



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

**DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS
EN SUELOS AGRÍCOLAS
DEL VALLE DEL MEZQUITAL, HGO.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN BIOLOGÍA**

**PRESENTA:
MARCOS MARTÍN ACOSTA ALVAREZ**

**DIRECTOR:
Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval**

**ASESOR:
Biol. Enrique Cruz Chávez**

SEPTIEMBRE 2007

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme concluir una parte esencial de mi vida profesional, guiándome por el mejor camino y dirigiendo mis pasos y mis pensamientos hacia la gratitud y sensibilidad del esfuerzo de mis padres.

A mis padres, por que sin ellos no hubiera conocido el camino de la responsabilidad y del compromiso, y por que con su apoyo permitieron el avance paso a paso, escalón por escalón, sacrificio tras sacrificio y por que se que ellos estas tan felices por este logro.

A mis hermanos Alex, pekin y el chato, quienes sacrificaron muchos gustos y necesidades creyendo día a día en las acciones que hoy, forjan el pilar de mis metas.

Al Doc Otilio y Henry, quienes además de apoyar la investigación y el proceso de titulación, fueron amigos, apoyo y ejemplo de superación y logro. Gracias por su tiempo y sus consejos...

Dedicado muy en especial para Yesica y Diego, mi pequeño gran equipo, por que también se desprendieron de momentos en los que pudimos estar juntos, permitiéndome e impulsándome a concluir este momento y por que a pesar de todo, lo hice pensando en ti.

Los amo mucho.

Santíguame madre, enciende la luz, platica con Dios y dame tu bendición, que aún necesito de tu protección y confianza, aún necesito aprender a vivir

Abrázame padre, no apagues la luz, dime que aún aquí estas, por que sigo teniendo miedo a la oscuridad, por que aún necesito de un fuerte abrazo a pesar de mi edad.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	i
1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- JUSTIFICACIÓN	3
I.- LA PROBLEMÁTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES	5
I.1.- El uso de agua residual en México y el Valle del Mezquital	5
II.- PRIMEROS ESTUDIOS SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO EN EL VALLE DEL MEZQUITAL	8
III.- SITUACIÓN DEL VALLE DEL MEZQUITAL	11
III.1.- El drenaje de la ZMCM	11
III.2.- El agua residual y la agricultura	12
II.2.1.- Sistemas de riego y drenaje	14
IV.- CONTAMINACION POR METALES PESADOS	16
IV.1.- Los metales pesados	16
IV.2.- Metales pesados y su efecto contaminante	17
IV.3.- Fuentes de producción de los metales pesados	18
IV.4.- Contaminación del suelo	19
IV.5.- Movilidad de los metales pesados en el suelo	20
IV.6.- Toxicidad de los metales pesados en el suelo	21
IV.7.- Fitotoxicidad de los metales pesados	22
IV.7.1.- Relación del crecimiento vegetal con las características físico-químicas del suelo	23
IV.8.- Nutrición vegetal	25
IV.9.- Mecanismos de absorción de metales pesados por las plantas	26

V.- NORMATIVIDAD	28
V.1.- Normas Oficiales Mexicanas y Ecológicas	28
VI.- OBJETIVO GENERAL	33
VI.1.- Objetivos específicos	33
VII.- HIPÓTESIS DEL TRABAJO	33
VIII.- ÁREA DE ESTUDIO	34
VIII.1.- Caracterización del área de estudio	34
VIII.1.2.- Geografía	34
VIII.1.3.- Geología	35
VIII.1.4.- Clima	35
VIII.1.5.- Vegetación	35
VIII.1.6.- Fauna	37
VIII.1.7.- Suelos	38
VIII.1.8.- Sistema de riego	39
VIII.2.- Descripción de los sitios de muestreo	39
IX.- ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE SUELO Y CULTIVOS	41
IX.1.- Pre-tratamiento de las muestras	41
IX.1.1.- Muestras de suelos	41
IX.1.2.- Muestras de cultivos	41
IX.2.- Análisis de laboratorio	41
IX.2.1.- Caracterización física del suelo	42
IX.2.1.1.- Caracterización química del suelo	42
IX.2.2.- Análisis químico de los cultivos	43
IX.3.- Análisis estadísticos	43

X.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
X.1.- Caracterización física del suelo	48
X.1.1.- Color del suelo	49
X.1.2.- Clase textural	49
X.1.2.1.- Interpretación de la clase textural	49
X.1.3.- Densidad aparente y densidad real; espacio poroso del suelo	50
X.1.3.1.- Interpretación de la DR, DA y EP.	52
X.2.- Caracterización química del suelo	54
X.2.1.- pH en el suelo	54
X.2.1.1- Interpretación del pH.	54
X.2.2.- Materia orgánica	56
X.2.3.- Conductividad eléctrica (CE) y contenido de sales totales en el suelo	58
X.2.4.- Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	61
X.2.5.- Determinación de bases intercambiables	62
X.2.5.1.- Ca^{++} en el Valle del Mezquital	63
X.2.5.2.- Mg^{++} en el Valle del Mezquital	63
X.2.5.3.- K^{+} en el Valle del Mezquital	64
X.2.5.3.- Na^{++} en el Valle del Mezquital	64
XI.- DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN TOTAL DE METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS DEL VALLE DEL MEZQUITAL.	67
XI.1.- Cromo (Cr), en el Valle del Mezquital	68
XI.2.- Níquel (Ni), en el Valle del Mezquital	68
XI.3.- Cobre (Cu), en el Valle del Mezquital	69
XI.4.- Zinc (Zn), en el Valle del Mezquital	69
XI.5.- Plomo (Pb), en el Valle del Mezquital	70

XII.- DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE METALES PESADOS POR HORTALIZAS CULTIVADAS EN EL VALLE DEL MEZQUITAL Y REGADAS CON AGUAS RESIDUALES.	71
XII.1.- Índice de bioacumulación (IB)	71
XII.2.- Cromo (Cr) en cultivos del Valle del Mezquital	74
XII.3.- Cobre (Cu) en cultivos del Valle del Mezquital	75
XII.4.- Níquel (Ni) en cultivos del Valle del Mezquital	76
XII.5.- Zinc (Zn) en cultivos del Valle del Mezquital	77
XII.6.- Cadmio (Cd) en cultivos del Valle del Mezquital	77
XII.7.- Plomo (Pb) en cultivos del Valle del Mezquital	77
XIII.- ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	78
XIV.1.- Concentración de metales pesados en suelo vs antigüedad de riego	79
XIV.2.- Concentración de metales pesados en suelo vs materia orgánica	79
XIV.3.-Concentración de metales pesados en cultivos vs concentración de metales pesados en suelo	80
XVI.- CONCLUSIONES	82
XVI.1.- Caracterización de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital	82
XVI.2.- Metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital	82
XVI.2.1.- Sitios de muestreo y métodos de riego	84
XVI.3.- Absorción de metales pesados por cultivos cultivadas en el Valle del Mezquital	84
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	86

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.- Industrias del Área Metropolitana de la ciudad de México que aportan aguas residuales al Valle del Mezquital.	6
Tabla 2.- Valores para suelos considerados normales y los afectados por anomalías geoquímicas (Bowie y Thornton, 1985).	18
Tabla 3.- Emisiones naturales de metales pesados. (Page <i>et al.</i> , 1981)	19
Tabla 4.- Contenido de elementos metálicos en el suelo (Linsay, 1979)	23
Tabla 5.- Alteración fisiológicas que producen algunos metales pesados que contaminan las plantas (Nastusch, 1997).	25
Tabla 6.- Umbrales de contaminación en mg kg ⁻¹ en los principales países que generan contaminación por metales pesados (Kabata-Pendias , 1995)	28
Tabla 7.- Función biológicas y de toxicidad de los metales pesados en los organismos (Hagedorn, 1996).	30
Tabla 8.- Municipios que conforman el Valle del Mezquital, Hidalgo (SARH, 1994; CNA, 1995).	37
Tabla 9.- Tipo de tenencia de la tierra en el DR03-Tula (CNA -1990).	38
Tabla 10.- Puntos de muestreo en 9 municipios que conforman el DDR 03-Tula.	45
Tabla 11.- Sitios de muestreo determinados para este trabajo.	47
Tabla 12.- Determinación de la clase textural del suelo por el procedimiento del Hidrómetro de Bouyoucos a través del método AS-09 (NOM- 021-RECNAT-2000).	50
Tabla 13.- Determinación de la DR, DA, EP y Peso por Ha de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital.	52
Tabla 14.- Determinación del pH del suelo medido en agua y KCl a través del método AS-02 (NOM- 021-RECNAT-2000).	55
Tabla 15.- Determinación del porcentaje de materia orgánica de los suelos agrícolas, a través del método AS-07, de Walkley y Black, 1934. (NOM- 021-RECNAT-2000).	56
Tabla 16.- Medición de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación a través del método AS-18, con un conductímetro y contenido de sales totales en el suelo (NOM- 021-RECNAT-2000).	59

Tabla 17.- Respuesta de las plantas hacia los valores de conductividad eléctrica de los estratos de saturación de suelo, propuesto por Scofiel (1949), modificado por el U.S. Salinity Laboratory (USSLS, 1954).	60
Tabla 18.- Tipo de cultivos idóneos a la salinidad de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, basado en Maas y Hoffman, 1977.	60
Tabla 19.- Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables del suelo a través del método AS-12, con acetato de amonio (NOM- 021-RECNAT-2000).	62
Tabla 20.- Determinación de bases intercambiables y extraíbles en kg ha^{-1} , a través del método AS-12, con acetato de amonio (NOM- 021-RECNAT-2000).	65
Tabla 21.- Determinación de la concentración de metales pesados totales en suelos agrícolas del Valle del Mezquital.	67
Tabla 22.- Parámetros establecidos por algunos autores para la concentración normal de Metales Pesados en el Suelo (mg kg^{-1}).	72
Tabla 23.- Concentración de metales pesados en cultivos regados con aguas residuales del Valle del Mezquital.	73
Tabla 24.- Índice de bioacumulación de algunos metales pesados establecido para especies vegetales.	74
Tabla 25.- Correlación de Pearson, análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados y algunas características del suelo contra la antigüedad en el uso de aguas residuales para riego de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital ($p = 0.05$).	76
Tabla 26.- Correlación de Pearson, análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados y la cantidad de materia orgánica de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital.	80
Tabla 27.- Correlación de Pearson, análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados en el suelo y la concentración absorbida por las hortalizas del Valle del Mezquital.	81

RESUMEN

El Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, es una zona importante de gran actividad agrícola y pecuaria, cuya principal fuente de productividad se basa en el empleo de aguas residuales provenientes de la zona metropolitana de la ciudad de México (ZMCM), para la irrigación de 130,000 ha de terrenos agrícolas, en donde se producen cultivos de interés económico y nutricional para todo el país.

El uso de esta agua, valorada significativamente por los agricultores del estado, ha sido empleada desde hace más de 100 años, misma que ha dado una mayor fertilidad y capacidad productiva a estos suelos agrícolas que inicialmente eran de tipo árido.

Las aguas residuales contienen una gran cantidad de nutrientes y elementos químicos y biológicos que por una parte, han favorecido al suelo y aprovechado los diferentes cultivos de alfalfa, maíz, trigo, cebada, fríjol, etc; sin embargo no solo han habido beneficios importantes para el estrato en donde se desarrollan las plantas, también se han venido registrando y evaluando la contaminación por acumulación y lixiviación de elementos tóxicos como los metales pesados, hacia diferentes estratos del suelo y los mantos freáticos que paralelamente, han aumentado por el uso excesivo de aguas residuales.

La posible contaminación ambiental, por el uso inadecuado de las aguas residuales en el sector productivo, tanto la acumulación y lixiviación de metales pesados en el suelo, como su absorción y bioacumulación en los diferentes cultivos regados con esta agua; son motivo de estudio de este trabajo, donde el principal objetivo es evaluar las concentraciones de cromo, cobre, níquel, zinc, cadmio y plomo, en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hgo.

En este trabajo, se determinaron rangos de concentración de metales pesados en el suelo de **Cr** (48 - 150 mg kg⁻¹), **Cu**: (21 - 96 mg kg⁻¹), **Ni** (26 - 57 mg kg⁻¹), **Pb** (8 - 86 mg kg⁻¹) y **Zn** (66 - 391 mg kg⁻¹), las cuales, no son representativas de concentraciones alarmantes de contaminación del suelo y biodisponibilidad para los cultivos de la región; además, tampoco se encontró una relación significativa entre los valores determinados y las características físico-química del suelo o la antigüedad de riego empleando aguas residuales.

1.- INTRODUCCIÓN

En las regiones áridas y semi-áridas del mundo, el recurso hídrico es cada vez más escaso por lo que el manejo adecuado de cualquier fuente de suministro de agua, es parte fundamental del desarrollo socioeconómico y la sobre vivencia (Page y Chang, 1981).

Actualmente, a nivel mundial la reutilización de las aguas residuales principalmente para los sectores industriales y agrícolas, se extiende a la par de la demanda de más y mejores productos alimenticios de origen animal y vegetal (Mará y Cairncross, 1990).

Esta tendencia de reutilización del agua puede deberse a una actitud conservacionista y sanitaria, acorde a un pensamiento de protección al ambiente, donde países como Alemania, Australia, Canadá, España y Estados Unidos, le dan un tratamiento primario y luego la reciclan en pequeñas cantidades, aminorando la escasez o la falta de este recurso para la sobrevivencia y el desarrollo de los seres vivos. En otros países como Brasil, Chile, India, Israel, Marruecos, México y Perú, reutilizan el agua residual en el desarrollo local o regional, empleándola principalmente, en actividades agropecuarias (Garza, 1994).

A nivel mundial, después de la República Popular de China, México es el segundo país que más agua residual emplea para el riego de grandes extensiones agrícolas; aproximadamente 350, 000 ha, en donde se cultivan especies vegetales de consumo básico (Mará y Cairncross, 1990).

El Instituto Nacional de Ecología (INE), estima que alrededor del 44.3% de las aguas residuales generadas en México, son utilizadas en la agricultura sin tener un tratamiento previo (SEDESOL / INE, 1993).

La Comisión Nacional del Agua, (CNA) menciona que se emplean un volumen aproximado de 160 m³/seg. de aguas residuales principalmente de origen municipal e industrial mezcladas con aguas pluviales superficiales o de pozo (CNA, 1995).

En México, existen más de 30 zonas importantes donde la irrigación agrícola depende de las aguas residuales y donde en la mayoría de los casos, no hay vigilancia ni control sanitario alguno para el reuso de este recurso (Cifuentes *et al.*, 1993).

2.- JUSTIFICACIÓN

El clima árido, representativo del estado de Hidalgo y en especial del Valle del Mezquital y la poca precipitación pluvial anual, origina la necesidad de utilizar aguas residuales para el riego que propician el incremento de de tierras laborales con una mayor capacidad de producción (Mendoza, 1981).

Por su ubicación geográfica cercana a la ZMCM, el Valle del Mezquital utiliza las aguas residuales provenientes de la zona metropolitana desde hace 100 años y son utilizadas para regar más de 130 000 ha, dentro del Distrito de Desarrollo Rural 063 (DDR-063) y los Distritos de Riego 03-Tula y 100-Alfajayucan (Ibáñez-Huerta, 1997).

El agua residual, parcialmente tratada y mezclada con aguas pluviales, es altamente valorada por los agricultores debido a que sus características físico químicas, han mejorado la calidad y fertilidad de los suelos de este Valle que inicialmente eran áridos (CNA, 1995), lo que a permitido el aumento de su rendimiento cualitativo y cuantitativo y es una de las zonas productoras de alfalfa, cebada, maíz, frijol, calabaza, chile verde, etc. A nivel nacional (INEGI, 1994).

Las aguas residuales contienen concentraciones importantes de contaminantes orgánicos e inorgánicos entre ellos, bacterias coliformes, residuos orgánicos, minerales, metales pesados y otros compuestos tóxicos (Petter y Paulina, 2003). Con el uso continuo y discriminado de esta agua, se puede conducir a la acumulación excesiva de estos contaminantes en el suelo, que lo van deteriorando de forma temporal o definitiva modificando sus propiedades físicas y químicas que finalmente afectan negativamente a los cultivos y plantas de interés económico y de consumo en la región (Ibáñez-Huerta, 1997).

Las concentraciones de metales pesados en el suelo y las absorbidas por los cultivos del Valle del Mezquital son sin lugar a duda, una de las principales problemáticas que deben tomarse en cuenta para el buen desarrollo y crecimiento social y económico del país.

I.- LA PROBLEMÁTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES

I.1.- El uso de agua residual en México y el Valle del Mezquital

El principal problema del uso de aguas residuales para riego agrícola, son las elevadas cantidades de elementos contaminantes que contiene y que son depositadas en los terrenos de cultivo incrementando su concentración natural de tres a seis veces con respecto a lo que ocurre en suelos donde no se emplean aguas residuales para el riego (Siebe, 1994).

Este tipo de contaminación se debe, a que en la zona metropolitana de la ciudad de México (ZMCM), donde se generan estas aguas, se presenta un crecimiento demográfico e industrial acelerado, donde uno de los productos finales son los altos e incontrolados volúmenes de agua residual que son dirigidos a las zonas agrícolas del Valle del Mezquital como opción sanitaria de drenaje (Ibáñez-Huerta, 1997).

El uso de efluentes provenientes de zonas urbanas para fines de riego en la agricultura, es una práctica que se incrementa cada día en particular en países subdesarrollados, en zonas áridas y semiáridas, así como en zonas con crecimiento demográfico constante en donde se presenta mayor explotación de recursos y generación de residuos (Hernández *et al.*, 1994).

De las 350,000 ha de suelos agrícolas que emplean aguas residuales para el riego en México, más de 280 mil ha son regadas con aguas residuales sin tratamiento alguno, con esto México ocupa el primer lugar en Latinoamérica en el uso de agua residual (CNA, 2003).

La ZMCM genera alrededor de 1,350 millones de m³ de agua residual, en esta zona existe el 55% de la actividad industrial nacional; esta agua, es drenada principalmente al Valle del Mezquital (Tabla 1).

Este Valle recibe 43 m³/seg. de agua residual (57% urbano y 43% industrial) y que es confinada principalmente, a los distritos de riego 03-Tula y 100-Alfajayucan (Altamirano, 1991). Una vez que cruza el Valle del Mezquital, el agua residual corre hacia el Golfo de México vía el sistema de ríos Tula, Moctezuma y Pánuco (García *et al.*, 1997).

Tabla 1.- Industrias del Área Metropolitana de la ciudad de México que aportan aguas residuales al Valle del Mezquital.

PRINCIPALES INDUSTRIAS	No. de plantas	Elementos vestigiales que participan en sus procesos
Refinerías de petróleo	1	Pb
Plantas termoeléctricas	4	Cd, Cu, Ni, y Pb
Cementeras	2	Ba
Fundidoras	8	Cr, Fe, Ag, Mn, Mo, Cd, Cu, Co, Ba, Ni, y Se
Industrias químicas	2	As, Cd
Industrias de fertilizantes	1	F, Cd
Plantas de ácido sulfúrico	4	Se, Te y Va
Industrias de celulosa y papel	1	Cr y Hg
Producción de asfalto	2	As, Cr, Pb
Metalurgia no ferrosa	5	As, Cd, Cr, Pb, Cu, Hg, Sb, Zn
Industrias de vidrio	4	As, B, Ba, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Pb y Se
Industria hulera	6	Ba, Zn, y Se
Fabricación de pesticidas	2	As, Cd, Cu, Hg, Pb, y Zn
Producción de fibra de vidrio	1	Cd, Cr, Pb, Zn
Tabiqueras	24	Cr, Pb, Br

Fuente: Subsecretaría del mejoramiento del Ambiente. 1993

En la ZMCM, se tiene registradas 36 plantas tratadoras de aguas residuales de las que no existe un censo seguro de su funcionamiento; dos de estas plantas están localizadas en el Valle del Mezquital, la termoeléctrica de Zimapan y la refinería de petróleo de la zona industrial de Tula.

La primera trata 4,80 l/seg. y la segunda 1,77 l/seg., esta cantidad de agua tratada, representa solo un 2% del volumen total (6.57 l/seg.) de aguas residuales que son vertidas a esta zona agrícola (Romero, 1993).

Estas aguas también son una importante fuente de patógenos y sustancias químicas como metales pesados y residuos orgánicos con baja tasa de degradación que constituyen un riesgo para la salud de los agricultores y consumidores de los productos agrícolas del Valle del Mezquital (Cifuentes *et al.*, 1993).

