Pardo amarillento opaco		
Moteado	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
Contraste	1 tenue	2 marcado	3 prominente	1 pocas	2 comunes	3 muchas	1 finisimasas	2 muy finas	3 finas	4 medias	5 grandes	
20 TEXTURA	Arcilla arenosa		Arcilla Arenosa		Arena		Arcilla arenosa		Arena		Arcilla (media)	
21 PEDREGOSIDAD	Pedregoso		Sin pedregosidad		Ligeramente pedregoso		Muy poco		Ligeramente pedregoso		Sin pedregosidad	
Cantidad												
1 sin menos del 1%												
2 muy pocas 1%												
3 ligeramente 1 – 5%												
4 pedregoso 5 – 20 %												
5 Muy pedregoso 20 – 50 %												
6 extrem. Pedregoso 50 – 75 %												
6 las piedras dominan más del 75 %												
tamaño en función diámetro												
1 grava												
2 Piedras pequeñas 1 – 5 cm												
3 piedras medias 5 – 10 cm												
4 Piedras grandes 10 – 20 cm												
5 piedras muy grandes mayor de 20 cm												
Forma												
1 angula												
2 subángular												
3 redonda												
4 laminar												
5 tabular												
Piedras pequeñas					Grava		2 mm y 1 cm		Grava			
Subangular					Subangular		Subángular		Subangular			



Horizonte	A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		A ₆	
22 ESTRUCTURA <u>Forma</u> 1 Laminar 2 Columnar 3 Prismática 4 Poliedrica angular 5 Poliedrica subangular 6 Granular 7 grumosa <u>Grado</u> 1 Sin estructura 2 Débilmente desarrollada 3 Moderada. Desarrollada 4 fuertemente desarrollada	Poliedrica subangular		Poliedrica subangular		Sin estructura		Poliedrica subangular		Sin estructura		Primatica subangular	
	Débilmente desarrollada		Moderadamente desarrollada				Débilmente desarrollada				Fuertemente desarrollada	
23 CONSISTENCIA <u>En seco</u> 1 suelto 2 blando 3 Lig. duro 4 duro 5 muy duro 6 Ext. Duro <u>en húmedo</u> 1 No plástico 2 muy friable 3 friable 4 firme 5 muy firme 6 Ext. firme <u>En muy Húmedo:</u> <u>Adhesividad</u> 1 No adhesivo 2 Lig adhesiv 3 Adhesivo 4 Muy adhe <u>Plasticidad</u> 1 No plástico 2 Lig. Plástico 3 Plástico 4 Muy plástico	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H
	Suelto	Friable	Blando	Friable	Suelto	Muy friable	Blando	Friable	Suelto	Muy friable		Firme
	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P
	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
24 ESTRATOS ENDURECIDOS Plintita endurecida Capas delgadas ferruginosas Duripanes Estratos petrocálcicos	No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
24 B CUTANES <u>Composición:</u> • Minerales arcillosos • Minerales arcillosos con oxido e hidroxidos de Fe. • Sesquioxidos • Oxidos e hidroxidos de Manganeseo • Sales solubles • Silicio	No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
24 C NODULOS <u>Composición</u> • Carbonatos • Yeso • Comp. De Fe y Mang. • Concreciones negras Manganíferas • Sulfuro ferroso • silice	No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	
25 POROSIDAD <u>Num. Promedio por dm²</u> 1 muy pocos 1 2 Pocos 1 - 50 3 frecuentes 50 - 200 4 Numerosos más de 200 <u>Diámetro en mm</u> 1 microporos menos de 0.075 2 Muy finos 0.075 - 1 3 Finos 1 - 2 4 medianos 2 - 5 5 gruesos más de 5 <u>Continuidad</u> 1 Continuo 2 discontinuo <u>Orientación</u> 1 verticales 2 horizontales 3 oblicuos 4 caóticos <u>Localización</u> 1 dentro de los agregados 2 fuera de los agregados <u>Morfología</u> 1 vesicular 2 intersticial 3 tabular	No se aprecia		Pocos		No presenta		No presenta		No presenta		Pocos	
	NA		Muy finos		NA		NA		NA		Muy finos	
	NA		NA		NA		NA		NA		NA	
	NA		Horizontales		NA		NA		NA		NA	
	NA		NA		NA		NA		NA		Entre agregados	
	NA		Vesicular		NA		NA		NA		NA	
26 PERMEABILIDAD 1 Muy lenta 2 Lenta 3 Moderada 4 Rápida 5 Muy rápida	Moderada		Lenta		Muy rápida		Moderada		Muy rápida		Muy lenta	
27 RAÍCES <u>Cantidad</u> 1 muy raras 2 Raras 3 pocas 4 comunes 5 Abundantes 6 ext. Abundan <u>tamaño (diámetro)</u> 1 muy. finas 2 finas menor de 1 mm 3 delgadas 1 - 3 mm 4 medianas 3 - 10 mm 5 gruesas 10 - 30 mm 6 muy gruesas mayor a 30 mm	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T	C	T
	Raras	Delgadas	No presenta		No presenta		No presenta		No presenta		No presenta	

NA = No aplica



Horizontes	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
28 FAUNA 1 túneles de lombrices 2 deposiciones de lombrices 3 Acaros 4 Colembolos 5 Miriapodos 6 Quilópodos	Insectos	No se aprecia	No se aprecia	No se aprecia	No se aprecia	No se aprecia
30 DRENAJE DEL PERFIL 1 excesivamente drenado 2 Bien drenado 3 imperfectamente drenado 4 pobremente drenado 5 muy pobremente drenado	Bien drenado	Imperfectamente drenado	Bien drenado	Bien drenado	Bien drenado	Pobremente drenado
REACCIONES						
29 Ph	6	6.5	6.5	6	6	6
Alofano						
HCl	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
H₂O₂	Moderada	Moderada	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
Det. sales (SO₄ , Cl⁻ , CO₃⁼)						
EROSION						
Clase						
1 Eólica	Eólica e hidrica	ND	ND	ND	ND	ND
2 hidrica laminar						
3 hidrica en surcos						
4 hidrica en carcavas						
Grado						
1 leve	Leve	ND	ND	ND	ND	ND
2 Moderada						
3 Fuerte						

Nd = No determinado NA = No aplica



PAGINA EN BLANCO



ANEXO B

Resultados por profundidad



PAGINA EN BLANCO



ÍNDICE DE ANEXO B

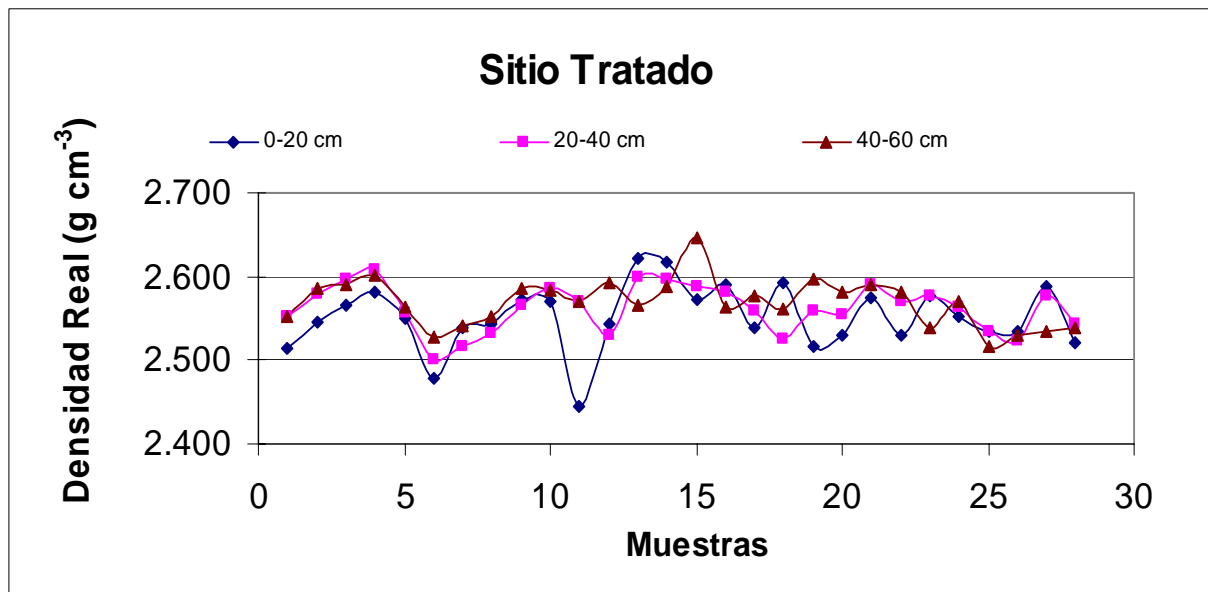
	Página
Densidad Real -----	115
Densidad Aparente-----	117
Porosidad (%)-----	119
Textura-----	121
pH-----	123
Nitrógeno Total-----	125
Nitritos-----	127
Nitratos-----	129
Calcio-----	131
Magnesio-----	133
Sodio-----	135
Potasio-----	137
Fósforo-----	139
Sulfato-----	141
Boro-----	143
Capacidad de Intercambio Catiónico-----	145
Hierro-----	147
Cobre-----	149
Zinc-----	151
Manganeso-----	153
Saturación de Bases-----	155
Relación Carbono Nitrógeno-----	157
Carbono Orgánico-----	159



PAGINA EN BLANCO

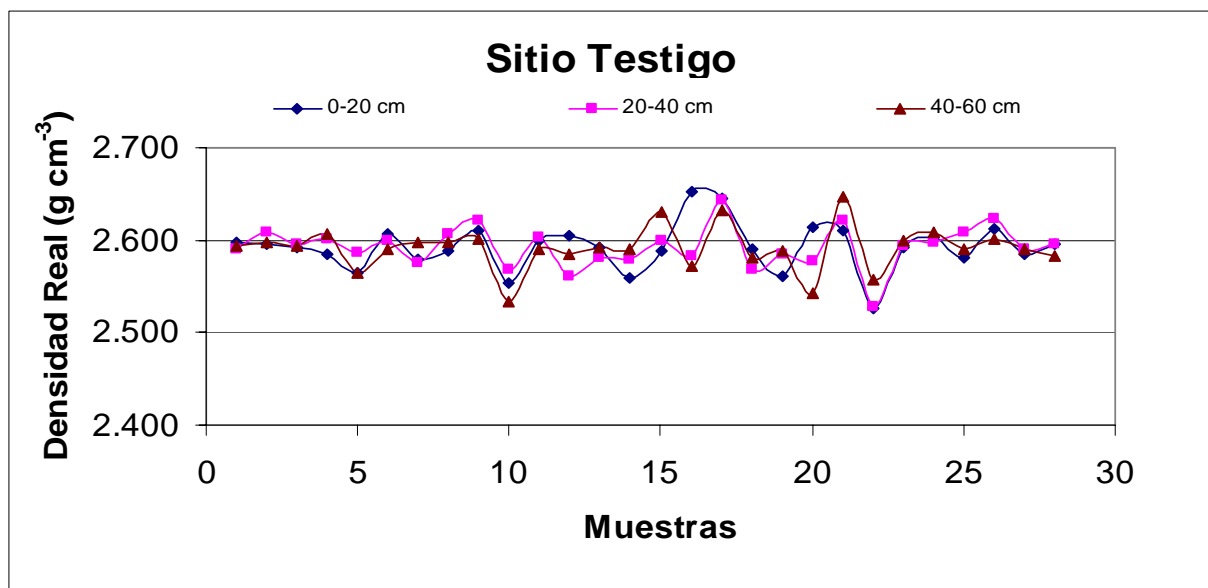


DENSIDAD REAL (g cm ⁻³)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	2.515	2.552	2.553
1B	2.545	2.580	2.586
1C	2.566	2.598	2.589
1D	2.581	2.608	2.600
2A	2.550	2.557	2.563
2B	2.478	2.501	2.527
2C	2.539	2.516	2.540
2D	2.542	2.532	2.551
3A	2.572	2.566	2.585
3B	2.570	2.585	2.584
3C	2.445	2.570	2.569
3D	2.542	2.531	2.593
4A	2.622	2.598	2.566
4B	2.618	2.597	2.588
4C	2.572	2.588	2.645
4D	2.589	2.582	2.564
5A	2.538	2.559	2.578
5B	2.593	2.525	2.562
5C	2.517	2.558	2.598
5D	2.529	2.555	2.581
7A	2.574	2.589	2.590
7B	2.531	2.570	2.582
7C	2.576	2.578	2.539
7D	2.553	2.563	2.571
8A	2.534	2.535	2.517
8B	2.535	2.523	2.531
8C	2.589	2.576	2.535
8D	2.521	2.544	2.540
Mínimo	2.445	2.501	2.517
Máximo	2.622	2.608	2.645
Promedio	2.551	2.562	2.569



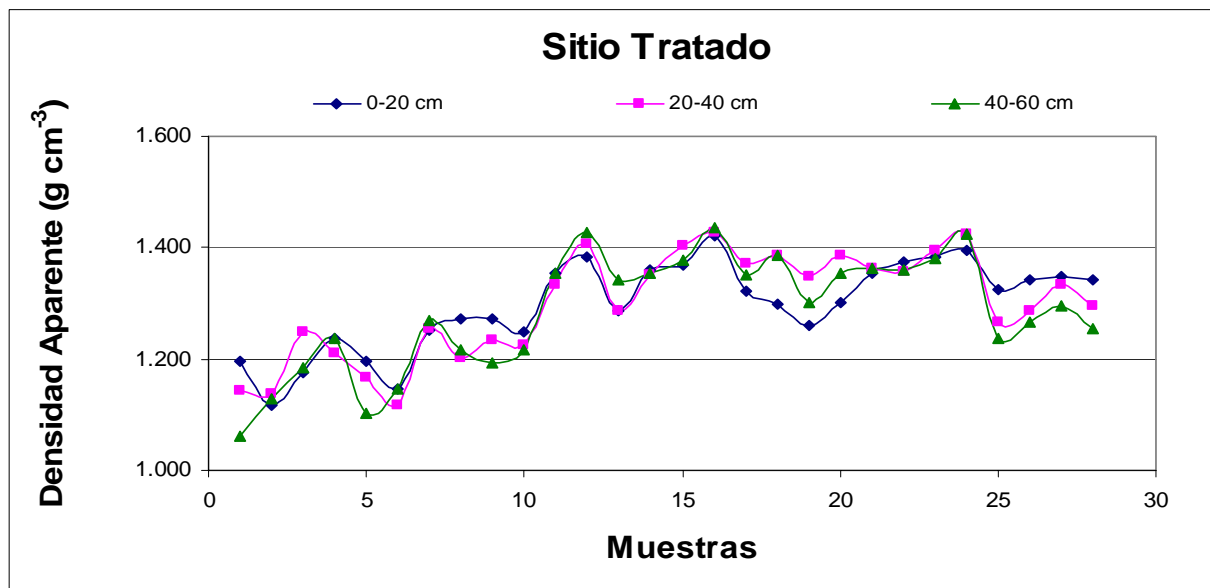


DENSIDAD REAL (g cm ⁻³)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	2.597	2.591	2.594
1G	2.596	2.608	2.598
1H	2.592	2.595	2.594
1I	2.584	2.602	2.606
2F	2.564	2.586	2.565
2G	2.606	2.599	2.591
2I	2.580	2.575	2.598
3F	2.588	2.607	2.597
3H	2.610	2.620	2.601
3I	2.554	2.569	2.534
4F	2.599	2.604	2.590
4G	2.604	2.561	2.586
4H	2.591	2.581	2.592
4I	2.559	2.580	2.590
5F	2.589	2.599	2.631
5G	2.653	2.583	2.572
5I	2.644	2.643	2.633
6F	2.591	2.568	2.581
6G	2.561	2.585	2.588
6H	2.615	2.578	2.543
6I	2.610	2.622	2.648
7F	2.526	2.529	2.557
7H	2.592	2.594	2.599
7I	2.604	2.598	2.609
8F	2.581	2.608	2.589
8G	2.611	2.623	2.601
8H	2.584	2.590	2.590
8I	2.596	2.596	2.583
Mínimo	2.526	2.529	2.534
Máximo	2.653	2.643	2.648
Promedio	2.592	2.593	2.591



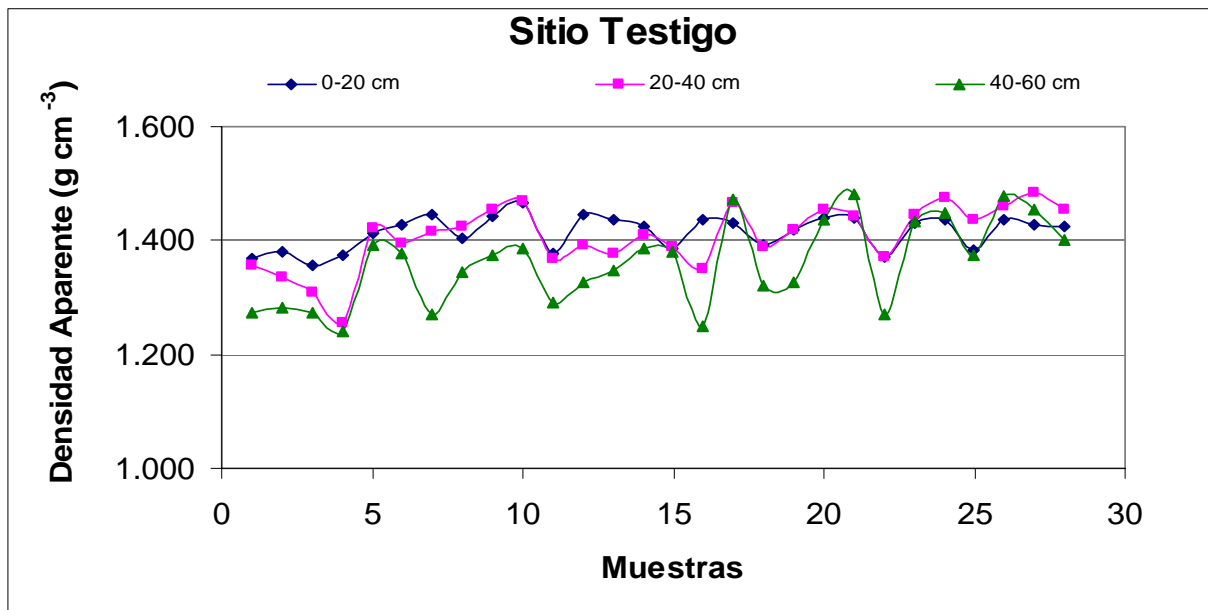


DENSIDAD APARENTE (g cm^{-3})			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	1.196	1.142	1.061
1B	1.116	1.136	1.130
1C	1.177	1.248	1.183
1D	1.236	1.210	1.237
2A	1.196	1.166	1.102
2B	1.146	1.118	1.148
2C	1.250	1.254	1.270
2D	1.271	1.203	1.218
3A	1.273	1.233	1.194
3B	1.248	1.225	1.215
3C	1.353	1.335	1.355
3D	1.382	1.406	1.428
4A	1.287	1.286	1.342
4B	1.361	1.352	1.353
4C	1.367	1.405	1.377
4D	1.422	1.428	1.436
5A	1.321	1.373	1.351
5B	1.298	1.385	1.386
5C	1.261	1.349	1.301
5D	1.301	1.386	1.353
7A	1.354	1.363	1.362
7B	1.376	1.356	1.359
7C	1.383	1.394	1.380
7D	1.396	1.425	1.423
8A	1.326	1.268	1.238
8B	1.342	1.287	1.268
8C	1.348	1.335	1.295
8D	1.343	1.297	1.255
Mínimo	1.116	1.118	1.061
Máximo	1.422	1.428	1.436
Promedio	1.298	1.299	1.286



