

15
2 ej -



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores
"CUAUTITLAN"



"ESTUDIO DEL GRADO DE CONTAMINACION POR PLOMO, CADMIO Y CROMO EN SUELOS Y TEJIDOS VEGETALES POR EL USO DE AGUAS RESIDUALES EN LOS MUNICIPIOS DE TLAXCOAPAN, TLAHUELILPAN Y ATITALAQUIA; HIDALGO (Distrito de Desarrollo Rural 063)".

T E S I S

Que para obtener el título de:
INGENIERO AGRICOLA
P r e s e n t a :

Ana María García Zúñiga



V N A M

Directores de Tesis: M.C. Jaime Cruz Díaz
Dr. Juan J. Gajuste

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, 1989.



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO

	Página
Indice de Tablas	i
Indice de Figuras	vi
1. INTRODUCCION	1
2. IMPORTANCIA	3
3. REVISION BIBLIOGRAFICA	5
3.1 Generalidades sobre aguas residuales	5
3.1.1 Criterios	6
3.1.1.1 Salinidad	6
3.1.1.2 Sodio	6
3.1.1.3 Cloruros	8
3.1.1.4 Bicarbonatos	8
3.1.1.5 Nitrógeno	9
3.1.1.6 Fósforo	10
3.1.1.7 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	10
3.1.1.8 Acidez y alcalinidad	11
3.1.1.9 Elementos traza	11
3.2 Características químicas de Cr, Cd y Pb	14
3.2.1 Metal traza	15
3.2.2 Metal esencial	15
3.2.3 Metal tóxico	15
3.2.4 Metal aprovechable	16
3.2.5 Comportamiento de los metales pesados	16
3.3 Fuentes de contaminación	18
3.3.1 Plomo	18

CONTENIDO

		Página
3.3.2	Cadmio	19
3.3.3	Cromo	20
3.4	Acumulacion en el suelo de metales pesados	20
3.4.1	Plomo	20
3.4.2	Cadmio	22
3.4.3	Cromo	24
3.5	Efectos del plomo sobre el ser humano	25
3.6	Influencia de los metales pesados sobre las plantas	26
3.6.1	Plomo	26
3.6.2	Cadmio	31
3.6.3	Cromo	33
3.7	Tecnologías que se disponen para el trata- miento de aguas residuales	35
3.7.1	Tratamiento biológico	35
3.7.1.1	Lodos activados	35
3.7.1.2	Filtros goteadores	36
3.7.1.3	Lagunas de estabilización	36
3.7.2	Tratamiento químico	41
3.7.3	Tratamiento físico	41
4	OBJETIVOS	42
5	MATERIALES Y MÉTODOS	43
5.1	Características generales de la zona de estudio.	43

CONTENIDO

	Página	
5.2	Clima	44
5.3	Topografía	45
5.4	Suelos	45
5.5	Hidrología	47
5.6	Flora	47
5.7	Recursos hidráulicos	47
5.7.1	Aguas negras	47
5.8	Localización de los sitios de muestreo	48
5.9	Muestreo de suelo	48
5.10	Muestreo de tejidos vegetales	50
5.11	Muestreo de aguas	50
5.12	Trabajo de laboratorio	51
5.12.1	Determinaciones físicas y químicas de Suelos	51
5.12.1.1	Textura	51
5.12.1.2	Reacción del suelo	51
5.12.1.3	Conductividad eléctrica	51
5.12.1.4	Sales solubles	52
5.12.1.5	Fósforo asimilable	52
5.12.1.6	Materia orgánica	52
5.12.1.7	Metales pesados como Pb, Cd y Cr	52
5.12.2	Determinaciones de Pb, Cd y Cr en tejido vegetal	53
5.12.3	Determinaciones de agua	53

CONTENIDO

		Página
5.13	Análisis estadístico	53
6	RESULTADOS Y DISCUSION	54
6.1	Características de las aguas residuales con fines de riego	54
6.1.1	Reacción del agua	54
6.1.2	Conductividad eléctrica	54
6.1.3	Sodio	56
6.1.4	Potasio	57
6.1.5	Calcio	57
6.1.6	Magnesio	57
6.1.7	Carbonatos	57
6.1.8	Bicarbonatos	57
6.1.9	Cloruros	58
6.1.10	Sulfatos	58
6.2	Índice de contaminantes en agua residual	58
6.2.1	Plomo	59
6.2.2	Cadmio	59
6.2.3	Cromo	60
6.3	Características físicas y químicas de suelos	60
6.3.1	Materia orgánica	62
6.3.2	Fósforo asimilable	63
6.3.3	Reacción del suelo	63
6.3.4	Conductividad eléctrica	63

CONTENIDO

	Página
6.3.5 Sales solubles	63
6.3.5.1 Calcio	64
6.3.5.2 Magnesio	64
6.3.5.3 Sodio	64
6.3.5.4 Potasio	65
6.3.5.5 Carbonatos	65
6.3.5.6 Bicarbonatos	65
6.3.5.7 Sulfatos	65
6.3.5.8 Cloruros	65
6.4 Niveles de plomo, cadmio y cromo extractables en suelos	65
6.4.1 Plomo	67
6.4.2 Cadmio	68
6.4.3 Cromo	70
6.5 Niveles de plomo, cadmio y cromo en tejidos vegetales	70
6.5.1 Plomo	72
6.5.2 Cadmio	72
6.5.3 Cromo	74
6.6 Grado de asociación de las propiedades químicas del agua y Pb, Cd y Cr	76
6.7 Grado de asociación de las propiedades fisi- sicas y químicas del suelo y Pb, Cd y Cr	81
6.8 Grado de asociación entre contaminantes	

CONTENIDO

		Página
	en el suelo-planta y agua-planta	88
7	CONCLUSIONES	92
8	ALTERNATIVAS	94
9	BIBLIOGRAFIA	96
10	APENDICE	110

Indice de Tablas.

	página
Tabla 1 Categorías de elementos en relación con riesgos toxológicos en el agua.	4
Tabla 2 Contaminantes objetables después de ciertos límites en las aguas residuales para el riego de cultivos, según U. S. Environmental Protection Agency (1972).	7
Tabla 3 Efectos de los elementos traza en concentraciones tóxicas, según U. S. Environmental Protection Agency (1972).	13
Tabla 4 Clasificación de algunas propiedades del ión receptor del metal. Lewis (1923) citado por Phipps (1981).	18
Tabla 5 Precipitaciones medias anuales, elevación sobre el nivel del mar y temperaturas máxima, media y mínima en los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo.	44
Tabla 6 Variación y niveles promedio en las características químicas en aguas residuales en los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hidalgo (D.D.R. 063). Septiembre de 1987.	55
Tabla 7 Niveles de cadmio, cromo y plomo (expresados en ppm) en aguas utilizadas para	

Indice de Tablas.

	página
riego en el Valle del Mezquital. Tula, - Hgo. Determinados por diferentes autores.	61
Tabla 8 Variación y niveles promedio en las ca-- racterísticas físicas y químicas del ex-- tracto de saturación de los suelos rega-- dos con aguas residuales en los Munici-- pios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atita-- laquia, Hgo. Septiembre de 1987.	66
Tabla 9 Concentración de plomo, cadmio y cromo (ppm) en suelos regados con aguas negras en el Valle del Mezquital, Hgo. Determi-- nados por diferentes autores.	69
Tabla 10 Variación y niveles promedio de contami-- nantes en tejidos vegetales regados con aguas residuales en los Municipios de -- Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia,- Hgo.	73
Tabla 11 Niveles promedio por cultivo de contami-- nantes en tejidos vegetales regados con aguas residuales en los Municipios de -- Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo.	73
Tabla 12 Concentración de Metales Pesados (expre-- sados en ppm) en tejidos vegetales rega--	

Indice de Tablas.

	página
dos con aguas negras en el Valle del Mezquitil Tula, Hgo. Determinados por diferentes autores.	75
Tabla 13 Relación entre las propiedades químicas del agua y contaminantes Pb, Cd y Cr, -- mencionandose el coeficiente de determinación (R^2), nivel de significancia y descripción de la ecuación del modelo lineal.	78
Tabla 14 Relación entre las propiedades físicas y químicas del suelo y contaminantes, mencionandose el coeficiente de determinación (R^2), significancia y descripción de la ecuación del modelo lineal.	82
Tabla 15 Relación entre las propiedades analizadas en agua y suelo con el plomo como -- contaminante, en los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo. (D.D.R. 063).	86
Tabla 16 Relación entre las propiedades analizadas en agua y suelos con el cadmio y cromo como contaminantes, en los Municipios Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo. (D.D.R. 063).	87

Indice de Tablas.

	Página
Tabla 17 Relación entre contaminantes en Suelo - Planta y Agua - Planta. Mencionandose - el coeficiente de determinación, nivel - de significancia y descripción de la e-- cuación matemática de modelo cuadrático. En los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahue- lilpan y Atitalaquia, Hgo. (D.D.R. 063).	90
Tabla A-1 Muestreo de suelo, agua y tejido vege-- tal.	110
Tabla A-2 Concentración de Metales Pesados (ppm) como plomo, cadmio y cromo en muestras de aguas residuales en los Municipios - Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia; Hgo. (D.D.R. 063).	111
Tabla A-3 Características físicas y químicas de - los suelos regados con aguas residuales en los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahue lilpan y Atitalaquia; Hgo. (D.D.R. 063).	112
Tabla A-4 Concentración de metales Pesados (ppm) en suelos regados con aguas residuales en los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahue lilpan y Atitalaquia; Hgo. (D.D.R. 063).	114
Tabla A-5 Variación y niveles promedio de contami	

Indice de Tablas.

	Página
nantes en la zona del distrito de riego 063 Valle del Mezquital Hidalgo.	115
Tabla A-6 Concentración media de Metales Pesados (en ppm) en tejidos vegetales regados con aguas residuales en los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitala-- quia; Hgo. (D.D.R. 063)	116
Tabla A-7 Concentración de contaminantes de Meta- les Pesados (en ppm) en tejidos vegeta- les, regados con aguas residuales en -- los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelil- pan y Atitalaquia; Hgo. (D.D.R. 063).	117
Tabla A-8 Concentración de Metales Pesados (en -- ppm) en hoja y tallo de vegetales rega- dos con aguas residuales en los Municipi- os de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Ati- talaquia; Hgo. (D.D.R. 063).	118
Tabla A-9 Relación entre las propiedades químicas del agua y contaminantes como Pb, Cd, y Cr.	119
Tabla A-10 Relación entre las propiedades físicas y químicas del suelo y contaminantes.	120

Indice de Figuras.

	Página
Figura 1 Zona de estudio y localización de los sitios de muestreo.	49
Figura 2-5 Efecto del pH (a), sodio soluble (b) sodio soluble (c) y potasio soluble (d) sobre las concentraciones del Cd, Cr soluble y Pb vegetal.	79
Figura 6-11 Efectos de los iones solubles, bicarbonatos (a,b), cloruros (c,d) y sulfatos (e,f) sobre la concentración del Cd, Cr y Pb solubles.	80
Figura 12-15 Efecto de bicarbonatos solubles (a, b,c) y textura (d) sobre la concentración del Pb soluble, Cr y Pb vegetal.	83
Figura 16 Resumen de la incorporación de nutrientes a la raíz.	85
Figura 17 Relación entre los contaminantes de -- Suelo - Planta y Agua - Planta, indicando el coeficiente de determinación (R^2), la significancia y ecuación matemática. Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuilipan y Atitalaquia; Hgo.	91

INTRODUCCION.