Las aguas residuales reciben un tratamiento de infiltración y lixiviación natural, cuando son almacenadas en las presas Endhó y Requena antes de ser empleadas por los agricultores de las casi 130, 000 ha del DDR- 63 (Distrito de Riego 03-Tula y 100-Alfajayucan) (Cifuentes *et al.*, 1993).

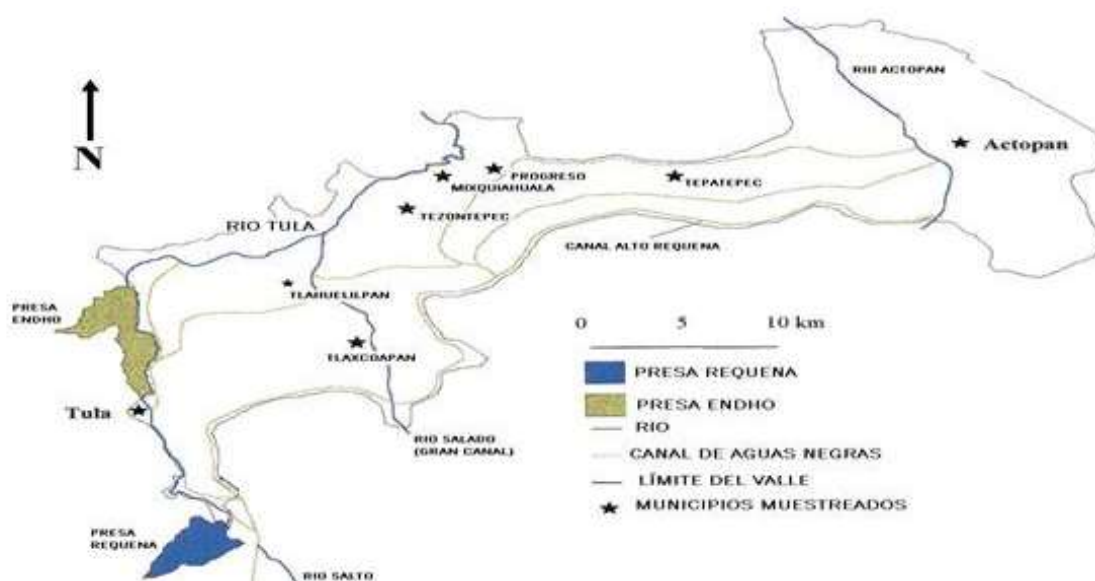


Fig. 1.- Las presas Requena y Endhó almacenan las aguas pluviales y residuales y les dan un tratamiento natural antes de repartirse a los canales de riego. (Modificado de Márquez, 1998).

El suelo, al ser un depurador biológico, se convierte en un factor importante para el tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y se constituye como una planta

tratadora natural eficiente, permitiendo que después de ser utilizadas en le Valle del Mezquital, lleguen al Golfo de México en condiciones menos contaminadas (Romero, 1993)



Imagen 1- La presa Requena, junto con la Endhó y Vicente Aguirre, son los contenedores mas importantes para el tratamiento primario de las aguas residuales.

II.- PRIMEROS ESTUDIOS SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO EN EL VALLE DEL MEZQUITAL

Existen diversos trabajos de investigación en donde se ha evaluado y dado prioridad a la contaminación de los suelos agrícolas por el uso de aguas residuales y otros componentes químicos, considerando los procesos de acumulación y distribución de metales bajo diferentes ambientes (Romero, 1993).

Kabata - Pendias (1984), así como Vázquez y Alarcón (1999), concluyen que existen diferentes contenidos de metales pesados en diversos tipos de fertilizantes que aparentemente no implican peligro de contaminación, pero no obstante, es importante tomar en cuenta las variaciones de concentración especialmente en zonas donde el uso de fertilizantes es intensivo.

Carrillo y Cajuste (1995), reportan que en el Valle del Mezquital, existen concentraciones de metales pesados contaminantes en el suelo y que estos rebasan los límites permisibles establecidos por normas oficiales como las de la comunidad Europea, representando importantes riesgos en el medio ambiente

Mejia *et al.* (1990), determinaron que la concentración de metales pesados en maíz y alfalfa correspondía directamente con la concentración de metales disponibles en el suelo. Reportaron que la varianza de la concentración de metales pesados dentro de los vegetales cultivados en el Valle del Mezquital ha variado conforme a la antigüedad de riego.

Cajuste *et al.* (1991), consideran que las concentraciones de Cu, Cr y Pb en el suelo representan niveles considerables de fitotoxicidad para algunas plantas y que las concentraciones de metales pesados en el suelo son proporcionales al volumen de aguas negras empleadas para el riego, también observaron concentraciones de metales en agua para riego más elevados que los permitidos por la Norma Oficial Mexicana que regula el uso del agua residual con fines agrícolas (NOM-SEMARNAT-001-1996), de igual forma, cuantificaron en alfalfa concentraciones de Ni y Pb influenciadas por la aplicación de riego con agua residual.

Carrillo *et al.* (1992) comprobaron que la concentración de Cd en agua residual fue superior al límite permisible en México; además, alfalfas regadas con estas aguas tenían concentraciones de Cr y Pb superiores a los valores considerados normales en tejido vegetal.

Hernández *et al.* (1994) concluyeron que la materia orgánica del suelo influye de manera importante en la distribución de metales pesados. Determinaron que el potencial de acumulación de metales pesados en una serie de suelos en Tepatepec, Hgo. es más alto que en los suelos de Progreso, Hgo. debido a que en esta zona existe un potencial más bajo de solubilización de los metales y por las concentraciones de materia orgánica.

Siebe (1994) estima que existe un serio proceso de acumulación de metales pesados en la región del Valle del Mezquital, la cual sería tres a seis veces superior respecto a la que ocurre en suelos no irrigados con agua residual.

Un aspecto preocupante es el incremento de la fracción activa de metales en el suelo, respecto a la disponibilidad para las plantas (Siebe, 1995). Esta autora registró un aumento en la concentración de la fracción móvil de metales pesados, así como de las cantidades de Cd y Pb en el cultivo de alfalfa, aunque no hubo concentraciones superiores a los límites de tolerancia o valores permisibles, como observaron Carrillo *et al.* (1992).

Carrillo y Cajuste (1995), concluyeron que las aguas negras empleadas para el riego han incrementado las concentraciones de metales pesados en suelos del Valle del Mezquital, pero estos se encuentran por debajo de los niveles máximos considerados como permisibles por otros autores, por lo que no se puede considerar un nivel importante de contaminación pero que estos niveles, si pueden ser dañinos para las plantas y animales a largo plazo, considerando que estos niveles se han incrementado a partir de las tres últimas décadas.

Flores *et al.* (1997), precisaron que los metales pesados se concentran en las capas superficiales del suelo y que las más altas concentraciones de estos, se presentan durante los periodos recientes de irrigación. Encontraron que las concentraciones de Cu, Cd, Zn y Pb en el suelo, se encuentran absorbidas con la fracción orgánica del suelo ya que las concentraciones disminuyen con el bajo porcentaje de materia orgánica y la variabilidad en la concentración del CaCO_3 en las capas del suelo.

III.- SITUACIÓN DEL VALLE DEL MEZQUITAL

III.1.- El drenaje de la ZMCM

La situación geográfica del Valle de México, ubicada a más de 2000 msnm, en una cuenca cerrada sin salidas naturales para los escurrimientos y donde se presentan temporadas de lluvia de alta intensidad y corta duración, ha provocado serios problemas para el desalojo y el control de las aguas desde la época prehispánica. Los sistemas de drenaje contruidos desde entonces han tenido siempre un doble propósito: desalojar las aguas residuales del valle de México y dar salida a las aguas pluviales para evitar inundaciones (Altamirano, 1991).

En los últimos años, el sistema de drenaje de la ZMCM, se ha completado con nuevas obras para la conducción del agua residual; el gran canal, el interceptor poniente y el emisor central; el gran canal mide 47.5 km. de longitud, se inicia en el oriente de la ciudad de México, distribuye agua hacia el distrito de riego 88 en el estado de México y a través de los túneles de Tequisquiac con el río Salado, es el afluente más importante del río Tula; por su parte el Interceptor poniente fue puesto en operación en 1960, descarga al río Hondo y al río de los Remedios; va hacia el lago de Zumpango, Tajo de Nochistongo y del río Salado, hacia el río Tula cuyo caudal se integra al sistema hidrológico del distrito de riego 03 (Altamirano, 1991).

El Emisor Central es la obra mas reciente del sistema de drenaje del Valle de México, formado por el interceptor Central y Oriente; este último inicia su recorrido en el oriente de la ciudad de México, cambia su dirección hacia el noreste hacia Amenalco donde se unen ambos interceptores y formar el Emisor Central, el cual se dirige hacia el distrito de riego DR-03 (Collin, 1990).

Para disminuir la magnitud de este problema una de las alternativas es la conducción, control y depositación de grandes cantidades de agua residual empleándola directamente en la agricultura, tal como ocurre en el Valle del

Mezquital, donde es utilizada desde hace 100 años para el riego de aproximadamente 130,000 hectáreas (Altamirano, 1991).

III.2.- El Agua Residual y la agricultura

La agricultura moderna depende principalmente de la aplicación de cuatro tecnologías para la producción agrícola y que deben emplearse de manera adecuada: la mecanización, la irrigación, la fertilización y el control de plagas aunque en realidad, en México no se cumple con estas técnicas de control siendo que en varios estados ni siquiera se ha implementado alguna de ellas (Vizcaíno-Murray, 1975).

La generación de aguas residuales en nuestro país, producto de actividades domésticas, industriales y agrícolas, han generado un impacto negativo sobre el medio ambiente ya que en estas aguas van incluidas sustancias tóxicas que afectan a la flora y fauna de la región donde son utilizadas (Mendoza, 1981). Es un importante medio de dispersión de elementos patógenos y organismos que causan la eutrofización de ríos y lagos, incorporan sustancias indeseables a las aguas subterráneas y en las actividades agropecuarias, contaminan a las plantas y animales a través de diferentes rutas en la cadena alimenticia y que por lo tanto, repercuten en el hombre (Cifuentes *et al.*, 1993).

Con esta inadecuada utilización de aguas residuales para uso agrícola, la CNA (2003) estima las siguientes cifras para México:

- El 10% de los suelos mexicanos sufren salinización a causa del riego por inundación.
- La contaminación agrícola, genera 10.65 km³ de aguas residuales al año, lo que representa el 62% de las aguas residuales nacional.
- La industria mexicana genera 2 km³ de aguas residuales al año, solo el 8% recibe tratamiento.

- Las principales ciudades industriales en México, generan 7.3 km³ de aguas residuales al año. Alrededor del 63% proviene de 140 ciudades con más de 50 mil habitantes, solo el 15% recibe tratamiento.
- En México el agua para riego no se cobra, pero solo 7 mil de 163, 500 usuarios, cuentan con permisos de descarga y pagan derechos correspondientes.

Las aguas residuales, pluviales y de los ríos son utilizadas para irrigar el Valle del Mezquital y se controlan por las presas Taxymay y Requena (Fig. 2), que son las más importantes durante las estaciones lluviosas, y las presas Endhó, Rojo Gómez y Vicente Aguirre interconectadas entre si, donde se almacena el agua residual y se le da un tratamiento primario (Siebe, 1995).



Imagen 2.- En el Valle del Mezquital, se emplean aproximadamente $43\text{m}^3/\text{seg.}$ de aguas residuales provenientes del la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

II.2.1.- Sistemas de riego y drenaje

Para fines agrícolas, el Valle del Mezquital esta organizado dentro de un Distrito de Desarrollo Rural (DDR 063), que está bajo la administración de un ingeniero en jefe designado por la CNA, por lo que, al estar bajo el control de una sola autoridad existen muchas facilidades para la gestión del plan de riego; según la zona de riego, los interesados asisten a los Distritos de Riego 03-Tula y 100-Alfajayucan, en donde solicitan el uso de agua (CNA, 1995).

También hay una mesa de gestión, compuesta por representantes de los gobiernos estatal y central, asociaciones de usuarios del agua y bancos de crédito local. Algunos agricultores están organizados en cooperativas, aunque muchos otros trabajan en forma individual cuando sus parcelas o tierras son muy pequeñas (un aproximado de 1.5 ha por usuario) (Ibáñez-Huerta, 1997).

En el Valle del Mezquital se emplea la técnica de riego de aniego o inundación, principalmente en los cultivo de alfalfa (García, *et al.*, 1997), en donde se aplica una gran cantidad de aguas residuales hasta inundar el terreno por completo;

Esta técnica presenta graves daños en la salud de los trabajadores agrícolas por el contacto directo con las aguas residuales, por otro lado, esta técnica ha generado suelos fértiles, junto con la roturación (subsuelo) y la trituración de la capa calcárea (Romero, 1993).

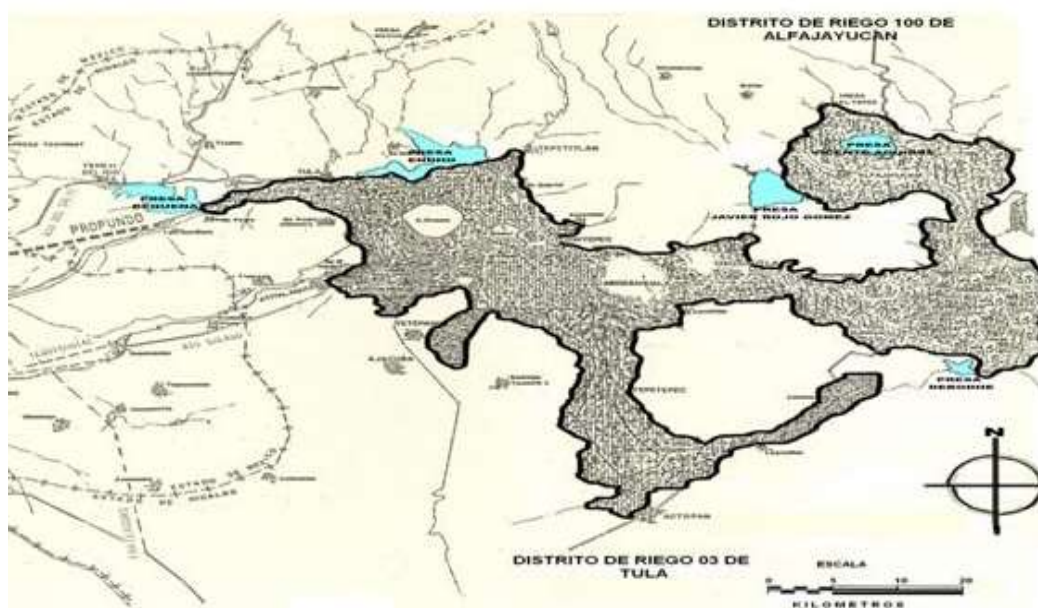


Fig. 2.- Distritos de riego 03-Tula y 100-Alfajayucan, que funcionan como drenaje de las aguas residuales generadas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. (Modificado de Altamirano, 1991).

Otro tipo de sistema es "por surco abierto", en donde solo se humedece una parte del surco, específicamente donde está sembrada la planta, se utiliza en cultivos de maíz y frijol, chile y calabaza. Los surcos son anchos (1.40 m de separación y 30 cm. de altura) y se emplea para minimizar los riesgos de contaminación.

Las ventajas de este sistema son, poco contacto directo entre el agua y el agricultor, el sistema radicular solo se mantiene húmedo evitando el contacto directo con la planta o fruto y con ello se aprovechan mejor los nutrientes que contienen las aguas residuales (Romero, 1993).

Otro es el sistema por “aspersión y goteo”, que se utiliza únicamente en zonas donde no existe agua residual; ya que las características de turbiedad y alto contenido de sólidos hacen imposible cualquier otro sistema (Romero, 1993).

El área donde se ubica el Valle del Mezquital, presenta temperaturas relativamente elevadas y temporadas de precipitación pluvial muy marcadas que pueden acelerar el proceso de descomposición y pérdida de materia orgánica; además de que las técnicas de cultivo y riego no son adecuadas ya que el sistema de riego empleado es por inundación y la rotación acelerada de cultivos no permiten la reincorporación de la materia orgánica en el suelo (Ibáñez-Huerta, 1997).

Se ha encontrado que, durante varios años de utilización de aguas residuales para el riego, ha aumentado en el nivel freático y afloramientos de nuevos manantiales como el de Cerro Colorado. Collin (1990) observó, en los suelos basálticos del Valle del Mezquital, el aumento en la infiltración de una gran proporción de aguas de riego, que va desde el 30% hasta el 100% en manantiales y pozos profundos.

IV.- CONTAMINACION POR METALES PESADOS

IV.1.- Los metales pesados

Se consideran como metales pesados a aquellos elementos cuya densidad es igual o superior a 5 g/cm^3 , cuando está en forma elemental; y en la tabla periódica son aquellos que tienen densidades mayores al del hierro y su número atómico es superior a 20, excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos (Torral, 1996),

Su presencia en la corteza terrestre, como componentes naturales del suelo es inferior al 0.1% (Bowie y Thornton, 1985), la mayoría de los elementos sólo están presentes en concentraciones mínimas de toxicidad y pocos son los que se requieren para los procesos fisiológicos de plantas y animales (Mortvent, 1983).

Los metales pesados, son parte fundamental de las actividades antropogénicas provenientes de desechos domésticos, agrícolas e industriales, los cuales son peligrosos para la biota, el hombre y el deterioro ambiental en general. Bajo este escenario los sedimentos, son uno de los principales reservorios de estos elementos, actúan como recursos secundarios de contaminación en el medio ambiente marino (Rubio *et al.*, 1996).

IV.2.- Metales pesados y su efecto contaminante

Los metales pesados, son potencialmente contaminantes devastadores ya que contaminan el aire, el agua, el suelo y las plantas cuando se absorben en altas concentraciones o se depositan en el suelo; en conjunto esta contaminación afecta a los demás eslabones de las cadenas tróficas; Desde el punto de vista biológico, se distinguen dos grandes grupos, aquellos que no presentan una función biológica conocida y los que tienen la consideración de oligoelementos o micronutrientes (Ryan y Chaney, 1994)..

Los oligoelementos o micronutrientes se requieren en pequeñas cantidades, o cantidades traza, por las plantas y animales; todos ellos son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital pero al superar cierto umbral, se vuelven tóxicos (Rubio *et al.*, 1996).

En la mayoría de los suelos agrícolas, existen pequeñas cantidades de boro, cobre, zinc, manganeso, molibdeno, cadmio, etc., elementos que en concentraciones normales favorecen el crecimiento de las plantas principalmente en sus estadios tempranos, por lo que la aplicación por vía fertilizantes o abonos químicos es cada día una práctica importante que se lleva a cabo en las zonas agrícolas del mundo. Por lo anterior, en los últimos años muchos investigadores se han dado a la tarea de determinar la importancia de los microelementos para el desarrollo de las hortalizas. (Chang *et al.*, 1992).

Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn, entre otros, todos ellos son componentes naturales de varios suelos (Tabla 1), ya que su procedencia esta relacionada con la composición del material original (Bowie y Thornton, 1985).

Tabla 2.- Valores para suelos considerados normales y los afectados por anomalías geoquímicas (Bowie y Thornton, 1985).

Elemento	Rango "normal" mg kg ⁻¹	Valores normalmente elevado mg kg ⁻¹
As	<5 - 40	>2500
* Cd	<1 - 2	>30
* Cu	2 - 60	>2000
Mo	<1 - 5	10 - 100
* Ni	2 - 100	>8000
* Pb	10 - 150	10000
Se	<1 - 2	>500
* Zn	25 - 200	10000

* Elementos que se analizaron en este estudio.

Existe una contaminación por metales pesado cuando el contenido de estos en el suelo excede considerablemente, los valores habituales. Estas anomalías geoquímicas pueden alcanzar valores que causan un grave peligro para las plantas y animales que habitan el suelo y para los consumidores de esta vegetación que se inicia en los herbívoros (Rubio *et al.*, 1996).

IV.3.- Fuentes de producción de los metales pesados

Los metales pesados, se encuentran de forma natural en la corteza terrestre contenidos en las rocas; el intemperismo y las actividades del hombre son los responsables del incremento o disminución de los niveles normales por ejemplo, con la utilización de aguas residuales, fertilizantes y mejoradores químicos. En el suelo se producen diversas reacciones que determinaran su velocidad y tiempo de resistencia relacionadas con su ciclo biogeoquímico (Rubio *et al.*, 1996).