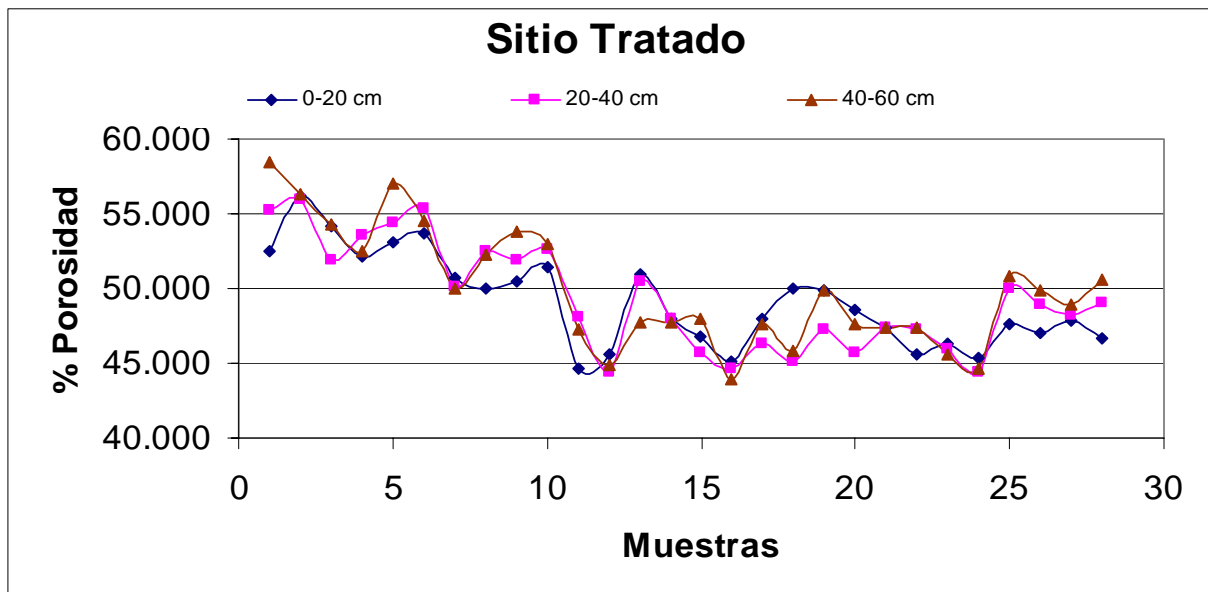


DENSIDAD APARENTE (g cm ⁻³)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	1.367	1.357	1.275
1G	1.380	1.337	1.283
1H	1.355	1.309	1.274
1I	1.374	1.257	1.240
2F	1.413	1.421	1.391
2G	1.426	1.395	1.378
2I	1.446	1.415	1.270
3F	1.405	1.426	1.343
3H	1.442	1.455	1.373
3I	1.466	1.470	1.385
4F	1.378	1.370	1.292
4G	1.445	1.391	1.327
4H	1.438	1.379	1.349
4I	1.424	1.410	1.385
5F	1.386	1.388	1.380
5G	1.438	1.350	1.248
5I	1.430	1.467	1.473
6F	1.391	1.390	1.320
6G	1.417	1.419	1.328
6H	1.439	1.454	1.438
6I	1.441	1.441	1.481
7F	1.372	1.370	1.271
7H	1.430	1.445	1.433
7I	1.438	1.475	1.447
8F	1.384	1.438	1.373
8G	1.435	1.459	1.478
8H	1.428	1.483	1.455
8I	1.424	1.454	1.401
Mínimo	1.355	1.257	1.240
Máximo	1.466	1.483	1.481
Promedio	1.415	1.408	1.360



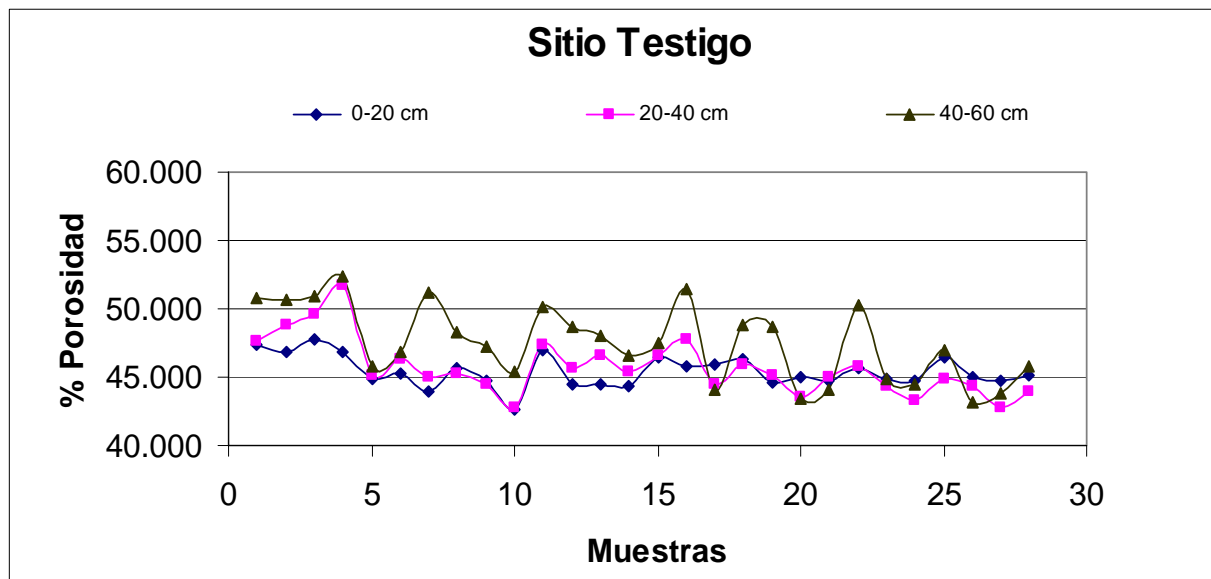


POROSIDAD (%)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	52.455	55.238	58.442
1B	56.133	55.948	56.311
1C	54.142	51.950	54.311
1D	52.121	53.592	52.444
2A	53.115	54.406	57.011
2B	53.744	55.304	54.583
2C	50.750	50.141	50.022
2D	50.007	52.485	52.270
3A	50.499	51.931	53.810
3B	51.452	52.595	52.959
3C	44.651	48.063	47.273
3D	45.626	44.446	44.905
4A	50.910	50.520	47.700
4B	47.992	47.953	47.711
4C	46.843	45.715	47.959
4D	45.084	44.691	43.977
5A	47.963	46.356	47.600
5B	49.964	45.154	45.880
5C	49.899	47.275	49.934
5D	48.553	45.751	47.578
7A	47.377	47.351	47.408
7B	45.625	47.240	47.382
7C	46.319	45.927	45.654
7D	45.328	44.402	44.650
8A	47.669	49.987	50.825
8B	47.048	48.982	49.914
8C	47.912	48.189	48.923
8D	46.718	49.015	50.586
Mínimo	44.651	44.402	43.977
Máximo	56.133	55.948	58.442
Promedio	49.139	49.307	49.929



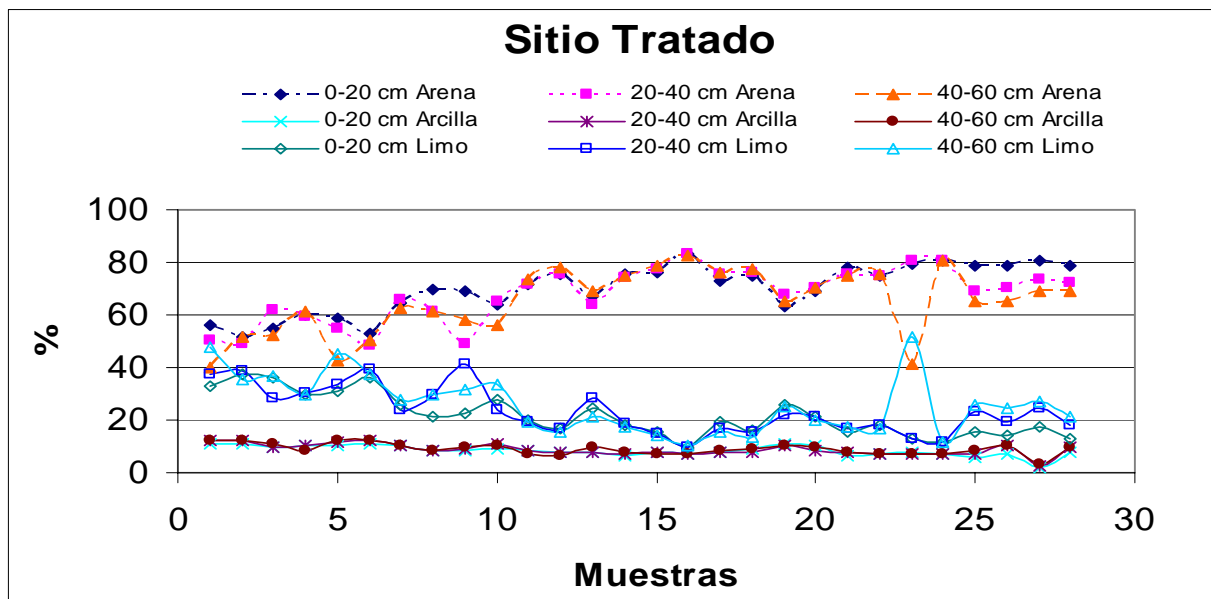


POROSIDAD (%)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	47.361	47.636	50.855
1G	46.853	48.751	50.632
1H	47.705	49.564	50.888
1I	46.817	51.699	52.423
2F	44.876	45.071	45.767
2G	45.275	46.337	46.831
2I	43.941	45.056	51.131
3F	45.708	45.314	48.274
3H	44.728	44.463	47.218
3I	42.619	42.763	45.347
4F	46.999	47.396	50.099
4G	44.509	45.701	48.677
4H	44.520	46.577	47.978
4I	44.355	45.344	46.526
5F	46.459	46.582	47.564
5G	45.809	47.742	51.474
5I	45.907	44.504	44.056
6F	46.325	45.873	48.838
6G	44.667	45.107	48.705
6H	44.979	43.605	43.445
6I	44.789	45.033	44.054
7F	45.693	45.808	50.290
7H	44.817	44.284	44.855
7I	44.781	43.248	44.534
8F	46.383	44.872	46.964
8G	45.034	44.368	43.182
8H	44.734	42.744	43.827
8I	45.155	43.985	45.742
Mínimo	42.619	42.744	43.182
Máximo	47.705	51.699	52.423
Promedio	45.421	45.694	47.506



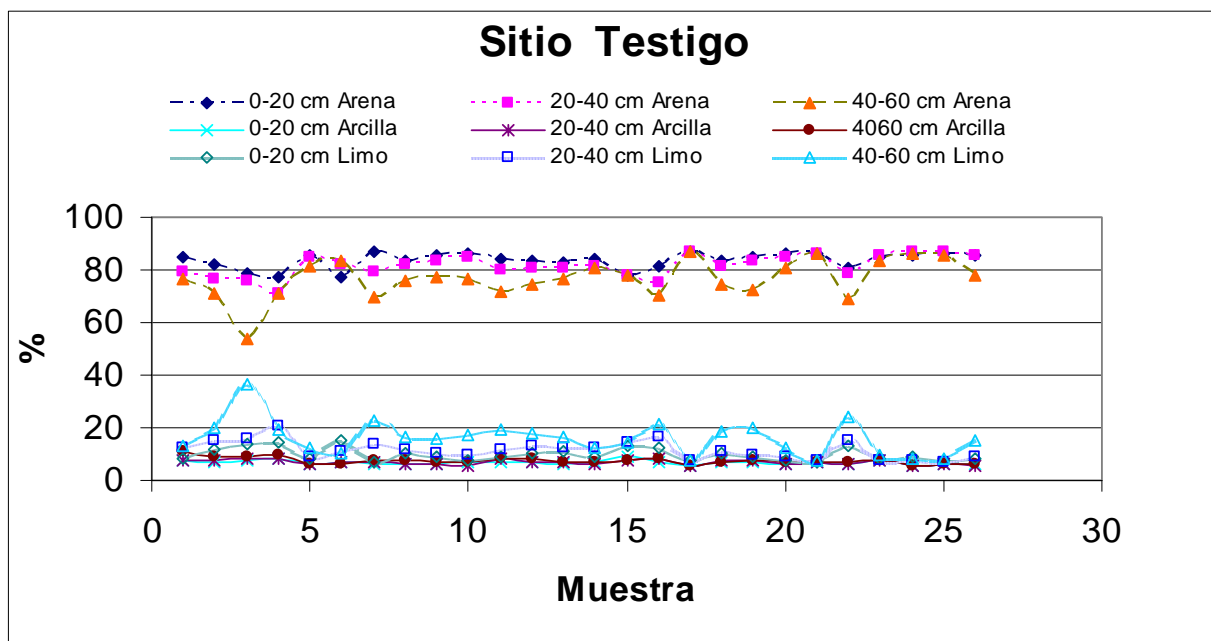


TEXTURA (%)									
Sitio Tratado									
Identificación de la muestra	Arena			Arcilla			Limo		
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
1A	56.25	50.25	40.00	10.86	12.36	12.36	32.89	37.39	47.64
1B	51.89	48.89	51.89	10.86	12.36	12.36	37.25	38.75	35.75
1C	54.61	62.00	52.25	9.36	9.36	10.86	36.03	28.64	36.89
1D	60.25	59.61	61.61	10.14	10.14	8.64	29.61	30.25	29.75
2A	58.61	54.61	42.36	10.14	11.64	12.39	31.25	33.75	45.25
2B	52.61	48.61	50.61	11.25	12.00	12.00	36.14	39.39	37.39
2C	64.36	66.11	62.36	10.14	10.14	10.14	25.50	23.75	27.5
2D	69.86	61.61	61.61	8.64	8.64	8.64	21.50	29.75	29.75
3A	68.83	49.33	58.33	8.28	9.28	9.78	22.89	41.39	31.89
3B	63.64	65.39	55.89	8.86	10.86	10.36	27.5	23.75	33.75
3C	71.72	71.72	73.47	8.14	8.64	7.14	20.14	19.64	19.39
3D	75.64	75.64	77.89	7.86	7.86	6.61	16.5	16.50	15.5
4A	67.39	63.64	69.14	7.86	7.86	9.36	24.75	28.50	21.5
4B	75.64	74.14	74.89	6.61	7.36	7.72	17.75	18.50	17.39
4C	76.39	77.14	78.64	7.86	7.86	7.36	15.75	15.00	14.00
4D	83.14	83.14	82.64	6.97	6.97	6.97	9.89	9.89	10.39
5A	73.14	75.28	76.03	7.72	7.72	8.22	19.14	17.00	15.75
5B	74.92	76.42	77.17	8.94	8.05	9.3	16.14	15.53	13.53
5C	63.28	67.78	65.03	11.22	10.08	10.08	25.5	22.14	24.89
5D	68.78	70.28	70.28	10.08	8.58	9.58	21.14	21.14	20.14
7A	78.25	75.64	74.89	6.25	7.50	7.50	15.50	16.86	17.61
7B	74.92	74.92	75.67	7.33	7.33	7.33	17.75	17.75	17.00
7C	79.39	80.39	41.50	7.50	7.00	7.00	13.11	12.61	51.5
7D	80.92	80.92	80.92	7.33	7.33	7.33	11.75	11.75	11.75
8A	78.64	69.140	65.39	5.83	7.33	8.58	15.53	23.53	26.03
8B	78.640	70.64	65.39	7.33	10.08	10.08	14.03	19.28	24.53
8C	80.505	73.27	69.27	1.98	2.48	3.48	17.51	24.25	27.25
8D	79.00	72.39	69.14	7.86	9.36	9.36	13.14	18.25	21.50
Mínimo	51.89	48.61	40	1.98	2.48	3.48	9.89	9.89	10.39
Máximo	83.14	83.14	82.64	11.25	12.36	12.39	37.25	41.39	51.50
Promedio	70.04	67.82	65.15	8.33	8.79	8.95	21.63	23.39	25.90



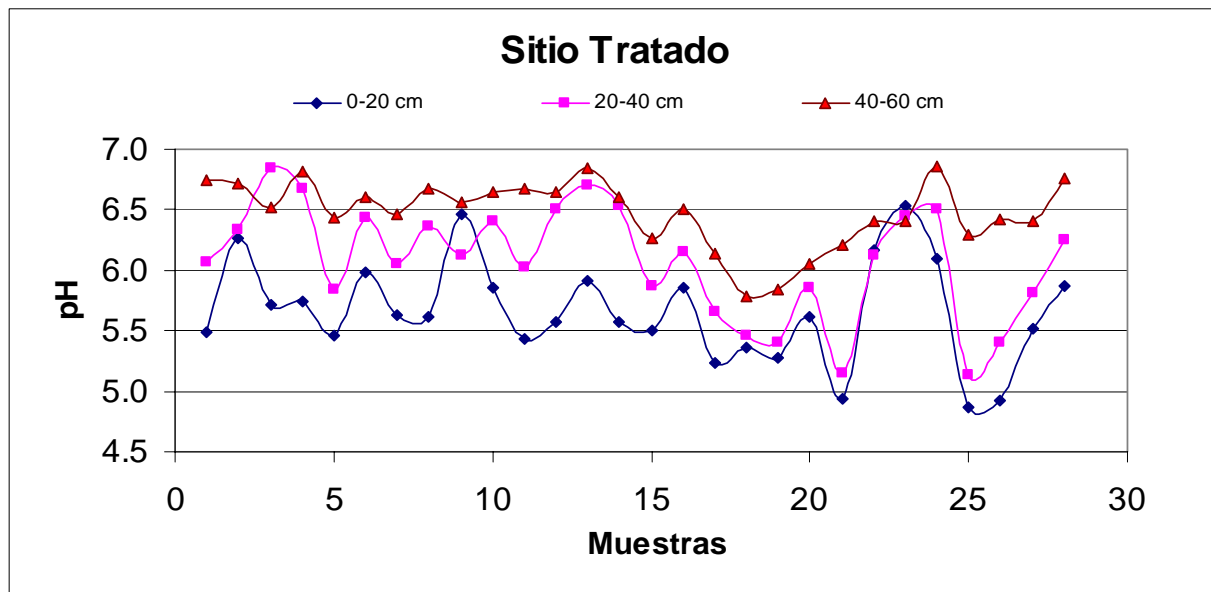


TEXTURA (%)									
Sitio Testigo									
Identificación de la muestra	Arena			Arcilla			Limo		
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
1F	84.64	79.39	76.39	7.36	7.86	10.72	8.00	12.75	12.89
1G	82.00	76.75	71.00	6.61	7.86	8.86	11.39	15.39	20.14
1H	78.64	75.64	53.89	7.86	8.22	9.22	13.50	16.14	36.89
1I	77.50	71.00	71.00	8.22	8.22	9.72	14.28	20.78	19.28
2F	85.36	84.61	81.61	6.25	6.25	6.25	8.39	9.14	12.14
2G	77.50	82.00	83.50	7.00	7.00	6.25	15.50	11.00	10.25
2I	86.86	79.36	69.50	6.25	7.00	7.50	6.89	13.64	23.00
3F	83.36	82.36	75.63	6.25	6.25	7.86	10.39	11.39	16.51
3H	85.33	83.72	77.47	5.89	6.25	7.00	8.78	10.03	15.53
3I	86.14	84.64	76.39	6.61	5.86	6.61	7.25	9.50	17.00
4F	83.89	80.03	72.03	6.97	8.08	8.58	9.14	11.89	19.39
4G	83.14	80.39	74.14	6.61	6.61	8.22	10.25	13.00	17.64
4H	82.64	80.53	76.39	6.22	6.97	6.97	11.14	12.50	16.64
4I	83.89	81.64	80.39	6.97	6.22	6.97	9.14	12.14	12.64
5F	77.92	77.92	77.92	8.94	7.69	7.69	13.14	14.39	14.39
5G	81.28	75.28	70.28	6.58	8.08	8.58	12.14	16.64	21.14
5I	86.89	86.89	86.89	5.86	5.86	5.86	7.25	7.25	7.25
6F	83.14	81.64	74.14	6.61	7.36	6.97	10.25	11.00	18.89
6G	84.64	83.14	72.39	6.61	7.36	7.86	8.75	9.50	19.75
6H	86.14	84.64	80.89	6.22	6.22	6.97	7.64	9.14	12.14
6I	86.50	86.14	86.14	6.61	6.61	6.61	6.89	7.25	7.25
7F	80.39	78.64	69.14	6.25	6.25	6.61	13.36	15.11	24.25
7H	84.67	85.42	83.17	7.33	7.33	7.33	8.00	7.25	9.50
7I	85.42	86.92	86.17	5.83	5.83	5.83	8.75	7.25	8.00
8H	86.23	86.98	85.48	6.13	6.13	6.13	7.64	6.89	8.39
8I	85.48	85.48	78.23	6.31	5.74	6.49	8.21	8.78	15.28
Mínimo	77.50	71.00	53.89	5.83	5.74	5.83	6.89	6.89	7.25
Máximo	86.89	86.98	86.89	8.94	8.22	10.72	15.50	20.78	36.89
Promedio	83.45	81.58	76.55	6.71	6.89	7.45	9.85	11.53	16.01