Ha sido notable la importancia que en los últimos años se le ha dado al estudio de la contaminación provocada por la descarga de aguas residuales provenientes de las grandes urbes. Entre ellas se encuentra la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, catalogada como la más habitada y la más grande del mundo.

A medida que se desarrolla y crece la industria, la composición de las aguas residuales sufren continuas degradaciones en su calidad desde el punto de vista agrícola. Esto se debe a que dichas industrias descargan sus desechos al drenaje, contaminando las aguas con una gran cantidad de elementos tóxicos tales como sales solubles, detergentes del tipo "ABS" o alquil-benceno-sulfonato, boro, metales pesados -Al, As, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Pb, Se, Zn- y otras sustancias dañinas, que provocan impactos negativos y positivos en los lugares receptores, tal como, El Distrito de Desarrollo Rural 063. Como efectos positivos, se tiene el fomento de la actividad agrícola, al permitir el aumento del área de riego, crear nuevas fuentes de empleo y motivar el crecimiento económico.

Por el contrario, dichas aguas residuales han modificado las condiciones naturales, sociales y económicas; que si bien, contienen gran cantidad de materia orgánica que actúa como fertilizante, incluyen en su composición altas

concentraciones de elementos tóxicos y microorganismos patógenos, contaminado los productos agrícolas y perjudicando la salud de sus consumidores. Además se ha visto una disminución en los rendimientos de los cultivos, observándose principalmente una reducción en el número de cortes de alfalfa; es decir, su tiempo de establecimiento antes era de 4 a 5 años y en la actualidad es solo de 2 años como máximo, siendo el frijol otro de los cultivos que se ve afectado.

Esta disminución, se atribuye a problemas de salinidad, toxicidad de boro, alto contenido de detergentes disueltos en el agua y otras sustancias. Así mismo afecta el rendimiento, como la calidad de los productos, por contener considerables concentraciones de metales pesados.

Este trabajo, va encaminado al estudio de implicaciones ambientales en los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atlatlaquia, Hidalgo. Estos Municipios pertenecen al Distrito de Desarrollo Rural 063; principal receptor de aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Se han realizado estudios desde hace más de diez años sobre los efectos del uso de aguas residuales en el suelo y tejidos vegetales en este distrito; sin embargo, por las condiciones diferentes a las actuales, se plantea el siguiente trabajo, no por ello se excluirán los ya realizados.

2. IMPORTANCIA.

La liberación de un metal dentro del medio ambiente en grandes cantidades, puede ser una amenaza insidiosa para la salud humana. Uno de los medios para liberar metales, es el agua desechada por industrias, hogares y la pluvial que en forma natural depura ciudades. Esta agua, es la que conocemos como residual, y es la que se reusa en la agricultura, o para otros fines, en diversos países con escasez de agua, causando a través del tiempo contaminación de suelos, disminución de los rendimientos de los cultivos, daños en la salud de los animales y seres humanos que consumen los productos agrícolas y contaminación de los cuerpos de aguas subterráneas.

Los elementos tóxicos más frecuentemente encontrados en esquemas de reuso de agua son: cobre, selenio, cadmio, mercurio y plomo (ver tabla 1).

Por lo antes señalado se considera importante la realización de este trabajo, dado que en el lugar de estudio, se utilizan aguas residuales sin tratar, desde 1886, provenientes de la ciudad de México.

Tabla 1. Categorías de elementos en relación con riesgos toxicológicos en el agua.

Elementos no críticos	Elementos tóxicos accesibles	Elementos tóxicos insolubles.
Fierro (Fe)	Berilio (Be)	Titanio (Ti)
Silicio (Si)	Cobalto (Co)	Hafnio (Hf)
Rubidio (Rb)	Niquel (Ni)	Circonio (Zr)
Aluminio (Al)	Cobre (Cu) *	Rhenio (Re)
Sodio (Na)	Zinc (Zn)	Tungsteno (W)
Potasio (K)	Estaño (Sn)	
Magnesio (Mg)	Arsénico (As) *	Tantalio (Ta)
Calcio (Ca)	Selenio (Se)	Galio (Ga)
Fósforo (P)	Telurio (Te)	Lantano (La)
Azufre (S)	Paladio (Pd)	Iridio (Ir)
Cloro (Cl)	Plata (Ag)	Osmio (Os)
Bromo (Br)	Cadmio (Cd) *	Rutenio (Ru)
Flúor (F)	Platino (Pt)	Bario (Ba)
Litio (Li)	Oro (Au)	
Estroncio (Sr)	Mercurio (Hg) *	
	Talio (Tl)	
	Ploomo (Pb) *	
	Antimonio (Sb)	
	Bismuto (Bi)	
	Cromo (Cr)	

Fuentes: YAREZ, Cossio Faviani; Manual de Métodos Experimentales. "Evaluación de Lagunas de Estabilización". CEPIS, OMS. Lima, Perú, 1982.

* De mayor importancia en aguas residuales.

3. REVISION BIBLIOGRAFICA.

3.1.- Generalidades Sobre Aguas Residuales.

Uno de los principales usos a que se han destinado en los últimos años las aguas residuales, es para el riego de cultivos en zonas con escasez de fuentes de abastecimiento de aguas de buena calidad y para el desarrollo de cultivos en zonas áridas y semiáridas. Sin embargo, según la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1982), el uso de aguas residuales para la agricultura del Distrito de Riego 03, perteneciente al Distrito de Desarrollo Rural 063 (DDR 063), se inició en el año de 1886.

Para lograr estos fines, las aguas residuales utilizadas en el riego, deben de tener una calidad tal que no ocasione daños a las plantas, que no demerite la calidad del producto cosechado o la combinación de estos dos efectos. Además, estas aguas no deben ocasionar daños a la salud de los consumidores de estos productos, tanto al hombre como a los animales (ganado) y no deben ser fuentes productoras de infecciones por la formación y el transporte de aerosoles que cargan organismos patógenos. Por otro lado, no deben afectar las características naturales del suelo, principalmente la permeabilidad, tasa de infiltración etc.; y donde la infiltración no debe afectar la calidad del agua de cuerpos subterráneos. Los parámetros que se consideran en los criterios del reuso del agua, en el riego agrícola, son con

base a otros estudios e investigaciones realizadas a nivel mundial; donde se han observado efectos adversos a los cultivos o a los consumidores de estos cultivos cuando exceden ciertos niveles, presentes en aguas residuales. En la tabla 2, se presenta la lista de estos parámetros, mencionados por U. S Environmental Protection Agency (U.S.E.P.A, 1972), SARH (1982).

3.1.1 Criterios.

3.1.1.1 Salinidad.

U.S.E.P.A (1972), refiriéndose a la salinidad o sólidos totales disueltos en la solución del suelo, este componente del agua es una de las consideraciones más importantes en la evaluación de su calidad. Se ha observado que ciertas plantas llegan a marchitarse no obstante que poseen el agua suficiente para su desarrollo; esta situación se debe a las altas concentraciones de sales contenidas en el suelo, las cuales crean condiciones fisiológicas de sequía, debido al cambio en el potencial de soluto de la solución y al potencial hidrico.

3.1.1.2 Sodio.

Hutchinson (1970) y U.S.E.P.A (1972), mencionan que concentraciones relativamente altas de sodio y cloruros en el suelo pueden afectar el crecimiento de las plantas; además, se ha encontrado que el sodio ocasiona la quemadura de las hojas

Tabla 2. Contaminantes objetables después de ciertos límites en las aguas residuales para el riego de cultivos, según U.S. Environmental Protection Agency (1972).

Parámetros.
Salinidad
Temperatura
Cloruros
Bicarbonatos
Sodio
Nitrógeno
Fósforo
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
Acidez
Alcalinidad
Sólidos suspendidos
Elementos traza
• Aluminio
• Arsénico
• Berilio
• Boro
• Cadmio
• Cobalto
• Cobre
• Cromo
• Estaño
• Hierro
• Flúor
• Litio
• Manganeso
• Mercurio
• Molibdeno
• Níquel
• Plomo
• Selenio
• Titanio
• Tungsteno
• Vanadio
• Zinc
Plaguicidas
Organismos patógenos

en varios cultivos - siendo más severa la toxicidad por sales cuando el suelo está seco - y que los suelos con altos niveles de sodio intercambiable desarrollan propiedades físicas indeseables como drenaje deficiente, por lo que la permeabilidad del suelo al aire y al agua disminuye, favoreciéndose la formación de costras, las cuales afectan o impiden el desarrollo normal del cultivo. Debido a que los iones sodio están cargados positivamente, éstos son atraídos por los sitios negativos de las arcillas y por partículas orgánicas; de esta manera el suelo deja libre los iones (cloruro) para ser arrastrados por el agua.

3.1.1.3 Cloruros.

Las concentraciones de cloruros contenidos en las aguas residuales, utilizadas en la irrigación, no son tóxicos para los cultivos; aunque, existen algunos cítricos muy sensibles a los cloruros (U.S.E.P.A, 1972). Algunos de los posibles efectos se traducen en que los cloruros no permiten que la planta ingiera agua (efecto osmótico), agravado este fenómeno por la evaporación y las tasas de evapotranspiración que se tengan entre riegos sucesivos.

3.1.1.4 Bicarbonatos.

Altas concentraciones de bicarbonatos en las aguas residuales utilizadas para el riego pueden ocasionar clorosis en las plantas, porque no deja fierro disponible a éstas. Aun

que las concentraciones de bicarbonatos en el agua entre 60 y 120 mg/l pueden ocasionar clorosis en algunas plantas. la precipitación del carbonato de calcio que se presenta en el campo, minimiza estos efectos. según U.S.E.P.A. (1972).

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos sobrepasa al contenido de calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio, el cual es muy soluble, pudiendo el sodio desplazar al calcio y al magnesio del complejo de intercambio del suelo produciendo la defloculación.

3.1.1.5 Nitrógeno.

La presencia de nitratos en el agua utilizada para riego de cultivos, puede considerarse como un elemento aprovechable. En muy raras ocasiones, el agua para irrigación llega a contener altas concentraciones de nitratos que llegan a dañar a los cultivos (U.S.E.P.A 1972).

En regiones áridas, las altas concentraciones de nitratos en el agua pueden ocasionar la acumulación de nitratos en el suelo (de manera similar a como se acumulan las sales en el suelo), las cuales se mueven fácilmente a través del suelo, con agua que se infiltra, contaminando a los cuerpos de aguas subterráneas.

En algunas ocasiones, se pueden presentar problemas cuando las aguas residuales, utilizadas para la irrigación contienen nitrógeno en cantidades superiores a las requeridas

por los cultivos. Sin embargo, el nitrógeno en estas aguas, se presenta en una forma tal que es convertido lentamente a nitrato.