La causa principal del aumento de metales pesados en el suelo radica en las actividades industriales, Kabata-Pedias (1984) estimaron que las concentraciones de metales contaminantes no han llegado a su nivel máximo y que incrementan progresivamente con el paso del tiempo por las actividades industriales y de agricultura moderna.

Existe una dependencia marcada entre las actividades humanas y el uso de compuestos químicos que generan el aumento de metales contaminantes. Page *et al.*, (1981) establece algunos límites de emisiones de metales en forma natural o por actividad humana y que causan alteraciones tanto al agua, aire y suelo.

Tabla 3.- Emisiones naturales de metales pesados. (Page *et al.*, 1981)

Emisión	Periodo	Cadmio mg kg ⁻¹	Cobre mg kg ⁻¹	Níquel mg kg ⁻¹	Plomo mg kg ⁻¹	Zinc mg kg ⁻¹
Natural	Anual	0.8	18	26	24	44
Antropogénica	Anual	7.3	56	47	450	310
Antropogénica	Total	316	2,186	1,000	19,600	14,000
Uso Total		500	307, 000	17, 000	241, 000	250, 000

Los márgenes de variabilidad de diferentes elementos en suelos que no presentan problemas de toxicidad para las plantas podemos observarlos en la siguiente figura, en adición a lo mostrado en la tabla 2 (Page *et al.*, 1981).

IV.4.- Contaminación del suelo

Los metales pesados participan en varios procesos desde que son incorporados en el suelo principalmente por actividades antropogénicas; se pueden incorporar al ciclo del agua o acumularse en tejidos vegetales o en el suelo por el resultado de diversas transformaciones químicas, vía proceso de adsorción, solubilización, precipitación y cambios en el estado de oxidación (Rubio *et al.*, 1996).

Para Schmitt y Sticher (1991), las características físico-químicas del suelo, son un factor importante para la concentración y disposición de éstos, tanto para las plantas como para los animales, por lo que es imposible establecer un patrón de bioacumulación y captación de metales pesados.

IV.5.- Movilidad de los metales pesados en el suelo

La movilización de los metales pesados en el ambiente, suelo y en organismos, es una condicionante importante de sus características de bioacumulación, transferencia hacia otros organismo en la cadena trófica, su potencial tóxico y sus efectos (Kevin *et al.*, 2001).

Cualquier elemento que se encuentre depositado en el suelo, no necesariamente esta disponible para la planta, ya que la absorción de éstos, depende de varios factores y características físico-químicas del suelo como el pH, Textura, etc., (Fitter *et al.*, 1987).

- pH. La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr. directa o indirectamente, el pH afecta varios mecanismos de la retención del metal por el suelo (Bigham *et al.*, 1996). El pH es un parámetro muy importante que tiene influencia en los procesos de sorción-desorción, precipitación y disolución, la formación de complejos y reacciones de oxido-reducción (Narwal *et al.*, 1999).
- Textura. La arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio.
- Materia orgánica. La formación de complejos por la materia orgánica del suelo es uno de los procesos que intervienen en la capacidad de solubilidad y asimilabilidad de metales pesados por las plantas; la toxicidad de los metales pesados aumenta en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, facilitando con ello, su solubilidad, disponibilidad y dispersión (Schmitt y Sticher, 1991)

- Capacidad de cambio. Está en función del contenido de arcilla y materia orgánica, fundamentalmente; en general cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico, mayor será la capacidad del suelo de fijar metales. El poder de adsorción de los distintos metales pesados depende de su valencia y del radio iónico hidratado; a mayor tamaño y menor valencia, se retienen con menor fuerza (Ahumada *et al.*, 1999).
- El potencial redox (disponibilidad de electrones) del suelo. Indica si los metales están en estado oxidado o reducido. Las condiciones de reducción en el suelo, se deben a la ausencia de oxígeno (anaerobio) ya que su utilización es mucho mayor a la contenida en el suelo. Esto puede ser de manera biológica o química. La oxidación en el suelo se da principalmente en suelos bien drenados (aerobia) (Schmitt y Sticher. 1991).
- Las formas solubles y cambiables de metales pesados en el agua se consideran fácilmente móviles y disponibles para las plantas, mientras que los metales incorporados en las estructuras cristalinas de las arcillas parecen relativamente inactivos (Ahumada *et al.*, 1999).

Existen otras formas que afectan la disponibilidad y movimiento de los metales pesados; el porcentaje de carbonatos, de óxidos de Fe, Mn y Al, los complejos con la materia orgánica y los óxidos de Fe-Mn (Iyenger *et al.*, 1981).

IV.6.- Toxicidad de los metales pesados en el suelo

Cuando los metales pesados se encuentran en la solución del suelo, pueden ser transferidos con mayor facilidad a otros medios así, cuando su concentración se incrementa, éstos contribuyen a un nivel importante de toxicidad en el suelo incluso, en elementos que se consideran esenciales para muchos procesos bioquímicos; la toxicidad de los elementos también depende de la especiación o formas en que se presentan en el mismo, así como de su biodisponibilidad y su ingreso a la cadena trófica (Holmgren *et al.*, 1993).

Su ingreso a la cadena trófica se da mediante la absorción por las plantas o el lavado hacia las aguas freáticas o cuando las concentraciones promedio de los metales en el suelo, rebasan los límites máximos de concentración (Tabla 4) (Linsay, 1979).

En suelos agrícolas inundados con aguas residuales se pueden incorporar al suelo sustancias tóxicas como es el caso de los metales pesados y residuos orgánicos de baja tasa de degradación, además de un incremento de salinidad tanto del suelo como del manto acuífero (Chang *et al.*, 1992).

Muchos metales asociado con la fase acuosa del suelo pueden transportarse por medio del agua subterránea y no se degradan (Aguirre y Athié, 1981). Su movilización hacia las aguas subterráneas, se da por los mecanismos de adsorción y precipitación; la interacción de los metales y el suelo, inicia desde que los metales se introducen desde la superficie hasta su precipitación a estratos inferiores cuando estos logran rebasar la capacidad de carga de los suelos (Gonzáles *et al.*, 2000).

IV.7.- Fitotoxicidad de los metales pesados

El término fitotoxicidad normalmente ha sido asociado con el fenómeno causado por una sustancia potencialmente dañina en el tejido vegetal que afecta su óptimo crecimiento y el desarrollo de la misma; la fitotoxicidad en las plantas se establece según su comportamiento y los signos que presentan a lo largo de su crecimiento, además de tomar en cuenta las características ambientales y de manejo del área donde estén cultivadas (Tabla 5) (McGrath y McCormack, 1999).

A las concentraciones bajas de elementos químicos contaminantes (< 0.1%), en las plantas se les llama "elementos traza", independientemente de que sean esenciales para su metabolismo o tengan efectos tóxicos.

Tabla 4.- Contenido de elementos metálicos en el suelo (Linsay, 1979)

Metales	Promedio seleccionado para el suelo (mg kg ⁻¹)	Rango común para el suelo (mg kg ⁻¹)
Al	71,000	10,000 – 30, 000
Fe	38,000	7,000 – 550, 000
Mn	600	20 – 3,000
Cu	30	2 – 100
Cr	100	1 – 1000
Cd	0.06	0.01 – 0.70
Zn	50	10 – 300
As	5	1.0 – 50
Se	0.3	0.1 – 2
Ni	40	5 – 500
Ag	0.05	0.01 – 5
Pb	10	2 – 200
Hg	0.03	0.01 – 0.3

Los elementos traza, como el arsénico (As), cadmio (Cd) o Talio (Tl), son poco abundantes en el agua y el suelo en condiciones naturales sin embargo, las actividades industriales y mineras pueden originar una contaminación por estos elementos, que pasarían a las plantas y animales donde se pueden concentrar y causar efectos tóxicos al humano (Fergusson, 1990).

IV.7.1.- Relación del crecimiento vegetal con las características físico-químicas del suelo

Los nutrimentos del suelo, provienen de diferentes fuentes, tales como la disolución de los materiales primarios, descomposición de la materia orgánica, aplicación de fertilizantes químicos y abonos orgánicos; una vez en el suelo, los nutrimentos pueden sufrir varias reacciones (Chang *et al.*, 1992).

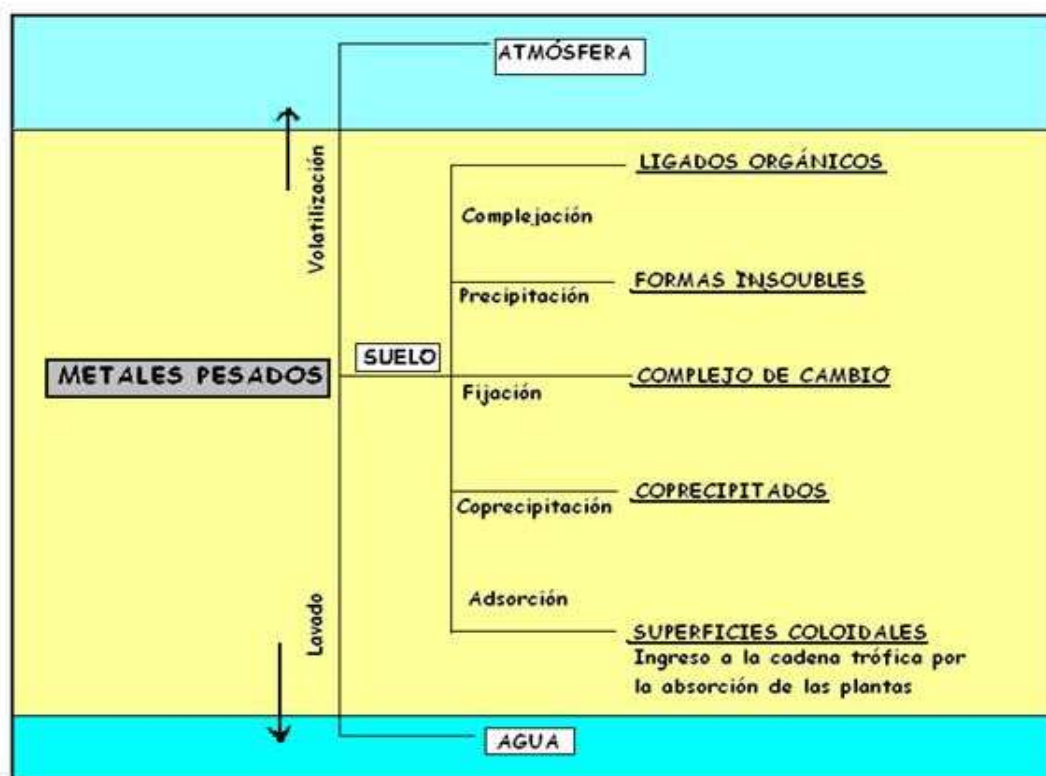


Figura 3.- Comportamiento de los metales pesados hacia los diferentes estratos ambientales (Frink, 1996).

El retraso en el desarrollo de las plantas, no solo se limitan a la asociación de sustancias tóxicas del medio ambiente ya que existen también, otros factores como la deficiencia de nutrimentos, agua, cantidad de sales minerales y diversas enfermedades a nivel de raíz, tallo, hojas y fruto (Aguirre y Athié, 1981).

La producción agrícola, debe basarse en las necesidades, físicas y químicas que requiere cada especie a cultivar, así como también, tomar en cuenta si estas características están presentes en la zona de cultivo.

Todo esto dará una pauta importante para la selección de cultivos y fertilizantes que deben de emplearse para lograr una buena producción agrícola (Robles, 1992).

IV.8.- Nutrición vegetal

Como parte de la nutrición vegetal, existen algunos elementos traza necesarios que se incorporan cuando están disponibles en el suelo o agua y según la especie vegetal, son requeridos en ciertas concentraciones actuando de diferente manera, ya sea por su deficiencia o excedente (Tabla, 5); pero cuando estos elementos son abundantes para las plantas se convierten en tóxicos y generan la pérdida de la calidad y propiedades alimenticias de los productos agrícolas generando conflictos fisiológicos importantes (McGrath y McCormack, 1999).

Tabla 5.- Alteración fisiológicas que producen algunos metales pesados que contaminan las plantas (Nastusch, 1997).

Metal	Efecto en los vegetales
Aluminio	Inhibición y alteración de las funciones de la membrana celular, a nivel del citoplasma.
Arsénico	Reducción del crecimiento y alteración de la concentración de Ca, K, P y Mn en la planta.
Cadmio	Inhibición de la fotosíntesis y la transpiración. Inhibición de la síntesis de clorofila. Modificación de las concentraciones de Mn, Ca y K.
Cobre	Desbalance iónico, alteración de la permeabilidad de la membrana celular, reducción del crecimiento e inhibición de la fotosíntesis.
Cromo	Degradación de la estructura del cloroplasto, inhibición de la fotosíntesis, alteración de las concentraciones de Fe, Ca, K y Mg.
Mercurio	Alteración de la fotosíntesis, inhibición del crecimiento, alteración de la captación de K.
Plomo	Inhibición de la fotosíntesis, el crecimiento y de la acción enzimática.
Zinc	Alteración de la permeabilidad de la membrana celular, inhibición de la fotosíntesis, alteración en las concentraciones de Cu, Fe y Mg.

Si la planta crece en diferentes tipos de suelo con igual concentración de metales, varía notablemente el nivel de fitotoxicidad por su capacidad de absorción. Esto se relaciona con el contenido de arcillas, su composición mineral, la cantidad de materia orgánica, pH y la composición de la solución del suelo (Nastusch, 1997). La toxicidad de algunos metales en las plantas, depende en mucho del tipo de vegetal de que se trate y las vías metabólicas a las que afecte;

esta toxicidad se puede manifestar con la alteración del balance iónico de la membrana plasmática ocasionando la salida de iones como el potasio o alterando el balance iónico en organelos celulares y el citoplasma (McGrath y McCormack, 1999).

IV.9.- Mecanismos de absorción de metales pesados por las plantas

Las especies vegetales, incluidos los cultivos agrícolas, tienen la capacidad de acumular metales pesados en sus tejidos; a esta capacidad se le conoce como bioacumulación y es diferente entre las especies vegetales y son atribuidas también, a la capacidad de retención de metales por el suelo y a la interacción planta – raíz - metal (Bañuelos *et al*, 1997).

El agua y los minerales disponibles en el suelo, se incorporan a las plantas a través de las raíces; en éstas existen unos pelos radicales que son extensiones unicelulares de las células epidérmicas y que poseen una pared muy fina con vida efímera (1-3 días); estos pelos radicales, aumentan el área de contacto con el estrato y permite una absorción más eficiente del agua y los minerales necesarios (Fitter *et al.*, 1987).

La endodermis contiene una cinta de material impermeable conocida como la banda de Caspary, que evita el paso de exceso de agua y elementos disueltos a través de células endodérmicas y de esta manera, regula el paso de nutrientes y agua que llega al xilema (Nobel, 1999). La vacuola es el orgánulo celular que ocupa un espacio considerable en las células vegetales (40 al 70%) y en muchas plantas es un almacén con gran capacidad masiva para acumular niveles elevados de materiales tóxicos sin dañar a otras células (Fitter *et al.*, 1987).

Cuando un metal pesado entra en una célula vegetal es inmovilizado por sustancias orgánicas quelantes (fitoquelatinas) que forman iones complejos con el metal y evitan la fitotoxicidad de estos; otro camino es que al formar los quelatos, estos pasan por la vacuola y ahí se alojan.

Las sustancias quelantes pueden ser producidas por la propia planta y liberadas al suelo a través de las raíces, o pueden ser añadidas directamente por el hombre, empleando insumos químicos para descontaminarlos (Nobel, 1999).

Las plantas capaces de crecer en suelos con altos contenidos de metales lo hacen excluyendo iones potencialmente tóxicos de sus sistemas de raíces. En otras plantas, los metales son utilizados como micronutrientes, aunque a menudo aún en concentraciones mínimas, saturan a la planta. La habilidad de tolerar la presencia de metales pesados está determinada por el nivel de variación genética de cada especie vegetal (Gadd, 2000).

La capacidad de las plantas de absorber y almacenar elementos minerales, como los metales pesados en sus órganos, se denomina bioacumulación y ha sido utilizada para monitorear el índice de contaminación de algunos ecosistemas, sin embargo, los patrones de bioacumulación son muy variables, tanto entre especies vegetales como entre los diferentes elementos minerales, y no siempre existe una relación extrapolable (Gadd, 2000).



Imagen 3.- Los principales cultivos, maíz, frijol, calabaza, chile, trigo, alfalfa, avena y trigo no abastecen únicamente las necesidades de la región, muchos de estos productos también son llevados a otros estados y hasta exportados.

V.- Normatividad

En cuanto a la legislación existente sobre umbrales mínimos que se consideran contaminantes para el suelo, la siguiente tabla muestra los valores aceptados por la Unión Europea y los correspondientes a algunos países, como Holanda, especialmente sensibles a este problema.

El establecimiento de niveles estándar de elementos traza para la valoración de la contaminación del suelo, constituye el principal requisito de calidad y protección de las funciones agrícolas y ecológicas (Kabata-Pendias y Pendias 1995).

Tabla 6.- Umbrales de contaminación en mg kg⁻¹ en los principales países que generan contaminación por metales pesados (Kabata-Pendias y Pendias, 1995)

Metal	Holanda (contaminación)	Holanda (necesidad de saneamiento)	España (adición de lodos)	Unión Europea (máximo permitido)
Cr	100	800	100-1000	--
Co	20	300	--	--
Ni	50	500	30-300	75
Cu	50	500	50-1000	140
Zn	200	3000	150-2500	300
As	20	50	--	--
Mo	10	200	--	--
Cd	1	20	1-20	3
Sn	20	300	--	--
Ba	200	2000	--	--
Hg	0.5	10	1-16	1.5
Pb	50	600	50-750	300

V.1.- Normas Oficiales Mexicanas y Ecológicas

Para minimizar los problemas de contaminación por el uso de aguas residuales en las actividades productivas de nuestro país, se cuenta con regulaciones legales e institucionales que aseguran el desarrollo sustentable de la agricultura

en el Valle del Mezquital como es el caso de la Ley de Aguas Nacionales (1993) y las Normas Oficiales Mexicanas, que establecen los requerimientos mínimos para el uso de aguas residuales (Carrillo *et al.*, 1995).

La CNA, oficialmente creada en 1989 como una entidad del gobierno federal, es responsable de promover la construcción de infraestructura hidroagrícola y se encarga de regular los distritos de riego, así como de su operación para asegurar el cumplimiento de las leyes y normas relacionadas con el uso eficiente del agua y su control de calidad (CNA, 1995).

El Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Comisión Nacional del Agua (CNA), expidieron en forma coordinada cuatro Normas Oficiales Mexicanas para la prevención y control de la contaminación del agua.

- NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. (DOF. 6 de enero de 1997).
- NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. (DOF. 3 de junio de 1998).
- NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público (DOF. 21 de septiembre de 1998).
- NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final (DOF. 15 de agosto de 2003).

Es importante mencionar que actualmente no existe ninguna normativa ni legislación que regule la concentración de metales pesados en el suelo y establezca los límites máximos permisibles, donde se utilice agua residual para el riego.

Tabla 7.- Función biológicas y de toxicidad de los metales pesados en los organismos (Hagedorn, 1996).