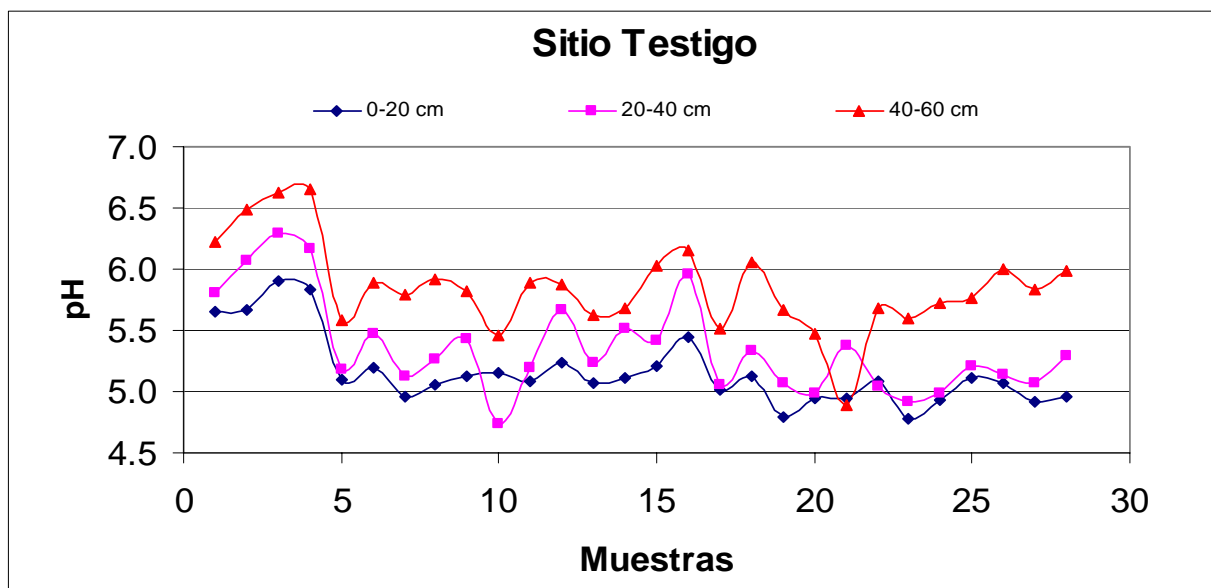


pH (adimensional) (1:2 Agua)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	5.49	6.07	6.75
1B	6.27	6.34	6.72
1C	5.72	6.84	6.52
1D	5.75	6.68	6.81
2A	5.46	5.84	6.44
2B	5.99	6.44	6.61
2C	5.63	6.05	6.47
2D	5.61	6.36	6.68
3A	6.47	6.13	6.56
3B	5.85	6.41	6.65
3C	5.43	6.03	6.67
3D	5.57	6.5	6.65
4A	5.91	6.71	6.85
4B	5.57	6.54	6.61
4C	5.5	5.87	6.27
4D	5.85	6.15	6.51
5A	5.24	5.66	6.14
5B	5.36	5.46	5.79
5C	5.28	5.41	5.84
5D	5.62	5.85	6.05
7A	4.94	5.15	6.21
7B	6.17	6.12	6.41
7C	6.53	6.45	6.4
7D	6.09	6.5	6.86
8A	4.87	5.13	6.29
8B	4.92	5.4	6.42
8C	5.51	5.82	6.41
8D	5.87	6.25	6.76
Mínimo	4.87	5.13	5.79
Máximo	6.53	6.84	6.86
Promedio	5.66	6.08	6.48



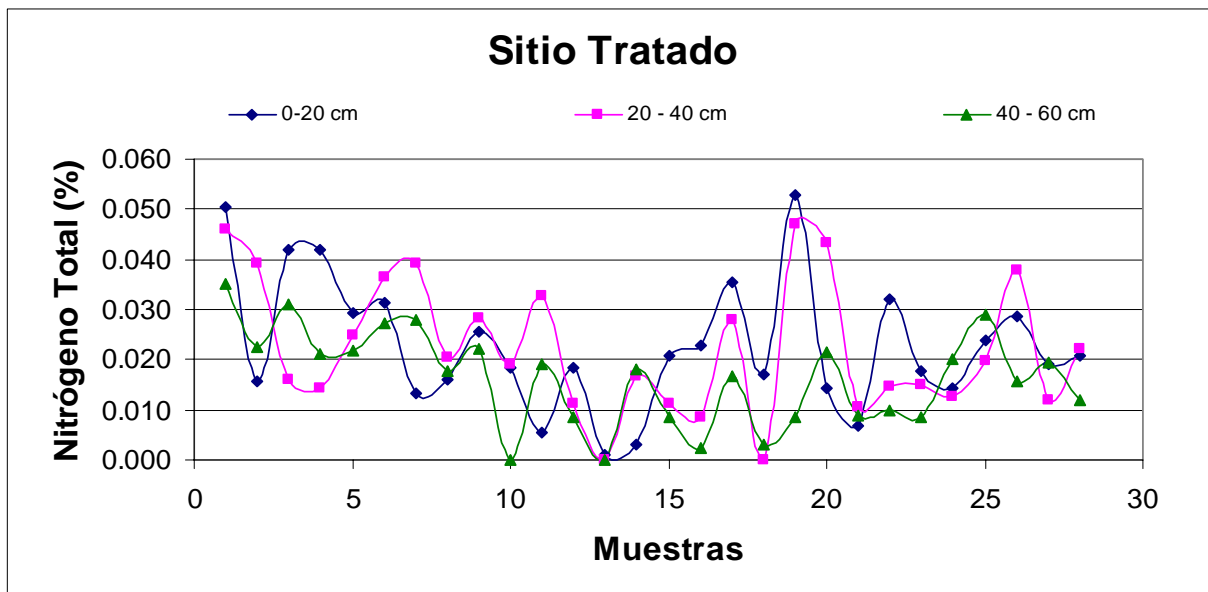


pH (adimensional) (1:2 Agua)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	5.65	5.80	6.22
1G	5.66	6.07	6.49
1H	5.90	6.29	6.63
1I	5.83	6.16	6.65
2F	5.10	5.18	5.59
2G	5.20	5.47	5.89
2I	4.96	5.13	5.79
3F	5.05	5.27	5.91
3H	5.12	5.43	5.82
3I	5.15	4.74	5.46
4F	5.08	5.20	5.89
4G	5.24	5.66	5.87
4H	5.07	5.24	5.63
4I	5.11	5.51	5.68
5F	5.21	5.42	6.03
5G	5.45	5.96	6.15
5I	5.02	5.05	5.52
6F	5.12	5.34	6.05
6G	4.79	5.07	5.67
6H	4.95	4.98	5.47
6I	4.95	5.37	4.89
7F	5.08	5.04	5.68
7H	4.78	4.91	5.60
7I	4.93	4.98	5.72
8F	5.11	5.21	5.77
8G	5.07	5.14	6.00
8H	4.91	5.07	5.83
8I	4.96	5.29	5.99
Mínimo	4.78	4.74	4.89
Máximo	5.90	6.29	6.65
Promedio	5.16	5.36	5.85



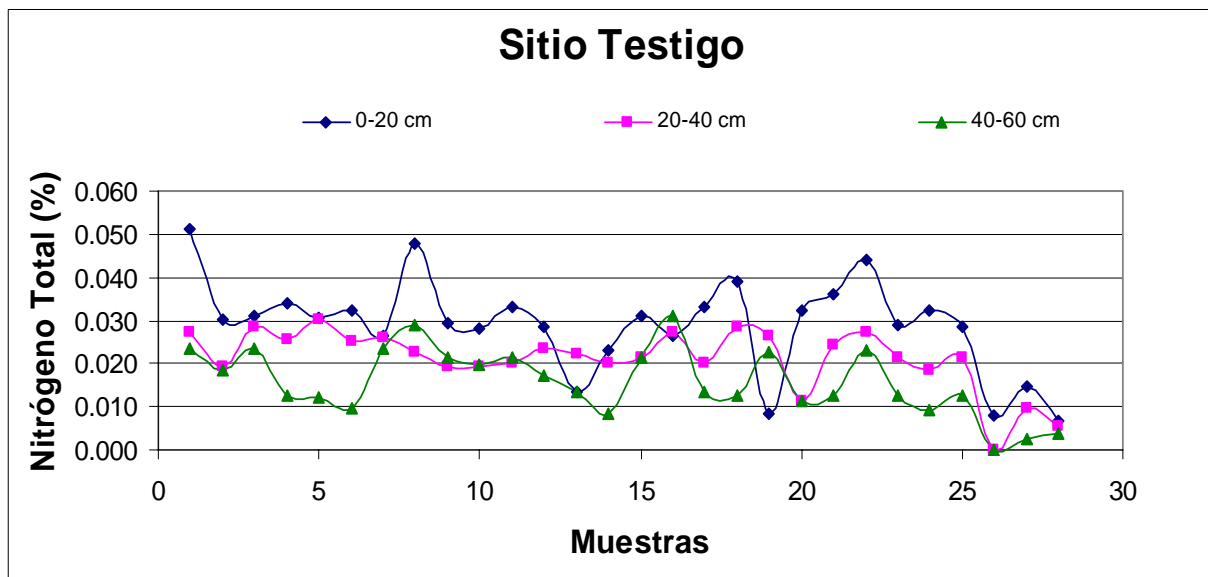


NITROGENO TOTAL (%)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	0.050	0.046	0.035
1B	0.016	0.039	0.022
1C	0.042	0.016	0.031
1D	0.042	0.014	0.021
2A	0.029	0.025	0.022
2B	0.031	0.037	0.027
2C	0.013	0.039	0.028
2D	0.016	0.020	0.018
3A	0.026	0.028	0.022
3B	0.018	0.019	0.000
3C	0.005	0.033	0.019
3D	0.019	0.011	0.008
4A	0.001	0.000	0.000
4B	0.003	0.017	0.018
4C	0.021	0.011	0.008
4D	0.023	0.008	0.003
5A	0.035	0.028	0.017
5B	0.017	0.000	0.003
5C	0.053	0.047	0.008
5D	0.014	0.043	0.021
7A	0.007	0.010	0.009
7B	0.032	0.015	0.010
7C	0.018	0.015	0.008
7D	0.014	0.013	0.020
8A	0.024	0.020	0.029
8B	0.029	0.038	0.016
8C	0.019	0.012	0.019
8D	0.021	0.022	0.012
Mínimo	0.001	0.000	0.000
Máximo	0.053	0.047	0.035
Promedio	0.023	0.022	0.016



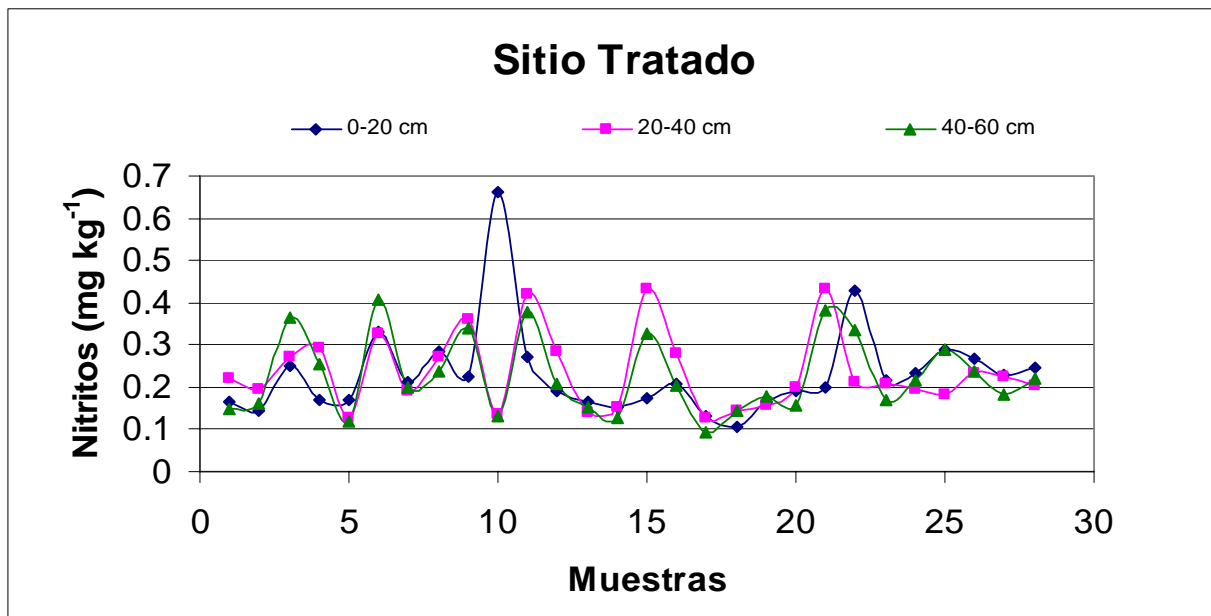


NITRÓGENO TOTAL (%)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	0.051	0.027	0.024
1G	0.030	0.019	0.018
1H	0.031	0.029	0.024
1I	0.034	0.026	0.013
2F	0.031	0.030	0.012
2G	0.032	0.025	0.010
2I	0.026	0.026	0.024
3F	0.048	0.023	0.029
3H	0.029	0.019	0.021
3I	0.028	0.019	0.020
4F	0.033	0.020	0.021
4G	0.029	0.024	0.017
4H	0.013	0.022	0.013
4I	0.023	0.020	0.008
5F	0.031	0.022	0.021
5G	0.027	0.027	0.031
5I	0.033	0.020	0.013
6F	0.039	0.029	0.013
6G	0.008	0.026	0.023
6H	0.032	0.011	0.011
6I	0.036	0.024	0.013
7F	0.044	0.027	0.023
7H	0.029	0.021	0.013
7I	0.032	0.019	0.009
8F	0.029	0.021	0.013
8G	0.008	0.000	0.000
8H	0.015	0.010	0.002
8I	0.007	0.005	0.004
Mínimo	0.007	0.000	0.000
Máximo	0.051	0.030	0.031
Promedio	0.029	0.021	0.016



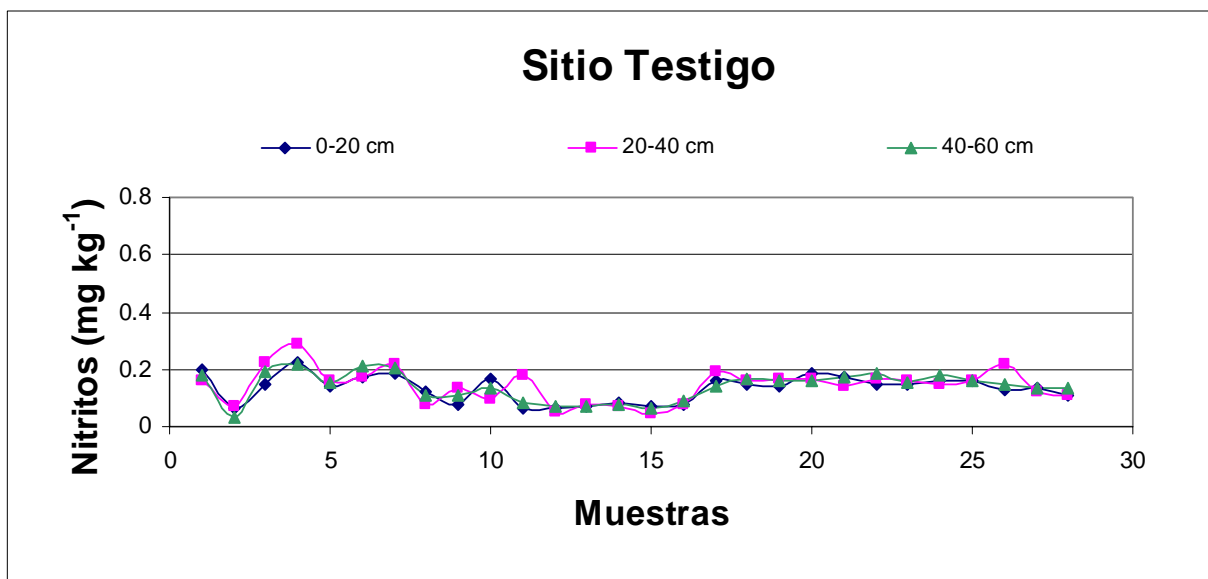


NITRITOS (mg kg^{-1})			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	0.167	0.219	0.149
1B	0.143	0.196	0.163
1C	0.251	0.272	0.364
1D	0.169	0.291	0.253
2A	0.168	0.127	0.117
2B	0.332	0.328	0.407
2C	0.211	0.191	0.201
2D	0.285	0.272	0.237
3A	0.226	0.359	0.34
3B	0.661	0.136	0.13
3C	0.27	0.421	0.376
3D	0.192	0.283	0.207
4A	0.165	0.138	0.151
4B	0.153	0.152	0.128
4C	0.174	0.431	0.328
4D	0.208	0.28	0.202
5A	0.132	0.129	0.092
5B	0.104	0.145	0.145
5C	0.166	0.159	0.177
5D	0.191	0.198	0.158
7A	0.199	0.434	0.382
7B	0.429	0.214	0.337
7C	0.216	0.209	0.171
7D	0.235	0.195	0.217
8A	0.29	0.184	0.287
8B	0.267	0.233	0.239
8C	0.23	0.223	0.184
8D	0.244	0.203	0.22
Mínimo	0.104	0.127	0.092
Máximo	0.661	0.434	0.407
Promedio	0.231	0.237	0.227



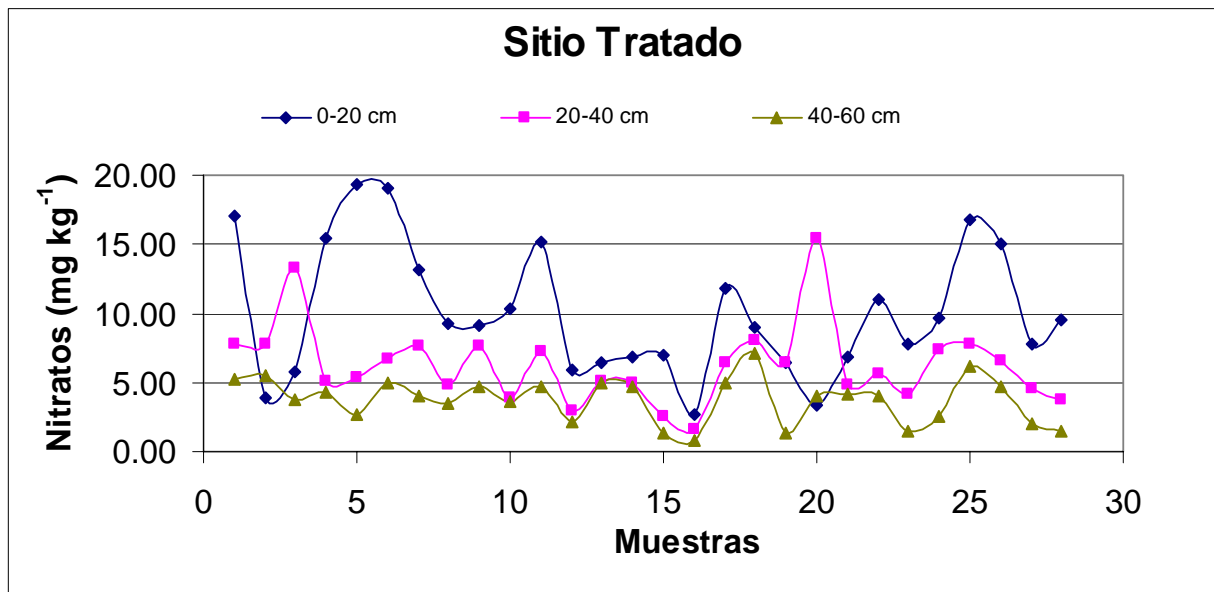


NITRITOS (mg kg^{-1})			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	0.199	0.16	0.181
1G	0.067	0.069	0.031
1H	0.145	0.227	0.191
1I	0.224	0.288	0.22
2F	0.139	0.157	0.154
2G	0.175	0.172	0.214
2I	0.188	0.215	0.206
3F	0.123	0.077	0.107
3H	0.076	0.132	0.11
3I	0.164	0.094	0.134
4F	0.064	0.178	0.085
4G	0.064	0.054	0.07
4H	0.072	0.08	0.073
4I	0.083	0.071	0.074
5F	0.068	0.045	0.062
5G	0.079	0.079	0.09
5I	0.162	0.19	0.144
6F	0.149	0.162	0.166
6G	0.142	0.169	0.159
6H	0.185	0.164	0.157
6I	0.174	0.144	0.173
7F	0.148	0.169	0.186
7H	0.149	0.162	0.154
7I	0.159	0.148	0.177
8F	0.16	0.161	0.159
8G	0.127	0.215	0.149
8H	0.137	0.124	0.135
8I	0.112	0.112	0.132
Mínimo	0.064	0.045	0.031
Máximo	0.224	0.288	0.22
Promedio	0.133	0.144	0.139