3.1.1.6 Fósforo.

En la mayoría de los suelos agrícolas, la aplicación del fósforo favorece el crecimiento de los cultivos; sin embargo, cuando el fósforo en forma de fosfatos, se presenta en el suelo a altas concentraciones, ocasiona una disminución en la productividad por efectos adversos sobre la disponibilidad de micronutrientes, tales como el fierro y el zinc.

3.1.1.7 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

El crecimiento óptimo de las plantas, requiere de una cantidad adecuada de oxígeno en el suelo, para su desarrollo normal.

Cuando las condiciones de drenaje del suelo son pobres, disminuye el oxígeno disponible; si además, en la irrigación de estos suelos se utilizan aguas residuales con alto requerimiento de oxígeno sea por demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o por la demanda química de oxígeno (DQO), esta situación se agrava. Aparte de los daños sobre las plantas causados por la disminución de oxígeno en el suelo, se ocasiona la reducción de elementos, tales como el fierro y manganeso, a formas divalentes más solubles lo que puede crear condicio-

nes tóxicas a las plantas. U.S.E.P.A (1972).

3.1.1.8 Acidez y alcalinidad.

Las aguas residuales, para riego, con valores de pH inferiores a 4.8 sobre suelos ácidos durante largos periodos, pueden restituir iones solubles de fierro, aluminio y manganeso en concentraciones tales que pueden ser tóxicas para el crecimiento de las plantas. El agua con alto contenido de sales en suelos ácidos puede ocasionar un decremento en el valor del pH y un incremento en la solubilidad del aluminio (U.S.E.P.A, 1972).

Aguas alcalinas que alcanzan valores de pH superiores a 8.3 pueden contener altas concentraciones de sodio y carbonatos. Por ejemplo, la adsorción de los iones de sodio contenidos en el agua, ocasionan la dispersión de la fracción de la arcilla, provocando una disminución de la permeabilidad del suelo por la formación de costras (sobre la superficie del suelo) que impide la germinación de la semilla y el que la plántula emerja a la superficie.

3.1.1.9 Elementos traza.

Los elementos traza son aquellos que se encuentran normalmente en aguas o soluciones de suelos en concentraciones menores a unos cuantos mg/l y usualmente en concentraciones menores a 100 μ g/l. Algunos de éstos son necesarios para el crecimiento de los cultivos, mientras que

otros no lo son, SARH (1976).

Cuando un elemento se adiciona al suelo, se puede combinar con éste para reducir su concentración e incrementar el almacenamiento del elemento en el suelo. Si el proceso de adición de agua para riego que contenga niveles tóxicos del elemento continua, la capacidad del suelo a reaccionar con el mismo se satura. Puede darse el caso en que se alcance un estado de equilibrio, en el cual la cantidad del elemento que es drenado es igual a la cantidad adicionada por el agua de riego. En muchos casos los suelos tienen gran capacidad para reaccionar con los elementos traza. Por lo tanto, el agua de riego que contiene niveles tóxicos de elementos traza pueden ser adicionados por años antes de que alcance el equilibrio. El tiempo en que dicho estado de equilibrio se alcance es variable, y depende de las características de la especie vegetal, las condiciones climáticas, las características del suelo y las concentraciones de los elementos traza. La tabla 3 presenta algunos efectos que pueden ocasionar los elementos traza.

Tabla 3. Efectos de los elementos traza en concentraciones tóxicas, según U.S. Environmental Protection Agency (1972).

Elemento	Efectos
Aluminio.	Tóxico en suelos ácidos. Reduce la productividad del suelo y el crecimiento de algunos frutales.
Arsénico.	Reduce el crecimiento de las raíces y tallos. Además reduce la productividad de algunas legumbres.
Berilio.	Reduce el crecimiento de legumbres y forrajes. Su toxicidad es mucho mayor en suelos ácidos que en calcareos.
Boro.	Síntomas de toxicidad diversa.
Cadmio.	Reducción en productividad de algunas legumbres. Elemento acumulativo en la cadena alimenticia, por lo que su presencia constituye un riesgo para la alimentación humana.
Cromo.	Produce reducción de la productividad, así como clorosis y deficiencia de fierro en algunos cultivos.
Cobalto.	Síntomas de toxicidad diversas.
Cobre.	Síntomas de toxicidad y clorosis.
Flúor.	Aumenta el nivel de fluoruros en los huesos del ganado alimentado con forrajes sometidos a contaminación con fluoruros.
Fierro.	Síntomas de toxicidad y disminución de productividad. Su precipitación en el suelo podría incrementar la fijación de elementos esenciales tales como fósforos y molibdeno y además de que las sales solubles contribuyen a la sodificación del suelo.
Piomo	Reduce el crecimiento de raíces en concentraciones extremas e inhibe la proliferación celular. Es un elemento acumulativo en la cadena alimenticia, por lo que puede representar un riesgo en la alimentación humana.
Litio.	Síntomas de toxicidad en cítricos.
Manganeso.	Toxicidad asociada con suelos ácidos.
Mercurio.	Síntomas de toxicidad, presenta riesgos a la alimentación humana por ser acumulativo en la cadena alimenticia.
Molibdeno.	Toxicidad en ganado alimentado con forrajes crecidos en suelos con concentraciones relativamente altas de este elemento.
Níquel.	Efectos tóxicos en cultivos localizados en

Tabla 3. Continuación.

Elemento	Efectos
Selenio.	suelos con bajo pH o en suelos con poco contenido de materia orgánica. Es tóxico a bajas concentraciones y pequeñas cantidades agregadas al suelo incrementan el contenido de selenio en forrajes a niveles
Estaño, Tungsteno y Titanio. Vanadio. Zinc.	tóxicos para el ganado. Además reduce la productividad de forrajes. Producen efectos tóxicos. Provoca efectos tóxicos en raíces y tallos. Produce deficiencias de fierro en algunos cultivos. Su toxicidad depende del pH del suelo, ya que en suelos ácidos disminuye su toxicidad.

3.2 Características químicas de metales pesados.

Es notable el avance en la apreciación del significativo papel que desempeñan los llamados metales traza en la salud y productividad de las plantas.

Phipps (1976) señaló que los metales en función a la reactividad química, pueden ser reconocidos como elementos, que bajo condiciones biológicamente significativas tienden a existir como cationes. Actuando como ácidos de Lewis, los iones metálicos forman compuestos complejos con un amplio margen de ligazones tanto orgánicos como inorgánicos y estos complejos son de esta manera las especies biológicamente activas. La ventaja de este concepto es que enfocan la atención directamente al ión metálico.

Lapades, 1974, señala que cualquier definición funcional de metal pesado es basada en su densidad (número atómico mayor de 20, pero esto no coincide en general) lo cual no encaja en una discusión biológica.

3.2.1 Metal traza.

Es un metal establecido en bajas concentraciones, tal vez en partes por millón o menos, en alguna fuente, por ejm. suelo, planta, tejido, agua etc. Este término se ha confundido con el bajo requerimiento nutricional por un organismo especificado, Phipps (1976).

Phipps (1981) señala también que una clasificación química de metal traza debe estar relacionado con los procesos bio-ambientales y debe tratar de suministrar una base informativa para la discusión y solución de problemas como: selectividad progresiva y patrones de toxicidad, Foy (1978) citado por Phipps (1981).

3.2.2 Metal esencial.

Se le denomina metal esencial cuando es requerido para completar el ciclo de vida de los organismos y estos producen síntomas de deficiencias, cuyo efecto es mostrado por una dosis-curva de respuesta.

3.2.3 Metal tóxico.

Todos los metales son tóxicos, pero el grado de

toxicidad varia grandemente de metal a metal y de organismo a organismo. La toxicidad puede ser definida por una dosis en la curva de respuesta.

3.2.4 Metal aprovechable.

Cuando el metal esta establecido en una forma fácil de ser asimilado por organismos vivos.

3.2.5. Comportamiento de los metales pesados.

Phipps (1980), menciona que la clasificación más conveniente es la separación de los metales en solo 5 amplias categorías, basado en el clásico sistema periodico y son: bloque-s, bloque-p, bloque-d de transición, bloque-f lántanidos y bloque-f actínidos. El Cd y Pb estan comprendidos dentro del bloque-p y el Cr en el bloque-d de transición y se caracterizan por:

Bloque-d: Estos metales muestran un extremadamente amplio rango de actividad redox y formación de complejos. Esta propiedad los hace adecuados para actuar como catalizadores biológicos.

Bloque-p: Algunos, aunque limitados, efectúan reacciones químicas redox por ejm. las asociaciones complicadas de estos metales Pb^{4+}/Pb^{2+} . Ellos generalmente forman complejos más estables. Los elementos pesados estando especialmente ávidos de sulfuros, pueden responder a actividades tóxicas.

Bloque-s: Los iones de metal-alcalino son altamente movibles. Normalmente forman complejos débiles y actúan como electrolitos. Las tierras alcalinas forman complejos más estables y por tanto tienen roles funcionales más especializados como promotores de estructura y activadores enzimáticos.

De gran significancia es la apreciación de la clasificación bio-ambiental de los metales, pues la creciente aceptación del punto de vista de la interacción de los metales con los sistemas vivos, la cual queda dominada por las propiedades del ión metálico tal como un ácido de Lewis, Lewis (1923) citado por Phipps (1981). Esta clasificación determina el comportamiento de los iones metálicos como receptores electrónicos; es decir, aprender su comportamiento en formaciones complejas. Dependiendo de la afinidad observada para diferentes ligaduras, los iones metálicos son escritos como clase "a" (ácidos fuertes), clase "b" (ácidos débiles) según Pearson (1969) citado por Phipps (1981) y línea limítrofe. La tabla 4, describe los iones metálicos por clase.

Los iones metálicos clase "a" que son fuertes o no polarizables forman compuestos con ligaduras simples no polarizables, particularmente proveedores de oxígeno y la afinidad es iónica. Los iones de la clase "b" se unen a ligaduras débiles polarizables para producir una afinidad covalente.

Los metales ultrafuertes (bloque-s) se combinan poco

Tabla 4. Clasificación de algunas propiedades del ión receptor del metal. Lewis (1923) citado por Phipps (1981).

Clase a	Li ⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Rb ⁺ , Cs ⁺ , Be ²⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , Sr ²⁺ , Ba ²⁺ , Sc ³⁺ , La ³⁺ , Ti ⁴⁺ , Zr ⁴⁺ , Hf ⁴⁺ , Cr ³⁺ , Mn ²⁺ , Fe ²⁺ , Co ²⁺
Clase B	Cu ⁺ , Ag ⁺ , As ⁺ , Cd ²⁺ , Hg ⁺ , Hg ²⁺ , Tl ⁺ , Pd ²⁺ , Pt ²⁺
Línea a	Fe ²⁺ , Co ²⁺ , Ni ²⁺ , Cu ²⁺ , Zn ²⁺ ,
Limitrofe	Rh ³⁺ , Ir ³⁺ , Ru ³⁺ , Os ³⁺ Sb ³⁺ , Bi ³⁺ , Pb ⁴⁺

con las ligaduras débiles y forman compuestos unidos iónicamente con ligaduras de proveedores fuertes de oxígeno y como la afinidad es iónica los iones metálicos fácilmente son desplazados y por lo tanto móviles. Los metales (bloque-p) más pesados muestran gran afinidad a ligaduras débiles tales como las proveedoras de sulfato o sulfuro y forman compuestos altamente covalentes que son muy difíciles de desplazar siendo por lo tanto relativamente inmóviles.