Elemento	Función biológica	Nivel de Fitotoxicidad ^a (mg kg ⁻¹)	Efectos de Toxicidad	Toxicidad en mamíferos	Niveles en el suelo (mg kg ⁻¹)
Al	Activa la deshidrogenasa	Moderado (50-200)	No esencial, las concentraciones naturales en el suelo son muy altas que las del agua residual: la toxicidad ocurre solo en suelos ácidos. La acumulación de este metal es a nivel de las raíces que se pudren o presentan plasmolisis. Este no se acumula en las hojas.	Bajo	10,000 a 300,000
As	Ninguno en animales; es un fosfolípido en algas y hongos	Moderado a alto (5-20)	Elemento no esencial, el contenido en plantas cultivadas varía ampliamente con las concentraciones naturales de arsénico en el suelo. El crecimiento en las plantas se ve afectado por altas concentraciones de As.	Alto	3.6 a 8.8
Cd	Ninguno conocido	Moderado a alto (5-30)	No esencial, las plantas presentan una amplia gama de tolerancia a las concentraciones del suelo; en plantas cultivadas aumenta su concentración y se vuelven inseguras para el consumo en humanos y animales.	Alto	0.06 a 1.1
Cr	Metaboliza el azúcar de la sangre en los mamíferos	Moderado a alto (5-30)	No esencial, su acumulación es tóxica en el suelo cuando se presenta en su estado hexavalente (Cr ⁺⁶).	Alto	20 a 85
Cu	Esencial para todos los organismos, actúa sobre las enzimas redox y el transporte de oxígeno	Moderado a alto (20-100)	Elemento esencial pero tóxico, particularmente en suelos ácidos, cuando existen altas concentraciones puede existir la deficiencia de hierro y fósforo. Se acumulan en las plantas pero no a nivel de las hojas aunque aun con ello son inseguras para el consumo.	Moderado	14 a 29
Fe	Esencial para todos los organismos. Es un cofactor en muchas enzimas y varias proteínas.	Bajo (>1000)	Elemento esencial; las concentraciones naturales en el suelo, varían mucho al aplicarse agua residual en el riego. No se considera tóxico en especies cultivadas aunque la presencia de formas amorfas contribuye a la deficiencia de fósforo y molibdeno.	Bajo	50 a 1000

Elemento	Función biológica	Nivel de Fitotoxicidad ^a (mg kg ⁻¹)	Efectos de Toxicidad	Toxicidad en mamíferos	Niveles en el suelo (mg kg ⁻¹)
Hg	Ninguna conocida	Alta (1-3)	No esencial, la magnitud de absorción por plantas terrestres es muy baja al igual que su toxicidad, pero si es alta en animales y el hombre. Se pierde del suelo por volatilización.	Alto	0.04 a 0.28
Mn	Esencial para todos los organismos además de participar en la fotosíntesis	Bajo a moderado (300-500)	Esencial, las concentraciones naturales en el suelo son usualmente más altas que las contenidas en el agua residual. Se restringe su toxicidad en los suelos ácidos y los síntomas en las plantas son una clorosis y rozamiento en los márgenes de las hojas.	Moderado	260 a 840
Mo	Esencial en casi todos los organismos, es un cofactor en la fijación del Nitrógeno	Moderado (10-50)	Esencial. Presenta baja toxicidad en algunas plantas, cuando existen altas concentraciones en el suelo, el molibdeno puede acumularse en el forraje; la solubilidad del molibdeno en el suelo incrementa cuando el nivel del pH es bajo.	Moderado	0.35 a 5.8
Ni	Esencial para las plantas	Moderado a alto (10-100)	No esencial para las plantas. Relativamente existe una baja fitotoxicidad en plantas que crecen en suelos ácidos. No se absorbe de manera natural a concentraciones consideradas de riesgo para el hombre o los animales.	Moderado	13 a 30
Pb	Ninguno conocido	Moderado (10-100)	No esencial, no es tan toxico cuando es absorbido por plantas cultivadas, pero cuando se ingiere directamente por animales o humanos se presenta un alto nivel de toxicidad.	Alto	17 a 26
Se	Esencial para los mamíferos y algunas plantas.	Moderado a alto (5-30)	No esencial para las plantas. Hay una baja toxicidad excepto cuando hay niveles altos en el suelo y solo así es absorbido por las plantas. El selenio en el forraje puede ser dañino para los animales. Es disponible para las plantas cuando la acides del suelo es baja.	Alto	0.019 a 1.05

Elemento	Función biológica	Nivel de Fitotoxicidad ^a (mg kg ⁻¹)	Efectos de Toxicidad	Toxicidad en mamíferos	Niveles en el suelo (mg kg ⁻¹)
Zn	Esencial en todos los mamíferos	Bajo a moderado (100-400)	Elemento esencial; se acumula en los cultivos pero en niveles considerado normales para el consumo del hombre y los animales; la fitotoxicidad es más prevalente y aguda en suelos ácidos.	Bajo a moderado	34 a 84

^a Las plantas cultivadas varían ampliamente en su capacidad de tolerar metales pesados en el suelo, en muchos casos, la forma química del metal es determinante para tal tolerancia. Los efectos y concentraciones están generalizadas solo si esta especificada o en el listado.

VI.- OBJETIVO GENERAL

Determinar la presencia y concentración de metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, en los que se empleen aguas residuales de la Presa Requena, dentro del DR 03-Tula.

VI.1.- Objetivos específicos

- Realizar la caracterización físico-química de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital.
- Determinar la concentración de metales pesados bioacumulados en los diferentes cultivos de los sitios de muestreo.
- Establecer una relación entre las concentraciones en ambos tipos de muestra, algunas características físico-químicas del suelo y su antigüedad de riego.

VII.- HIPÓTESIS DEL TRABAJO

Con el uso incontrolado de aguas residuales para el riego agrícola del Valle del Mezquital, los metales pesados contenidos en la misma se han ido concentrando en el suelo y por lo tanto, se encuentran biodisponibles para las plantas cultivadas en las zonas de riego.

VIII.- ÁREA DE ESTUDIO

Dentro de la subprovincia de llanuras y sierras de los estados de Querétaro e Hidalgo, se encuentra el Valle del Mezquital, que es una prolongación del Valle de México, rodeado por una serie de montañas, sierras, mesetas y lomeríos, casi todos de origen volcánico, con una altura promedio de 2,000 msnm y que le dan una topografía de plana a ligeramente ondulada (CNA, 1995).

VIII.1.- Caracterización del área de estudio

El Valle del Mezquital, esta conformado por 27 de los 84 municipios que integran el estado de Hidalgo; es considerado como una zona de gran importancia social, política, económica y religiosa del centro de México y es también, la zona agrícola más grande irrigada con aguas residuales; constituido el 21 de Julio de 1988, con una superficie total de 461,000 ha, de las cuales, 136, 722 ha, son de vocación agrícola (6,000 de producción temporal y 95,000 a 130,000 de riego), 18,500 ha, de uso forestal y 204,500 ha, de aprovechamiento pecuario (Peña, 1997).

De los 750,000 habitantes, el 70% viven en áreas urbanas y semiurbanas y se dedican principalmente a las actividades agrícolas y ganaderas (INEGI, 2001), por lo que se conoce como el granero de México, donde se produce maíz, frijol, trigo, tomate, jitomate, cebolla, avena y la cuarta parte de toda la alfalfa y el chile verde que se producen en el país (Peña, 1997).

VIII.1.2.- Geografía

Se encuentra ubicado en lo alto de la meseta Mexicana y ocupa la parte sur-occidental y central del estado de Hidalgo dentro de los paralelos 19° 53' y 20° 02' latitud norte y 98° 57' y 99° 15' longitud oeste a 109 km. de la ciudad de México con una altitud que va de 1,700 y 2,100 msnm (CNA, 1995).

Pertenece a la región hidrológica del Río Pánuco (RH-26) que corresponde a la vertiente del Golfo de México, esta zona hidrológica se subdivide en el alto y bajo Pánuco, donde el Río Tula que nace en el estado de México, inicia su recorrido hasta Ixmiquilpan y el Río San Juan, en donde cambia su nombre a Río Moctezuma siendo este, junto con el Río Tamuin los principales afluentes de la región (CNA, 1995).

VIII.1.3.- Geología

Esta zona sustenta un mosaico edáfico más o menos homogéneo donde dominan los suelos someros y en las llanuras son generalmente profundos, constituida por formaciones del Terciario Superior y Cuaternario con rocas volcánicas (Brechas, tobas y derrames riolíticos, intermedios y basálticos) e intrusiones de caliza del cretácico (Hernández *et al.*, 1994).

VIII.1.4.- Clima

El clima es semiseco templado, con lluvias en verano (BS1Kw) con una temperatura media anual de 14.8 °C (17.3 °C MAX y 9.4 °C MIN); la precipitación máxima se presenta en septiembre (117.4 mm) y mínima en enero (8.8 mm) con un promedio anual de 543.4 mm, razón por la cual se hace indispensable el riego de los cultivos; este clima favorece la vegetación natural de diferentes especies de matorral de tipo xerófito donde predominan los pastizales, cactus, agaves, palmeras y mezquites, ya que es el más húmedo de los climas áridos (Hernández *et al.*, 1994).

VIII.1.5.- Vegetación

El matorral crasicaule es la vegetación más representativa; lo caracterizan las cactáceas de tallos suculentos, huizaches (*Acacia farnesiana*) y los mezquites (*Prosopis sp.*). Entre las especies nativas encontramos al garambullo (*Mytilacactus geometrizzans*), el mezquite (*Prosopis laevigata*), maguey (*Agave*

sp) y nopal (*Opuntia sp.*). El Valle del Mezquital fue considerado como Área Natural Protegida en el Diario Oficial de la Federación el 3 de mayo de 1947 (Peña, 1997).

Esta vegetación natural sólo está presente en las partes altas y poco perturbadas; ya que la mayor parte de las tierras bajas están cubiertas por los cultivos de riego; dentro de las principales especies cultivadas se presentan la alfalfa (*Medicago sativa*) y el maíz (*Zea mays*) que ocupan del 60 al 80% del área de cultivo (Tabla 18) (Hernández *et al.*, 1994).



Imagen 4.- Del total productivo del Valle del Mezquital, el 49% corresponde a los cultivos de alfalfa, de ahí, le sigue, el frijol, Maíz, cebada, trigo y chile.

Debido al uso de aguas residuales para riego, quedo prohibido bajo la ley por disposición sanitaria (DOF, 1993) el cultivo de verduras, aunque hay zonas donde aún se cultiva alcachofa (*Cirana sp*), acelga (*Beta vulgaris L.*), rábano (*Raphanus sativus*), calabaza (*Cucurbita sp*) y betabel (*Beta vulgaris*) (CNA, 1995).

VIII.1.6.- Fauna

Dentro de especies silvestres se pueden encontrar en las áreas menos perturbadas conejos (*Oryctolagus cuniculus*), liebres (*Lepus capensis*), zorros (*Vulpes vulpes*), tejones (*Meles sp.*), ardillas (*Sciurus sp.*), armadillos (*Dasypus sp.*) y otros roedores, diversas especies de aves, serpientes y reptiles (Peña, 1997).

En su mayoría, la fauna del Valle del Mezquital esta compuesta por especies domesticas que también son una parte importante de la economía de la región; el sector ganadero de los municipios que integran el Valle del Mezquital, tiene una importante jerarquía a nivel estado; tan solo los municipios de Tula de Allende, Ixmiquilpan, Tepeji del Río, Actopan y Tezontepec de Aldama representan el 12.7 % de la producción bovina del estado de Hidalgo; dentro de las especies domesticas más representativas están el ganado vacuno (*Bos taurus*), borregos (*Ovis aries*), cabras (*Capra sp.*), cerdos (*Sus sp.*), caballos (*Eqqus caballus*), aves de corral como gallinas (*Gallus gallus domesticus*) y guajolotes (*Meleagris gallipavo*), etc. (Hernández et al., 1994).

Tabla 8.- Municipios que conforman el Valle del Mezquital, Hidalgo (SARH, 1994; CNA, 1995).

NOMBRE ¹	SUPERFICIE ² (Km ²)	POBLACIÓN ² (Habitantes)
Actopan *	280,10	45.946
Ajacuba *	192,70	14.459
Alfajayucan	467,70	16.977
Atitalaquia	64,20	21.805
Atotonilco de Tula	30,80	24.733
Cardonal	462,60	16.903
Chapantongo	298,10	11.172
Chilcuahutla	231,30	15.058
El Arenal	125,90	14.119
Francisco I. Madero *	95,10	28.425
Huichapan	668,10	38.045
Ixmiquilpan	565,30	75.725
Mixquiahuala de Juárez *	138,10	35.054

NOMBRE¹	SUPERFICIE² (Km²)	POBLACIÓN² (Habitantes)
Nopala de Villagran	334,10	14.697
Progreso de Obregón *	106,00	19.027
San Agustín Tlaxiaca	354,60	24.252
San Salvador	200,40	28.972
Santiago de Anaya	316,10	13.559
Tasquillo	167,00	16.610
Tecozautla	575,60	30.793
Tepeji del Río de Ocampo	393,20	678.573
Tepetitlan	179,90	8.494
Tetepango	56,50	8.927
Tezontepec de Aldama *	120,80	38.682
Tlahuelilpan *	31,30	13.910
Tlaxcoapan *	79,30	22.424
Tula de Allende *	305,80	86.782
Total	6.840,60	753.073

* Municipios donde se ubican los puntos de muestreo para este trabajo.

¹ Comisión Estatal de Ecología del Estado de Hidalgo (COEDE), septiembre 2001

² Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (INEGI), Anuario Estadístico Hidalgo, Edición 2000.

VIII.1.7.- Suelos

El termino suelo, se refiere a la región en la que se encuentra la vida vegetal y de la cual, las plantas obtienen soporte mecánico y muchos de sus nutrimentos (Cong, 1994). Los suelos de esta región han permitido el desarrollo de la agricultura de riego utilizando aguas residuales desde hace 100 años, por lo que la cobertura natural ha sido remplazada continuamente; se han establecido dos agrupaciones de suelos: la primera constituida por suelos recientes, que son aluviales profundos, de textura variable y topografía plana; esta agrupación está conformada por las series Actopan y Lagunillas (CNA, 1991). La segunda agrupación está conformada por suelos mixtos con un grado de desarrollo variable, le corresponde las series Tepatepec y Progreso; estos conforman la mayor parte del DR 03-Tula (CNA, 1995).

VIII.1.8.- Sistema de riego

El suelo predominante en el DR 03-Tula, cuenta con una buena infiltración, permeabilidad variada y buen drenaje interno; tiene gran capacidad para retener elementos necesarios para las plantas como N, P y macronutrientes como Zn, Cu y Mn. El DR 03-Tula, se localiza al sureste del estado y abastece los ríos San Luis, Tepeji, El Salto y Tula, donde son importantes las presas Taxhimay, Requena y Endhó (Fig. 2) que almacenan aguas residuales provenientes de la ZMCM (INEGI, 1994).

Tabla 9.- Tipo de tenencia de la tierra en el DR03-Tula (CNA-1995).

TIPO	SUPERFICIE (ha)	USUARIOS	PARCELA MEDIA
Ejidal	23,510.43	15, 366	1-55-30 ha
Pequeña propiedad	21, 704.09	125, 588	1-68-00 ha
Colonos			1-76-34 ha
Total	45, 214.52	27, 894	1-68-86 ha

Las aguas residuales utilizadas en el Valle del Mezquital sólo reciben un tratamiento natural, no convencional y debido a la superficie de cultivo de riego, la región es el ejemplo más importante del sistema de riego con aguas residuales a nivel nacional (Mendoza, 1981).

VIII.2.- Descripción de los sitios de muestreo

La investigación se llevo acabo dentro del DR 03-Tula, en el Valle del Mezquital específicamente en nueve municipios tomados de manera aleatoria (Ajacuba, Tlaxcoapan, Tlahuelilpan, Mixquiahuala, Progreso de Obregón, Tezontepec de Aldama, Francisco I. Madero, Actopan y Tula de Allende); los sitios de muestreo han empleado aguas residuales para riego provenientes de la presa Requena (19° 55'47" N y 99° 20' 05" W, 2114 msnm) con antigüedades de riego registrados de 3 a 87 años (Tabla 10).



Fig. 4.- Área de estudio, El Valle del Mezquital, Hidalgo. Modif. De Departamento Cultural e Informativo del Consulado Americano de Monterrey. 2001

En cada sitio de cultivo, se tomaron con una barrena, cinco sub muestras de suelo a una profundidad de 0-30 cm, en la capa arable de aproximadamente 1 kg., empleando la técnica de recorrido de terreno en zig-zag (Ruiz *et al.*, 1999), éstas se homogenizaron para formar un muestra compuesta (Brady y Weil, 1999); de igual forma, en los mismos sitios, se tomaron submuestras del cultivo dominante y se colocaron en una bolsa de papel perfectamente identificada para su revisión en laboratorio.

Es importante mencionar, que también se recolectaron muestras de dos sitios en el municipio de Tezontepec de Aldama, en donde el riego se realiza empleando aguas residuales mezcladas con agua de manantial y del Río Tula, con la finalidad de hacer un comparativo de resultados considerando el tipo de agua empleada.

Las muestras fueron llevados al laboratorio de suelos del centro de investigaciones de ciencias de la Tierra de la UAEH para ser analizadas.

IX.- ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE SUELO Y CULTIVOS

IX.1.- Pre-tratamiento de las muestras

IX.1.1.- Muestras de suelos

Las muestras compuestas, se extendieron sobre hojas de papel periódico durante tres días con la finalidad de someterlas a un proceso de secado a temperatura ambiente y libre de contaminación; después se tamizaron utilizando un tamiz de malla 10, de acero inoxidable, el suelo tamizado se recolectó en bolsas de plástico etiquetadas para realizar los análisis correspondientes.

IX.1.2.- Muestras de cultivos

Para el proceso de las muestras de cultivos, se obtuvieron plantas de ejote (*Pisum sativum*), acelga (*Beta vulgaris* L.), rábano (*Raphanus sativus*), calabaza (*Cucurbita* sp), betabel (*Beta vulgaris*), coliflor (*Brassica oleracea*), Hierbabuena (*Mentha sativa*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), chile (*Capsicum* sp.), maíz (*Zea mays*), verdolaga (*Portulaca* sp.) y cempasúchil (*Tagetes erecta*); las partes empleadas para su análisis fueron el tallo, hoja y en algunos casos el fruto, los cuales fueron colocadas en una bolsa de papel en donde se secaron en una estufa a 75° durante 48 hrs, después se molieron y depositaron 200 g de muestras en seco, en bolsas de polietileno etiquetadas.

IX.2.- Análisis de laboratorio

Los análisis de suelo y vegetales se realizaron siguiendo las especificaciones de las NOM-021-RECNAT-2002 y las pruebas descritas por Reyes (1996), en triplicado para corroborar los resultados.

IX.2.1.- Caracterización física del suelo

Se tomaron en cuenta los siguientes parámetros para la caracterización físico-química y la determinación de metales pesados en suelos.

- Determinación de color del suelo por medio del método de las tablas de Munsell (Reyes. 1996).
- Textura.- La determinación de la textura del suelo por el procedimiento del Hidrómetro de Bouyoucos a través del método AS-09 (NOM- 021-RECNAT-2000).
- La determinación de la densidad real con el picnómetro se realizó a través del método AS-04 (NOM- 021-RECNAT-2000).
- La determinación de la densidad aparente de suelo por el método de la probeta (Reyes. 1996).

IX.2.1.1.- Caracterización química del suelo

- pH.- La determinación del pH del suelo medido en agua se realizó a través del método AS-02 (NOM- 021-RECNAT-2000).
- % Materia orgánica.- El procedimiento para la determinación de materia orgánica del suelo se realizó a través del método AS-07, de Walkley y Black (NOM- 021-RECNAT-2000).
- La medición de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación se realizó a través del método AS-18, con un conductímetro (NOM- 021-RECNAT-2000).

- La determinación de la capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables del suelo se realizó a través del método AS-12, con acetato de amonio (NOM- 021-RECNAT-2000).
- La determinación de la concentración total de metales pesados en suelo, se realizó a través de la técnica de espectroscopia de fluorescencia de rayos X (FRX), utilizando un espectrómetro secuencial de fluorescencia de rayos X SIEMENS SRS3000 automatizado, equipado con tubo de Rh y ventana de Be de 1.25 μm .

IX.2.2.- Análisis químico de los cultivos

Después del pre-tratamiento de las especies vegetales, se obtuvieron 30 muestras de vegetales a las que se les determinó la concentración de metales pesados absorbido, utilizando el método de Piper, (1944) modificado por Plank (1992) empleando una mezcla diácida (ácido Nítrico y ácido Perclórico), para eliminar la materia orgánica de los vegetales hasta obtener una digestión clara del material.

Con esta solución se determinó la concentración de plomo, cadmio, níquel, zinc, cobre y cromo en peso seco, por medio del espectrómetro de plasma de inducción acoplada (ICP) Perkin Elmer modelo LAMBA 2S.

IX.3.- Análisis estadísticos

Para determinar si existe alguna correlación entre la concentración de metales pesados en el suelo y las características fisicoquímicas del mismo, las variables obtenidas se sometieron a un análisis estadístico de correlación empleando el software SPSS/PC + Advanced Statistics Version 6.0 statistical package. El nivel de significación fue establecido para $p < 0.05$.