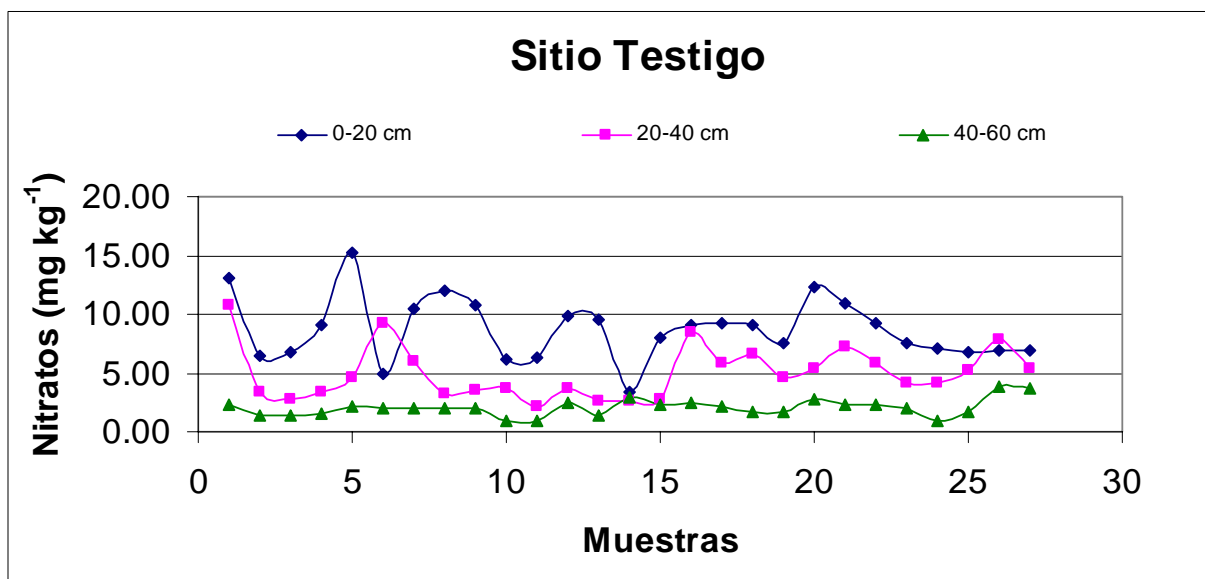


NITRATOS (mg kg ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	17.043	7.831	5.221
1B	3.827	7.754	5.567
1C	5.749	13.228	3.766
1D	15.441	5.089	4.247
2A	19.392	5.403	2.743
2B	19.088	6.722	5.013
2C	13.169	7.699	4.059
2D	9.195	4.818	3.423
3A	9.154	7.631	4.690
3B	10.369	3.944	3.670
3C	15.130	7.289	4.634
3D	5.859	2.963	2.162
4A	6.505	5.082	4.919
4B	6.827	4.998	4.642
4C	6.993	2.502	1.373
4D	2.648	1.576	0.835
5A	11.778	6.411	4.908
5B	9.046	8.095	7.125
5C	6.387	6.438	1.296
5D	3.380	15.438	3.968
7A	6.891	4.836	4.098
7B	11.041	5.576	3.973
7C	7.724	4.213	1.418
7D	9.660	7.423	2.542
8A	16.830	7.776	6.223
8B	14.983	6.637	4.671
8C	7.771	4.607	1.987
8D	9.521	3.701	1.500
Mínimo	2.648	1.576	0.835
Máximo	19.392	15.438	7.125
Promedio	10.050	6.274	3.738



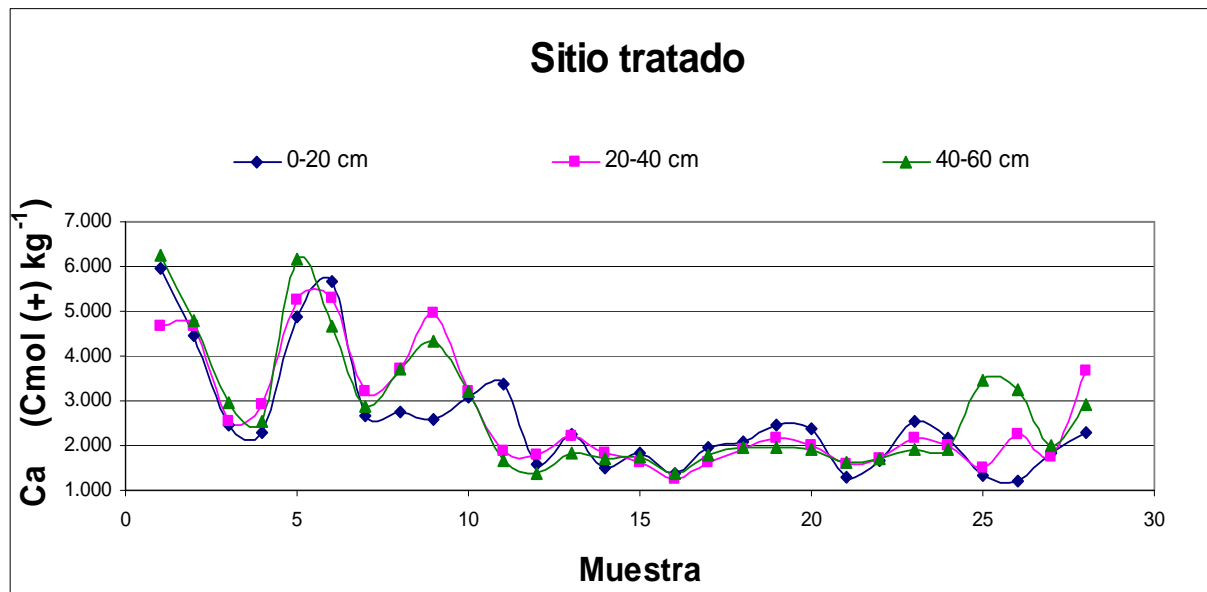


NITRATOS (mg kg ⁻¹)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	13.039	10.782	2.235
1G	6.510	3.440	1.340
1H	6.718	2.723	1.404
1I	9.046	3.327	1.507
2F	15.250	4.663	2.195
2G	4.914	9.236	1.949
2I	10.417	5.958	1.936
3F	11.980	3.250	2.010
3H	10.760	3.590	2.060
3I	6.160	3.760	0.960
4F	6.300	2.160	0.980
4G	9.890	3.750	2.490
4H	9.500	2.650	1.320
4I	3.340	2.560	2.960
5F	8.010	2.700	2.340
5G	9.110	8.480	2.440
5I	9.178	5.913	2.124
6F	9.082	6.673	1.677
6G	7.509	4.614	1.643
6H	12.373	5.355	2.825
6I	10.942	7.213	2.279
7F	9.212	5.853	2.273
7H	7.540	4.147	2.020
7I	7.119	4.200	0.959
8F	6.779	5.165	1.703
8G	6.923	7.825	3.771
8H	6.883	5.456	3.625
8I	5.688	5.428	4.508
Mínimo	3.340	2.160	0.959
Máximo	15.250	10.782	4.508
Promedio	8.578	5.031	2.126



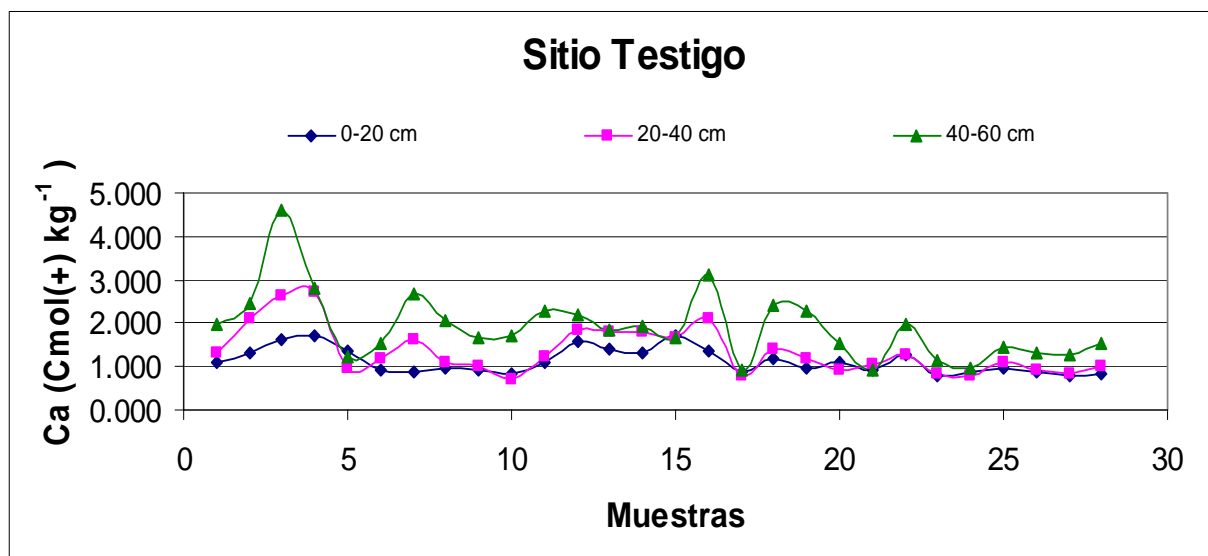


CALCIO (cmol(+) kg ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	5.942	4.665	6.245
1B	4.442	4.649	4.784
1C	2.450	2.554	2.938
1D	2.289	2.910	2.542
2A	4.895	5.229	6.175
2B	5.672	5.287	4.683
2C	2.655	3.193	2.872
2D	2.741	3.696	3.713
3A	2.586	4.945	4.326
3B	3.081	3.227	3.213
3C	3.366	1.889	1.668
3D	1.584	1.801	1.364
4A	2.250	2.192	1.850
4B	1.501	1.829	1.694
4C	1.825	1.634	1.736
4D	1.363	1.246	1.394
5A	1.969	1.610	1.803
5B	2.078	1.911	1.964
5C	2.468	2.148	1.947
5D	2.396	1.999	1.909
7A	1.290	1.572	1.631
7B	1.664	1.722	1.713
7C	2.531	2.163	1.900
7D	2.148	2.013	1.897
8A	1.315	1.486	3.455
8B	1.206	2.261	3.250
8C	1.833	1.747	1.992
8D	2.301	3.682	2.927
Mínimo	1.206	1.246	1.364
Máximo	5.942	5.287	6.245
Promedio	2.566	2.688	2.771



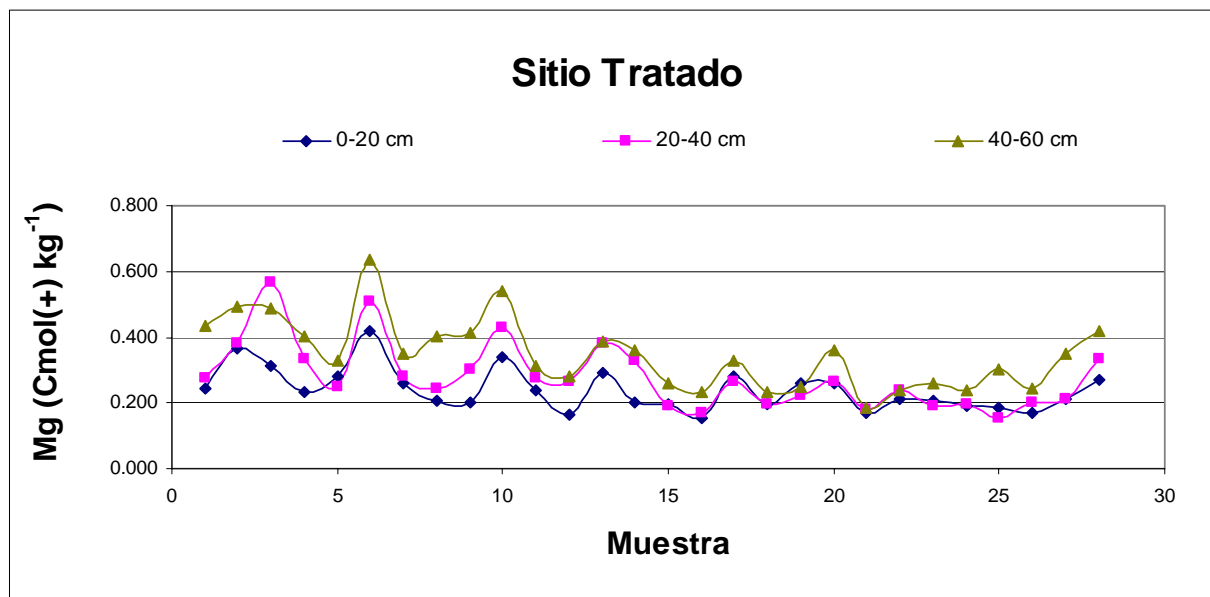


CALCIO (cmol(+) kg ⁻¹)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	1.112	1.316	1.987
1G	1.310	2.107	2.450
1H	1.637	2.629	4.585
1I	1.727	2.716	2.808
2F	1.338	0.944	1.227
2G	0.941	1.198	1.550
2I	0.879	1.618	2.692
3F	0.964	1.115	2.077
3H	0.903	1.006	1.646
3I	0.840	0.714	1.720
4F	1.114	1.245	2.296
4G	1.569	1.863	2.206
4H	1.390	1.780	1.857
4I	1.298	1.802	1.928
5F	1.704	1.649	1.680
5G	1.357	2.114	3.127
5I	0.882	0.775	0.900
6F	1.198	1.391	2.412
6G	0.947	1.184	2.296
6H	1.118	0.937	1.556
6I	0.932	1.060	0.909
7F	1.287	1.276	1.962
7H	0.805	0.840	1.145
7I	0.878	0.792	0.986
8F	0.945	1.087	1.445
8G	0.890	0.939	1.334
8H	0.778	0.849	1.268
8I	0.852	0.996	1.527
Mínimo	0.778	0.714	0.900
Máximo	1.727	2.716	4.585
Promedio	1.128	1.355	1.913



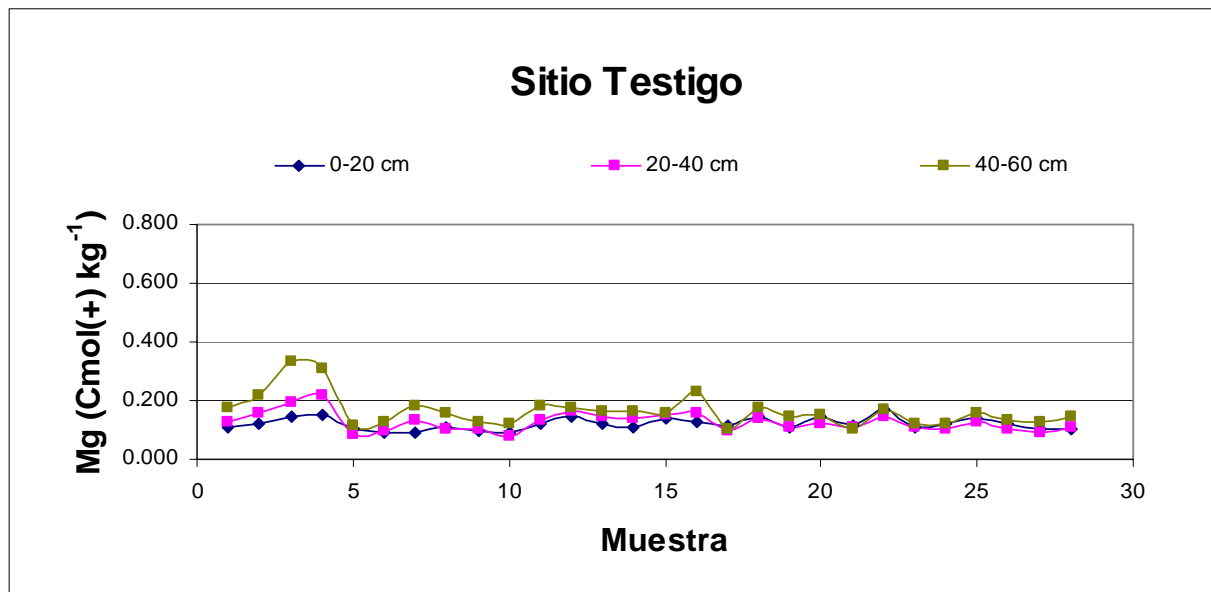


MAGNESIO (cmol(+) kg ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	0.242	0.278	0.434
1B	0.365	0.384	0.492
1C	0.311	0.565	0.490
1D	0.231	0.335	0.404
2A	0.281	0.249	0.329
2B	0.420	0.506	0.637
2C	0.258	0.280	0.352
2D	0.208	0.243	0.404
3A	0.200	0.303	0.415
3B	0.340	0.430	0.539
3C	0.240	0.277	0.312
3D	0.165	0.267	0.281
4A	0.291	0.380	0.385
4B	0.203	0.331	0.359
4C	0.195	0.190	0.257
4D	0.154	0.170	0.233
5A	0.281	0.265	0.329
5B	0.195	0.195	0.234
5C	0.258	0.223	0.248
5D	0.260	0.266	0.358
7A	0.170	0.179	0.186
7B	0.211	0.240	0.239
7C	0.205	0.193	0.260
7D	0.192	0.193	0.240
8A	0.184	0.152	0.301
8B	0.169	0.201	0.244
8C	0.213	0.214	0.348
8D	0.273	0.334	0.418
Mínimo	0.154	0.152	0.186
Máximo	0.420	0.565	0.637
Promedio	0.240	0.280	0.347



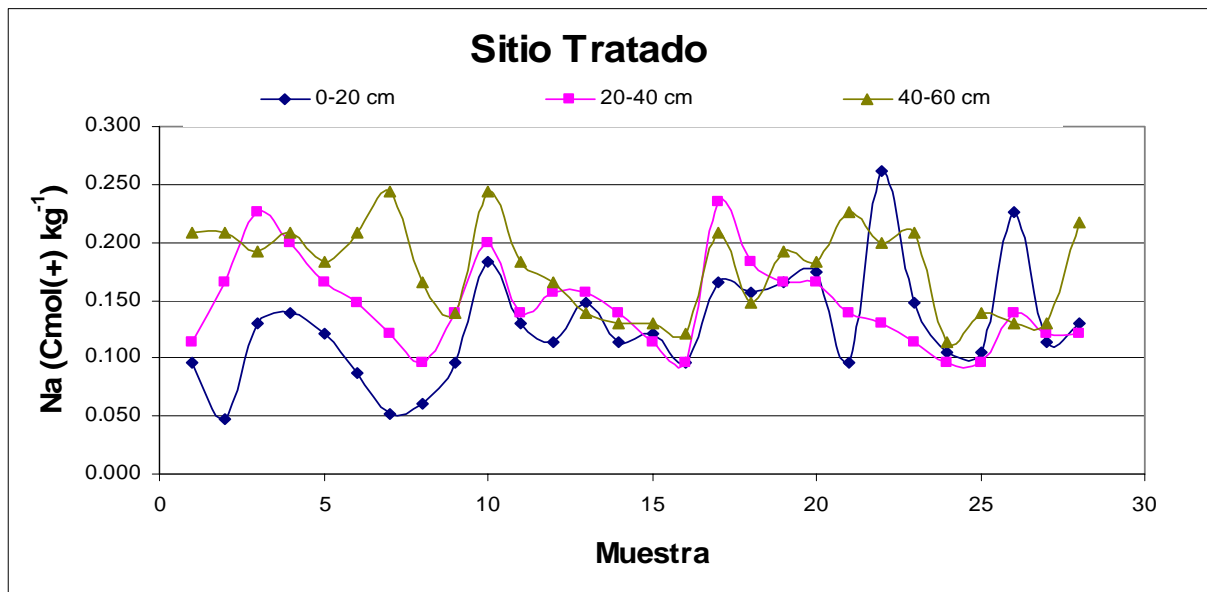


MAGNESIO (cmol(+) kg ⁻¹)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	0.109	0.128	0.175
1G	0.121	0.156	0.221
1H	0.146	0.193	0.331
1I	0.153	0.215	0.311
2F	0.100	0.083	0.113
2G	0.093	0.099	0.128
2I	0.088	0.131	0.180
3F	0.111	0.102	0.156
3H	0.099	0.102	0.128
3I	0.088	0.076	0.123
4F	0.122	0.132	0.183
4G	0.143	0.163	0.177
4H	0.124	0.146	0.162
4I	0.109	0.138	0.161
5F	0.141	0.150	0.156
5G	0.125	0.161	0.228
5I	0.113	0.094	0.101
6F	0.143	0.137	0.179
6G	0.110	0.111	0.144
6H	0.145	0.118	0.153
6I	0.116	0.111	0.106
7F	0.167	0.144	0.171
7H	0.111	0.106	0.119
7I	0.120	0.102	0.121
8F	0.138	0.126	0.158
8G	0.121	0.102	0.134
8H	0.104	0.094	0.125
8I	0.104	0.111	0.148
Mínimo	0.088	0.076	0.101
Máximo	0.167	0.215	0.331
Promedio	0.120	0.126	0.164