3.3 Fuentes de Contaminación.

3.3.1 Plomo.

El plomo lo encontramos en la fabricación de baterías, municiones, lana blanca para calzado, insecticidas, compuestos fosforados, en la industria plúmbica (plantas de galvanización, soldadura de plomo o estaño), depósitos de chatarra

de acero, pintura, gasolina (se usa como aditivo en forma de tetraetilo y tetrametilo de plomo), establecimientos petroquímicos, efluentes de minas, actividades de incineración, imprentas (fundición de linotipias, etc.), manufactura de anilinas, siendo las cantidades de plomo variables, Rodríguez (1979) y Borja (1985).

El plomo alcanza los suelos y los cultivos o cubierta vegetal como depósito aéreo y durante la precipitación, irrigación, drenaje de minas, desecho de hojas o como polvo que vuela de un lugar a otro. Más aún, el plomo se adiciona al suelo como plaguicida al incrementarse su uso por la prohibición del DDT.

El plomo contaminante, que alcanza el suelo desde diversas fuentes, entra a un nuevo ciclo de procesos que siguen a la incorporación dentro de la capa superficial; esto puede alterar su disponibilidad para las plantas. Así, el plomo precipitado, recién derivado de la combustión de la gasolina y asociada fundamentalmente con haluros, es relativamente soluble (Singer y Hanson, 1969), probablemente debido a la pérdida de haluros y a la asociación con sulfatos, carbonatos y fosfatos en forma aniónica y en la materia orgánica del suelo, Schinitzer (1968).

3.3.2 Cadmio.

El cadmio se encuentra en la naturaleza asociado con el zinc; es usado por el hombre en galvanoplastia, industria

aeronáutica, aviones, en fotografía, en agricultura -fertilizantes fosfatados o plaguicidas-, Borja (1985).

El cadmio es un elemento de gran toxicidad y de fácil incorporación por las plantas al igual que el plomo. Hoy en día es un elemento que produce trastornos renales, hipertensión, enfermedades arterioescleróticas del corazón; tiende a acumularse en los riñones y parece que tiene una vida media biológica de 20 a 30 años, además investigaciones generales indican que el cadmio al estar en sangre y agua en grandes cantidades, puede ser un factor de envejecimiento en el ser humano, Luna (1981).

3.3.3 Cromo.

El contenido de cromo en la superficie del suelo es debido a varias fuentes contaminantes, una de las principales son los diversos desperdicios industriales, por ejemplo: sedimentos de galvanoplastia o galvanizado, pintura de cromo, y desperdicios en la curtiduría, desperdicios de la manufactura de la piel o cuero, sedimentos de aguas fecales y municipales.

3.4 Acumulación en el suelo de metales pesados.

3.4.1 Plomo.

La abundancia terrestre de plomo, tiende a concentrarse en las series ácidas de rocas ígneas y sedimentos arcillosos que en rangos de concentraciones comunes de plomo son de 10 a

40 ppm, mientras en rocas ultramórficas y sedimentos calcáreos los rangos son de 0.1 a 10 ppm.

Debido a la contaminación del plomo es probable enriquecer los suelos con este metal, especialmente en la superficie del horizonte. La ocurrencia natural del plomo en el horizonte superficial de diferentes suelos de varios países muestra una media de 32 ppm.

El plomo es menos móvil, entre los otros metales pasados por su relativamente baja concentración en solución natural de suelos; se ha considerado que la lixiviación del metal puede suceder como complejos quelatados solubles en materia orgánica.

La característica localización de plomo cerca de la superficie del suelo, esta relacionada con la acumulación superficial de materia orgánica. Así como también las más grandes concentraciones de plomo en las superficies de horizontes de suelos orgánicamente ricos no cultivados, según Fleming citado por Aubert (1980).

En Dinamarca, Hansen y Tjell (1977) citados por Aubert (1980), estimaron un aumento de plomo anual en los suelos agrícolas de 3.7 % de la cantidad total.

La contaminación de suelos con plomo, se considera un proceso irreversible y por tanto un proceso acumulativo en superficies de suelos aunque la entrada sea baja.

La acumulación de plomo en superficies de suelos, es de gran importancia significativa ecológica porque se conoce que

este metal influye en la actividad biológica del suelo. Tyler, Anderson, Doelman y Hoanstro citados por Aubert (1980), mostraron que al aumentar los niveles de plomo en el suelo, es probable que limiten la actividad enzimática microbótica y como consecuencia, aumenta la acumulación de la descomposición incompleta de materia orgánica del suelo, por ejemplo materiales que no se descomponen fácilmente como la celulosa.

3.4.2 Cadmio.

La abundancia de cadmio en rocas sedimentarias e ígneas no excede a 0.3 ppm, y este metal al igual que el plomo está concentrado en depósitos arcillosos y pizarra (lutita). El cadmio está firmemente asociado con el zinc en geoquímicas; pero, parece tener una mayor afinidad por el azufre que por el zinc, y exhibe una mayor inestabilidad que el zinc en ambientes ácidos.

Los contenidos promedio de cadmio en suelos, yacen entre 0.007 - 1.1 ppm; sin embargo, los niveles de este metal en suelos, no deben exceder a 0.5 ppm y todos los valores superiores reflejan un impacto antropogénico.

La solubilidad del cadmio está en función del pH del suelo, a pH de 7.5, el cadmio en suelos no es fácilmente soluble, por consiguiente, la solubilidad de $CdCO_3$ y $Cd_3(PO_4)_2$, controlan la movilidad del cadmio en suelos, pero la naturalidad de la superficie de absorción y las uniones orgáni-

nicas son también de importancia, Aubert (1980). Por lo cual, es más móvil en suelos ácidos (pH de 4.5-5.5) que en suelos alcalinos, siendo más bien inmóvil.

Se han realizado diversos estudios sobre la acumulación de cadmio en suelos agrícolas basándose en el aumento del pH y capacidad de intercambio catiónico y partiendo del supuesto que en suelos calizos la adsorción de cadmio disminuye, encontrándose que esto no era efectivo para todos los suelos y plantas. Esto es apoyado por las siguientes observaciones: Si la concentración en las aguas residuales es de 2.02 mg/l, asumiendo también una lámina de riego anual de 1.5 m, considerando que los límites acumulativos para Estados Unidos es de 5, 10 y 20 kg/Ha y para Inglaterra, de 5 kg/Ha; para llegar a estos límites en un suelo normal, recibiendo esta concentración de metal de aguas residuales, y si el suelo tiene una capacidad de intercambio catiónico de 15 meq/100 gr de suelo, se requieren 67 años para ser un suelo contaminado, pero solamente 17 años, si ese suelo presenta una capacidad de intercambio catiónico menor a 5 meq/100 gr de suelo; es decir, un suelo arenoso. Este valor coincide para ambos países, y más aún, para un suelo con pH mayor de 6.5. Sin embargo, si el suelo tiene un pH menor de 6.5, aún cuando presenta una capacidad de intercambio catiónico de 15 meq/100 gramos de suelo (suelo franco o franco arcilloso), también se requieren 17 años para ser contaminado; es decir, se acelera el proceso si el suelo es ácido. Esta es una observación valí

liosa porque en 17 años se pierde un suelo agrícola que estaba trabajando muy bien, (Cajuste 1988).

3.4.3 Cromo.

El contenido de cromo en rocas sedimentarias y ácido igneas es muy bajo y rangos de 5-120 ppm se tienen en sedimentos arcillosos.

El comportamiento del cromo en el suelo ha sido estudiado por Bartlett, Kimble, James, Bloomfield, citados por Aubert (1980), ellos mostraron que la mayor parte de cromo del suelo ocurre como Cr^{3+} dentro de la estructura mineral o formas mixtas de óxidos de Cr^{3+} y Fe^{3+} ; Bassam citado por Aubert (1980), subraya que el comportamiento del cromo es gobernado por el pH del suelo y potencial redox. Este comportamiento puede ser modificado por complejos orgánicos de cromo y el efecto dominante de materia orgánica, estimula la reducción de Cr^{6+} a Cr^{3+} (cromo soluble a cromo insoluble), esta conversión es importante porque es responsable del bajo cromo disponible para plantas.

El Cr^{3+} es ligeramente móvil en medios muy ácidos y a un pH de 5.5 es casi completamente precipitado; por lo que estos compuestos son considerados muy estables en suelos. Por otra parte, el Cr^{6+} es muy inestable y es fácilmente movilizado en suelos ácidos y alcalinos. La adsorción de Cr^{6+} disminuye al aumentar el pH y la adsorción de Cr^{3+} aumenta al elevar el pH. El cromo es tóxico cuando se encuentra en estado hexa-

valente al acumularse en los suelos, sin embargo esta forma²⁵ no es muy común.

Los suelos arenosos e histosoles son usualmente los más pobres en cromo y se calcula el contenido medio de 65 ppm en los suelos en general.

Baszám citado por Aubert (1980), señala que después de 80 años de irrigación con aguas fecales, los suelos contienen 112 ppm de Cr, y la contaminación del metal en ellos, aumentó de 43 a 113 ppm. Otros autores también reportaron una alta acumulación de Cr en horizontes superficiales de tierras agrícolas donde los rangos de más alto nivel son de 214 a 399 ppm.

Aplicaciones de caliza, fósforo y materia orgánica se conocen como efectivos en la reducción de cromo tóxico en suelos contaminados. Después de la reducción, la caliza promueve la precipitación de compuestos de Cr^{3+} (Aubert, 1980).

3.5 Efectos del Plomo Sobre El Ser Humano.

Por ser el plomo un elemento ubicuo en la naturaleza, forma parte de numerosos compuestos que han sido útiles para el hombre. Ha habido en el curso de la Historia de la Humanidad, dos épocas en las que el plomo y sus compuestos han sido usados abundantemente y en los que se ha hecho patente sus efectos tóxicos.

Durante el Imperio Romano se empleó el plomo para

recubrir utensilios domésticos, para la elaboración de medicamentos, cosméticos y tubos para los acueductos. Estos usos determinaron una continua y prolongada exposición al metal, lo que de acuerdo con algunos autores, fue uno de los factores precipitantes de la decadencia de este Imperio, al producir una alta frecuencia de muertes perinatales, malformaciones congénitas y retraso mental. Esta hipótesis ha sido apoyada por el descubrimiento de altas concentraciones de plomo en los esqueletos de los Romanos que datan de la época de la declinación del Imperio Romano, Stofen (1974).