Para este trabajo se establecieron las variables significativas:

- Concentración de metales pesados en suelo y antigüedad de riego,
- concentración de metales pesados en sitios de riego con aguas residuales y sitios de riego con aguas residuales mezcladas con aguas de manantial y del Río Tula y
- concentración de metales pesados en cultivos y concentración en el suelo.

Tabla 10.- Puntos de muestreo en 7 municipios que conforman el DDR 03-Tula.

Sitio	Tipo de agua	Años de riego	Muestras colectadas	Ubicación	Descripción de la zona
Pto. 1	Residual	83	Suelo, cempasúchil y Ejote	Ajacuba	El riego se realiza cada 6 días utilizando aguas residuales durante los últimos cuatro meses; 8 días antes del muestreo, se aplicó Metrofosfato como fertilizante con una dosis no determinada; el cempasúchil estaba plantado en dos surcos a la mitad del área de cultivo.
Pto. 2	Residual	75	Suelo, Chile y Calabaza	Tula de Allende	Zona semi-urbana ubicada a la orilla de la carretera, existe una canaleta para riego hacia el sureste del área de cultivo. El riego de esta zona se había llevado a cabo la noche anterior.
Pto. 3	Residual	87	Suelo y Calabaza	Tlaxcoapan	Recibe constantemente agua negra de una canaleta secundaria cuando se riegan otras parcelas por lo que la mayor parte del tiempo se encuentra húmeda. El cultivo se encontraba en flor por lo que las muestras de vegetales consistieron en flor y fruto.
Pto. 4	Residual	77	Suelo, Maíz y Betabel	Tlahuelilpan	Se muestreo un cultivo de betabel que se encontraba en medio de uno de maíz a 12 mts del canal Requena. Aparentemente ya se habían realizado uno o dos cortes de este producto ya que existían restos de hojas en toda el área de cultivo.
Pto. 5	Residual	72	Suelo y Chile	Tlahuelilpan	Los cultivos mixtos donde se combinan frijol, maíz, calabaza o chile son muy comunes en el Valle del Mezquital; en esta zona predominaba el cultivo de chile, el frijol era la especie secundaria cultivada en este lugar.

Sitio	Tipo de agua	Años de riego	Muestras colectadas	Ubicación	Descripción de la zona
Pto. 6	Residual	37	Suelo, Cempasúchil y Calabaza	Francisco I. Madero	El cultivo principal de esta zona era la calabaza y solo cada 6 surco existía una de cempasúchil, el área esta ubicada a la entrada de la comunidad de el Rosario, a 50 metros de la carretera Tula-Actopan.
Pto. 7	Residual	48	Suelo, Ejote y Chile	Progreso de Obregón	La noche anterior se había efectuado el riego de este cultivo; el ejote es el cultivo dominante; pero el chile se encontraba plantado en todos los surcos por cada 10-15 plantas de ejote.
Pto. 8	Residual diluida	69	Suelo, Acelga, Verdolaga, Perejil y Ejote	*Tezontepec de Aldama	Se utiliza un sistema de producción en mosaico, con asociación de cultivos en áreas menores a una ha. aproximadamente 400-600 m ² de terreno. En esta área se encontraban cultivadas acelga, verdolaga, perejil, ejote y rábanos.
Pto. 9	Residual diluida	62	Suelo, Hierbabuena y Coliflor	*Tezontepec de Aldama	Se emplea el sistema de mosaico antes descrito. El suelo ya presenta algunas características de ensalitramiento; la coliflor y acelga se encontraban cultivadas además de las hierbas de olor.
Pto. 10	Residual	53	Suelo y ejote	Actopan	El frijol se encontraba en ejote; y se calculaban 15 días para la primera corta de ejote.
Pto. 11	Residual	3	Suelo y frijol ejotero	Mixquiahuala de Juárez	Los puntos 11 y 12 son zonas nuevas de riego; ubicadas en la colonia Morelos del municipio de Mixquiahuala de Juárez; hace tres años empezaron a utilizar aguas residuales de la presa Requena para el riego; anteriormente se practicaba el cultivo de temporal y no se empleaba fertilizantes.

Sitio	Tipo de agua	Años de riego	Muestras colectadas	Ubicación	Descripción de la zona
Pto. 12	Residual	3	Suelo y Maíz	Mixquiahuala de Juárez	En comparación al sitio anterior ubicado a 100 metros de este terreno, el suelo presenta un color más claro y una deficiencia muy marcada en el crecimiento de las plantas de maíz.
Pto. 13	Residual	5	Suelo, Chile y Fríjol	Mixquiahuala de Juárez	Zona reciente en el uso de aguas residuales para el riego; hace cinco años que se inicio con el riego aunque por su cercanía al canal alto Requena, se utilizaba un sistema de bombeo para aprovechar el agua; esta práctica se lleva a cabo desde hace diez años aproximadamente.
Pto. 14	Residual	65	Suelo, Calabaza y Maíz	Actopan	En las márgenes de este terreno existen árboles frutales de higo, durazno y ciruela; las calabazas se cultiva entre cada planta de maíz para aprovechar espacio y agua de cada riego.
Pto. 15	Residual	68	Suelo, Fríjol y Maíz	Mixquiahuala de Juárez	Zonas con 68 años utilizando aguas residuales para el riego. Los puntos 15 y 16 se encuentran dentro de la misma área de cultivo (2 ha). Este punto presenta suelos de color más oscuro y las especies vegetales son más altas y frondosas.
Pto. 16	Residual	59	Suelo y Maíz	Mixquiahuala de Juárez	De color más claro, su capacidad de producción es baja, las especies vegetales que aquí nacen, presentan deficiencia en su tamaño.

Pto = Punto de muestreo

* Zona testigo, donde se emplean agua residual, mezclada con agua de manantial y del Río Tula para riego.

X.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

X.1.- Caracterización física del suelo

La caracterización física del suelo, se refiere a las características de organización estructural que determinan sus propiedades cualitativas y cuantitativas para el desarrollo de los cultivos, es decir la interacción suelo – aire – agua – microorganismos – plantas (Honorato *et al.*, 1988).

Los sitios de muestreo corresponden a ocho municipios del Valle del Mezquital (tabla 11); dos de estos puntos, son regados con aguas residuales mezcladas con aguas de manantial y del Río Tula y que nos servirán como zonas testigo de comparación.

Tabla 11.- Sitios de muestreo determinados para este trabajo.

Sitio	Tipo de agua	Antigüedad de riego	Municipio
Pto. 1	Residual	83	Ajacuba
Pto. 2	Residual	75	Tula de Allende
Pto. 3	Residual	87	Tlaxcoapan
Pto. 4	Residual	77	Tlahuelilpan
Pto. 5	Residual	72	Tlahuelilpan
Pto. 6	Residual	37	Fco. I. Madero
Pto. 7	Residual	48	Progreso de Obregón
Pto. 8	Mezclada	69	*Tezontepec de Aldama
Pto. 9	Mezclada	62	*Tezontepec de Aldama
Pto. 10	Residual	53	Actopan
Pto. 11	Residual	3	Mixquiahuala de Juárez
Pto. 12	Residual	3	Mixquiahuala de Juárez
Pto. 13	Residual	5	Mixquiahuala de Juárez
Pto. 14	Residual	65	Actopan
Pto. 15	Residual	68	Mixquiahuala de Juárez
Pto. 16	Residual	59	Mixquiahuala de Juárez

* Sitios de cultivo donde se irriga con aguas residuales y de manantial

X.1.1.- Color del suelo

El color en el suelo sirve como indicador para denominar horizontes y es determinante para su clasificación; el color del suelo puede deberse a las características de material generador o intemperización de minerales durante su formación. Los suelos Agrícolas del Valle del Mezquital, van de colores gris pardo a gris muy oscuro y esto habla en general, de suelos con concentraciones de materia orgánica adecuada para el crecimiento de cultivos, de tipo arcilloso ideal para las actividades agrícolas (Reyes. 1996).

X.1.2.- Clase textural

Denominada también como la composición granulométrica, expresa las proporciones relativas de las partículas minerales del suelo; es decir, su expresión cualitativa y cuantitativa (tamaño, naturaleza y proporción de las partículas del suelo). Estas partículas minerales pueden clasificarse según su composición química, su densidad, su forma o su tamaño (Boul *et al.*, 1997) y determinan el grado de humedad, drenaje, agregación, plasticidad, cohesión, retención de nutrimentos y capacidad de intercambio catiónico, entre otras propiedades del suelo (Reyes, 1996).

X.1.2.1.- Interpretación de la clase textural

La composición granulométrica promedio de los suelos analizados presentan los siguientes porcentajes: 38% arena, 25.4% arcilla y 36.6% limo y lo clasifican como clase textural franca, este tipo de textura presenta un mayor equilibrio entre sus componentes y se considera como el estado ideal en la textura de los suelos agrícolas (Talavera, 1983).

En general, los suelos del Valle presentan texturas de franco arenoso o franco arcilloso (Tabla 12); la primera, corresponde a suelos medios, buenos para el cultivo de hortalizas, cítricos, algodón, leguminosas, forrajes y maíz tal es el caso de los suelos del municipio de Ajacuba, Tezontepec y Mixquiahuala.

Por su parte, la textura franco arcillosa que corresponde a los municipios de Ajacuba, Actopan y Francisco I. Madero, corresponde a suelos pesados buenos para el cultivo de cítricos y tomate, aunque el tipo de cultivos que se observan en estas zonas son el maíz, frijol, chile, calabaza y alfalfa (López-Ritas y López-Melida. 1978).

Tabla 12.- Determinación de la clase textural del suelo por el procedimiento del Hidrómetro de Bouyoucos a través del método AS-09 (NOM- 021-RECNAT-2000).

Sitio de muestreo	Arena %	Arcilla %	Limo %	* Clase textural	** Clase textural (C.C.)
Punto 1	24	42	34	Arcillosa	Franca
Punto 2	30	24	46	Franco arcillo-arenosa	Franca
Punto 3	18	16	66	Franco limosa	Franca
Punto 4	16	48	36	Arcillosa	Arcilla
Punto 5	44	24	32	Franca	Franco arcillosa
Punto 6	24	40	36	Franca arcillosa	Arcilla
Punto 7	20	44	36	Franca arcillosa	Franco arcillosa
Punto 8	21	45	36	Franco arcillosa	Franco arcillosa
Punto 9	52	20	28	Franco arenosa	Franca
Punto 10	44	24	32	Franca	Franca
Punto 11	34	38	28	Franco arcillosa	Franca
Punto 12	41	38	21	Arcillosa	Franca
Punto 13	26	48	26	Arcillosa	Franca
Punto 14	40	26	34	Franco arcillosa	Franca
Punto 15	48	22	30	Franca	Franca
Punto 16	28	10	62	Franco arcillosa	Arcilla

* Hidrómetro de Bouyoucos. (NOM-021-SEMARNAT-2001) y

** Clase textural por la capacidad de campo (C.C.) (Talavera, 1983).

X.1.3.- Densidad aparente y densidad real; espacio poroso del suelo

La densidad real (DR), se expresa como la relación de la masa total de las partículas sólidas en un volumen conocido, excluyendo el volumen ocupado por los poros existentes entre tales partículas, está en función de los constituyentes sólidos del suelo y varía según el estado de agregación y el volumen ocupado por espacios intersticiales (León, 1991).

La densidad aparente (DA) por su parte, es la relación de la masa y volumen macroscópico ocupado por las partículas del suelo más el espacio poroso. Esta propiedad influye en la elasticidad, conductividad eléctrica, dureza y conductividad térmica del suelo (López-Ritas y López-Melida, 1978). El volumen que no es ocupado por material sólido en el suelo, se denomina espacio poroso (EP) y puede estar ocupado por agua o por aire; también es un parámetro importante que permite de desarrollo vital y la actividad biológica en el suelo (Tabla 13) (León, 1991).

La porosidad depende de la textura, estructura y la actividad biológica del suelo. La actividad biológica del suelo y la materia orgánica contribuye a aumentar la porosidad del suelo; un suelo rico en materia orgánica presenta mayor espacio poroso de esta forma, los suelos coloidales los que tienen la mayor porosidad (Aguilar, 1988).

Los suelos analizados, presentan porcentajes de porosidad que permiten la aireación y retención adecuada del agua en el suelo (40 - 60 %); estas propiedades seguramente evitaban la acumulación de metales pesados (León, 1991).

X.1.3.1.- Interpretación de la DR, DA y EP.

Los datos obtenidos de las densidades real y aparente son empleados en diferentes ecuaciones para obtener algunos valores del suelo tales como: lámina de riego, contenido de humedad por volumen de suelo y masa del suelo por hectárea de cultivo (Tabla 13).

Tabla 13.- Determinación de la DR, DA, EP y peso por ha., de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital.

Sitio de muestreo	* D.A. kg m ⁻³	** D.R. kg m ⁻³	*** E.P. %	**** (t ha ⁻¹)
Punto 1	1.35	1.69	79.88	4.05
Punto 2	1.25	1.71	73.1	3.75
Punto 3	1.35	1.62	83.33	5.05
Punto 4	1.5	2.32	64.54	4.5
Punto 5	1.33	1.7	78.24	3.99
Punto 6	1.35	1.59	84.91	4.05
Punto 7	1.29	2.17	59.53	3.87
Punto 8	1.52	2.17	69.99	4.56
Punto 9	1.48	2.2	67.3	4.44
Punto 10	1.32	2.11	62.49	3.96
Punto 11	1.28	2.18	58.63	3.84
Punto 12	1.42	2.1	67.5	4.26
Punto 13	1.2	2.07	58.09	3.6
Punto 14	1.42	2.11	67.4	4.26
Punto 15	1.5	2.23	67.32	4.5
Punto 16	1.45	2.18	66.58	4.35

* D.A. Densidad aparente

* * D.R. Densidad real

*** E.P. Espacio poroso

**** Ton/ha Toneladas de suelo por hectárea.

En los sitios de muestreo se presentan densidades relativamente uniformes, variando de 1.35 a 1.52 kg cm³, de manera general, los valores más altos se presentan en los sitios de muestreo 8, corresponde a Tezontepec donde se emplea agua mezclada para el riego y los puntos 4 (Tlahuelilpan) y 15 (Mixquiahuala de Juárez) con 77 y 68 años de riego respectivamente; estos valores indican suelos con problemas de compactación que evitan la libre circulación del agua y aire, es decir permiten la acumulación de sólidos y desarrollo radical de las plantas, además, con inadecuado sistema de riego por inundación, se genera una lámina de riego gruesa, se pueden generar problemas de intercambio gaseoso, deficiente filtración de agua y nutrimentos a nivel de raíz (León, 1991).

No así, con el resto de los puntos de muestreo donde los porcentajes de porosidad representan suelos sin problemas significativos de compactación, aireación y flujo de agua y que permitirán el desarrollo adecuado de los cultivos.

Con la densidad aparente, se puede también, determinar el peso por hectárea de cada sitio de muestreo, tomando 30 cm. de profundidad, ya esta corresponden a la zona arable (Tabla 13) (Reyes, 1996); para determinar este valor se multiplica la densidad aparente obtenida por el volumen de una hectárea de terreno (100 m x 100 m x 0.30 m), y se expresa en mg m³. Después se realiza la conversión por kg ha⁻¹ y resulta que el peso promedio de suelos agrícolas es de 3.6 a 4.56 t ha⁻¹.

Los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, presentan características físicas buenas para la actividad agrícola, ya que su porosidad y textura arcillosa permite la fácil aireación y retención adecuada del agua en el suelo; permiten también el contacto radical directo con las estructuras formadoras del suelo y la disponibilidad de materia orgánica para las plantas; aunado a esto, difícilmente puede considerarse la acumulación de metales pesados biodisponibles para las plantas al menos en la capa arable.

X.2.- Caracterización Química del suelo

X.2.1.- pH en el suelo

El pH en suelo varía según su composición y la proporción de agua que contenga. Este parámetro determina la concentración de iones hidrógeno y otros elementos generadores de la acidez del suelo. El pH se relaciona con la biodisponibilidad de metales pesados y nutrimentos en el suelo ya puede desencadenar varias reacciones químicas y bioquímicas; También determina la actividad microbológica y por tal, la degradación de la materia orgánica, fuente importante de nutrimentos (Buol *et al.*, 1997).

X.2.1.1- Interpretación del pH.

Los rangos de pH en suelos agrícolas del Valle del Mezquital se presentan de 7.05 a 8.82 con agua, y un promedio de 8.08; y de 6.42 a 7.89 empleando KCl.; en general, se presentan suelos medianamente alcalinos (Tabla 14) (NOM-021-RECNAT-2000).

Los valores de pH van de ligera a fuertemente alcalino, predominando el pH medianamente alcalino; los sitios 8 y 9 presentan una fuerte alcalinidad y corresponde a las zonas de muestreo del municipio de Tezontepec de Aldama, donde se utiliza agua mezclada para riego, esto debido a que las aguas de río presentan mayor concentración de sales solubles y presentan cristales de carbonatos, principalmente de Ca^{++} (Tabla 20).

Los sitios de muestreo 2, 6, 7 y 8, que corresponden a los municipios de Tula, Ajacuba, Francisco I. Madero y Progreso de Obregón, presentan un pH que tiende a la neutralidad; estos suelos han sido regados con aguas residuales y existen registros de su pH desde 1976 (Hernández *et al.*, 1994), que los corroboran como suelos medianamente alcalinos.

Tabla 14.- Determinación del pH del suelo medido en agua y KCl a través del método AS-02 (NOM- 021-RECNAT-2000).

Sitio de muestreo	H ₂ O (1:5)	KCl (1:5)	Acidez real o activa (H ₂ O, 1:5)	Acidez potencial o intercambiable (KCl, 1:5)
Punto 1	7.83	7.28	Medianamente alcalino	Muy ligeramente alcalino
Punto 2	7.48	6.9	Ligeramente alcalino	Neutro
Punto 3	8.09	7.42	Medianamente alcalino	Moderadamente ácido
Punto 4	8.13	7.55	Medianamente alcalino	Medianamente alcalino
Punto 5	7.24	6.42	Ligeramente alcalino	Moderadamente ácido
Punto 6	7.05	6.95	Medianamente alcalino	Neutro
Punto 7	8.0	7.03	Medianamente alcalino	Neutro
Punto 8	8.63	7.9	Fuertemente alcalino	Medianamente alcalino
Punto 9	8.75	7.89	Fuertemente alcalino	Medianamente alcalino
Punto 10	8.35	7.8	Medianamente alcalino	Medianamente alcalino
Punto 11	8.29	7.69	Medianamente alcalino	Medianamente alcalino
Punto 12	8.82	7.56	Medianamente alcalino	Medianamente alcalino
Punto 13	7.95	6.96	Medianamente alcalino	Neutro
Punto 14	8.25	7.86	Medianamente alcalino	Medianamente alcalino
Punto 15	8.32	7.33	Medianamente alcalino	Medianamente alcalino
Punto 16	8.14	7.4	Medianamente alcalino	Medianamente alcalino

El pH se atribuye a la presencia de carbonatos, principalmente de Calcio (Tabla 20) y a la acumulación de sales aportadas por el agua de riego (Hernández *et al.*, 1994).

X.2.2.- Materia orgánica

Es el material de origen orgánico que se encuentra en diferentes grados de descomposición en el suelo; es muy importante en relación con la fertilidad del suelo ya que determina en gran parte, diferentes propiedades físicas y químicas, aumenta los niveles de filtración de agua y facilita la labranza, también reduce las pérdidas por erosión y es una fuente importante de nutrimentos para los cultivos (Aguilar, 1988).

La mayor parte de la materia orgánica del suelo esta formada por residuos vegetales y animales contiene cantidades variables de nutrimentos como fósforo, magnesio, calcio, azufre y otros micronutrientes (Bandick y Dick, 1999).

El contenido de materia orgánica es, en general de bajo a muy bajo, con rangos de 0.2 a 3.5 mg kg⁻¹ (Tabla 15) (NOM-021-SEMARNAT-2001); los puntos que presentan mayor porcentaje de materia orgánica, corresponde a los municipios de Tezontepec de Aldama y Mixquiahuala (puntos 9, 15 y 16); estos municipios tienen una antigüedad de 68 y 62 años utilizando aguas residuales para riego; a diferencia del sitio 9, que utiliza agua del río Tula para el riego principalmente de cultivos que en su mayoría son verduras.