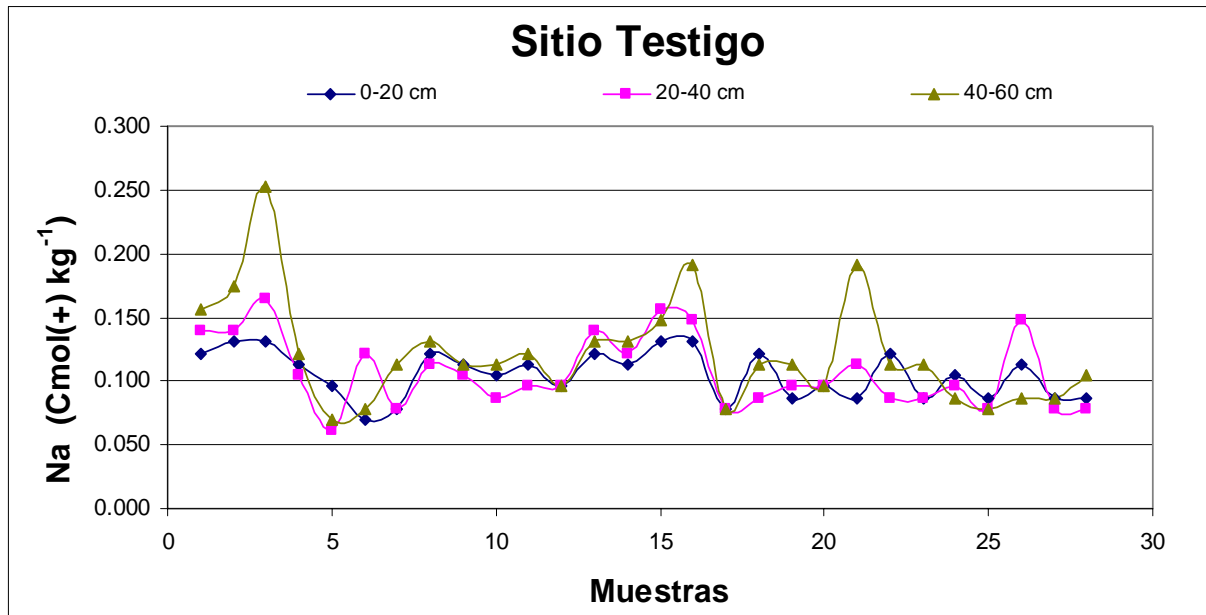


SODIO (cmo(+) kg ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	0.096	0.113	0.209
1B	0.048	0.165	0.209
1C	0.130	0.226	0.191
1D	0.139	0.200	0.209
2A	0.122	0.165	0.183
2B	0.087	0.148	0.209
2C	0.052	0.122	0.244
2D	0.061	0.096	0.165
3A	0.096	0.139	0.139
3B	0.183	0.200	0.244
3C	0.130	0.139	0.183
3D	0.113	0.157	0.165
4A	0.148	0.157	0.139
4B	0.113	0.139	0.130
4C	0.122	0.113	0.130
4D	0.096	0.096	0.122
5A	0.165	0.235	0.209
5B	0.157	0.183	0.148
5C	0.165	0.165	0.191
5D	0.174	0.165	0.183
7A	0.096	0.139	0.226
7B	0.261	0.130	0.200
7C	0.148	0.113	0.209
7D	0.104	0.096	0.113
8A	0.104	0.096	0.139
8B	0.226	0.139	0.130
8C	0.113	0.122	0.130
8D	0.130	0.122	0.217
Mínimo	0.048	0.096	0.113
Máximo	0.261	0.235	0.244
Promedio	0.128	0.146	0.177



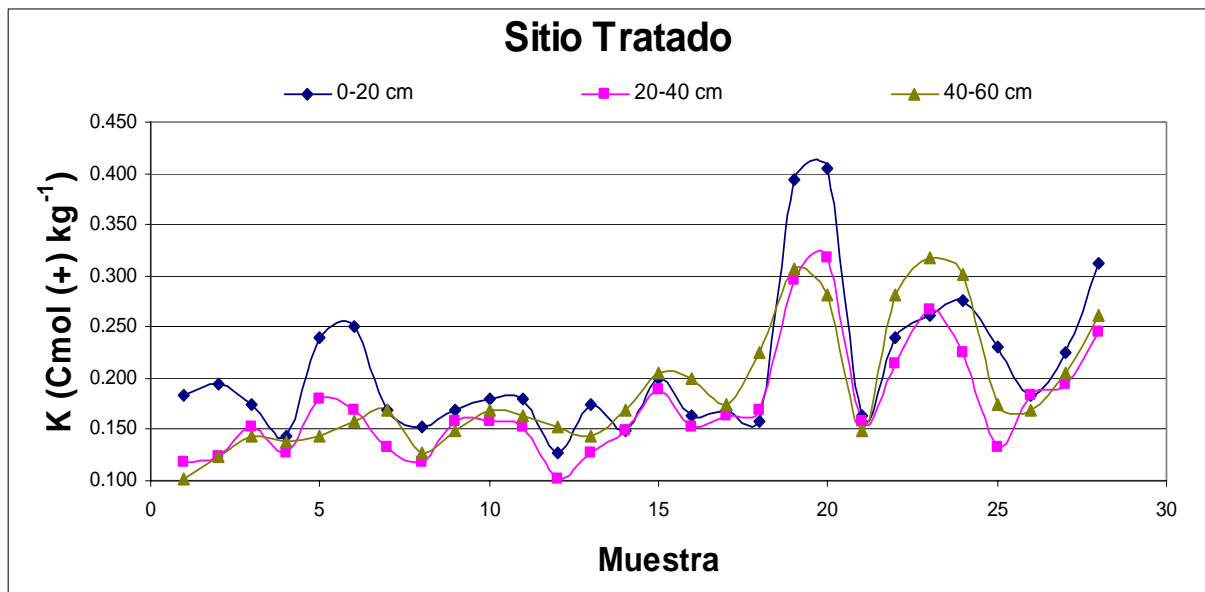


SODIO (cmol(+) kg ⁻¹)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	0.122	0.139	0.157
1G	0.130	0.139	0.174
1H	0.130	0.165	0.252
1I	0.113	0.104	0.122
2F	0.096	0.061	0.070
2G	0.070	0.122	0.078
2I	0.078	0.078	0.113
3F	0.122	0.113	0.130
3H	0.113	0.104	0.113
3I	0.104	0.087	0.113
4F	0.113	0.096	0.122
4G	0.096	0.096	0.096
4H	0.122	0.139	0.130
4I	0.113	0.122	0.130
5F	0.130	0.157	0.148
5G	0.130	0.148	0.191
5I	0.078	0.078	0.078
6F	0.122	0.087	0.113
6G	0.087	0.096	0.113
6H	0.096	0.096	0.096
6I	0.087	0.113	0.191
7F	0.122	0.087	0.113
7H	0.087	0.087	0.113
7I	0.104	0.096	0.087
8F	0.087	0.078	0.078
8G	0.113	0.148	0.087
8H	0.087	0.078	0.087
8I	0.087	0.078	0.104
Mínimo	0.070	0.061	0.070
Máximo	0.130	0.165	0.252
Promedio	0.105	0.107	0.121



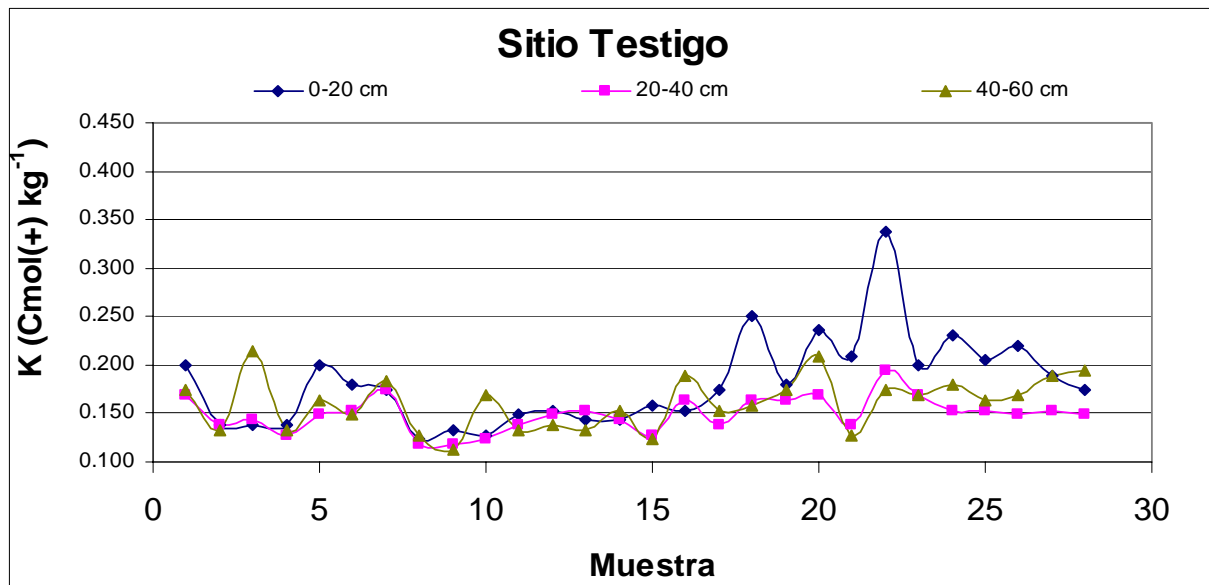


POTASIO (cmol(+) kg ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	0.184	0.118	0.102
1B	0.194	0.123	0.123
1C	0.174	0.153	0.143
1D	0.143	0.128	0.138
2A	0.240	0.179	0.143
2B	0.251	0.169	0.159
2C	0.169	0.133	0.169
2D	0.153	0.118	0.128
3A	0.169	0.159	0.148
3B	0.179	0.159	0.169
3C	0.179	0.153	0.164
3D	0.128	0.102	0.153
4A	0.174	0.128	0.143
4B	0.148	0.148	0.169
4C	0.199	0.189	0.205
4D	0.164	0.153	0.199
5A	0.169	0.164	0.174
5B	0.159	0.169	0.225
5C	0.394	0.297	0.307
5D	0.404	0.317	0.281
7A	0.164	0.159	0.148
7B	0.240	0.215	0.281
7C	0.261	0.266	0.317
7D	0.276	0.225	0.302
8A	0.230	0.133	0.174
8B	0.184	0.184	0.169
8C	0.225	0.194	0.205
8D	0.312	0.246	0.261
Mínimo	0.128	0.102	0.102
Máximo	0.404	0.317	0.317
Promedio	0.210	0.174	0.189



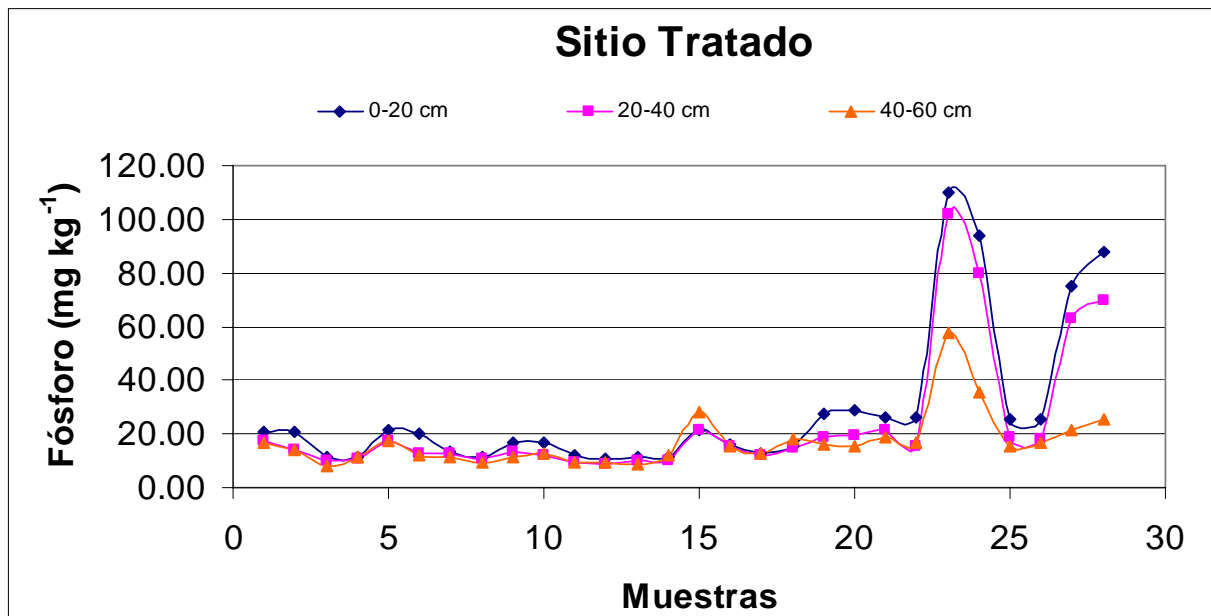


POTASIO (cmol(+) kg ⁻¹)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	0.199	0.169	0.174
1G	0.138	0.138	0.133
1H	0.138	0.143	0.215
1I	0.138	0.128	0.133
2F	0.199	0.148	0.164
2G	0.179	0.153	0.148
2I	0.174	0.174	0.184
3F	0.123	0.118	0.128
3H	0.133	0.118	0.113
3I	0.128	0.123	0.169
4F	0.148	0.138	0.133
4G	0.153	0.148	0.138
4H	0.143	0.153	0.133
4I	0.143	0.143	0.153
5F	0.159	0.128	0.123
5G	0.153	0.164	0.189
5I	0.174	0.138	0.153
6F	0.251	0.164	0.159
6G	0.179	0.164	0.174
6H	0.235	0.169	0.210
6I	0.210	0.138	0.128
7F	0.338	0.194	0.174
7H	0.199	0.169	0.169
7I	0.230	0.153	0.179
8F	0.205	0.153	0.164
8G	0.220	0.148	0.169
8H	0.189	0.153	0.189
8I	0.174	0.148	0.194
Mínimo	0.123	0.118	0.113
Máximo	0.338	0.194	0.215
Promedio	0.180	0.149	0.160



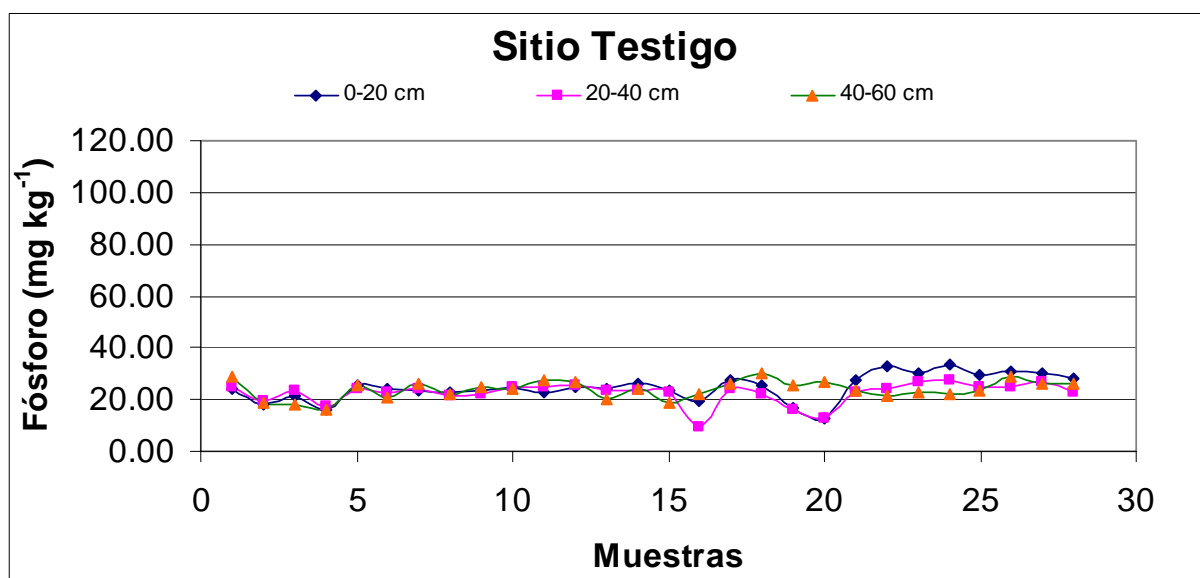


FOSFORO (mg kg ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	20.56	17.52	16.82
1B	20.56	14.36	14.25
1C	11.44	10.28	8.29
1D	11.56	10.46	11.17
2A	21.74	17.12	17.35
2B	19.94	12.84	11.94
2C	13.29	12.50	11.60
2D	11.49	10.70	9.58
3A	16.92	13.40	11.47
3B	16.81	12.38	12.72
3C	11.92	9.20	9.43
3D	10.45	8.86	9.31
4A	11.16	10.12	8.84
4B	11.51	9.88	11.86
4C	21.16	21.74	28.49
4D	16.16	15.35	15.70
5A	13.05	11.78	12.59
5B	15.24	15.01	18.13
5C	27.37	18.82	16.28
5D	28.52	19.75	15.24
7A	26.24	21.73	18.61
7B	25.89	15.72	16.53
7C	109.81	101.72	57.79
7D	93.63	79.76	35.83
8A	25.77	18.70	15.72
8B	25.43	18.25	16.99
8C	75.27	62.72	21.55
8D	87.81	69.57	25.43
Mínimo	10.45	8.86	8.29
Máximo	109.81	101.72	57.79
Promedio	28.60	23.58	17.13



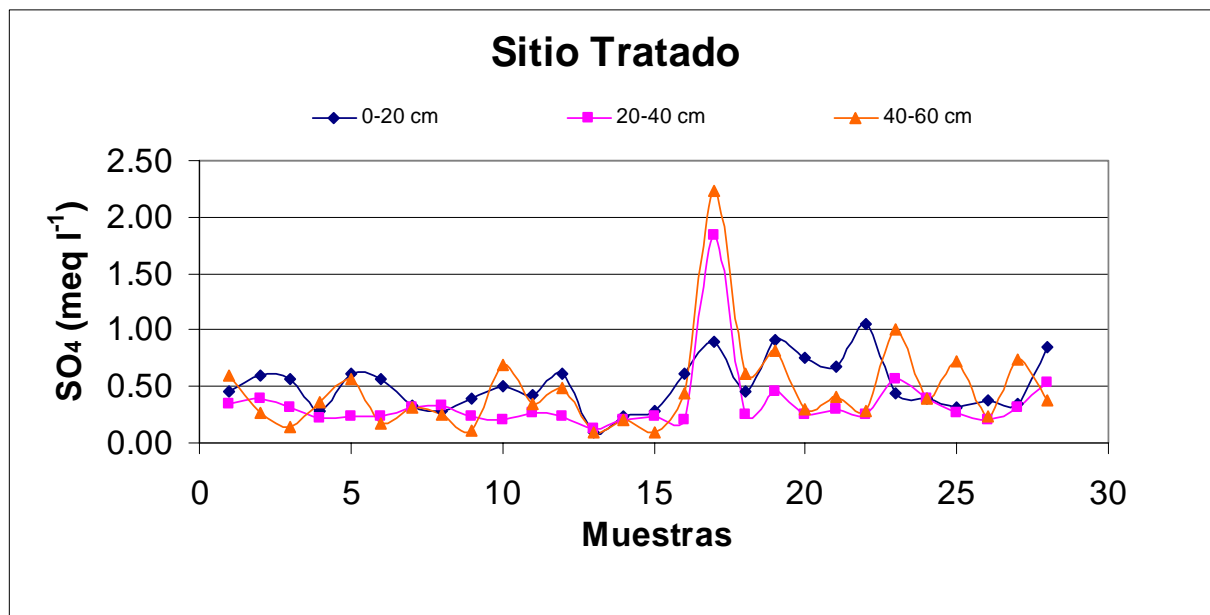


FÓSFORO (mg kg^{-1})			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	24.22	24.69	28.57
1G	18.11	19.52	18.81
1H	21.40	23.51	18.11
1I	16.00	17.57	16.11
2F	25.35	24.22	25.46
2G	23.99	22.53	20.61
2I	23.17	24.08	25.89
3F	22.60	21.35	21.80
3H	23.28	22.14	24.98
3I	24.98	24.53	24.42
4F	22.79	24.88	27.44
4G	24.77	25.23	26.63
4H	24.25	23.44	20.44
4I	26.21	23.56	24.02
5F	23.79	22.63	19.04
5G	19.49	9.26	22.30
5I	27.37	24.44	26.25
6F	25.35	22.42	30.18
6G	16.65	15.84	25.44
6H	12.60	12.49	26.82
6I	27.16	23.12	23.23
7F	32.87	24.00	21.61
7H	30.48	26.62	22.98
7I	33.67	27.75	22.35
8F	29.20	24.63	23.61
8G	31.02	24.98	28.85
8H	30.45	26.80	26.23
8I	28.17	23.04	26.00
Mínimo	12.60	9.26	16.11
Máximo	33.67	27.75	30.18
Promedio	24.62	22.47	23.86



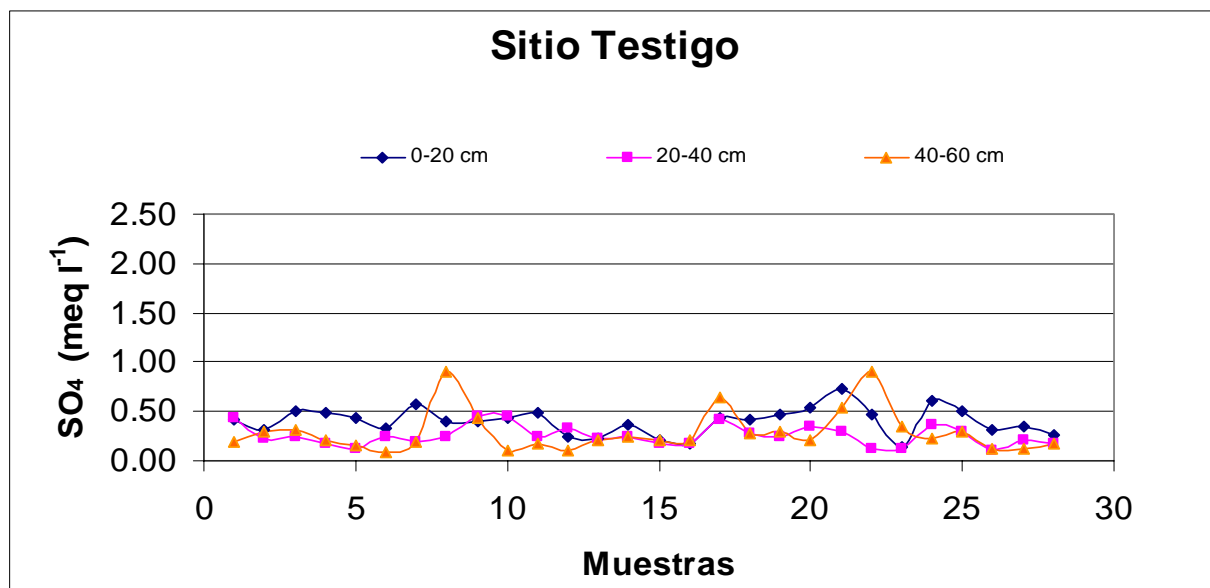


SULFATO (meq l ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	0.46	0.34	0.60
1B	0.60	0.39	0.26
1C	0.56	0.31	0.14
1D	0.29	0.22	0.36
2A	0.62	0.23	0.57
2B	0.57	0.23	0.17
2C	0.33	0.31	0.31
2D	0.28	0.33	0.25
3A	0.40	0.24	0.11
3B	0.51	0.21	0.69
3C	0.43	0.27	0.35
3D	0.61	0.24	0.48
4A	0.10	0.12	0.10
4B	0.23	0.20	0.20
4C	0.28	0.23	0.10
4D	0.62	0.20	0.44
5A	0.89	1.84	2.24
5B	0.46	0.25	0.62
5C	0.91	0.46	0.81
5D	0.75	0.25	0.30
7A	0.68	0.30	0.41
7B	1.06	0.25	0.28
7C	0.44	0.57	1.00
7D	0.39	0.39	0.39
8A	0.31	0.26	0.72
8B	0.37	0.21	0.23
8C	0.34	0.31	0.74
8D	0.85	0.53	0.37
Mínimo	0.10	0.12	0.10
Máximo	1.06	1.84	2.24
Promedio	0.51	0.35	0.47