Para poder producir intoxicación por vía digestiva, se necesita la ingestión de cantidades considerables de plomo. Una dosis tóxica sería de 1 a 2 mg por día durante varios meses, Borja (1985). Los síntomas de envenenamiento aparecen cuando el plomo almacenado es liberado en la sangre. Por esta razón se conoce como veneno acumulativo y se agrupa como elemento tóxico junto con el cadmio, arsénico y mercurio, Kehoe (1976) citado por Borja (1985).

3.6.- Influencia de los Metales Pesados Sobre las Plantas.

3.6.1 Plomo.

En la actualidad la presencia de plomo en el suelo, afecta al hombre, y ocasiona problemas por efecto de plomo sobre plantas de importancia económica; es decir, es altamente tóxico a muchos organismos bajo ciertas condiciones, provocando severos impactos en el ecosistema natural, Koeppe

(1981).

Estudios en cultivos hidropónicos, utilizando diversos niveles de plomo, han mostrado una reducción significativa en la producción agrícola, al aumentar las concentraciones de plomo, Miller y Koepe (1971), Rolfe (1973).

Otros estudios no encontraron disminución en el rendimiento de alfalfa y bromo espigado tratados con 100 μ g Pb/gr suelo, Karamanos (1976). Estudios con rábano, zanahoria y espinaca mostraron considerable incorporación de plomo.

Bainhard y Welch (1972), Koepe (1977), citados por Koepe (1981), encontraron que es mayor el contenido de plomo en los frutos y granos que en otras partes comestibles de plantas. Sin embargo, otros investigadores señalan que en plantas expuestas a contaminación por plomo, las raíces contienen una concentración mayor que en otros tejidos de la planta, Heversy (1923). Broyer (1972), observó reducción en el peso seco en raíz y apices de frijol (Phaseolus vulgaris), cebada (Hordeum vulgare) y jitomate (Lycopersicon esculentum) tratados con 50 μ g Pb/litro; además, encontró la mayor parte de Pb asociado con las raíces y pequeñas cantidades en el ápice de la planta.

Avena sativa, una de las especies menos sensibles a la toxicidad por plomo mostró una disminución del 34 % en peso fresco, 23 % en peso seco y 26 % en el contenido de clorofila al estar desarrollado durante 21 días en solución nutritiva con 10^{-6} M $Pb(NO_3)_2$, Fiussello y Molinari (1973).

también determinaron la sensibilidad al plomo de diferentes especies comestibles, de acuerdo a la siguiente secuencia decreciente: Chile (Capsicum annuum) > Betabel (Beta vulgaris) > (Phalaris canariensis) > Trigo (Triticum vulgare) > Avena (Avena sativa) > Chicharo (Pisum sativum).

Phaseolus vulgaris después de diez días de ser tratado con 10^{-8} M $PbCl_2$ se redujo en peso y longitud en todas las plantas en un 34 %; en raíces el 70 % y la superficie aérea de la hoja en un 26 % y se redujo a más del doble a concentraciones de 10^{-2} M, Merakchiska (1976) citado por Koeppé (1977)

En Oryza sativa, las raíces en crecimiento, fueron completamente inhibidas por 2×10^{-2} M y la germinación por 10^{-1} M de acetato de plomo, Mukherji y Maitra (1976).

En un experimento realizado por varios autores citados por Koeppé (1981), donde se determinó la asimilación de CO_2 en fotosíntesis en plantas de Glycine max L (frijol soya), Helianthus annuus (girasol), Plantanus occidentales L (plátano falso de América) y Zea mays L (maíz), tratados con varias concentraciones de plomo por crecientes periodos de tiempo, se encontró que todas esas especies manifiestan reducciones en la tasa fotosintética a concentraciones crecientes de plomo en el suelo.

En Helianthus annuus a concentraciones de 193 μ g Pb/gr peso seco, la tasa fotosintética neta fue reducida al 50 %, (Rolfe y Bazzaz, 1975). También estos autores encontraron una correlación fuerte entre efectos de plomo con fotosíntesis y

tasa de transpiración disminuida. Consideran que esto puede ser debido al cierre de estomas inducido en vez de un efecto directo sobre los procesos de fotosíntesis.

En maíz cultivado en suelo areno-arcilloso tratado con cloruro de Plomo ($PbCl_2$) a concentraciones de 125-250 μg Pb/gr de peso seco de suelo, después de 20 a 30 días de tratamiento, las concentraciones de boro, manganeso, cobre y zinc en plantas fueron reducidas de 20-39 %, (Walker, 1977). En plantas de chicharo recién nacidas, tratadas con plomo (medio nutritivo) fue inhibida la absorción de iones de fierro, manganeso y zinc, (Kannan y Kepp, 1976) citados por Koeppe (1977); ellos consideran que la inhibición fue de naturaleza física al bloquear la entrada con ligamentos iónicos o con iones cargados.

El acetato de plomo (6×10^{-2} M) en medio líquido afectó la germinación de arroz aproximadamente en un 50 %, disminuyendo la actividad de proteasa y alfa-amilasa en endospermos después de 4 días, (Mukherji y Maitra, 1976) citados por Koeppe (1977). Además la actividad de RNA fue reducida al 17 % pero el DNA fue estimulado al 12 %.

El plomo causa una adelantada senectud de la planta recién nacida, (Lee, 1976). A concentraciones de plomo de 100 μg /ml, la respiración en hojas se incrementó en un 22 %, mientras que diversas enzimas mostraron los siguientes efectos cuando se compararon con tratamientos controlados sin plomo: ácido fosfatado, +23 %; peróxido, +154 %;

desidrogenasa málica, +20 %; alfa amilasa, +28 %; sintetasa-glutamina, -89 %; decreció fósforo, calcio y nitratos y aumentaron aminoácidos, proteínas solubles, amonio y plomo total libre.

Algunas investigaciones tienen establecido que varias formas de plomo producen lesiones cromosomales u otras perturbaciones (Ahlberg.1972).

En otros efectos interactivos por plomo se ha sugerido la hipótesis de que el efecto tóxico no es directo sobre cualquier componente celular, es más bien indirecto por la destrucción continua de células por carencia de fosfato, (Schulze y Brand, 1978).

El plomo también produce alteración en la actividad de muchas membranas mitocondriales y cloroplásticas, así como también altera ácidos nucleicos y los cromosomas, resultando efectos tóxicos como reducción en la actividad de la fosfatasa y de la enzima ligada a la ATPasa, (Valle y Umer, 1972).

Efectos sobre cloroplastos aislados han observado que el plomo inhibe el transporte de electrones en la fotosíntesis asociada con el fotosistema II, pero no tiene efecto sobre el transporte de electrones que va al fotosistema I, también se ha visto en cloroplastos aislados de *Zea mays* L. que el plomo tiene dos efectos simultáneos:

- 1) inhibición de P700 a nivel de su fotooxidación y
- 2) la alteración en la reducción cinética de P700⁺, lo que trae como consecuencia una disminución en la velocidad de la fotofosforilación y por tanto en la producción de

carbohidratos fotosintéticos (Wong y Grovendjee, 1976)

En extracto de raíz y hojas de espinaca, Hampp (1973) observó la inhibición de la actividad de la ribulosa 1, 5-difosfato carboxilasa y ribulosa-5 fosfatokinasa a $5 \mu\text{M Pb}(\text{NO}_3)_2$ y a concentraciones de $100 \mu\text{M}$ asciende la actividad de piruvatokinasa.

3.6.2. Cadmio.

Hace tiempo que se conoce que el cadmio puede causar envenenamiento en el hombre. El cual toma, en cantidades significativas, compuestos de cadmio del aire, agua, alimentos, bebidas y cigarrillos (Luna, 1981). La principal vía de entrada de cadmio en una persona es por alimentos, y se pone de manifiesto el impacto nocivo del Cd décadas después de exposiciones continuas. Es importante mencionar que uno de los envenenamientos en humanos más publicados fue el reportado en Fuchu, Japón a mitad de los 50s, Tsuchiga (1978) citado por Page, Luna (1981), donde la exposición al cadmio ocurrió a través de la ingestión de arroz crecido en campos irrigados por agua de un río que ha sido contaminado por alguna corriente procedente de minas.

La concentración de cadmio en arroz ha sido por muchos años alrededor de $1 \mu\text{gr/gr}$ y la dieta ingerida de cadmio debe estar alrededor de $300 \mu\text{gr}$ o más (Luna, 1981). En la mayor parte de la población mundial los rangos son de 25-27 $\mu\text{gr/día}$. Friberg (1974) citado por Page (1977).

Se conoce que el cadmio produce en humanos una

enfermedad llamada itai-itai y recibió su nombre de los severos dolores causados por las fracturas de los huesos ablandados. Es evidente el gran problema que representa el cadmio para la salud, es por esto que la Organización Mundial de la Salud (1972) propuso una tolerancia máxima ingerida no mayor de 400-500 μg Cd/semana (Page, 1975). En el Distrito de Desarrollo Rural 063 no se tiene información sobre la cantidad de cadmio ingerida.

También se han observado efectos en plantas, Page (1972) citado por Mascareño (1974), trabajando con varios cultivos en solución conteniendo de 0.1-10 ppm de Cd, observó reducciones de un 50 % en el rendimiento de frijol con niveles de 0.2 ppm de Cd en solución, así como en lechuga y maíz con 1 ppm, en tomate y centeno con 5 ppm y en calabaza con 9 ppm; además comprobó que aumentaba el nivel en las hojas conforme se incrementaba el cadmio en solución.

Casterline (1982), señaló que los análisis de muchas plantas diferentes, desarrolladas en laboratorios y en varias partes del mundo cerca de minas y áreas industriales, han revelado que las plantas no excluyen la incorporación de metales pesados tóxicos especialmente cadmio, durante la asimilación de minerales esenciales.

La relación planta-suelo de cadmio fue considerablemente más alta que para plomo, zinc o cobre. Esto sugiere que la concentración del cadmio en plantas, es más alto que éste en su medio ambiente. Cutler y Rains (1974), sugirieron que uno

de los mecanismos en la acumulación de cadmio involucran una irreversible separación de cadmio a sitios de enlazamiento, probablemente en constituyentes de la célula. También señalan que la acumulación fue más grande en las raíces que en las yemas de las plantas. Esta acumulación en concentraciones altas se ha reportado en varias especies de plantas, ser tóxicas (Huang, 1974), citado por Casterlain (1982). Concentraciones tan bajas como 18 μM de cadmio en la solución nutritiva inhibieron la acumulación de peso fresco en vaina, actividad de la nitrogenasa y tasa fotosintética en frijol soya (Huang, 1974), citado por Casterlain (1982).

El mecanismo por el cual metales pesados son distribuidos y retenidos en plantas no es enteramente entendido. En tanto la concentración de cadmio en el medio ambiente esta aumentando debido a muchos procesos industriales.

3.6.3 Cromo.

Yoe y Koch (1955) citados por Mascaraño (1974), llevaron a cabo análisis de elementos traza en pastura y paja de avena, encontrando menos de 0.1 y 0.2 ppm de cromo respectivamente; en agua de bebida, encontraron 1.1 ppm y en agua de lagos menos de 0.3 ppm.

Hunter y Orella en 1953, indican que los efectos tóxicos del cromo se asocian con un contenido reducido de nitrógeno en plantas de avena.