Pero la antigüedad de uso de aguas residuales para el riego no es el factor que delimita la concentración de materia orgánica en el suelo; la correlación que existe entre la antigüedad de riego y el contenido de materia orgánica en el suelo no es significativa ($r = 0.08$) (Tabla 25), posiblemente, el tipo de fertilizantes empleados, las especies que se cultivan en la zona y las técnicas de cultivo y aprovechamiento de residuos orgánicos pos-cosecha, son las fuentes principales fuentes de materia orgánica en la región, cuando se aplican proporciones adecuadas de materia orgánica a un suelo agrícola, aumenta la productividad de los cultivos en más del 100 % (Labrador, 1996).

De manera general, sin tomar en cuenta otros parámetros del suelo para determinar la calidad productiva del suelo, se considera que los suelos que tienen de 2 a 3% de materia orgánica son adecuados para el cultivo y que, los que presentan porcentajes menores a 2% son pobres en materia orgánica y no garantizan una buena productividad agrícola (Etchevers, *et al.* 1971), como sucede en la mayoría de los sitios de muestreo (Tabla 15).

Tabla 15.- Determinación del porcentaje de materia orgánica de los suelos agrícolas, a través del método AS-07, de Walkley y Black, 1934. (NOM- 021-RECNAT-2000).

Sitio de muestreo	Materia orgánica %	Carbono %	* M.O.	** C.O.
Punto 1	0.5	0.3	Muy bajo	Muy baja
Punto 2	0.2	0.1	Muy bajo	Muy baja
Punto 3	1.3	0.8	Bajo	Muy baja
Punto 4	0.3	0.2	Muy bajo	Muy baja
Punto 5	2.6	1.5	Medio	Muy baja
Punto 6	0.8	0.4	Bajo	Muy baja
Punto 7	0.5	0.3	Muy bajo	Muy baja
Punto 8	0.7	0.4	Bajo	Muy baja
Punto 9	3.5	2.0	Medio	Baja
Punto 10	0.7	0.4	Bajo	Muy baja
Punto 11	3.4	2.0	Medio	Baja
Punto 12	1.0	0.6	Bajo	Muy baja
Punto 13	0.7	0.4	Bajo	Muy baja
Punto 14	1.8	1.0	Medio	Muy baja
Punto 15	3.3	1.9	Alto	Muy baja
Punto 16	3.5	2.0	Alto	Baja

* Interpretación de la materia orgánica (MO) según la NOM-021-SEMARNAT-2001.

** Interpretación del carbono orgánico (CO) según Landon, 1984.

En el Valle del Mezquital, la sobreexplotación del recurso suelo y agua residual genera hasta tres ciclos de cultivo por año así, entre cultivo y cultivo la reposición de materia orgánica es casi imposible (Cottenie, 1980).

Sin embargo, este problema tiene una solución favorable comprobada y es la de incrementar los niveles de materia orgánica además de un buen manejo y aprovechamiento de residuos vegetales, lo cual permite producir mayores rendimientos y más residuos por hectárea (Cottenie, 1980).

X.2.3.- Conductividad eléctrica (CE) y contenido de sales totales en el suelo

La salinidad de los suelos, particularmente en la región del Valle del Mezquital, se debe al empleo de aguas residuales y fertilizantes de base sódica para los cultivos (León, 1991). El contenido de sales en el suelo puede estimarse de manera muy precisa con la conductividad eléctrica de una solución de suelo saturada con agua.

El contenido de sales totales en el suelo (Tabla 16), se refiere a los constituyentes inorgánicos que intervienen en el crecimiento y desarrollo de las plantas y que responden específicamente a la presión osmótica de la solución del suelo; este contenido de sales, varía inversamente con el contenido de agua, cuando se mide la conductividad eléctrica en el suelo por medio de una pasta de saturación, se está midiendo de manera casi exacta, el contenido de sales disueltas en el suelo (Whitney, 1897).

Una de las aplicaciones más importantes de la determinación de sales en el suelo, es la selección de cultivos tolerantes a la salinidad del suelo, las tablas 17 y 18, muestran la relación de la respuesta del cultivo con la salinidad del suelo expresada en términos de conductividad eléctrica del extracto de saturación (Maas y Hoffman, 1977).

El rango de la conductividad eléctrica de los suelos del Valle del Mezquital va de 0.28 a 5.2 dSm⁻¹; con ello se considera que el 80 % de los suelos analizados van de ligeramente salinos a moderadamente salinos y se pueden ver afectados algunos tipos de cultivo sensibles (Tabla 17).

Tabla 16.- Medición de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación a través del método AS-18, con un conductímetro y contenido de sales totales en el suelo (NOM-021-RECNAT-2000).

Sitio de muestreo	Conductividad eléctrica (dSm ⁻¹)	Contenido de sales totales
Punto 1	1.6	Muy ligeramente Salino
Punto 2	2.05	Moderadamente Salino
Punto 3	2.4	Moderadamente Salino
Punto 4	5.2	Suelo Salino
Punto 5	1.06	Muy ligeramente Salino
Punto 6	2.5	Moderadamente Salino
Punto 7	4.01	Moderadamente Salino
Punto 8	3.1	Moderadamente Salino
Punto 9	1.9	Muy ligeramente Salino
Punto 10	1.5	Muy ligeramente Salino
Punto 11	1.6	Despreciables de Salinidad
Punto 12	1.3	Muy ligeramente Salino
Punto 13	1.05	Muy ligeramente Salino
Punto 14	2.4	Moderadamente Salino
Punto 15	2.65	Moderadamente Salino
Punto 16	2.8	Moderadamente Salino

Únicamente el punto 4 de muestreo que corresponde al municipio de Tlahuelilpan, presenta un grado de salinidad mayor con una conductividad eléctrica de 5.2 dSm⁻¹, es importante mencionar que este sitio no tiene alguna diferencia importante con el resto de los puntos de muestreo que le adjudique dichas características salinidad.

Maas y Hoffman (1977), presentaron una tabla que muestra la tolerancia de los cultivos a la salinidad basándose en diferentes investigaciones (Tabla 18); en ella establecieron la salinidad máxima permisible sin reducir el rendimiento de la producción y el porcentaje de disminución del rendimiento por unidad de salinidad mayor al límite establecido.

Tabla 17.- Respuesta de las plantas hacia los valores de conductividad eléctrica de los estratos de saturación de suelo, propuesto por Scofiel (1949), modificado por el U.S. Salinity Laboratory (USSLS, 1954).

Conductividad eléctrica del extracto de saturación (dSm ⁻¹)	Respuesta de las plantas
0 – 2	Efectos de salinidad generalmente desapercibidos.
2 - 4	El rendimiento de los cultivos muy sensibles a las sales puede ser limitado.
4 – 8	El rendimiento de los cultivos sensibles a las sales se restringe.
8 – 16	Únicamente los cultivos tolerantes a las sales rinden satisfactoriamente.
Más de 16	Únicamente unos cuantos cultivos tolerantes a las sales rinden satisfactoriamente.

Tabla 18.- Tipo de cultivos idóneos a la salinidad de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, basado en Maas y Hoffman, 1977.

Rango de salinidad del suelo	Cultivo idóneo
1.0 a 3.0	Alfalfa, almendro, Brócoli, calabacita, camote, caña de azúcar, cebolla, ciruelo, chile, durazno, fríjol, lechuga, Maíz, rábano, tomate, vid, zanahoria.
3.1 a 5.0	Arroz, betabel, cacahuete, sorgo.
5.1 a 7.0	Algodón, cebada, pasto, remolacha, trigo.

La media de conductividad eléctrica de los suelos del Valle del Mezquital es de 2.25 dSm^{-1} ; este valor los clasifica como suelos sódicos ($< 4 \text{ dSm}^{-1}$) y se puede corroborar con la cantidad de Na^{++} extraíble determinado de $1.75 \text{ meq } 100\text{g}$ en la tabla 20.

X.2.4.- Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La Capacidad de intercambio catiónico (CIC), es una propiedad química que tienen las arcillas del suelo para retener e intercambiar cationes de calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), potasio (K^{+}), sodio (Na^{++}), hidrógeno (H^{+}) y amonio (NH_4). A partir de esta propiedad, es posible inferir acerca del tipo de arcilla presente, la magnitud de la reserva nutrimental y del grado de intemperismo y fertilidad de los suelos (Pierce, *et al*, 1999).

Cuando la CIC es alta, el suelo puede retener una mayor concentración de cationes y hacerlos intercambiables; esto depende principalmente, de la cantidad y el tipo de arcillas, así como del contenido de materia orgánica (Aguilar, 1987).

En el Valle del Mezquital, los valores determinados de CIC van de 12.4 a $22.00 \text{ cmol kg}^{-1}$ (Tabla 19), presentando en promedio un grado de fertilidad adecuado para cultivos como el maíz, frijol y alfalfa (Pierce, *et al*, 1999).

Al analizar los valores de CIC obtenidos, se puede determinar que el 25% de los suelos analizados presentan un bajo grado de fertilidad (Tabla 19) y el resto contiene un grado medio de reserva nutrimental (Cottenie, 1980).

La antigüedad de riego no es el parámetro determinante para esta condición del suelo y para la concentración de cationes intercambiables y su correlación no es significativa ($r = 0.30$) (Tabla 24), posiblemente se deba a otros factores como la naturaleza calcárea de los suelos y los fertilizantes de tipo alcalino empleados en la agricultura.

Tabla 19.- Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y grado de fertilidad el suelo a través del método AS-12, con acetato de amonio (NOM- 021-RECNAT-2000).

Sitio de muestreo	CIC (cmol kg ⁻¹)	* Grado de fertilidad
Punto 1	14.1	Baja
Punto 2	16.3	Media
Punto 3	17.0	Media
Punto 4	12.4	Baja
Punto 5	14.5	Baja
Punto 6	19.3	Media
Punto 7	18.1	Media
Punto 8	17.2	Media
Punto 9	14.3	Baja
Punto 10	17.1	Media
Punto 11	21.8	Media
Punto 12	15.3	Media
Punto 13	22.0	Media
Punto 14	15.1	Media
Punto 15	17.4	Media
Punto 16	17.3	Media

* Se considera que una reserva nutricional abundante se presenta en suelos con CIC mayor de 25 cmol kg⁻¹; en los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, el máximo nivel es de 22.3 cmol kg⁻¹.

X.2.5.- Determinación de bases intercambiables

Los cationes intercambiables presentes en el suelo, influyen directamente en la estructura, actividad biológica, régimen hídrico y gaseoso y la formación del suelo (Kelley, 1984).

Generalmente, la distribución de los principales cationes intercambiables en los suelos agrícolas productivos es: Ca⁺⁺ > Mg⁺⁺ > K⁺ > Na⁺⁺ > Al₃ > Fe₃ > Mn₂₊ > H⁺; (Cheong *et al.*, 1995), lo que le ocurre a los iones después del intemperismo mineral y la descomposición de la materia orgánica depende tanto de las

propiedades de los iones como de las del suelo o de los materiales producto del intemperismo y la descomposición (Kelley, 1984).

La salinidad del suelo o el contenido de sales totales, constituye una problemática en la agricultura a nivel mundial; el exceso de sales en el suelo provoca deficiencias de nitrógeno y de fósforo, reduce los contenidos de K^+ , Mg^{++} y Ca^{++} disponibles (Marlet, 1998); también induce cambios en la fisiología de las plantas y consecuentemente reduce su productividad (Rangel, *et al.*, 2000).

X.2.5.1.- Ca^{++} en el Valle del Mezquital

En el suelo, el Ca^{++} intercambiable, ocupa el mayor espacio en el complejo de intercambio (70%), cuando existe deficiencia de este elemento, las raíces de las plantas se desarrollan muy pobremente tornándose negras y llegando a la putrefacción ya que es un importante elemento para la formación de las paredes celulares vegetales. Los valores de Ca^{++} determinados van de 0 a 37.2 meq 100g, interpretándose como suelos ricos en Ca^{++} (7,315.62 kg ha⁻¹), (Westermann, 1990). El nivel de concentración de Ca^{++} determinado en este trabajo, es muy alto en los suelos agrícolas (>12.5 meq 100g); no así en los puntos 1 al 5, debido a su textura donde además se podrían presentar problemas de aireación y drenaje de agua (Cepeda, 1991) (Tabla 20).

X.2.5.2.- Mg^{++} en el Valle del Mezquital

El Mg^{++} es un elemento esencial y es componente químico de la molécula de clorofila, por lo que es fundamental para la fotosíntesis, forma parte de varias proteínas de las plantas e interviene en el metabolismo de los carbohidratos (Anderson, 1992). El Mg^{++} es mucho menos abundante en los suelos que el Ca^{++} en el Valle del Mezquital, la concentración de Mg^{++} determinado es de 0 a 9.4 meq 100g, con una media de 3.64 meq 100g (1,267.8 kg ha⁻¹); según Buol, *et al.*, (1983), citado por Azabache (1985), se considera un concentración mediana de

Mg⁺⁺; para Westermann (1990), está se encuentra en un rango optimo aceptable (2.8 a 4.4 meq 100g) (Tabla 20).

X.2.5.3.- K⁺ en el Valle del Mezquital

Las concentraciones de K⁺ en los suelos agrícolas del Valle del Mezquital se encuentran en rangos bajos y muy bajos, con valores de 0 a 5.18 meq 100g con una media de 2.47 meq 100g (3,102.4 kg ha⁻¹); los sitios 8 y 9, no muestran diferencias significativas en la concentración de K⁺ intercambiable determinado; para Westermann, 1990, los valores de K⁺ intercambiable óptimos en suelos agrícolas deberán presentar valores de 1.5 a 3.8 meq 100g. (Tabla 20).

X.2.5.3.- Na⁺⁺ en el Valle del Mezquital

La concentración de Na⁺⁺ determinada en los suelos agrícolas del Valle del Mezquital va de muy baja a alta, con concentraciones de 0 a 2.63 meq 100g (957.37 kg ha⁻¹) con una media de 1.75 meq 100g. Cuando llega a existir una acumulación importante de Na⁺⁺ en el suelo, se generan dos problemas importantes, el primero, es la toxicidad en las plantas al ser absorbido ya que se alteran funciones nutricionales que impiden una buena absorción de calcio; el segundo problema es la perdida de la estructura del suelo ya que el sodio absorbido disgrega las partículas del suelo, (Allison, *et al.*, 1990). Las concentraciones de Na⁺⁺ son elevadas en relación al Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺, pero aun con esta característica del sodio, el pH (prom. 8.08) y la conductividad eléctrica (prom. 2.32 dSm⁻¹), este no afectaran el crecimiento de los cultivos de la zona (Bohn, 1993) (Tabla 20).

Tabla 20.- Determinación de bases intercambiables y extraíbles del suelo en kg ha⁻¹, a través del método AS-12, con acetato de amonio (NOM- 021-RECNAT-2000).

Sitio de muestreo	Ca ⁺⁺ meq 100g kg ha ⁻¹	Mg ⁺⁺ meq 100g kg ha ⁻¹	K ⁺ meq 100g kg ha ⁻¹	Na ⁺⁺ Meq 100g kg ha ⁻¹
Punto 1	3.1 1,550.00 Baja	0.4 144 Muy baja	1.24 1,451.00 Muy baja	0.06 41 Muy baja
Punto 2	1.75 875 Muy baja	0.58 208.8 Baja	0.43 503 Muy baja	0.11 76 Muy baja
Punto 3	2.62 1,310.00 Baja	0.37 133.2 Muy baja	1.025 1,199.00 Muy baja	0.08 55 Muy baja
Punto 4	0.56 280 Muy baja	0.01 3.6 Muy baja	1.3 1,521.00 Muy baja	0 0 Nula
Punto 5	3.1 1,550.00 Baja	0.44 158.4 Muy baja	1.25 1,463.00 Muy baja	0.11 76 Muy baja
Punto 6	16.72 8,360.00 Alta	9.4 3,384.00 Alta	2.11 2,469.00 Muy baja	1.9 1,311.00 Alta
Punto 7	11.63 5,815.00 Alta	5.86 2,109.60 Alta	3.58 4,189.00 Baja	2.57 1,773.00 Alta
Punto 8	30 15,000.00 Alta	8.9 3,204.00 Alta	2 2,340.00 Baja	2.1 1,449.00 Alta
Punto 9	22.55 11,275.00 Alta	0.24 86.4 Muy baja	1.9 2,223.00 Muy baja	0.71 490 Muy baja
Punto 10	15.07 7,535.00 Alta	7.3 2,628.00 Alta	2.4 2,808.00 Muy baja	2.15 1,484.00 Alta
Punto 11	16.64 8,320.00 Muy alta	0.95 342 Media	2.78 3,253.00 Baja	2.04 1,408.00 Alta
Punto 12	18.6 9,300.00 Alta	0.77 277.2 Baja	3.96 4,633.00 Baja	2.63 1,815.00 Alta

Sitio de muestreo	Ca⁺⁺ meq 100g kg ha ⁻¹	Mg⁺⁺ meq 100g kg ha ⁻¹	K⁺ meq 100g kg ha ⁻¹	Na⁺⁺ Meq 100g kg ha ⁻¹
Punto 13	15.07 7,535.00 Alta	1.3 468 Media	5.18 6,061.00 Baja	1.96 1,352.00 Alta
Punto 14	15.1 7,550.00 Alta	7.25 2,610.00 Alta	4.7 5,499.00 Baja	1.72 1,187.00 Alta
Punto 15	37.2 1,600.00 Alta	5.3 1,908.00 Alta	5.08 5,944.00 Baja	1.78 1,228.00 Alta
Punto 16	24.39 12,195.00 Alta	7.28 2,620.80 Alta	3.49 4,083.00 Baja	2.28 1,573.00 Alta

XI.- DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN TOTAL DE METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS DEL VALLE DEL MEZQUITAL.

La determinación de la concentración de metales pesados de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, se llevó a cabo en el laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIs) del Instituto de Geología de la UNAM, empleando la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX).

Tabla 21.- Determinación de la concentración de metales pesados totales en suelos agrícolas del Valle del Mezquital.

Sitio de muestreo	Cr mg kg ⁻¹	Ni mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	Pb mg kg ⁻¹
Punto 1	146.0	55	86	248	64
Punto 2	150.0	56	96	310	86
Punto 3	101.0	40	51	161	32
Punto 4	103.0	44	61	193	46
Punto 5	99.0	48	70	208	51
Punto 6	100	42	71	209	46
Punto 7	89	36	62	181	38
Punto 8	70	30	36	163	24
Punto 9	48	22	36	105	16
Punto 10	79	37	55	157	36
Punto 11	77	27	26	169	28
Punto 12	80	22	21	67	8
Punto 13	78	33	75	66	10
Punto 14	68	27	33	100	13
Punto 15	97	43	57	391	45
Punto 16	78	34	50	179	27

Se determinaron los siguientes rangos de concentración de metales pesados en el suelo: **Cr**: 48 - 150 mg kg⁻¹ (prom. 91.43 mg kg⁻¹), **Cu**: 21 - 96 mg kg⁻¹ (prom. 55.37 mg kg⁻¹), **Ni**: 26 - 57 mg kg⁻¹ (prom. 37.25 mg kg⁻¹), **Pb**: 8 - 86 mg kg⁻¹ (prom. 35.62 mg kg⁻¹) y **Zn**: 66 - 391 mg kg⁻¹ (prom. 181.68 mg kg⁻¹) (Tabla 21).

XI.1.- Cromo en el Valle del Mezquital

Las concentraciones de Cr total determinadas en los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, van de 48 a 150 mg kg⁻¹; los más altos corresponden a los sitios de muestreo 6, 3, 1 y 2 (Francisco I. Madero, Tlaxcoapan y Ajacuba y Tula) que tienen como rango de antigüedad de uso de aguas residuales para riego de 37 a 87 años. El valor más bajo de Cr en el suelo corresponde al punto 14 (68 mg kg⁻¹) con 65 años de riego, de la comunidad colonia Morelos del municipio de Mixquiahuala, Hgo. Los valores más altos no son significativos en comparación al valor promedio mundial establecido de 65 mg kg⁻¹ (Tabla 22) (Kabata - Pendias y Pendias, 1995).

En su mayoría, en los puntos de muestreo se determinaron valores que van por encima de los reportados como normales por algunos autores (Tabla 22), sin embargo, estas concentraciones no tiene ninguna relación con la antigüedad de riego y las características físicas del suelo (Tabla 25).