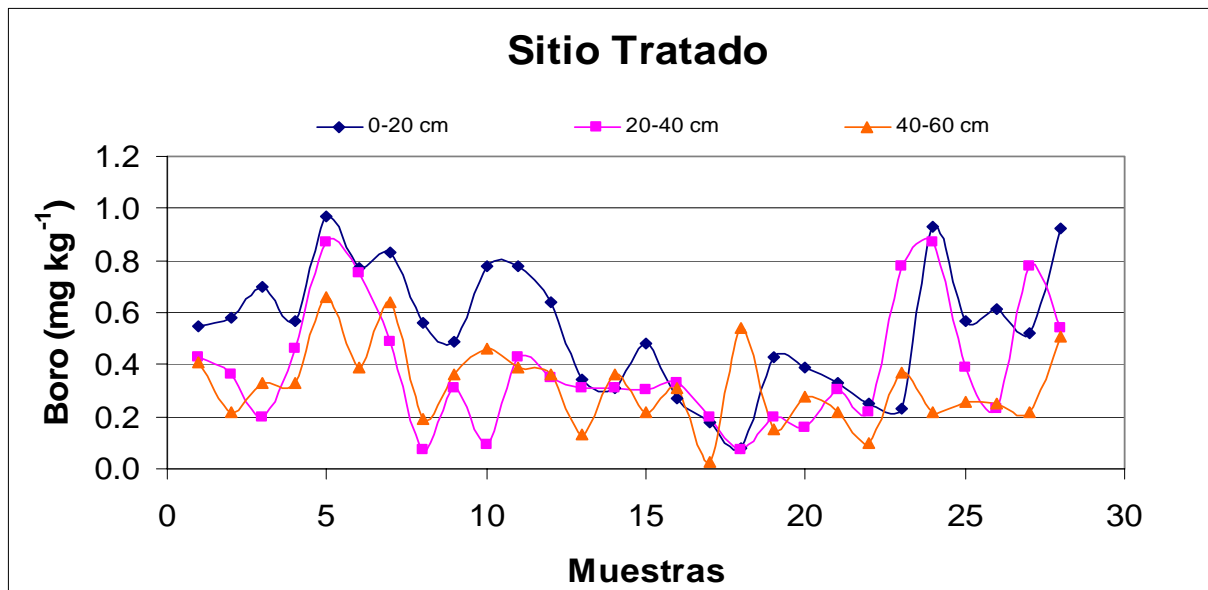


SULFATO (meq l ⁻¹)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	0.41	0.43	0.19
1G	0.31	0.22	0.29
1H	0.51	0.24	0.31
1I	0.49	0.17	0.20
2F	0.44	0.12	0.15
2G	0.33	0.25	0.09
2I	0.58	0.19	0.19
3F	0.40	0.24	0.90
3H	0.40	0.45	0.43
3I	0.43	0.46	0.10
4F	0.49	0.25	0.17
4G	0.25	0.33	0.10
4H	0.22	0.22	0.20
4I	0.36	0.25	0.25
5F	0.20	0.17	0.21
5G	0.18	0.18	0.21
5I	0.44	0.41	0.65
6F	0.41	0.27	0.27
6G	0.47	0.24	0.30
6H	0.53	0.35	0.21
6I	0.73	0.30	0.53
7F	0.47	0.12	0.90
7H	0.14	0.12	0.34
7I	0.61	0.37	0.23
8F	0.50	0.29	0.29
8G	0.31	0.10	0.13
8H	0.34	0.21	0.13
8I	0.26	0.18	0.18
Mínimo	0.14	0.10	0.09
Máximo	0.73	0.46	0.90
Promedio	0.40	0.25	0.29



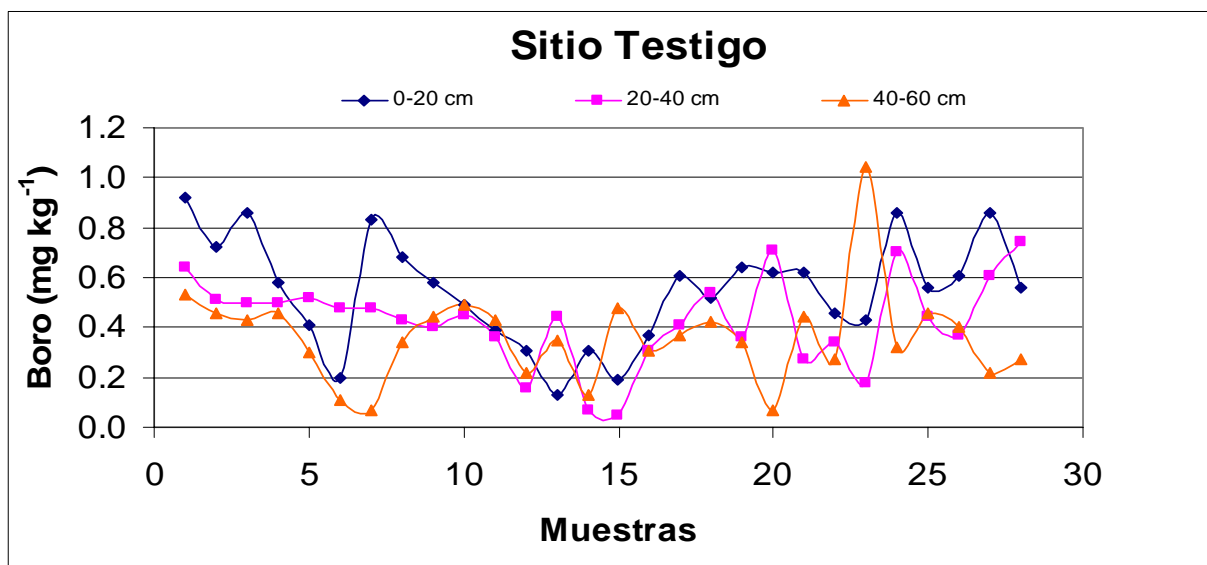


Boro (mg kg^{-1})			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	0.550	0.430	0.410
1B	0.580	0.360	0.220
1C	0.700	0.200	0.330
1D	0.570	0.460	0.330
2A	0.970	0.870	0.660
2B	0.770	0.750	0.390
2C	0.830	0.490	0.640
2D	0.560	0.070	0.190
3A	0.490	0.310	0.360
3B	0.780	0.090	0.460
3C	0.780	0.430	0.390
3D	0.640	0.350	0.360
4A	0.340	0.310	0.130
4B	0.310	0.310	0.360
4C	0.480	0.300	0.220
4D	0.270	0.330	0.310
5A	0.180	0.200	0.025
5B	0.080	0.070	0.540
5C	0.430	0.200	0.150
5D	0.390	0.160	0.280
7A	0.330	0.300	0.220
7B	0.250	0.220	0.100
7C	0.230	0.780	0.370
7D	0.930	0.870	0.220
8A	0.570	0.390	0.260
8B	0.610	0.230	0.250
8C	0.520	0.780	0.220
8D	0.920	0.540	0.510
Mínimo	0.080	0.070	0.025
Máximo	0.970	0.870	0.660
Promedio	0.538	0.386	0.318



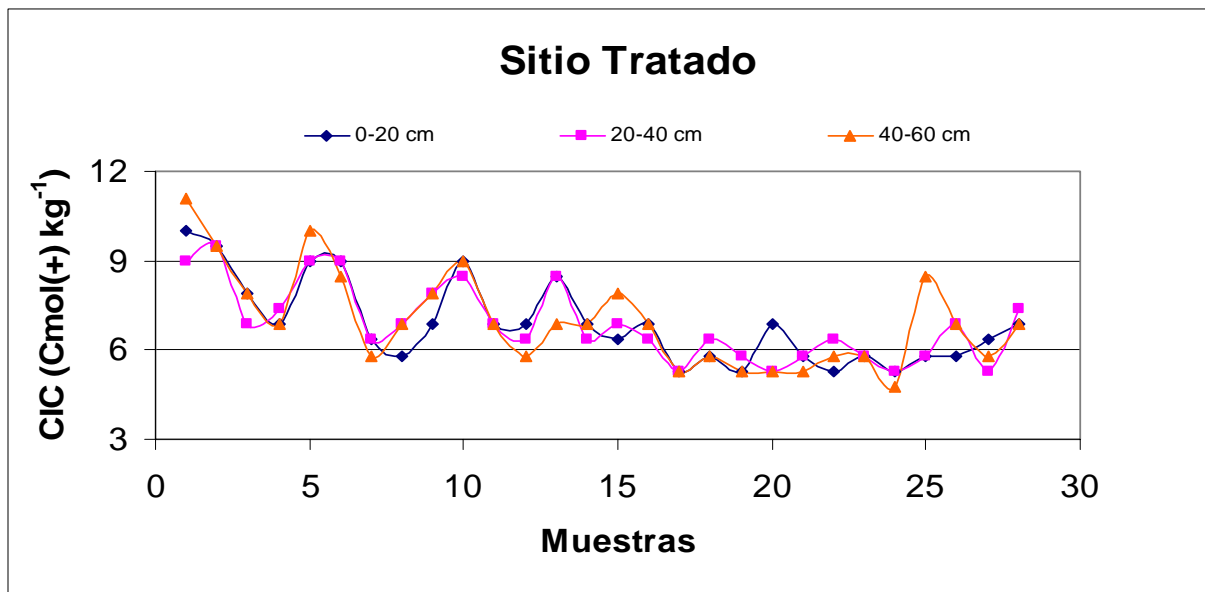


BORO (mg kg^{-1})			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	0.920	0.640	0.530
1G	0.720	0.510	0.460
1H	0.860	0.500	0.430
1I	0.580	0.500	0.460
2F	0.410	0.520	0.300
2G	0.200	0.480	0.110
2I	0.830	0.480	0.070
3F	0.680	0.430	0.340
3H	0.580	0.400	0.440
3I	0.490	0.450	0.490
4F	0.390	0.360	0.430
4G	0.310	0.160	0.220
4H	0.130	0.440	0.350
4I	0.310	0.070	0.130
5F	0.190	0.050	0.480
5G	0.370	0.310	0.310
5I	0.610	0.410	0.370
6F	0.520	0.540	0.420
6G	0.640	0.360	0.340
6H	0.620	0.710	0.070
6I	0.620	0.270	0.440
7F	0.460	0.340	0.270
7H	0.430	0.180	1.040
7I	0.860	0.700	0.320
8F	0.560	0.440	0.460
8G	0.610	0.370	0.400
8H	0.860	0.610	0.220
8I	0.560	0.740	0.270
Mínimo	0.130	0.050	0.070
Máximo	0.920	0.740	1.040
Promedio	0.547	0.428	0.363



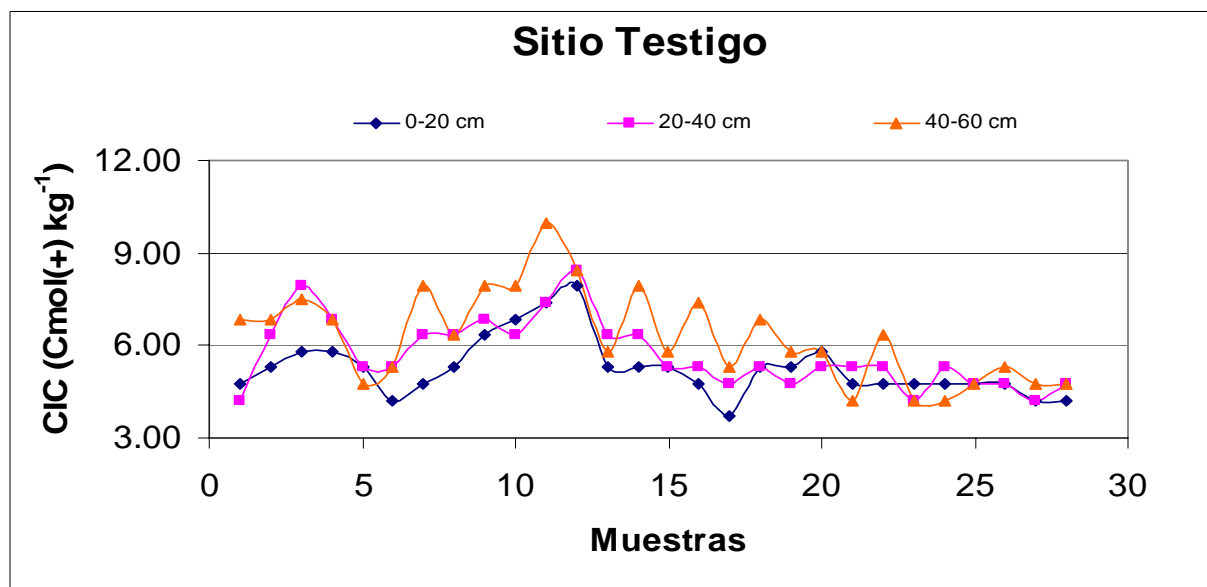


CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (Cmol(+) kg ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	10.03	8.98	11.09
1B	9.50	9.50	9.50
1C	7.92	6.86	7.92
1D	6.86	7.39	6.86
2A	8.98	8.98	10.03
2B	8.98	8.98	8.45
2C	6.34	6.34	5.81
2D	5.81	6.86	6.86
3A	6.86	7.92	7.92
3B	8.98	8.45	8.98
3C	6.86	6.86	6.86
3D	6.86	6.34	5.81
4A	8.45	8.45	6.86
4B	6.86	6.34	6.86
4C	6.34	6.86	7.92
4D	6.86	6.34	6.86
5A	5.28	5.28	5.28
5B	5.81	6.34	5.81
5C	5.28	5.81	5.28
5D	6.86	5.28	5.28
7A	5.81	5.81	5.28
7B	5.28	6.34	5.81
7C	5.81	5.81	5.81
7D	5.28	5.28	4.75
8A	5.81	5.81	8.45
8B	5.81	6.86	6.86
8C	6.34	5.28	5.81
8D	6.86	7.39	6.86
Mínimo	5.28	5.28	4.75
Máximo	10.03	9.50	11.09
Promedio	6.88	6.88	7.00



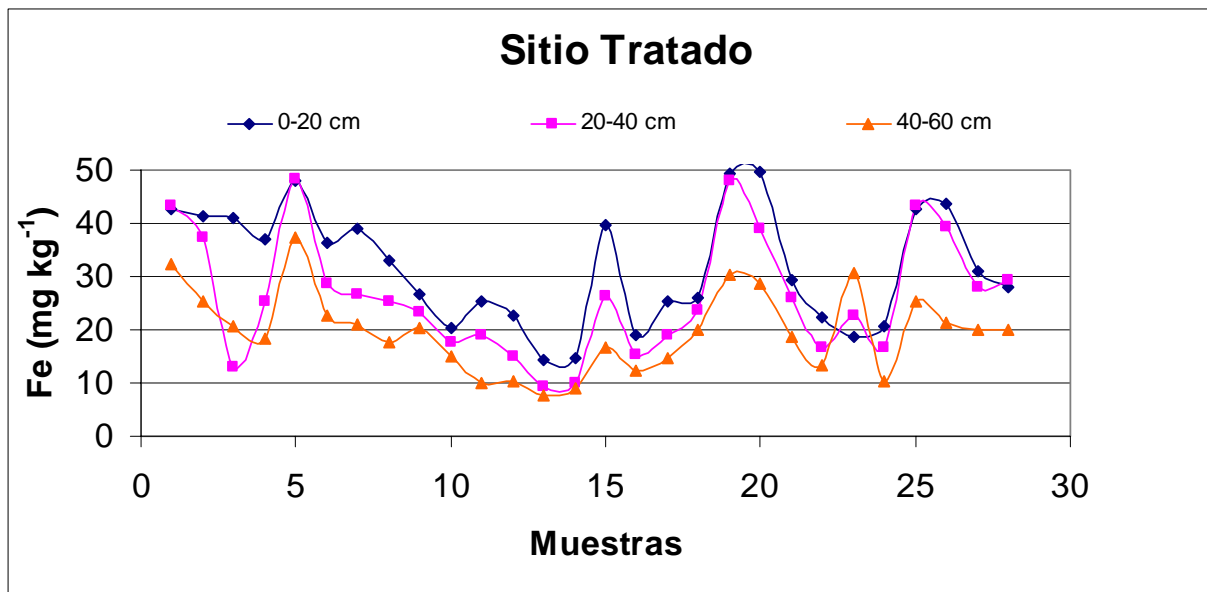


CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (Cmol(+) kg ⁻¹)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	4.75	4.22	6.86
1G	5.28	6.34	6.86
1H	5.81	7.92	7.52
1I	5.81	6.86	6.86
2F	5.28	5.28	4.75
2G	4.22	5.28	5.28
2I	4.75	6.34	7.92
3F	5.28	6.34	6.34
3H	6.34	6.86	7.92
3I	6.86	6.34	7.92
4F	7.39	7.39	9.98
4G	7.92	8.45	8.45
4H	5.28	6.34	5.81
4I	5.28	6.34	7.92
5F	5.28	5.28	5.81
5G	4.75	5.28	7.39
5I	3.70	4.75	5.28
6F	5.28	5.28	6.86
6G	5.28	4.75	5.81
6H	5.81	5.28	5.81
6I	4.75	5.28	4.22
7F	4.75	5.28	6.34
7H	4.75	4.22	4.22
7I	4.75	5.28	4.22
8F	4.75	4.75	4.75
8G	4.75	4.75	5.28
8H	4.22	4.22	4.75
8I	4.22	4.75	4.75
Mínimo	3.70	4.22	4.22
Máximo	7.92	8.45	9.98
Promedio	5.26	5.69	6.28



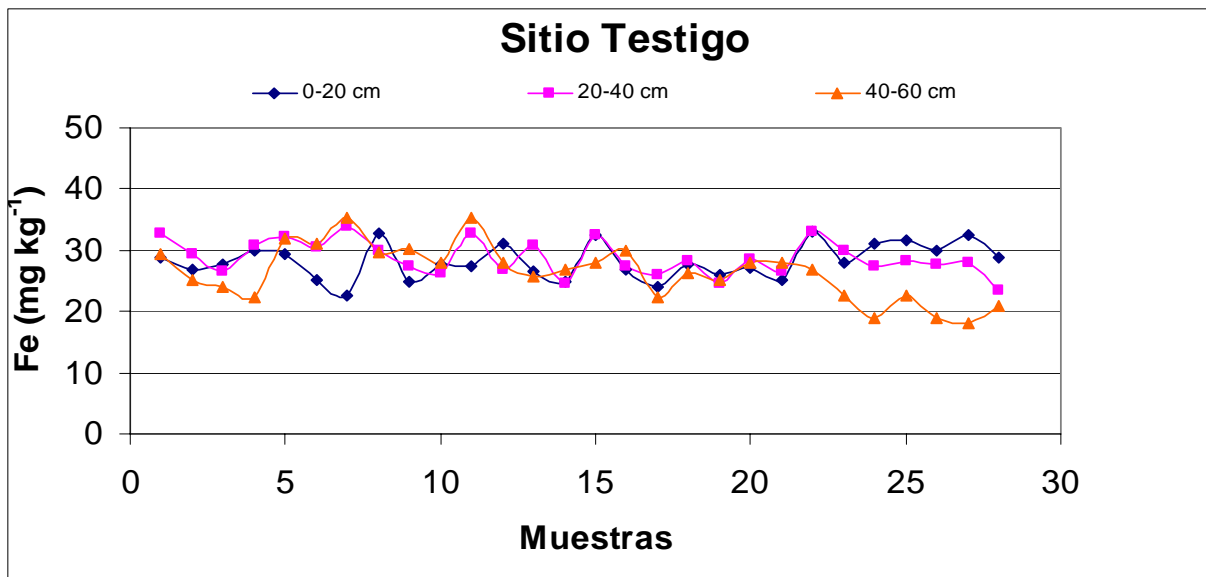


HIERRO (mg kg ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	42.76	43.21	32.19
1B	41.49	37.19	25.47
1C	40.91	12.99	20.61
1D	37.15	25.40	18.39
2A	47.96	48.23	37.32
2B	36.26	28.76	22.74
2C	39.02	26.73	21.08
2D	33.05	25.29	17.61
3A	26.82	23.46	20.42
3B	20.49	17.74	14.99
3C	25.29	19.10	10.09
3D	22.79	15.02	10.48
4A	14.40	9.47	7.51
4B	14.80	9.86	8.91
4C	39.76	26.41	16.52
4D	19.10	15.37	12.24
5A	25.33	19.15	14.75
5B	26.03	23.79	20.00
5C	49.22	47.95	30.32
5D	49.52	39.16	28.62
7A	29.39	26.04	18.53
7B	22.29	16.64	13.36
7C	18.69	22.58	30.66
7D	20.78	16.74	10.29
8A	42.55	43.21	25.37
8B	43.68	39.47	21.43
8C	30.88	28.01	20.15
8D	28.15	29.47	20.15
Mínimo	14.40	9.47	7.51
Máximo	49.52	48.23	37.32
Promedio	31.73	26.30	19.65