Underwood en 1972, citado por Mascareño (1974), menciona que han aparecido varios reportes de un efecto estimulante de cromo sobre el crecimiento de los cultivos, así como de sus efectos tóxicos. Señala que excesivas cantidades de cromo en ciertos suelos causan enfermedades a las plantas. En tejidos vegetales normales encontró de 0.01 a 1.0 ppm pero el nivel medio cae entre 0.1 y 0.5 ppm.

3.7 Tecnologías que se Disponen para el Tratamiento de Aguas Residuales.

Entre las alternativas tecnológicas que se disponen para el tratamiento de aguas residuales se mencionan las siguientes:

Tratamiento biológico.

Tratamiento químico.

Tratamiento físico.

3.7.1 Tratamiento biológico.

En este tipo de tratamiento se encuentra el proceso de lodos activados, filtros goteadores y lagunas de estabilización.

3.7.1.1 Lodos activados.

El proceso de lodos activados, ha marcado un progreso importante en el tratamiento secundario de aguas residuales. Se basa en procesos bioquímicos por contacto, en el que microorganismos aeróbicos y los compuestos orgánicos y elementos susceptibles a degradar, se mezclan íntimamente en un ambiente favorable con la consecuente descomposición en compuestos utilizables en el recurso agua. Por su alta eficiencia de remoción, alcanza de 90-98 % de DBO en igual cantidad para sólidos suspendidos y bacterias patógenas. Por su complejidad de la planta de tratamiento, es muy costosa su operación y mantenimiento, ya que requiere de personal

3.7.1.2 Filtros goteadores.

Son unidades de tratamiento que emplean cultivos microbiológicos adheridos a superficies rugosas, para llevar a cabo la descomposición aeróbica por contacto con el material orgánico (Vigueras, 1988), transformandolos en compuestos estables con eficiencias de remoción de DBO de 80 a 95 %, y sólidos suspendidos de 70 a 92 % y de 90 a 95 % de bacterias. Por los costos de instalación, equipo, operación y mantenimiento, son poco utilizadas, Vigueras (1988).

3.7.1.3 Lagunas de estabilización.

Existen diferentes tipos de lagunas de estabilización de aguas residuales - de aguas negras, de oxidación, redox, de maduración, facultativas, aeróbicas, anaeróbicas-, a las cuales se les puede adicionar equipo mecánico (Vañez, 1982).

Una laguna de estabilización de aguas residuales, es una estructura simple, para embalsar agua, de poca profundidad - de 1 a 4 m- y con periodos de retención de magnitud considerable -de 1 a 40 días- (Saenz, 1985).

Cuando las aguas residuales son descargadas en lagunas de estabilización, se realiza en las mismas, en forma espontánea, un proceso conocido con el nombre de autodepuración, o estabilización natural, en el que ocurren fenómenos de tipo físico, químico, bioquímico y biológico.

Este proceso se lleva a cabo en casi todas las aguas con alto contenido de materia orgánica putrescible o biodegradable.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas descargadas en una laguna de estabilización y del efluente de las mismas, es el parámetro que más se ha utilizado para evaluar las condiciones de trabajo de las lagunas y su comportamiento (Saenz, 1985).

Las lagunas que reciben agua residual cruda, son lagunas primarias. Las que reciben el efluente de una primaria, se llama secundaria y así sucesivamente.

El proceso de estabilización que se lleva a cabo en las lagunas facultativas, es muy diferente a las anaeróbicas. Sin embargo, ambas son útiles y efectivas en la estabilización de las aguas residuales. La estabilización de la materia orgánica se lleva a cabo a través de la acción de organismos aeróbicos cuando hay oxígeno disuelto en el agua. Existen organismos con capacidad de adaptación a ambos ambientes, los cuales reciben el nombre de facultativas.

El proceso aeróbico se caracteriza porque la descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo en presencia de oxígeno, produciéndose compuestos inorgánicos que sirven de nutrientes a las algas, las cuales a su vez producen más oxígeno que facilita la actividad de las bacterias aeróbicas. Nos encontramos pues, ante un caso de simbiosis. El proceso de desdoblamiento de la materia orgánica se lleva a cabo con intervención de enzimas

producidas por bacterias en sus procesos vitales (Saenz, 1985).

Las reacciones anaeróbicas, son más lentas y los productos de las mismas originan malos olores.

En el proceso anaeróbico, las bacterias suelen aprovechar parte de los nutrientes inorgánicos en la fabricación de su propio protoplasma celular, fenómeno que también suele suceder en el proceso aeróbico. Sin embargo, llama la atención el hecho final, de que en ambos casos el resultado final es una disminución notable de bacterias, lo cual ocurre como consecuencia del agotamiento de los nutrientes y de otros fenómenos aún no muy claros, en los que juegan un papel importante el período de retención, la temperatura y la luz solar.

Para que las lagunas de oxidación aceleren el tratamiento, y aumenten la eficiencia para eliminar el exceso de nutrientes de las aguas residuales, con la consiguiente disminución del tiempo de retención hidráulico, existe una amplia gama de plantas acuáticas vasculares, que eliminan gran cantidad de nitrógeno y fósforo orgánico, DBO, gérmenes patógenos y metales tóxicos. Por ser la velocidad de crecimiento muy alta en plantas tales como, lirio (Eichornis crassipes) y lentejilla (Lemna sp.), se pueden aprovechar como mejoradoras de suelo, producción de biogas, de material de empaque o como fuente de proteínas no convencional para animales menores (Vigueras, 1988). El uso de Lemna sp.,

alcanza a eliminar hasta un 98 % de DBO_5 , 99 % de sólidos³⁹ suspendidos, 90 % de nitrógeno, 80 % de fosfatos y de 90 a 98 % de coliformes (Wolverton y Mc Donal, 1979; Sutton y Ornes, 1975), citados por Viguera (1988). Cuando existen metales tóxicos, estas plantas los asimilan, reduciendo la concentración por debajo de los límites que marca la norma (Nasu y Kijimoto, 1983), citados por Viguera (1988).

El uso del Eichornia crassipes, por su crecimiento acelerado e incontrolado, forma una capa densa que impide penetrar la luz solar, reduciendo la actividad fotosintética de las algas; consecuentemente disminuyen las bacterias aeróbicas, por consiguiente la turbiedad y el color, así mismo los sólidos suspendidos volátiles presentes en el agua. Otra consecuencia del tratamiento en ausencia de algas, es la reducción de los carbonatos y simultáneamente el incremento de ácidos orgánicos, lo que ocasiona una disminución en el pH (Rico, 1987). El lirio incorpora en su biomasa nutrientes como Na, K, Ca, Mg, Cl^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , etc., mismos que están presentes en el agua cruda en menor o mayor proporción, fenómeno que es necesario equilibrar mediante la cosecha continua y programada de la planta; de no efectuarse, el lirio presenta zonas necróticas y en lugar de tratar el agua, la ensuciaría, liberando los iones absorbidos (Rico, 1987).

El lirio también elimina las bacterias patógenas por competencia de nutrientes presentes en el agua, remueve metales pesados eficientemente con cosechas entre intervalos

largos.

En la parte superficial de las lagunas, se presenta un flujo de microremansos, favoreciendo la ovidepositación de larvas de insectos, siendo esto muy problemático, además las pérdidas de agua oscilan entre un 40 a 50 % por evaporación y transpiración; esto como desventajas que de alguna manera se pueden evitar (Rico, 1987).

Este tipo de sistemas de tratamiento de aguas, deben caracterizarse por su explotación, mantenimiento y equipo de la planta, que corresponda a la capacidad de mantener un equilibrio ecológico natural de los cuerpos receptores, de modo que el proceso resulte útil y económico (Vigueras, 1988).

Objetivos de las lagunas de estabilización (Saenz, 1985).

a) protección epidemiológica, a través de la disminución de organismos patógenos presentes en las aguas residuales y dificultando la transmisión de los mismos;

b) Protección ecológica a través de la disminución de la carga orgánica (DBO) de las aguas residuales, logrando de esta manera que el nivel de oxígeno disuelto (OD) en estos cuerpos receptores se vea menos comprometido, con el consiguiente beneficio para los peces y demás organismos acuáticos;

c) Reuso directo del agua trata en la agricultura, evitando los riesgos e inconvenientes del reuso de aguas

servidas crudas.

d) Piscicultura.

3.7.2 Tratamiento químico.

Entre los procesos químicos, se aplican principalmente la neutralización y precipitación por adición de sales inorgánicas -iones, ferrosos, alumbre, cal etc.- y polielectrolitos.

3.7.3 Tratamiento físico.

en este tipo de procesos, se tienen los que se llevan a cabo en la interfase sólido-líquido, como: filtración, centrifugación, absorción, osmosis inversa etc. (Vigueras, 1988).

4. OBJETIVOS.

- 1.- Cuantificar el grado de contaminación por Pb, Cd y Cr de algunos suelos y cultivos forrajeros regados con aguas residuales, en el Distrito de Riego 063, Estado de Hidalgo.
- 2.- Comparar los niveles de contaminación por Pb, Cd y Cr encontrados recientemente con los analizados en años anteriores en la misma zona del Distrito de Riego.
- 3.- Relacionar el grado de contaminación con las propiedades físicas y químicas del suelo.

5. MATERIALES Y METODOS.

5.1. Características generales de la zona de estudio.

Los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hidalgo; se localizan en el sur del Distrito de Desarrollo rural 063, que esta situado en parte suroeste del Estado de Hidalgo, entre los paralelos 20 01' y 20 09' de latitud norte y meridiano 99 09' y 99 18' de longitud oeste, con una altitud media de 2047 msnm.

La zona esta limitada al norte con Mixquiahuala, al sur con Atotonilco de Tula, al este con Ajacuba y Tetepango, y al oeste con Tezontepac de Aldama y Tula de Allende.

Estos municipios ocupan una superficie de 7250 hectáreas para siembra; de ellas aproximadamente el 75% es de riego y el 25% de temporal.

El Río Salado pasa por los municipios en estudio, dando origen a cuatro derivadoras de corrientes denominadas Tlamaco, Salitrillo, Dendhó y la Virgen, las cuales permiten derivar las aguas residuales provenientes de la ciudad de México y mezclarlas con las provenientes de las presas Requena y Endhó.

Existen dos pequeñas presas derivadoras sobre el Río Salado, a la altura de la población de Atitalaquia, Hgo., que forman las obras de toma para los canales principales Tlamaco-Jundhó (presa derivadora tlamaco) y Dendhó (presa derivadora el Tablón).

El agua en el distrito se distribuye por cuatro canales principales.

a) Requena y Endhó con una capacidad de conducción de 15 m³/seg.

b) Dendhó y Tlamaco con una capacidad de 17 m³/seg. y 13 m³/seg. respectivamente.

Tres de ellos irrigan la zona en estudio y son el Requena, Tlamaco-Juandhó y Dendhó. Dicha zona cuenta con drenaje natural bueno que conecta con el río Salado.