XI.2.- Níquel en el Valle del Mezquital

El rango de Ni total, encontrado en los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, va de 22 a 56 mg kg⁻¹. Aunque este es considerado como un nutrimento necesario para las plantas, también se han reportado índices de toxicidad por altas concentraciones en el suelo (Marchner, 1997). El promedio de Ni, encontrado en el Valle del Mezquital es de 37.25 mg kg⁻¹, este valor rebasa la media de 20 mg kg⁻¹ establecida para el rango normal en suelo a nivel mundial establecido por Kabata-Pendias y Pendias, 1992 y 2000 y el establecido por Hagedorn en 1996. También en los suelos agrícolas de Estados Unidos, se ha reportado una

media máxima de 24 mg kg^{-1} de Ni total en suelos agrícolas (Holmgren, *et al*, 1993); los puntos considerados como testigos y que emplean aguas residuales y del río Tula para riego no rebasan los valores máximos establecidos (Tabla 22).

Los valores más altos de Ni, corresponden a los sitios 1 y 2 de los municipios de Ajacuba y Tula de Allende, con 83 y 75 años de antigüedad empleando aguas residuales para riego; los más bajos corresponden a los sitios 9 y 12 con 62 y 3 años de antigüedad; con esto podemos considerar que no existe relación entre la concentración de metales pesados y la antigüedad de riego (Tabla 25).

XI.3.- Cobre en el Valle del Mezquital

El rango determinado de Cu total en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, va de 21 a 96 mg kg^{-1} con una media de 56 mg kg^{-1} , el valor más alto se determinó en el punto 2 que corresponde al municipio de Tula de Allende, con una concentración de 96 mg kg^{-1} , en tanto que la concentración menor de 21 mg kg^{-1} , corresponde al punto 12, del municipio de Mixquiahuala, que es una zona de riego nueva y emplea aguas residuales para el riego desde hace tres años. La media determinada para el Cu en el suelo agrícola del Valle, rebasa el valor medio establecido a nivel mundial de 20 mg kg^{-1} (Kabata-Pendias y Pendias, 1995); los puntos 8 y 9 presentan valores que rebasan significativamente dichos valores (Tabla 22).

XI.4.- Zinc en el Valle del Mezquital

Las concentraciones de Zn, en los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, presentan rangos de concentración de 66 a 391 mg kg^{-1} , siendo los puntos 2 y 15 (Tula y Mixquiahuala) los que presentan las concentraciones más altas con 310 y 391 mg kg^{-1} respectivamente, pero que no rebasan los considerados por Kabata-Pendias y Pendias (2000), como normales; los puntos 12 y 13, que corresponden a zonas agrícolas nuevas en el uso de aguas residuales, presentan las concentraciones más bajas de zinc con 67 y 66 mg kg^{-1} respectivamente y los

puntos testigos 8 y 9, tampoco son significativos para concentraciones altas (Tabla 25). Según Bowie y Thornton (1985), la concentración normal de zinc que deberá presentar un suelo es de 25 a 200 mg kg⁻¹ por lo que el valor medio de concentración de Zn en el Valle del Mezquital (174 mg kg⁻¹) puede considerarse como normal (Tabla 22).

XI.5.- Plomo en el Valle del Mezquital

En las muestras de suelo analizadas el rango de concentración de Plomo determinado va de 8 a 86 mg kg⁻¹, esta concentración, según Bowie y Thornton (1985), cae dentro del rango normal de Pb total en el suelo (10 a 150 mg kg⁻¹), al igual que los establecidos por los países de Holanda (50 mg kg⁻¹), España (50–750 mg kg⁻¹) y la comunidad Europea (300 mg kg⁻¹) (Tabla 22).

La concentración más alta de Pb en suelo analizado corresponde al punto 2 (Tula); en este punto también se registraron niveles altos de Zn, Cu y Cr. Este sitio comparado con el punto 12, con menor concentración de Pb (8 mg kg⁻¹) y que corresponde al municipio de Mixquiahuala, tiene una antigüedad de riego de 72 años; y sin embargo, no existe relación entre la antigüedad de años de riego y las características físico-químicas del suelo con la concentración de Pb (Tabla 25).

XII.- DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE METALES PESADOS POR HORTALIZAS CULTIVADAS EN EL VALLE DEL MEZQUITAL Y REGADAS CON AGUAS RESIDUALES.

Los metales pesados son contaminantes devastadores muy importantes, ya que pueden contaminar el aire, el agua y el suelo donde crecen las plantas quedando muchas veces a su disposición (Chang *et al.*, 1992). Sus efectos en las plantas incluyen: necrosis en las puntas de las hojas, inhibición del crecimiento de las raíces y de la planta en general, disminuyendo su rendimiento, problema que afecta más a los agricultores (Kevin *et al.*, 2001).

XII.1.- Índice de bioacumulación (IB)

La bioacumulación, hace referencia a la acumulación neta de los metales pesados u otras sustancias persistentes que a través del tiempo, que se van acumulando en los tejidos de las mismas a partir de fuentes bióticas como otros organismos y fuentes abióticas como son el suelo, aire y agua desde donde son absorbidos (Gadd, 2000). El índice de bioacumulación se expresa como la relación entre la cantidad de un contaminante en el organismo y la concentración de ese en el suelo (Kevin *et al.*, 2001) (Tabla 23).

La determinación de la concentración de metales pesados absorbidos en los diferentes cultivos de la zona agrícola del Valle del Mezquital, se determinaron por el método de Piper (1944), modificado por Plank (1992), empleando un espectrómetro de plasma de inducción acoplada (ICP), y se obtuvieron los resultados descritos en la tabla 23.

Tabla 22.- Parámetros establecidos por algunos autores para la concentración normal de Metales Pesados en el Suelo (mg kg⁻¹).

Elemento	Concentraciones promedio determinadas en este trabajo:	(Linsay, 1979)	(Hagedorn, 1996).	(Bowie y Thornton, 1985).	(Kabata - Pendias y Pendias, 1995)		Unión Europea	Rango normal mundial (Kabata-Pendias y Pendias, 1992)	Kabata-Pendias y Pendias, 2000		
					Holanda	España			Suficiente o normal	Suficiente o tóxica	Tolerante por algunos cultivos
Cu	56	2 – 100	14 - 29	2.0 - 60.0	50	50 -1000	140	20	11.07	20 - 100	5.0 - 20
Cr	84.5	1 – 1000	20 - 85	NR	100	100 -1000	NR	65	0.1 - 0.5	5.0 - 30	2.00
Ni	36.5	5 – 500	13 - 30	2 - 100	50	30 -300	75	20	0.1 - 5	10 - 100	1.0 - 10
Pb	34	2 – 200	17 - 26	10 - 150	50	50 -750	300	NR	5.0 - 10	30 - 300	0.5 - 10
Zn	174	10 – 300	34 - 84	25 - 200	200	150 -2500	300	NR	27 - 150	100 - 400	50 - 100

NR.- No registrado

Los valores establecidos se reportan en mg kg⁻¹

Las celdas sombreadas corresponden a valores que han sido rebasados por los determinados en este trabajo.

Tabla 23.- Concentración de metales pesados en cultivos regados con aguas residuales del Valle del Mezquital.

Muestra	Parte analizada	Sitio de muestreo	Cr (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Ni (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
Cempasúchil	Flor	1	0.028	0.0443	0.0291	0.0615
Ejote	Semilla	1	0.0306	0.03	0.0278	0.0236
Calabaza	Hojas	3	0.03896	0.04543	0.0358	0.0386
Chile	Fruto	3	0.0324	0.0554	0.0263	0.0289
Betabel	Fruto	4	0.0178	0.0252	0.011	t
Betabel	Hojas	4	0.0238	0.0282	0.0209	0.0095
Maíz	Hojas	4	0.0407	0.0479	0.0297	0.0638
Chile	Tallo y hojas	5	0.031	0.0385	0.0263	0.0353
Calabaza	Hojas	6	0.0322	0.0331	0.0308	0.0166
Calabaza	Flor	6	0.0303	0.0644	0.0251	0.0435
Calabaza	Fruto	6	0.0154	0.0293	0.0153	0.0274
Cempasúchil	Flor	6	0.0324	0.0435	0.0326	0.0466
Acelga	Hojas	8	0.0227	0.0286	0.0181	0.0101
Ejote	Hojas	8	0.0147	0.0312	0.017	0.0105
Perejil	Tallo y hojas	8	0.015	0.025	0.0131	0.0121
Verdolaga	Hojas	8	0.0309	0.0492	0.0292	0.0391
Coliflor	Hojas	9	0.0252	0.0205	0.0175	t
Hierbabuena	Hojas	9	0.0261	0.0256	0.0204	0.0047
Ejote	Tallo y hojas	11	0.0235	0.0204	0.0211	0.006
Fríjol	Tallo y hojas	11	0.0253	0.0216	0.0214	0.0045
Fríjol	Hojas	13	0.0181	0.0244	0.0211	0.0228
Maíz	Hojas	15	0.0239	0.0485	0.0278	0.0173
Fríjol	Hojas	16	0.0186	0.0336	0.0194	0.0294

t = traza

Los análisis se determinaron en peso seco, cada uno de ellos, correspondió a muestras compuesta de tres plantas recolectadas en los sitios de muestreo establecidos; estos cultivos se encontraban en etapa de desarrollo adulto, incluso algunos de ellos ya estaban en tiempo de cosecha, como es el caso de la calabaza, chile, ejote, perejil, acelga y verdolaga.

Tabla 24.- Índice de bioacumulación de algunos metales pesados establecido para especies vegetales.

ELEMENTO	(IB) ÍNDICE DE BIOACUMULACIÓN (mg kg ⁻¹)
Cu	1.508 ⁻⁴
Cr	2.767 ⁻⁴
Ni	5.561 ⁻⁴
Pb	5.61 ⁻⁴
Zn	5.744 ⁻⁴

***IB.-** Este parámetro se obtiene al dividir la concentración del elemento absorbido por la planta entre la concentración total del mismo elemento en el suelo.

XII.2.- Cromo en cultivos del Valle del Mezquital

En orden de concentración en los cultivos, el Cr ocupa el tercer lugar de bioacumulación con una media de 0.0253 mg kg⁻¹ (Tabla 24); dentro de las tres especies vegetales en que se encontró mayor concentración, en orden descendiente están:

1.- Maíz (*Zea mays*).- La concentración de Cr, fue de 0.0407 mg kg⁻¹, este cultivo corresponde al pto. 4 localizado en el municipio de Tlahuelilpan y se trata de hojas de una planta adulta; la concentración de cromo total en suelo es de 103 mg kg⁻¹, tomando en cuenta este valor, el índice de bioacumulación del cromo en el maíz es de 3.95⁻⁴ mg kg⁻¹, valor que sobrepasa el considerado como normal para el cromo (2.767⁻⁴ mg kg⁻¹) (Tabla 24).

2.- Calabaza (*Curcubita sp.*).- Se registro una concentración de 0.0389 mg kg⁻¹, el cultivo corresponde al punto de muestreo 3 del municipio de Tlaxcoapan; el suelo de este punto contenía una concentración de cromo de 101 mg kg⁻¹, por lo que el índice de bioacumulación de 3.851⁻⁴ mg kg⁻¹ es mayor al establecido en la tabla 24.

3.- Cempasúchilt (*Tagetes erecta*).- Corresponde al punto 6 de muestreo del municipio de Fco. I. Madero; la concentración de Cr determinada en la flor de esta planta, fue de $0.0324 \text{ mg kg}^{-1}$ y el contenido total en el suelo de este punto fue de 100 mg kg^{-1} , por lo que el índice de bioacumulación es de $3.24^{-4} \text{ mg kg}^{-1}$.

XII.3.- Cobre en cultivos del Valle del Mezquital

Las concentraciones de Cu en las hortalizas del Valle del Mezquital, representan el metal pesado mayormente absorbido por las mismas con un promedio de concentración de $0.0311 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabla 23); las concentraciones determinadas van de 0.0204 a $0.0644 \text{ mg kg}^{-1}$ con un índice de bioacumulación de $5.561^{-4} \text{ mg kg}^{-1}$. Dentro de las tres especies vegetales en que se encontró mayor concentración, en orden descendiente están:

1.- Flor de Calabaza (*Curcubita sp*).- Corresponde al punto de muestreo 6, con una concentración de $0.0644 \text{ mg kg}^{-1}$, en la flor de calabaza y 71 mg kg^{-1} en el suelo con índice de bioacumulación de $9.07^{-4} \text{ mg kg}^{-1}$.

2.- Chile (*Capsicum sp*).- Este cultivo se colectó en el punto 3 que corresponde al municipio de Tlaxcoapan; en el fruto se determinó una concentración de Cu de $0.0554 \text{ mg kg}^{-1}$ y en el suelo fue de 51 mg kg^{-1} , por lo que el índice de bioacumulación de metales pesados es muy bajo ($0.001^{-4} \text{ mg kg}^{-1}$).

3.- Verdolaga (*Portulaca sp.*).- Este cultivo es regado con aguas residuales mezcladas con agua del río Tula y de manantial; corresponde al punto de muestreo testigo 8 del municipio de Tezontepec de Aldama; cuenta con 69 años de riego; y se determinó una concentración de $0.0492 \text{ mg kg}^{-1}$; en el suelo, la concentración de Cu total es de 36 mg kg^{-1} . El índice de bioacumulación es relativamente muy bajo de $0.0013^{-4} \text{ mg kg}^{-1}$.

XII.4.- Níquel en cultivos del Valle del Mezquital

Las concentraciones de Ni determinadas, van de 0.0358 a 0.011 mg kg⁻¹ con un índice de bioacumulación de 5.754 mg kg⁻¹ (Tabla 23). Dentro de las tres especies vegetales en que se encontró mayor concentración, en orden descendiente están:

1.- Calabaza (*Curcubita sp*).- Corresponde al punto de muestreo 3 del municipio de Tlaxcoapan, la muestra de suelo tiene una concentración de 0.0358 mg kg⁻¹ de Níquel; en tanto que en las hojas de este cultivo se determino una concentración del fruto de la calabaza en el suelo, la concentración de Ni total es de 40 mg kg⁻¹, con lo que se obtiene un índice de bioacumulación de Ni en la calabaza muy bajo de 8.9⁻⁴ mg kg⁻¹.

2.- Cempasúchilt (*Tagetes erecta*).- Corresponde al punto 6 de muestreo; la concentración determinada es de 0.0326 mg kg⁻¹ y en el suelo de 42 mg kg⁻¹; el índice de bioacumulación es de 5.071⁻⁴ mg kg⁻¹.

3.- Calabaza (*Curcubita sp*).- También corresponde al punto de muestreo 6 antes descrito; en este caso, se analizaron la hojas (0.0308 mg kg⁻¹), la Flor (0.0251 mg kg⁻¹) y el fruto (0.0153 mg kg⁻¹) con una concentración promedio de 0.0237 mg kg⁻¹ para toda la planta. El índice de bioacumulación es de 5.65⁻⁴ mg kg⁻¹.

XII.5.- Zinc en cultivos del Valle del Mezquital

A diferencia de todos los demás elementos analizados, el Zinc fue determinado como el elemento de mayor concentración en el suelo agrícola del Valle del Mezquital ($181.68 \text{ mg kg}^{-1}$) y el segundo, después del Cu, en las especies vegetales cultivadas ($0.0274 \text{ mg kg}^{-1}$) (Tabla 23), pero con un índice de bioacumulación promedio que de $1.508^{-4} \text{ mg kg}^{-1}$, que no rebasa los establecidos en la tabla 23; dentro de las tres especies vegetales en que se encontró mayor concentración de zinc, en orden descendiente están:

1.- Maíz (*Zea mays*).- corresponde al punto 4 del municipio de Tlahuelilpan, en la muestra de suelo se obtuvo una concentración de 193 mg kg^{-1} y en las hojas de este cultivo, una concentración absorbida de $0.0638 \text{ mg kg}^{-1}$; el índice de bioacumulación corresponde a $3.305^{-4} \text{ mg kg}^{-1}$, menor al establecido en la tabla 24.

2.- Cempasúchilt (*Tagetes erecta*).- correspondiente a los puntos 1 y 6 de los municipios de Ajacuba y Francisco I. Madero, con concentraciones de zinc absorbidos en las flores de 0.0615 y $0.0466 \text{ mg kg}^{-1}$ respectivamente. En el suelo agrícola de cada uno de estos puntos se determinaron concentraciones de 248 mg kg^{-1} y 209 mg kg^{-1} , respectivamente por lo que sus índices de bioacumulación, en el mismo orden son de $2.479^{-4} \text{ mg kg}^{-1}$ y $0.0002 \text{ mg kg}^{-1}$ y son menores a los de la tabla 24.

XII.6.- Cadmio en cultivos del Valle del Mezquital

En este trabajo, no se registraron lecturas de Cadmio en las especies vegetales analizadas (Tabla 23).

XII.7.- Plomo en cultivos del Valle del Mezquital

De igual forma, En este trabajo, no se registraron lecturas de Cadmio en las especies vegetales analizadas (Tabla 23).

XIII.- ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Para analizar los datos obtenidos, se aplicó el análisis estadístico de correlación de Pearson en donde se compararon las diferentes concentraciones de metales pesados, algunas condiciones fisicoquímicas del suelo y la antigüedad en el empleo de aguas residuales para el riego, este análisis se realizó utilizando el software SPSS, Advanced Statistics, se obtuvieron los resultados de la siguiente tabla:

Tabla 25.- Correlación de Pearson, análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados y algunas características del suelo contra la antigüedad en el uso de aguas residuales para riego de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital ($p = 0.05$).

	Años	pH	M. O.	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
Años	1.00							
pH	0.30	1.00						
M.O.	0.08	0.24	1.00					
Cromo	0.17	0.37	0.13	1.00				
Níquel	0.34	0.48	0.20	**0.89	1.00			
Cobre	0.45	**0.74	0.48	0.04	0.38	1.00		
Zinc	0.39	**0.55	0.02	**0.80	**0.84	0.29	1.00	
Plomo	0.39	0.46	0.06	**0.88	**0.92	0.22	**0.97	1.00

**La correlación es significativa al acercarse a +1.00.

Las concentraciones de metales pesados determinados en los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, no tienen una relación directa con la antigüedad de riego y uso de aguas residuales de la presa Requena, ya que encontramos puntos de muestreo con concentraciones altas de metales pesados, por ejemplo cromo, que se encuentran tanto en sitios con más de 60 años de riego como en los nuevos que solo llevan empleando esta agua 3 años.

XIV.1.- Concentración de metales pesados en suelo vs antigüedad de riego

Las características físico-químicas de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital y su antigüedad en el uso de aguas residuales para riego (3 a 87 años), no es directamente proporcional a las diferentes concentraciones de metales pesados totales en los mismos; sin embargo si se encuentran concentraciones altas que no necesariamente pudieran estar biodisponibles para los diferentes cultivos de la región, aún cuando se observaron índices de bioacumulación relativamente altos, no existe una norma específica que le adjudique toxicidad a ciertas concentraciones de metales pesados en las plantas.

Uno de los factores principales que disminuyen los riesgos de contaminación excesiva de elementos químicos, físicos y microbiológicos en las zonas agrícolas del Valle del Mezquital, son las presas Requena y Endhó, en donde las aguas residuales provenientes de la ZMCM, reciben un tratamiento primario de sedimentación; sin embargo, no es suficiente el potencial de carga y tratamiento de estos embalses.

XIV.2.- Concentración de metales pesados en suelo vs materia orgánica

El contenido de materia orgánica es, en general de bajo a muy bajo con rangos de 0.2 a 3.5 mg kg⁻¹ (Tabla 15); y no existe ninguna relación entre estos valores y las diferentes concentraciones de metales pesados determinadas (Tabla 26).

Sin embargo, esta baja concentración de materia orgánica en el suelo, ha evitado que se formen quelatos minerales de metales pesados biodisponibles para los diferentes cultivos; a la vez que disminuye su toxicidad; no obstante es necesario emplear de manera controlada los diferentes implementos químicos agrícolas como fertilizantes, abonos, insecticidas, etc., que también pueden ser fuentes potenciales de contaminación.

Tabla 26.- Correlación de Pearson, análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados y la cantidad de materia orgánica de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital.

	M.O.	Cr	Ni	Cu	Zn
M.O.	1.00				
Cr	0.13	1.00			
Ni	0.20	0.89	1.00		
Cu	0.48	0.04	0.38	1.00	
Zn	0.02	0.80	0.84	0.29	1.00

**La correlación es significativa al acercarse a +1.00

XIV.3.-Concentración de metales pesados en cultivos vs concentración de metales pesados en suelo

La concentración de metales pesados determinados en las hortalizas no esta relacionada con la cantidad de metales pesados totales en el suelo (Tabla 27); esto es por que no se estableció con certeza, que porcentaje de las concentraciones determinadas en el suelo se encuentran biodisponibles para los cultivos; además, es necesario considerar la textura e índices de porosidad de los suelos (Tabla 12 y 13), que permiten la lixiviación de los metales a horizontes más profundos quedando con ello, menos disponibles a la absorción de las plantas.