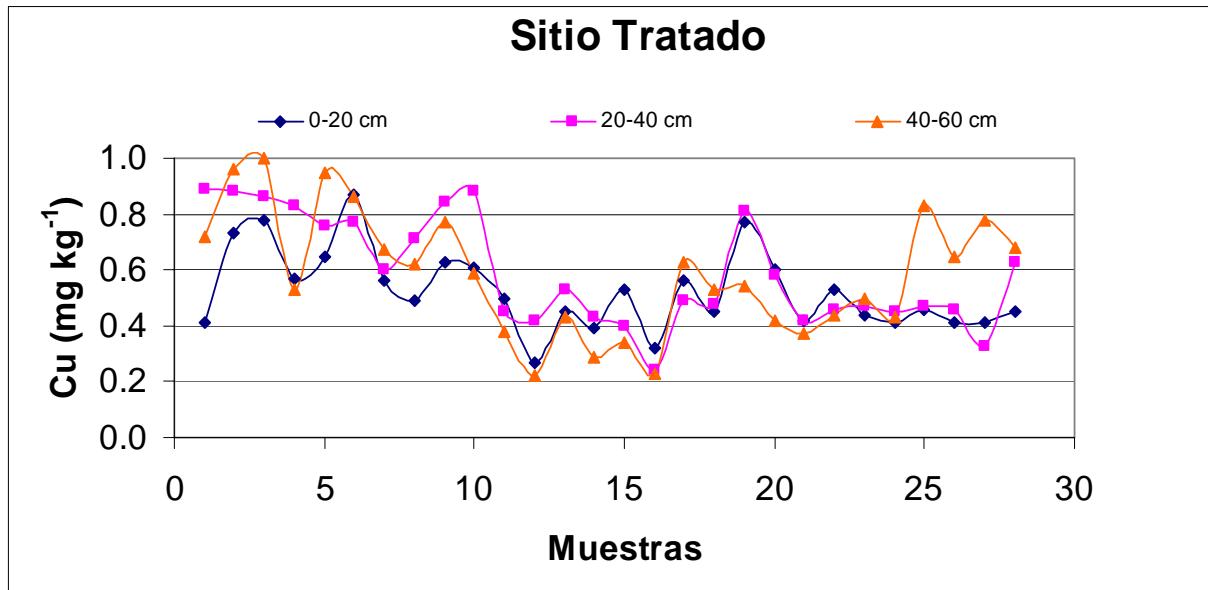


HIERRO (mg kg ⁻¹)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	28.83	32.81	29.28
1G	26.96	29.46	25.25
1H	27.68	26.47	23.95
1I	29.98	30.67	22.18
2F	29.30	32.12	31.95
2G	25.15	30.59	31.03
2I	22.49	33.77	35.34
3F	32.73	29.91	29.54
3H	24.83	27.54	30.28
3I	27.80	26.14	28.00
4F	27.26	32.80	35.41
4G	31.14	26.90	27.98
4H	26.67	30.65	25.69
4I	24.89	24.54	26.74
5F	32.44	32.46	27.99
5G	26.70	27.27	30.04
5I	24.14	25.90	22.33
6F	27.70	28.24	26.28
6G	25.92	24.66	25.10
6H	27.17	28.51	27.84
6I	25.24	26.55	27.90
7F	32.93	33.16	26.76
7H	27.85	29.98	22.64
7I	30.94	27.43	18.90
8F	31.51	28.17	22.64
8G	30.07	27.68	18.87
8H	32.57	28.00	17.97
8I	28.81	23.49	20.83
Mínimo	22.49	23.49	17.97
Máximo	32.93	33.77	35.41
Promedio	28.20	28.78	26.38



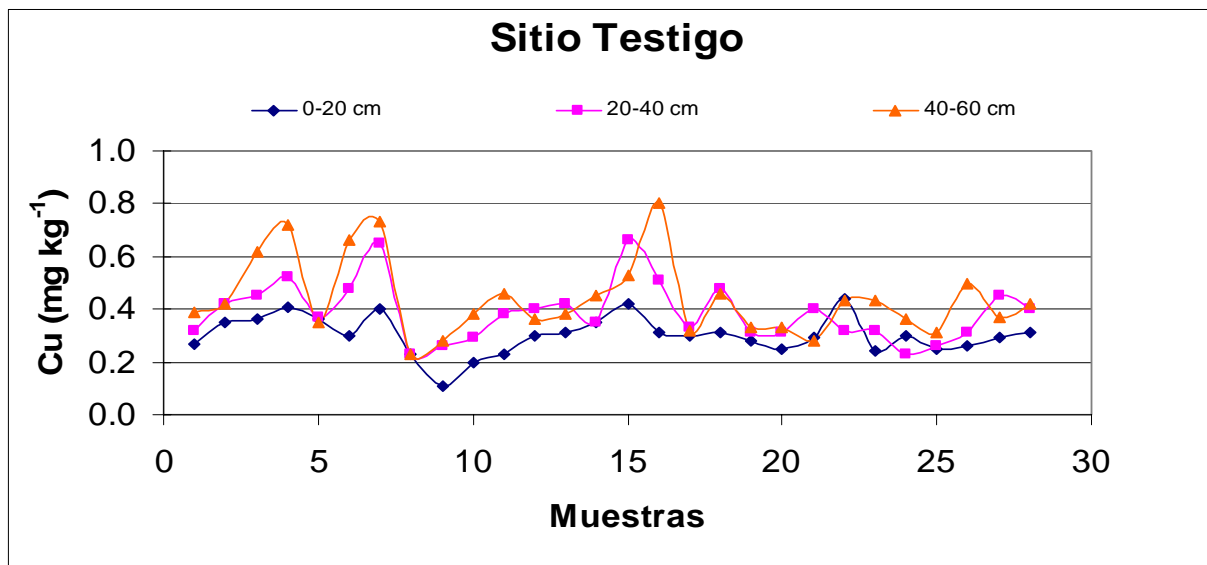


COBRE (mg kg ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	0.41	0.89	0.72
1B	0.73	0.88	0.96
1C	0.78	0.86	1.00
1D	0.57	0.83	0.53
2A	0.65	0.76	0.95
2B	0.87	0.77	0.86
2C	0.56	0.60	0.67
2D	0.49	0.71	0.62
3A	0.63	0.84	0.77
3B	0.61	0.88	0.59
3C	0.50	0.45	0.38
3D	0.27	0.42	0.22
4A	0.45	0.53	0.43
4B	0.39	0.43	0.29
4C	0.53	0.40	0.34
4D	0.32	0.24	0.23
5A	0.56	0.49	0.63
5B	0.45	0.48	0.53
5C	0.77	0.81	0.54
5D	0.60	0.58	0.42
7A	0.42	0.42	0.37
7B	0.53	0.46	0.44
7C	0.44	0.47	0.50
7D	0.41	0.45	0.43
8A	0.46	0.47	0.83
8B	0.41	0.46	0.65
8C	0.41	0.33	0.78
8D	0.45	0.63	0.68
Mínimo	0.27	0.24	0.22
Máximo	0.87	0.89	1.00
Promedio	0.52	0.59	0.58



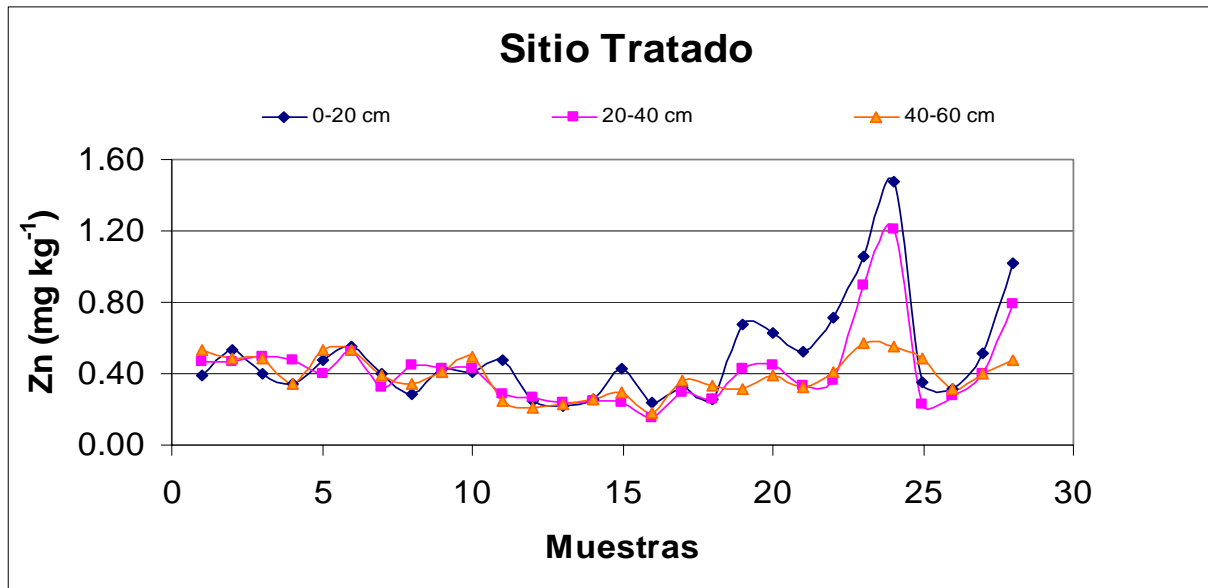


COBRE (mg kg^{-1})			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	0.27	0.32	0.39
1G	0.35	0.42	0.42
1H	0.36	0.45	0.62
1I	0.41	0.52	0.72
2F	0.36	0.37	0.35
2G	0.30	0.48	0.66
2I	0.40	0.65	0.73
3F	0.23	0.23	0.23
3H	0.11	0.26	0.28
3I	0.20	0.29	0.38
4F	0.23	0.38	0.46
4G	0.30	0.40	0.36
4H	0.31	0.42	0.38
4I	0.35	0.35	0.45
5F	0.42	0.66	0.53
5G	0.31	0.51	0.80
5I	0.30	0.33	0.32
6F	0.31	0.48	0.46
6G	0.28	0.31	0.33
6H	0.25	0.31	0.33
6I	0.29	0.40	0.28
7F	0.44	0.32	0.43
7H	0.24	0.32	0.43
7I	0.30	0.23	0.36
8F	0.25	0.26	0.31
8G	0.26	0.31	0.50
8H	0.29	0.45	0.37
8I	0.31	0.40	0.42
Mínimo	0.11	0.23	0.23
Máximo	0.44	0.66	0.80
Promedio	0.30	0.39	0.44



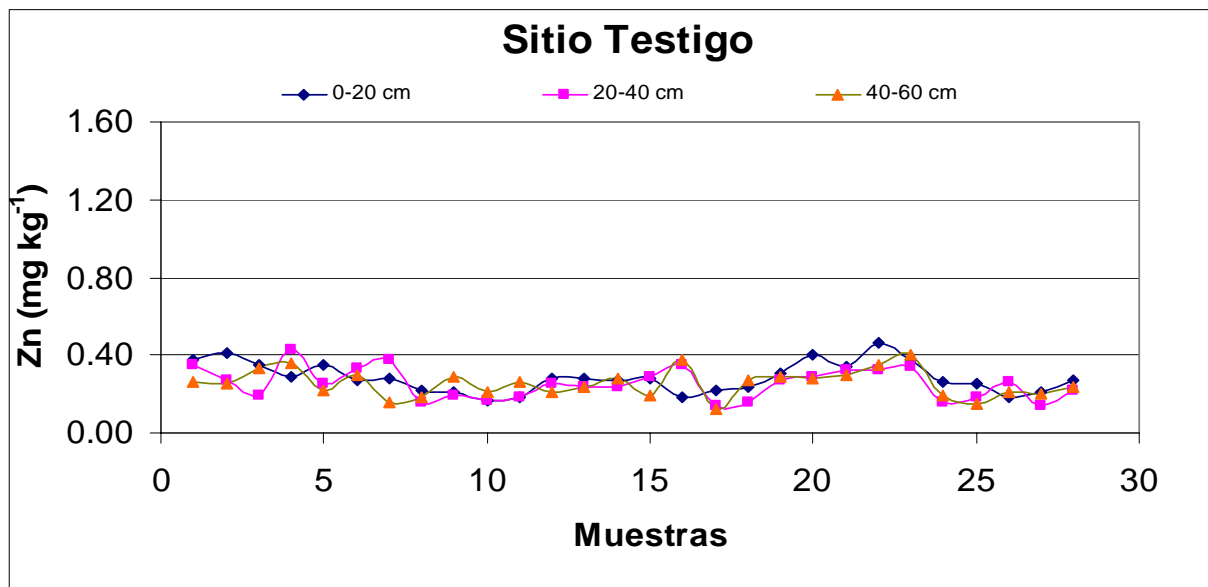


ZINC (mg kg ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	0.39	0.47	0.53
1B	0.53	0.47	0.49
1C	0.40	0.50	0.49
1D	0.34	0.48	0.34
2A	0.48	0.40	0.53
2B	0.55	0.52	0.53
2C	0.40	0.32	0.39
2D	0.29	0.45	0.34
3A	0.43	0.43	0.41
3B	0.41	0.43	0.50
3C	0.48	0.29	0.25
3D	0.25	0.27	0.21
4A	0.22	0.24	0.23
4B	0.26	0.25	0.26
4C	0.43	0.24	0.30
4D	0.24	0.15	0.18
5A	0.32	0.30	0.36
5B	0.26	0.26	0.33
5C	0.68	0.43	0.31
5D	0.63	0.45	0.39
7A	0.52	0.33	0.32
7B	0.71	0.36	0.41
7C	1.06	0.90	0.57
7D	1.48	1.21	0.55
8A	0.35	0.23	0.49
8B	0.31	0.28	0.31
8C	0.51	0.40	0.40
8D	1.02	0.79	0.48
Mínimo	0.22	0.15	0.18
Máximo	1.48	1.21	0.57
Promedio	0.50	0.42	0.39



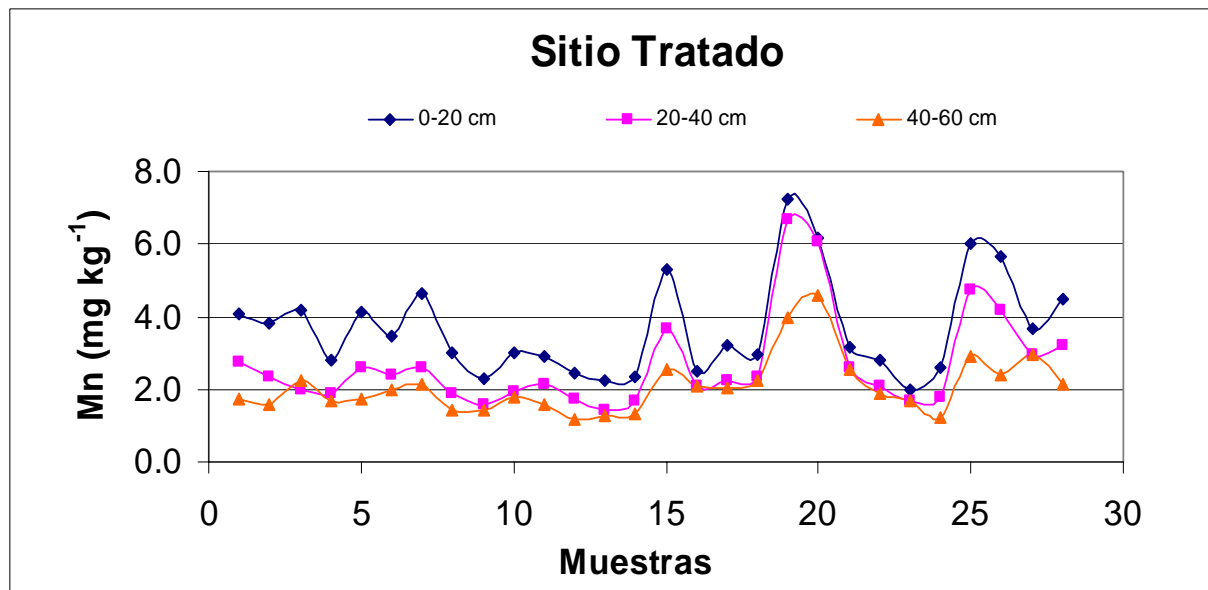


ZINC (mg kg^{-1})			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	0.38	0.35	0.26
1G	0.41	0.27	0.25
1H	0.35	0.19	0.33
1I	0.29	0.43	0.36
2F	0.35	0.25	0.22
2G	0.27	0.33	0.30
2I	0.28	0.38	0.16
3F	0.22	0.16	0.18
3H	0.21	0.19	0.29
3I	0.17	0.17	0.21
4F	0.18	0.18	0.26
4G	0.28	0.25	0.21
4H	0.28	0.24	0.24
4I	0.27	0.24	0.28
5F	0.28	0.29	0.19
5G	0.18	0.35	0.38
5I	0.22	0.14	0.12
6F	0.24	0.16	0.27
6G	0.31	0.27	0.29
6H	0.40	0.29	0.28
6I	0.34	0.32	0.30
7F	0.46	0.32	0.35
7H	0.38	0.34	0.40
7I	0.26	0.16	0.19
8F	0.25	0.18	0.15
8G	0.18	0.26	0.21
8H	0.21	0.14	0.20
8I	0.27	0.22	0.24
Mínimo	0.17	0.14	0.12
Máximo	0.46	0.43	0.40
Promedio	0.28	0.25	0.25



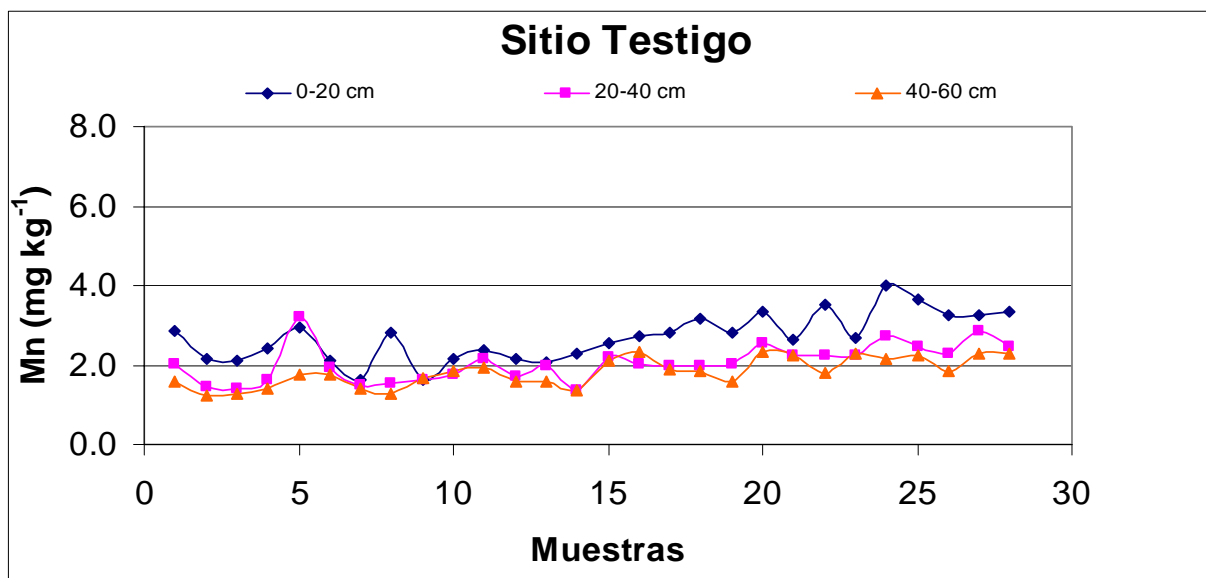


MANGANESO (mg kg ⁻¹)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	4.10	2.74	1.73
1B	3.80	2.35	1.59
1C	4.20	1.98	2.25
1D	2.78	1.86	1.68
2A	4.11	2.58	1.74
2B	3.49	2.42	1.98
2C	4.64	2.58	2.16
2D	3.03	1.87	1.45
3A	2.28	1.57	1.45
3B	2.99	1.92	1.77
3C	2.92	2.16	1.58
3D	2.43	1.73	1.16
4A	2.23	1.43	1.25
4B	2.32	1.67	1.30
4C	5.28	3.67	2.56
4D	2.49	2.10	2.09
5A	3.20	2.24	2.06
5B	2.97	2.36	2.26
5C	7.26	6.68	3.95
5D	6.19	6.07	4.57
7A	3.17	2.61	2.53
7B	2.80	2.07	1.86
7C	1.98	1.67	1.69
7D	2.61	1.80	1.20
8A	6.00	4.75	2.92
8B	5.66	4.20	2.39
8C	3.66	2.97	2.97
8D	4.47	3.23	2.12
Mínimo	1.98	1.43	1.16
Máximo	7.26	6.68	4.57
Promedio	3.68	2.69	2.08