5.2. Clima

Estos municipios se encuentran dentro de la provincia con características de clima templado con lluvias en verano; en general, la humedad es deficiente. En la tabla 5 se observan las precipitaciones medias anuales, la elevación y temperaturas en cada municipio.

Tabla 5. Precipitaciones medias anuales, elevación sobre el nivel del mar y temperaturas máxima, media y mínima de los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo.

Lugar	Precipitación	Elevación msnm	Temperatura en C		
	mm		Máx.	Media	Min.
Atitalaquia	947	2073	41	17.6	-8
Tlaxcoapan	850	2070	35	16.8	-6
Tlahuelilpan	675	2000	35	16.7	-6

5.3. Topografía.

Se puede considerar que la zona se compone de llanos y planos con una pendiente menor a 2%. En algunas localidades, como el cerro el Xicuco, se presentan pendientes pronunciadas que favorecen la erosión del suelo.

5.4. Suelos.

Según el estudio Agrológico Complementario del Distrito de Riego 003 (nombre anterior del D.D.R. 063) realizado por la SARH en 1976, se han clasificado las series de suelos, con perfiles de dos metros de profundidad, en función de su potencial agrícola.

Fundamentalmente son dos las series identificadas, en función de la procedencia del material como:

1) Serie Lagunillas. Esta serie ocupa 4,756.4 ha. dentro del Distrito (D.R.03), y se localizan en los márgenes de los ríos que cruzan la región. Estos suelos son profundos de topografía plana con pendiente menor a 2%, están originados por materiales diversos arrastrados por las corrientes, entre los que predominan las andesitas y riolitas. Su formación es aluvial con desarrollo incipiente.

El drenaje de este tipo de suelos puede ser considerado, como deficiente, en virtud de que dominan el perfil las texturas finas; sufren inundaciones periódicas por desbordamientos de los ríos o escurrimientos de las zonas altas adyacentes y el nivel freático se localiza

aproximadamente a un metro de profundidad.

Su clasificación agrícola es de 2a. Clase por drenaje y últimamente se han venido afectando por sales, algunas pequeñas áreas de esta serie. Al introducirse obras de drenaje, estos suelos pasarán a ser de 1a. Clase, convirtiéndose en suelos aptos para todo tipo de cultivos.

2) Serie Progreso. Los suelos de esta serie ocupan 24,890 ha. dentro del Distrito (D.R.03) y se localiza en las lomas y cerros; generalmente son de poco espesor (menos de 50 cm.) yacen sobre un material calizo que dificultan la penetración de las raíces y el paso del agua. Estos suelos son originados de una capa caliza consolidada y su modo de formación es "in situ" en las partes altas y coluviales en las laderas.

La topografía de estos suelos es inclinada y fuertemente inclinada con una textura predominantemente media fina, encontrándose texturas del tipo franco arenoso con coloraciones que varían del café claro al rojizo claro; ocasionalmente canto rodados en la superficie. Cuando el material calizo está a pocos centímetros de la superficie es triturado por el arado e incorporado al suelo.

El drenaje interno es regular y superficial, variando de rápido a muy rápido. Los tipos dominantes de suelo son: arcilla, franco arenoso, franco arenoso-arcilloso y arcilloso arenoso. La clasificación agrícola de esta serie es de 2a. y 3a. Clase, teniendo como factores limitantes el espesor del

suelo, la topografía, la erosión y la pedregosidad.

5.5. Hidrología.

El establecimiento de un Distrito de Riego implica la modificación parcial del ecosistema, siendo su parte más afectada la hidrología superficial y subterránea. En el caso de la zona de estudio, las aguas residuales invaden el río Salado que cruza esta zona.

5.6. Flora.

La flora natural de esta zona de estudio ha ido desapareciendo y modificándose desde el inicio de operación del Distrito. Estas alternativas se minimizan por el beneficio que implica abrir tierras al riego. La antigua composición natural de esta zona fue arbustiva de tipo matorral xerófilo (Prosopis juliflora, Acacia sp., Opuntia sp., Agave sp.), aunque la mayor parte de ella no queda huella alguna de la vegetación original, considerándose como áreas cultivadas.

5.7 Recursos Hidráulicos.

Aguas negras.

El Río Salado es el afluente más importante del Río Tula y descarga por la margen derecha, aguas abajo de la Presa Endó. Reciben los caudales que fluyen del gran canal de desagüe, por los túneles de Tequixquiac provenientes del

drenaje de la Cuenca del Valle y de las aguas negras de la Ciudad de México.

Se observan incrementos en los caudales de las aguas negras con la expansión de la Ciudad de México y las obras realizadas para su abastecimiento de agua potable.

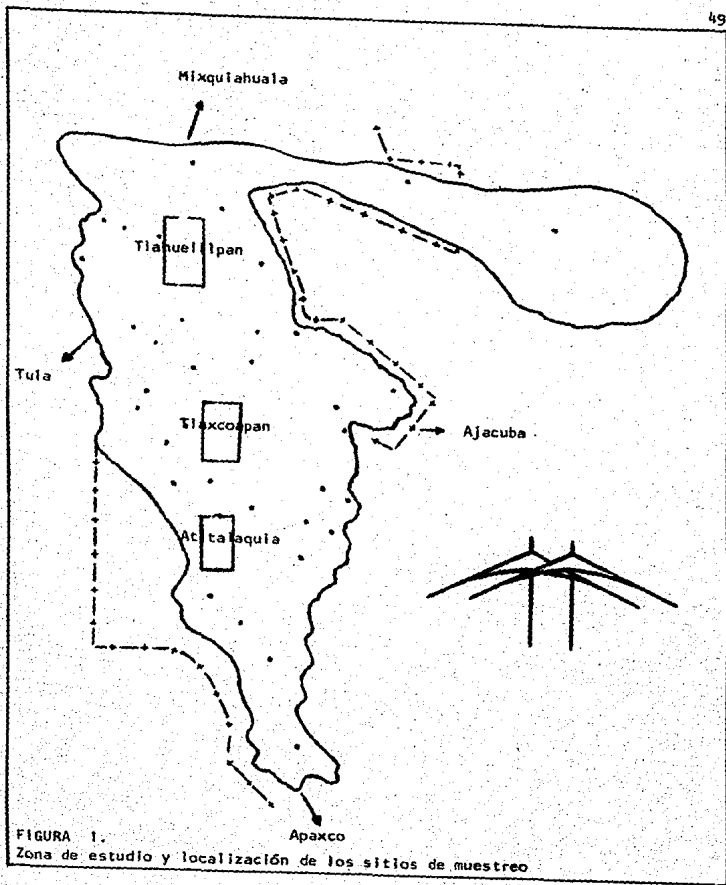
Según la Comisión Hidrológica, en el año de 1901 se tenían 103 millones de metros cúbicos al inicio del funcionamiento del Gran Canal. La Estación Hidrométrica del Tajo de Nochistongo, reporta a la salida del Túnel de Tequixquiac los siguientes caudales: de 1920 a 1930 un promedio anual de 195 millones de metros cúbicos, de 1930 a 1937 fueron 238 millones de metros cúbicos, y de 1940 a 1951, 297 millones de metros cúbicos. En la Estación Hidrométrica de la Mora, localizada aguas abajo de Tequixquiac dedujeron que el consumo promedio anual de aguas negras de 1951 a 1958 fue de 463 millones de metros cúbicos.

5.8 Localización de los sitios de muestreo.

En la figura 1, se presenta el área de estudio y los sitios donde se llevaron a cabo los muestreos de agua, suelo y tejidos vegetales.

5.9 Muestreo de suelo.

La zona de estudio es irrigada con las aguas residuales provenientes de la Ciudad de México, trayendo varias sustancias contaminantes.



El muestreo de suelos se llevó a cabo al azar, ⁵⁰ tomándose un total de 26 muestras a una profundidad de 0-25 centímetros, recogiendo aproximadamente 3 Kgs. de suelo en bolsas de plástico. Cada muestra esta compuesta por diez submuestras extraídas de un mismo predio.

5.10 Muestreo de tejido vegetal

La recolección de muestras de tejido vegetal se realizó al mismo tiempo que las muestras de agua y suelo. El tejido vegetal se colectó en bolsas de papel, muestreándose raíz, hoja, tallo y fruto dependiendo del tipo de cultivo; se colectaron 26 muestras de tejido vegetal de alfalfa, maíz, chile y calabaza; se les dio un pretratamiento adecuado que consistió en lavar las muestras con agua de la llave y agua destilada.

5.11 Muestreo de agua.

Se muestrearon los lugares más representativos de la zona, es decir, de acuerdo al canal principal que le corresponde regar al predio muestreado (suelo y tejido vegetal).

Para realizar estos muestreos se utilizaron frascos de plástico de medio litro de capacidad, tomándose dos muestras por sitio, una de las cuales se conservó en ácido nítrico (1 ml) según la técnica para determinar metales pesados en agua. Las muestras se trasladaron al laboratorio y se

conservaron en refrigeración antes y después de cada determinación química.

5.12 Trabajo de laboratorio.

Todas las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Química de Suelos del Centro de Edafología del Colegio de Postgraduados, Montecillos, Edo. de México .

Las muestras de suelo fueron secadas a temperatura ambiente, molidas y cernidas en un tamiz de seda con abertura de 2 mm de diámetro y se guardaron en bolsas de plástico para ser analizadas posteriormente. Las muestras de tejido vegetal fueron secadas en la estufa a una temperatura de 65-70 °C, cada muestra fue molida después de estar completamente seca y se guardó en sobres pequeños de papel.

5.12.1 Determinaciones físicas y químicas de suelos.

5.12.1.1 Textura.

Por el método del hidrómetro de Bouyoucos (1936).

5.12.1.2 Reacción del suelo. Se llevó a cabo por el método potenciométrico, para lo cual se usó un potenciómetro marca Beckman usando una relación 1:2 de suelo-agua.

5.12.1.3 Conductividad eléctrica.

Se determinó en el puente de conductividad marca

Beckman usando una relación 2:1 de agua-suelo (Richards, 1954).

5.12.1.4 Sales solubles.

Se determinaron en el extracto de la pasta de saturación (Richards, 1954).

Cationes (Na y K).- Por el método flamométrico, utilizando un flamómetro marca Coleman 21.

Ca y Mg.- Por el método del Versenato.

Aniones CO_3^{2-} y HCO_3^- .- Se determinaron por titulación con ácido sulfúrico valorado.

Cl^- .- Por titulación con nitrato de plata valorado.

SO_4^{2-} .- Por precipitación con cloruro de bario (Método gravimétrico).

5.12.1.5 Fósforo asimilable.

Por el método Olsen, citado por Black (1965).

5.12.1.6 Materia orgánica.

Por el método Walkley y Black, modificado por Walkley (1947).

5.12.1.7 Metales pesados como Pb, Cd y Cr.

Por el método Carolina del Norte, Wear y Evans (1968), utilizando el espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo 303.

5.12.2 Determinaciones de Pb, Cd y Cr en tejido vegetal.

Por el método de Digestión en Base Húmeda, (Cruz 1984), utilizando el espectrofotómetro de absorción atómica.