Para determinar la correlación que existe entre la concentración de metales pesados absorbidos por los cultivos y las muestras de suelos analizadas, se consideraron los valores promedio para cada punto muestreado (Tabla 27).

Tabla 27.- Correlación de Pearson, análisis estadístico de las concentraciones de metales pesados en el suelo y la concentración absorbida por las hortalizas del Valle del Mezquital.

	Plantas Cr	Plantas Cu	Plantas Ni	Plantas Zn	Suelo Cr	Suelo Ni	Suelo Cu	Suelo Zn
Plantas Cr	1.00							
Plantas Cu	0.59	1.00						
Plantas Ni	0.87	0.64	1.00					
Plantas Zn	0.60	0.74	0.67	1.00				
Suelo Cr	0.06	0.20	0.24	0.14	1.00			
Suelo Ni	0.19	0.30	0.34	0.14	0.94	1.00		
Suelo Cu	0.14	0.29	0.27	0.51	0.39	0.24	1.00	
Suelo Zn	0.15	0.19	0.31	0.12	0.83	0.86	0.19	1.00

**La correlación es significativa al acercarse a +1.00

Se emplearon las concentraciones promedio de los metales pesados determinados en suelo y cultivos para aplicar la prueba estadística.

Para muchos autores, el efecto de tratamiento primario que se presenta en los embalses o presas que acumulan las aguas residuales para su posterior empleo en la agricultura, como es el caso de la presa Requena y la Presa Endhó, permite que los metales pesados y otros componentes químicos y microbiológicos se lixivien de manera natural, aunado al periodo de almacenamiento y el método de riego, que comúnmente es por inundación; se reduce considerablemente la biodisponibilidad de los metales pesados para los diferentes cultivos del Valle del Mezquital (García, *et al.*, 1997).

XVI.- CONCLUSIONES

XVI.1.- Caracterización de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital

De acuerdo a las observaciones de campo y la caracterización físico-química de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, se concluye que estos son poco profundos, de naturaleza calcárea, cuyo elemento cromógeno que da colores de castaño a grisáceo, se debe a su naturaleza y a la cantidad de materia orgánica que en general es baja (Tabla 15), debido a las condiciones de aridez y al bajo aporte de residuos orgánicos que se generan entre cultivo y cultivo.

Los suelos alcalinos del Valle del Mezquital, debido a su media y baja capacidad de intercambiar cationes con otros minerales; hace posible que los elementos potencialmente contaminantes como los metales pesados, estén poco biodisponibles para los cultivos, tal como se observa en las concentraciones de metales pesados absorbidos en los cultivos analizados y sus índices de biodisponibilidad (Tablas 23 y 24); en contra parte, esta característica también disminuye notablemente el grado de fertilidad de los suelos (Tablas 19 y 20), la cual esta en constante modificación debido al uso de aguas residuales e implementos agrícolas para mejorar los cultivos.

XVI.2.- Metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital

Las concentraciones medias de los metales pesados evaluados en los suelos agrícolas y que rebasan los establecidos como normales por Kabata-Pendias y Pendias (2000) son:

- Cromo.- Este presenta una media de concentración de 84.5 mg kg^{-1} , siendo el valor normal de 65 mg kg^{-1} ,
- Níquel.- Presenta una media de concentración de 36.5 mg kg^{-1} , el valor establecido como normal es de 20 mg kg^{-1} y

- Cobre.- Cuya media de concentración es de 56 mg kg^{-1} y el valor normal mundial es también, de 20 mg kg^{-1} .

Por su parte, los elementos cuya media de concentración se encuentra dentro del rango normal de concentración en el suelo son:

- Zinc con una media de 174 mg kg^{-1} y el rango establecido de 20 a 200 mg kg^{-1} ; y
- Plomo con una media de concentración de 34 mg kg^{-1} y un rango promedio de 10 a 150 mg kg^{-1} .

En relación a los puntos de muestreo evaluados; los diferentes rangos de concentración de cada elemento determinado no tienen variaciones significativas; es decir, que las condiciones físico- químicas del suelo, el método de riego y la antigüedad en el uso de aguas residuales, no son factores que intervengan de manera puntual en la acumulación de estos elementos (Tabla 21).

Lo anterior se respalda con el análisis estadístico empleado, en donde se observa que la correlación entre la concentración de metales pesados y la antigüedad de riego, no es significativa (Tabla 25), con ello podemos concluir que la antigüedad en el uso de aguas residuales para riego no es un factor de acumulación de metales en el suelo; seguramente, los metales pesados que contiene en agua residual proveniente de la ZMCM, se lixivian de manera natural a lo largo de su recorrido por el sistema profundo de desagüe de la ciudad.

Complementariamente, la disminución de concentraciones de metales pesados y su disponibilidad disminuye cuando las aguas negras, se depositan en las presas de almacenamiento Requena y Endhó ubicadas en nuestro estado; cuando el agua se deriva para su utilización ya habrán pasado por un tratamiento primario de lixiviación (percolación) de elementos pesados (sólidos y minerales).

De esta manera, entre las presas, los canales de riego y las zonas agrícolas, sin lugar a duda, el agua empleada para el riego, disminuyen las concentraciones de metales pesados y otros elementos tóxicos antes de llegar a los suelos agrícolas que por su textura arcillosa, permite su percolación a estratos más profundos en donde ya no son biodisponibles para los cultivos (Tabla 21 y 23).

XVI.2.1.- Sitios de muestreo y métodos de riego

Como se menciona anteriormente, la antigüedad de riego y las características físico-químicas de los suelos agrícolas, no tienen una relación significativa con la concentración de metales pesados acumulados y biodisponibles para los cultivos; si comparamos los sitios de muestreo 8 y 9, considerados como testigo, debido a que en estos, se emplean aguas residuales mezcladas con aguas del río Tula y los diferentes manantiales de la zona; no se observan valores diferentes a la media de las concentraciones determinadas al igual que los absorbidos por los diferentes cultivos analizados (Tablas 21 y 23).

XVI.3.- Absorción de metales pesados por cultivos en el Valle del Mezquital

Las razones anteriores también pueden ser aplicables a lo observado con los vegetales; donde tampoco existe correlación significativa entre la concentración de metales pesados en el suelo y las concentraciones absorbidas por las hortalizas (Tabla 27).

Si tomamos en cuenta que los metales pesados tienden a lixiviarse o percolarse a horizontes más profundos, es lógico pensar que estos no se encuentren disponibles para los cultivos a nivel de la capa arable (30 cm); por esta razón, se encontró que la concentración de metales pesados absorbidos por las plantas no representan niveles considerables de toxicidad ya que están muy por debajo de algunas concentraciones determinadas por otros autores.

Cuando los agricultores del Valle del Mezquital se preocupan únicamente por el rendimiento de sus procesos productivos empleando aguas residuales de manera indiscriminada, sin considerar ciclos de cultivo adecuados que permitan la reincorporación natural de materia orgánica y nutrimentos al suelo, viéndose en la necesidad de aplicar insumos químicos, están ampliando las fuentes potenciales de contaminantes y por consiguiente la disponibilidad y bioacumulación de metales pesados para los cultivos que finalmente afectaran a ser humano.

Una problemática de contaminación de suelos agrícolas que verdaderamente pondría en riesgo la salud de los consumidores de productos agrícolas del Valle del Mezquital, se presentará si las autoridades y los mismos productores, no visualizan los riesgos de contaminación a los que están expuestos y que ellos mismos generan, esto aunado al incesante crecimiento urbano y la globalización, donde las empresas productoras generaran mayores volúmenes de aguas residuales que finalmente serán descargadas a los suelos agrícolas Valle del Mezquital.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Ahumada, I., Mendoza, J., Ascar, L. 1999. Sequential extraction of heavy metals in soils irrigated with wastewater. *Commun. Soil Sci Plant Anat.*, 30, pp. 1507–1519.
- Aguilar, S. A. 1988. Método de Análisis de suelos, Manual de análisis de suelos, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Chapingo, Mex.
- Aguirre, M., J., Athié, L., M. 1981. *Municipal Wastewater in Agriculture*. Academic Press, New, York.
- Altamirano, P.R. 1991. Control de la contaminación del agua en México. En: Cuaderno técnico no. 3 CICM, México.
- Anderson D.L. 1992. The sugarcane plant and magnesium. *Sugar Journal* 55 (1): 12
- Allison, L.E., Brown, J.W., Hayward, H.E., Richards, L.A., Bernstein, L., Fireman, M., Pearson, G.A., Wilcox, L.V., Brower, C.A., Hatcher, J.T., y Reeve, R.C. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos., Editorial Limusa, México, 172 pp.
- Bandinck A. K., R. P. Dick. 1999. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry* 31(11). pp. 1471-1479.
- Bañuelos G.S., Ajawa H.A., Mackey, M., Wu, L., Cook, C., Akohoue, S., Zambruzuki, S., 1997. Evaluation of different plant species used for phytoremediation of high soil selenium. *J. Environ. Qual.* 26:239-46.
- Bohn, H. L., McNeal, B.L., O'Connors, G.A. 1993. *Química de suelos*, Limusa, México.
- Buol, S.W., Hole, F.D., Mc Cracken. 1997. *Génesis y Clasificación de suelos* Primera Edición en español. Ed. Trillas S.A. México.
- Bowie, S. H. U.; Thornton, I. 1985, *Environmental Geochemistry and Health*. Boston: D. Reidel Publishing Co.
- Brady N.C., R.R. Weil. 1999. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Cajuste, L., Carrillo, R., Cota, E., and Lair, R., 1991. The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of mezquital: Water, Air and soils pollution. V. 57 – 58, pp. 763-771.
- Carrillo, R., Cajuste, L., 1995. Behavior of trace metals in soils of Hidalgo, Mexico: *Journal of Environmental Science and Health*. V. 30, no. 1, pp. 143 – 155.

- Carrillo, G., R. L. J. Cajuste, L. Hernández H. 1992. Acumulación de Metales Pesados en un suelo regado con aguas residuales. *Terra*. 10. pp 166 – 173
- Cepeda - Dovala, J. M. 1991. Química de Suelos. Edit. Trillas S.A. de C.V., México. p. 167
- Cifuentes, E, H. Blumenthal, G. Ruiz Palacios, S. Bennett, M. Quigley, A. Peasey y H. Romero Alvarez. 1993. Problemas de salud asociados al riego agrícola con agua residual en México. *SSA. Mex.*; 35(6). pp. 614-619.
- Chang, A. C., Granato, T. C., Page, A. L. 1992. A methodology for establishing phytotoxicity. Criteria for chromium, copper, nickel and zinc in agricultural land application of municipal sewage sludges. *J Environ. Qual.* 21. pp 521-536.
- Cifuentes, E, H. Blumenthal, G. Ruiz-Palacios, S. Bennett, M. Quigley, A. Peasey, H. Romero Alvarez. 1993. Problemas de salud asociados al riego agrícola con agua residual en México. *Sal. Pub. Mex.*; 35(6). pp. 614-619
- CNA, 1991. Comisión Nacional del Agua. Características generales del DR 03-Tula y 100 Alfajayucan. SARH, pp. 40
- CNA, 1995. Comisión Nacional del Agua. Información proporcionada por la Jefatura de los Distritos de Riego del Valle del Mezquital. Comisión Nacional del Agua, Mixquiáhuala, Hidalgo, México.
- CNA. 2003. Comisión Nacional del Agua. El uso de aguas residuales en la Agricultura de Riego. Subgerencia de Ingeniería, Riego y Drenaje. México pp. 3-17
- Collin, M. J. 1990. Remoción de metales pesados y otros compuestos en un tipo de suelo del Distrito de Riego 03, Hgo. 1^{er} simposio Nacional de Degradación del suelo. Instituto de Geología. UNAM.
- Cottenie A. 1980. Los análisis de suelos y plantas como base para formular recomendaciones sobre fertilizantes. *Boletín de suelos de la FAO* 38:8 FAO, Roma, Italia.
- Cong Well. 1994. Geología Física. Edt. Limusa, México. Pp. 156 -159.
- Etchevers B. J., D. Espinoza, E. Riquelme. 1971. Manual de Fertilidad y Fertilizantes. Chillan, Chile, Universidad de Concepción.
- Fergusson, J.F., 1990. The heavy Elements. Chemistry, Environmental Impact and Health Effects. Pergamon Press.
- Fitter, A. H., Kay, R. K. M. 1987. Environmental Physiology of Plants. Academic Press. San Diego.

- Flores, L., Blas, G., Hernández, G., Alcalá, R., 1997, Distribution and sequential extraction of some heavy metals from soil irrigated with wastewater from Mexico City, pp. 239-249.
- Frink, C.R. 1996. A perspective on metals in soils, *Journal Soils Contaminant*. 5. pp. 329-359.
- García, C.N.E., Ibañez, H. A., Vallejo-Albarran, C. 1997. Seminario sobre el uso de aguas residuales para riego. Problemática del Valle del Mezquital. Red α -Mezquital. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Pp. 203
- Garza, V. 1994. La legislación ambiental en México en referencia a la generación y uso de aguas residuales. *Salud Fronteriza*. 1994; VIII (1): pp. 11-16.
- González, J., Moreno, A. M., Pérez L., Larrea, M. T., Prieto, P., de la Rosa, C. Ángeles, M., 2000. Nivel de contaminación en suelos por elementos traza. Impacto sobre las comunidades microbianas. *Edafol*. V. 7-3. Septiembre 2000. pp. 47-54.
- Hernández, G., Flores, F., Maples, Solorio, J., and Alcalá, J. 1994. Riesgo de acumulación de Cd, Pb, Cr y Co en tres series e suelos del DR03, Estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, V. 11.1 pp. 53-61.
- Holmgren, G. G. S., M. W. Meyer, R. L., Chaney, R. B., Daniels. 1993. Cadmium, lead, zinc, copper and nickel in agricultural soil of the United States of America. *J. Env. Qual*. 22. pp. 235-348.
- Honorato, R., H. Silva, y C. Bonomelli. 1988. Efecto del suelo en el patrón de enraizamiento y productividad de la vid. *Ciencia e Investigación Agraria* 15:159-169
- INEGI. 1994. Sistemas de Cuencas Nacionales de México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Iyenger, S. S., Martens, D.C., Miller, W.P. 1981. Distribution and plant availability of soil zinc fractions. *Soil Sci Soc. Am. J.*, 45, pp. 735–739.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. 1984. Agricultural Problems related to excessive trace metal contents of soils. En *Heavy Metals*, Salomons W., Förstner U., Mader P. (Eds). Springer, Berlin. 412.
- Kabata-Pendias, A., Pendias H., 1995. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, London. 365.
- Kelley, W. P. 1984. Cation exchange in soil. New York, Reinhold. 144 pp. En: Hans W. F. 1975, Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. INCA. Turrialba, Costa Rica, 395 pp.

- Kevin, C., Michael L. 2001. Bioaccumulation of metals in plants, arthropods, and mice at a seasonal wetland. University of California, John Muir Institute of the Environment, Davis, California, USA.
- Labrador, J. 1996. La materia orgánica en los agrosistemas. Editorial Mundi Prensa. Madrid. España.
- León, A. R., 1991. Nueva Edafología, Regiones tropicales y áreas templadas de México. 2ª edición corregida y aumentada. Fontamara S.A. México. pp 364
- Lindsay, W.L. y W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil zinc, iron, manganese and cooper. J. Am. Sci. Soil. 42. pp. 421 - 428
- López Ritas J., López Mélida, J. 1985. El diagnóstico de suelos y plantas. Ed. Mundi-Prensa.
- Maas, E. V., G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerante current assessment. Journal of irrigation and drainage engineering / American Society of Civil Engineers American Society of Civil Engineers. 103. pp. 115 - 134
- Mará, D., S. Cairncross. 1990. Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura. España: OPS/PNUMA.
- Marchner, H. 1997. Mineral nutrition of higher plants. 2ª Ed. Academic press, London. 889 pp.
- Marlet, S. 1998. Soil alkalization and irrigation in the sahelian zone of niger. 2-Agronomy consequences of alkalinity and sodicity. Arid Soil Res. Rehab.,12(2). pp. 139 - 152
- McGrath, D., McCormack, R.J. 1999. The significance of heavy metal and organic micropollutants in soil. End of Project Report No. 4268.
- Mejía, .B., S. Sanchez, B., G. Hernández S., Flores D., G. Villareal L., R. Guajardo. 1990. Metales pesados en maíz, alfalfa y su correlación con los extractantes en suelos del DDR 063, Hgo. En: Primer Simposium Nacional de Degradación del Suelo. Instituto de Geología. UNAM. pp. 42-43
- Mendoza, H. 1981. "An evaluation of the use of Mexico city Wastewater on the irrigation of Crops". Water Reuse Symposium II. Washington D.C. August 23-28. 1981.
- Mortvedent, J. J., 1983. Micronutrientes en Agricultura. AGT Editor, S.A. México.
- Munsell soil color charts. 1990. Munsell Color Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation. Baltimore, USA.

Narwal, R. P., Singh, B. R., Selbu, B. 1999. Association of cadmium, zinc, copper and nickel with components in naturally heavy metal rich soils studied by parallel and sequential extraction. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 30, pp. 1209 – 1230.

Nastusch, J. 1997. Application and development of contaminated site remediation technologies in Australia. ANZAC Fellowship Report to Department of Internal Affairs, Wellington, New Zealand and Department of Foreign Affairs and Trade, Canberra, Australia.

Nobel, P. S. 1999. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. Academic Press. San Diego.

Norma Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio de muestreo y análisis. pp75.

Page, A. L., A.C. Chang. 1981. Trace metal in soils and plants receiving municipal wastewater irrigation. In: *Municipal wastewater in agriculture*. F.M. D'Itrí, J.A. Martínez and M. Athié L. (eds). Academic Press, Inc. N. Y. USA.

Peña, de P., F. J. 1997. Mezquital: La Importancia del Riego con Aguas Negras. México, D.F., pp.105-127.

Pierce, F. J., P. Nowak. 1999. *Advance in Agronomy*. 67. Academic Press.

Rangel, T. 2000. Afeito do stresse salino e da prolina exogena em calos de milho. *Rev. Bras. Fisiol. Veg.*, 12(2). pp.146 - 155

Reyes - Jaramillo I. (1996). *Fundamentos teórico-prácticos de temas selectos de la ciencia del suelo*. Parte I. UAM. pp. 257

Robles, P. C. 1992. Variación de algunos parámetros químicos del suelo por irrigación con aguas negras urbanas. Pp. 103. *Memorias del XXV Congreso del suelo*.

Ruiz, O. 1997. Evaluación de la calidad del dato analítico. II. pp. 73 - 84. En: Osorio, W. *Diagnóstico químico de la Fertilidad de Suelos*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Medellin.

SEDESOL/INE. 1993. *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente: 1991-1992*. México.

Talavera S. G. 1983. Comparación de seis métodos para la determinación de capacidad de campo en suelos del campo experimental. *CENAMAR, Región Lagunera. TERRA* 1. pp. 44 - 51.

Tejeda G.C. 1991. El riego con aguas residuales en México: Efectos en la salud y propuestas de soluciones técnicas. *Ingeniería Ambiental. SMISAAC/AIDIS*. Año 4, No. 10. México.

Toral - Ferrero. Y., 1996., Estudio comparativo de esquemas de especiación en muestras sólidas de interés medioambiental. Trabajo de Licenciatura. Universidad de Valladolid, España.

United Status Salinity Laboratory Staff (USSLS). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Handbook. Edit. Limusa, México.

Vázquez- Alarcón A. 1999. Evaluación del riesgo de contaminación con metales pesados, en la región del Valle del Mezquital, Hgo. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. México.

Vázquez-Alarcón. A., Norberto B. A. 1993. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua. Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de suelos. 29 pp.

Vizcaíno- Murray, F. 1975. La contaminación en México. Fondo de Cultura Económica. México.

Westerman, R.L. 1990. Soil testing and Plant Analysis. Soil Sci. Soc. Am. Inc., 3 ed., Madison, Wisconsin.

Whitney M.,T. H. Means. 1897. An Electrical method of determining the soluble salt content of soils. U. S. Departament of Agricultura., Div. of soils Bull.