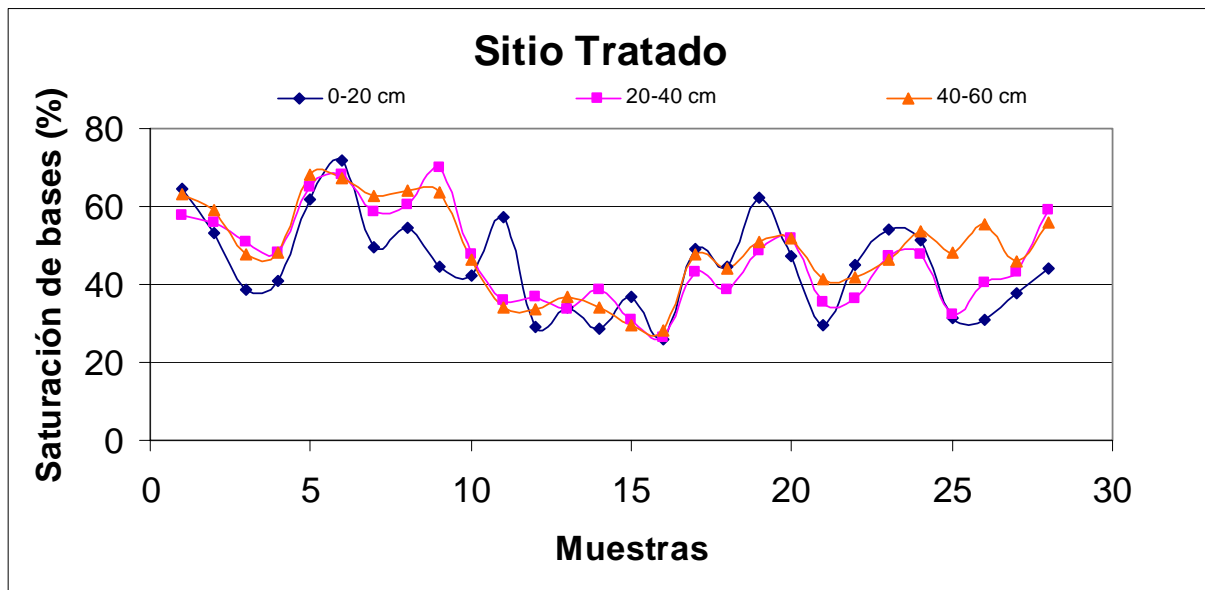


MANGANESO (mg kg^{-1})			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	2.85	2.03	1.59
1G	2.17	1.47	1.21
1H	2.12	1.41	1.28
1I	2.40	1.63	1.41
2F	2.95	3.21	1.76
2G	2.11	1.92	1.75
2I	1.64	1.51	1.41
3F	2.82	1.56	1.27
3H	1.62	1.62	1.66
3I	2.16	1.75	1.84
4F	2.37	2.16	1.94
4G	2.17	1.70	1.58
4H	2.06	1.99	1.59
4I	2.27	1.35	1.36
5F	2.55	2.19	2.10
5G	2.73	2.01	2.34
5I	2.83	1.97	1.88
6F	3.18	1.97	1.83
6G	2.81	2.04	1.59
6H	3.36	2.54	2.34
6I	2.64	2.25	2.26
7F	3.50	2.25	1.81
7H	2.70	2.25	2.29
7I	4.01	2.73	2.17
8F	3.64	2.44	2.23
8G	3.27	2.28	1.85
8H	3.26	2.84	2.27
8I	3.34	2.44	2.29
Mínimo	1.62	1.35	1.21
Máximo	4.01	3.21	2.34
Promedio	2.70	2.05	1.82



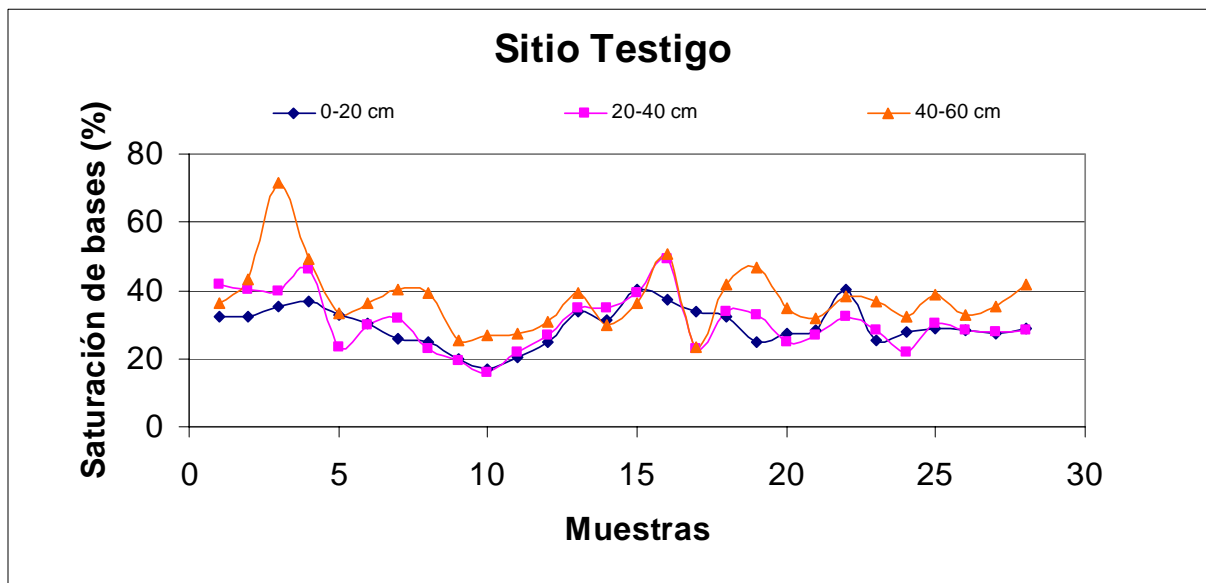


PORCENTAJE DE SATURACION DE BASES (%)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	64.445	57.609	63.029
1B	53.152	56.001	59.030
1C	38.707	51.000	47.507
1D	40.854	48.347	48.012
2A	61.679	64.839	68.089
2B	71.597	68.041	67.307
2C	49.443	58.809	62.594
2D	54.451	60.525	64.284
3A	44.474	70.010	63.490
3B	42.119	47.517	46.372
3C	57.075	35.837	33.904
3D	29.008	36.698	33.787
4A	33.870	33.804	36.701
4B	28.652	38.602	34.285
4C	36.938	30.995	29.400
4D	25.889	26.260	28.401
5A	48.938	43.054	47.617
5B	44.553	38.765	44.245
5C	62.221	48.766	51.007
5D	47.138	52.028	51.717
7A	29.583	35.249	41.517
7B	45.023	36.396	41.881
7C	54.122	47.072	46.245
7D	51.521	47.872	53.732
8A	31.563	32.132	48.156
8B	30.736	40.593	55.307
8C	37.604	43.131	46.040
8D	43.970	59.317	55.732
Mínimo	25.889	26.260	28.401
Máximo	71.597	70.010	68.089
Promedio	44.976	46.760	48.907



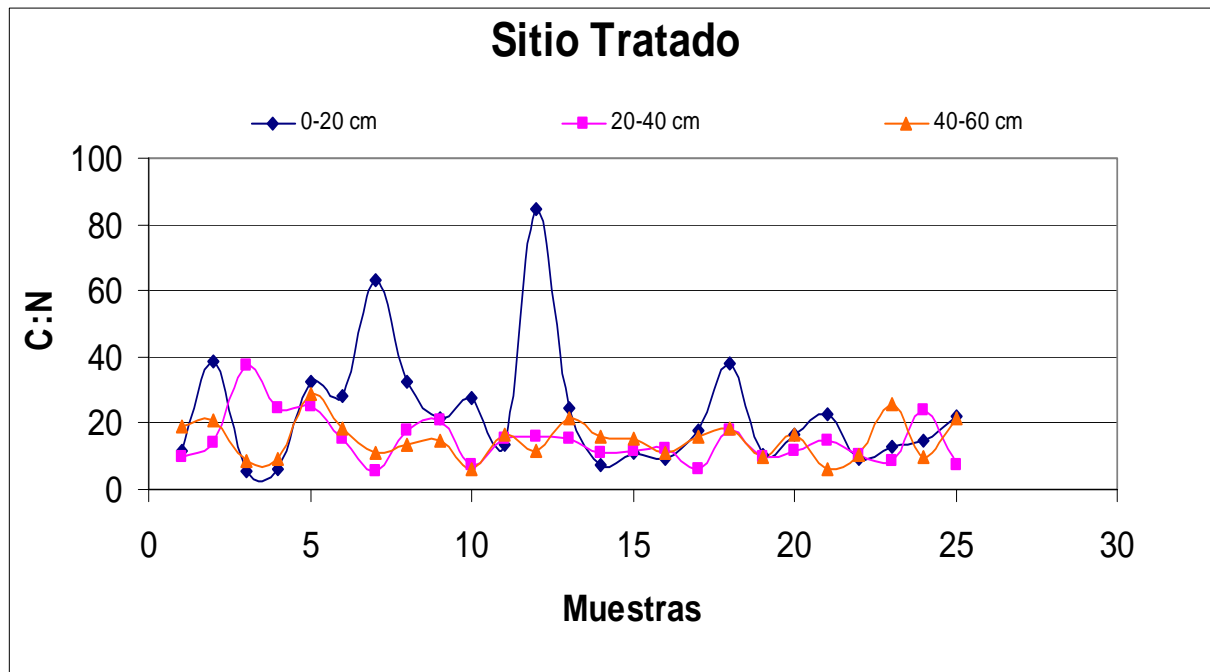


PORCENTAJE DE SATURACION DE BASES (%)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	32.467	41.525	36.340
1G	32.194	40.057	43.419
1H	35.301	39.526	71.576
1I	36.680	46.121	49.184
2F	32.831	23.423	33.117
2G	30.395	29.774	36.057
2I	25.687	31.572	40.016
3F	24.986	22.829	39.294
3H	19.683	19.396	25.251
3I	16.912	15.768	26.830
4F	20.262	21.808	27.393
4G	24.758	26.871	30.968
4H	33.698	34.995	39.288
4I	31.505	34.779	29.957
5F	40.414	39.465	36.265
5G	37.167	48.982	50.542
5I	33.702	22.862	23.338
6F	32.460	33.677	41.724
6G	25.048	32.730	46.952
6H	27.438	25.000	34.666
6I	28.310	26.940	31.607
7F	40.280	32.214	38.163
7H	25.322	28.497	36.638
7I	28.063	21.649	32.523
8F	28.950	30.410	38.835
8G	28.304	28.142	32.660
8H	27.444	27.826	35.137
8I	28.830	28.079	41.555
Mínimo	16.912	15.768	23.338
Máximo	40.414	48.982	71.576
Promedio	29.610	30.533	37.475



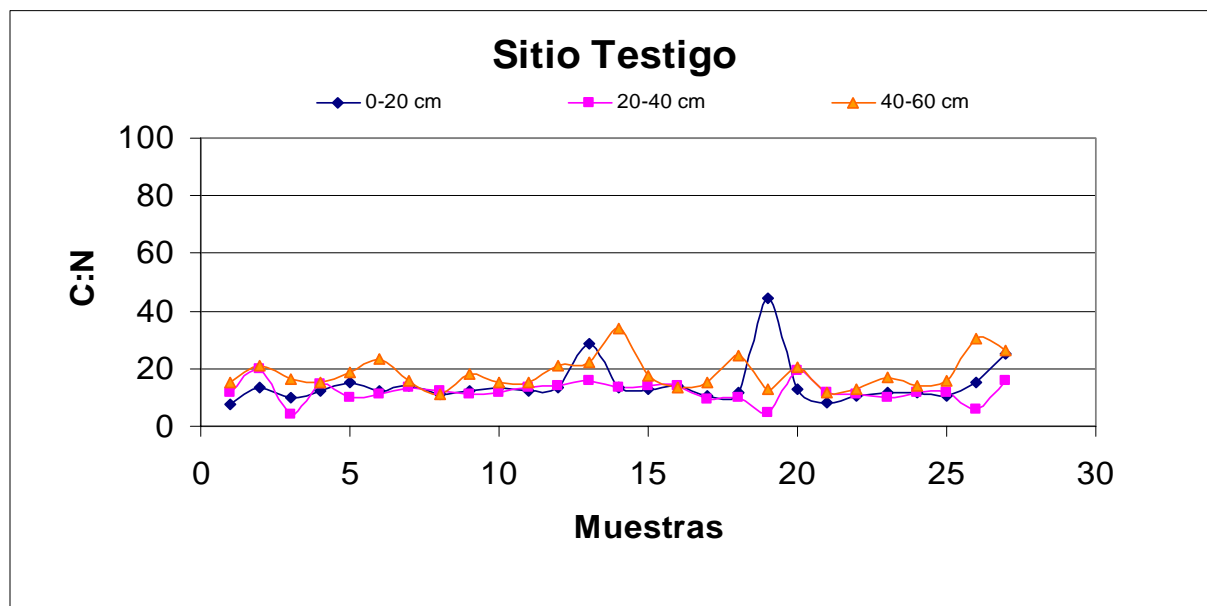


RELACION CARBONO:NITROGENO (adimensional)			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	11.706	9.962	18.731
1B	38.515	14.337	20.919
1C	5.690	37.665	8.391
1D	6.221	24.585	9.100
2A	32.388	25.350	29.053
2B	28.478	15.076	18.150
2C	63.196	5.770	11.045
2D	32.773	17.628	13.454
3A	21.514	20.597	14.439
3B	27.759	7.124	6.031
3D	13.762	15.436	16.644
4B	84.384	16.206	11.462
4C	24.298	15.436	21.458
4D	7.328	11.096	15.954
5A	11.322	11.615	15.291
5C	9.323	12.365	11.075
5D	17.996	5.892	15.697
7A	38.234	17.725	18.670
7B	10.478	9.921	9.537
7C	16.603	11.648	16.612
7D	22.517	14.598	6.374
8A	8.967	10.354	10.214
8B	12.746	8.592	25.724
8C	14.806	24.144	9.621
8D	22.063	7.568	21.332
Mínimo	5.690	5.770	6.031
Máximo	84.384	37.665	29.053
Promedio	23.323	14.828	14.999



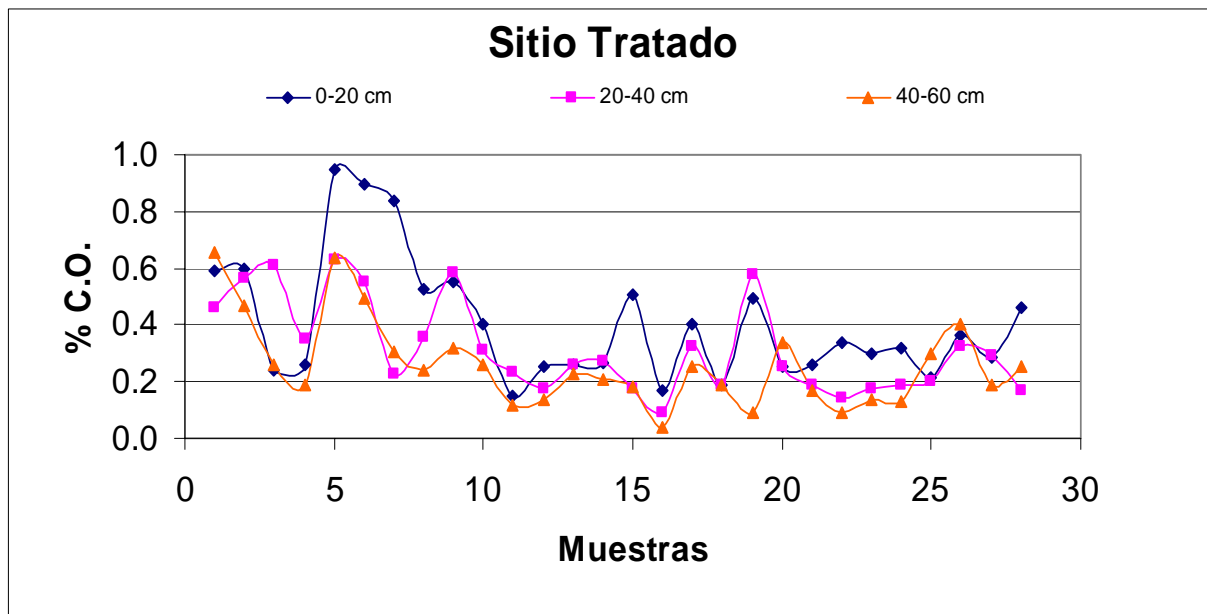


RELACION CARBONO:NITROGENO (adimensional)			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	7.375	11.887	14.940
1G	13.439	19.804	21.332
1H	10.134	4.042	16.442
1I	12.006	14.843	15.070
2F	15.017	9.974	18.833
2G	12.236	10.865	23.632
2I	13.793	13.439	15.952
3F	10.837	12.178	11.094
3H	12.037	10.824	18.096
3I	13.452	11.414	15.433
4F	12.386	13.341	15.426
4G	13.327	13.798	21.042
4H	28.425	15.690	22.374
4I	13.379	13.645	33.880
5F	13.097	14.017	17.337
5G	13.766	14.037	13.284
5I	10.496	9.271	15.119
6F	11.789	9.933	24.586
6G	44.252	4.602	12.710
6H	12.738	19.114	20.560
6I	7.919	17.701	11.885
7F	10.667	10.836	13.140
7H	11.901	9.723	16.879
7I	11.505	11.873	14.079
8F	10.702	11.672	15.952
8H	15.020	5.980	30.560
8I	25.272	16.047	26.446
Mínimo	7.375	4.042	11.094
Máximo	44.252	19.804	33.880
Promedio	14.332	12.021	18.374





% DE CARBONO ORGANICO			
Sitio Tratado			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1A	0.590	0.458	0.655
1B	0.597	0.563	0.470
1C	0.238	0.609	0.261
1D	0.261	0.354	0.191
2A	0.945	0.632	0.638
2B	0.893	0.551	0.493
2C	0.835	0.226	0.307
2D	0.528	0.360	0.238
3A	0.551	0.586	0.319
3B	0.400	0.313	0.261
3C	0.151	0.232	0.116
3D	0.255	0.174	0.139
4A	0.261	0.261	0.226
4B	0.267	0.273	0.209
4C	0.505	0.174	0.180
4D	0.168	0.093	0.041
5A	0.400	0.325	0.255
5B	0.186	0.191	0.191
5C	0.493	0.580	0.093
5D	0.255	0.255	0.336
7A	0.261	0.186	0.168
7B	0.336	0.145	0.093
7C	0.296	0.174	0.139
7D	0.319	0.186	0.128
8A	0.215	0.203	0.296
8B	0.365	0.325	0.400
8C	0.284	0.290	0.186
8D	0.458	0.168	0.255
Mínimo	0.151	0.093	0.041
Máximo	0.945	0.632	0.655
Promedio	0.404	0.317	0.260





% DE CARBONO ORGANICO			
Sitio Testigo			
Identificación de la muestra	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
1F	0.377	0.325	0.354
1G	0.406	0.383	0.394
1H	0.313	0.116	0.389
1I	0.406	0.383	0.191
2F	0.458	0.302	0.226
2G	0.394	0.273	0.232
2I	0.365	0.348	0.377
3F	0.516	0.278	0.319
3H	0.354	0.209	0.389
3I	0.377	0.220	0.307
4F	0.411	0.267	0.331
4G	0.383	0.325	0.360
4H	0.383	0.348	0.302
4I	0.307	0.273	0.284
5F	0.406	0.302	0.371
5G	0.365	0.383	0.412
5I	0.348	0.186	0.203
6F	0.458	0.284	0.313
6G	0.371	0.122	0.290
6H	0.412	0.215	0.232
6I	0.284	0.284	0.151
7F	0.470	0.296	0.302
7H	0.342	0.209	0.215
7I	0.371	0.220	0.128
8F	0.307	0.249	0.203
8G	0.151	0.151	0.104
8H	0.220	0.058	0.075
8I	0.168	0.087	0.104
Mínimo	0.151	0.058	0.075
Máximo	0.516	0.383	0.412
Promedio	0.362	0.253	0.270