5.12.3 Determinaciones de agua.

Se filtraron las muestras de agua y utilizando la misma metodología que se usó para los análisis de suelos se determinó pH, aniones y cationes solubles; el plomo, cadmio y cromo, se determinaron por el método de análisis químicos para agua (U.S.E.P.A. 1974) para caracterizar las aguas con fines agrícolas y el grado de contaminación de las mismas.

5.13 Análisis Estadísticos.

Se analizaron estadísticamente todos los valores obtenidos del resultado de análisis de las muestras de agua con los contaminantes en agua, suelo y tejido vegetal, mencionándose el Coeficiente de Determinación (R^2), el nivel de la significancia y descripción de la Ecuación Matemática de Modelo Lineal ($Y = a + bx$). Así mismo se relacionó estadísticamente el grado de asociación existente entre las Propiedades físicas y químicas del suelo con los contaminantes presentes en el suelo, agua y tejido vegetal y el grado de asociación entre contaminantes del suelo-planta y agua-planta.

6. RESULTADOS Y DISCUSION.

6.1 Características de las aguas residuales con fines de riego.

En la tabla 6, se indican las características de las aguas residuales de acuerdo a su pH, conductividad eléctrica en milliamhos/cm y sales solubles (cationes y aniones expresados en meq/l), indicando principalmente límites de variación y valores promedio.

6.1.1 Reacción del agua (pH).

Las variaciones en el pH, oscilaron de 7.3 a 8.5 con un promedio de 7.7.

6.1.2 Conductividad eléctrica (C.E.).

La Conductividad Eléctrica fluctua de 0.64 a 6.25 con un promedio de 2.5 mmhos/cm. De acuerdo con el Departamento de Agricultura de los E.U.A. (1974), la conductividad eléctrica es muy alta, debido a que sobrepasa el límite de 2.25 mmhos/cm. Se considera que las aguas de riego que se han usado por mucho tiempo, tienen una conductividad eléctrica menor de 2.25 mmhos/cm, y las aguas cuya conductividad eléctrica sea menor de 0.75 mmhos/cm son satisfactorias para el riego con lo que respecta a sales, y las aguas con conductividad eléctrica entre 0.75 y 2.25 mmhos/cm son comúnmente utilizadas, obteniéndose con ellas crecimientos

Tabla 6. Variación y niveles promedio en las características químicas en aguas residuales en los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hidalgo. (D.D.R. 063). Septiembre de 1967.

contenido	Variación		Promedio
pH	7.30	8.50	7.70
C.E. en mmhos/cm	0.64	6.25	2.50
Ca ⁺⁺ en meq/l	2.10	9.90	3.93
Mg ⁺⁺ en meq/l	2.00	8.40	3.30
Na ⁺ en meq/l	2.13	12.40	7.22
K ⁺ en meq/l	0.05	0.60	0.43
CO ₃ ⁼⁼ en meq/l	T	T	T
HCO ₃ ⁻ en meq/l	2.83	10.70	7.20
SO ₄ ⁼⁼ en meq/l	1.70	11.40	4.56
Cl ⁻ en meq/l	1.64	11.75	4.05
Metales pesados.			
Pb en ppm	1.90	3.10	2.70
Cd en ppm	T	0.045	0.023
Cr en ppm	0.83	2.60	1.85

T - trazas

adecuados de las plantas, siempre y cuando haya un buen manejo de la tierra y un drenaje eficiente; sin embargo, las condiciones de salinidad se presentarán si el lavado y el drenaje no son adecuados.

Con el empleo de aguas con conductividad eléctrica mayor de 2,25 mmhos/cm rara vez se obtienen buenos resultados, y únicamente los cultivos más tolerantes a las sales, se pueden desarrollar bien cuando se riegan con este tipo de agua y siempre que se aplique agua en abundancia y el drenaje del suelo sea adecuado. Los niveles de tolerancia son importantes porque el rendimiento de diversos cultivos disminuye al aumentar la conductividad eléctrica.

6.1.3 Sodio (Na^+).

El nivel del sodio varió de 2.13 a 12.44 meq/l con un promedio de 7.22 meq/l. La presencia de altas concentraciones de sodio en las aguas de riego, afecta a los cultivos de muchas formas, como el efecto indirecto de las sales sobre los cultivos, que se debe a que el sodio sustituye al Ca^{++} y Mg^{++} del complejo de intercambio; ocasionando una deterioración en la estructura del suelo, haciéndolo más impermeable al agua y al aire, lo cual afecta o impide el desarrollo normal del cultivo. Además se ha encontrado que el sodio ocasiona la quema de las hojas en varios cultivo, U.S.E.P.A (1972).

6.1.4 Potasio (K^+).

Las cantidades de potasio variaron de 0.05 a 0.60 meq/l con un promedio de 0.43 meq/l. Este ión es un elemento esencial para las planta superiores, por consiguiente no ejerce efectos nocivos a suelos y plantas.

6.1.5 Calcio (Ca^{++}).

La variación en los índices de calcio, fue de 2.1 a 9.9 meq/l con un promedio de 3.93 meq/l. Este elemento es esencial para el crecimiento normal de la planta y para mantener en condiciones aceptables al suelo.

6.1.6 Magnesio (Mg^{++}).

La variación en la concentración de magnesio en las aguas de riego de la zona de estudio, es de 2.0 a 8.40 meq/l con un promedio de 3.3 meq/l. Este elemento, también es esencial para el crecimiento normal de las plantas; además, estos iones, junto con los de calcio en el agua de riego, tienden a mantener al suelo en buenas condiciones.

6.1.7 Carbonatos (CO_3^{--}).

Solo se encontraron trazas de carbonatos.

6.1.8 Bicarbonatos (HCO_3^-).

El nivel de bicarbonatos osciló de 2.83 a 10.70 meq/l, con un promedio de 7.2 meq/l. El ión bicarbonato pueda ser

tóxico para ciertos cultivos sensibles, tales como el frijol. El peligro de este ión, estriba en la tendencia a precipitar los iones Ca y Mg de la solución del suelo, con la consiguiente consecuencia de deterioración estructural del suelo y alteraciones nutricionales.

6.1.9 Cloruros (Cl^-).

La concentración de cloruros, varió de 1.64 a 11.75 meq/l con un promedio de 4.05 meq/l. Estos, en aguas de riego, no son en general tóxicos, por lo que son aceptables para la irrigación ya que la literatura señala que pueden ser usadas aguas con concentraciones de cloruros hasta 20 meq/l. Sin embargo, Palacios (1970) señala que rangos entre 1 a 5 meq/l de cloruros, estas aguas se clasifican como condicionadas para cítricos.

6.1.10 Sulfatos (SO_4^{2-}).

El contenido de sulfatos varió de 1.7 a 11.40 meq/l con un promedio de 4.56 meq/l; siendo estas concentraciones de sulfatos normales. Los iones cloruros y sulfatos forman sales neutras con el sodio produciendo únicamente una sustitución parcial de calcio por el sodio en el complejo de intercambio del suelo.

6.2 Índice de contaminantes solubles en aguas residuales.

En la tabla A-2, podemos observar las concentraciones

de los metales traza en aguas para riego de uso continuo, capaces de provocar contaminación en el suelo, como el plomo, cadmio y cromo.

6.2.1 Plomo (Pb).

Las concentraciones de este metal varían de 1.9 a 3.1 ppm con un promedio de 2.7 ppm (Tabla 6). Estos valores son inferiores a los límites permisibles en México y E.U. en aguas de uso continuo (ver Tabla 7).

Sin embargo, hace más de 10 años, otros autores, en la misma zona de estudio, han registrado valores inferiores a éstos (ver Tabla 7). Es notorio el incremento de plomo en estas aguas residuales a través del tiempo; además, es importante señalar que si este aumento continúa, la concentración de este elemento pronto llegará a los límites permisibles.

6.2.2 Cadmio (Cd).

En la Tabla 6, podemos observar los niveles de cadmio en agua residual de la zona de estudio; oscilando desde trazas a 0.045 ppm con un promedio de 0.023 ppm. Estas concentraciones son mayores a los niveles permisibles en México y E.U. para aguas de uso continuo (Tabla 7). en esta misma tabla observamos que otros autores en fechas diferentes, en El Valle del Mezquital, manifiestan también niveles por arriba de los límites permisibles.

De acuerdo con la bibliografía citada, a través del tiempo, el cadmio se acumula principalmente en la superficie del suelo, dependiendo de las condiciones o naturaleza del mismo generando un problema además de inutilizar los suelos para fines agrícolas.

6.2.3 Cromo (Cr).

El contenido de cromo en el agua, varía de 0.83 a 2.6 con un promedio de 1.85 ppm, y rebasa también los límites permisibles de E.U. para aguas de uso continuo. Al igual que los otros metales, a través del tiempo estos niveles van en aumento en las aguas de riego del Distrito de Desarrollo Rural 063; aunque descubrimientos recientes, manifiestan que el cromo participa en el metabolismo de la glucosa y colesterol, y por consiguiente es esencial tanto al hombre como a los animales; pero no señalan que sea esencial a plantas; además, la forma en que es incorporada por éstas últimas es poco común (Cr^{6+} es muy inestable); no por ello, deja de ser importante su acumulación en el suelo, ya que hay evidencias de que es tóxico a plantas a altas concentraciones.

6.3 Características Físicas y Químicas de Suelos.

el suelo está constituido por un complejo orgánico mineral, que tiene la habilidad de reaccionar en forma física y química, con los constituyentes presentes en el agua de irrigación. El grado en el cual estos constituyentes

Tabla 7. Niveles de Cadmio, cromo y plomo (expresados en ppm) en aguas utilizadas para riego en el Valle del Mezquital, Tula, Hgo. Determinados por diferentes autores.

Autor y año		Cd	Cr	Pb
Mascareño Castro	(1974) 1	0.005	0.040	Trazas
	2	0.008	0.020	Trazas
Acosta Lara	(1980) 1	0.030	0.145	0.16
	2	0.101	0.027	0.05
	3	0.040	0.139	0.13
Méndez García	(1980)	-	0.005	0.04
Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación.	1	0.029	0.145	0.16
	2	0.010	0.027	0.05
D.G.U.A.P.C	(1974) 3	0.040	0.139	0.13
	(1976) 1	0.030	0.150	0.16
	2	0.100	0.030	0.05
	3	0.040	0.140	0.13
García Zúñiga	(1987)	0.023	1.850	2.70
Valores Máx. Permisibles en Méx.		0.005	-	5.00
E.U.	{ Aguas de Uso continuo	0.005	0.005-5.0	5.00
	{ Aguas de Uso Limitado	0.050	20.000	20.00

1. Agua Negra 2. Agua Blanca 3. Agua Mezclada

adicionados serán lixiviados del suelo o modificados para favorecer o inhibir su asimilación en los vegetales, depende mucho de las características del suelo. Por lo general, se considera el nivel de salinidad de la solución del suelo para evaluar el problema de crecimiento de los vegetales.

Las características físicas y químicas de los suelos analizados se muestran en la Tabla A-3.

La Tabla 8, indica la variación de niveles promedios en las características físicas y químicas del extracto de saturación de los suelos, regados con aguas residuales en los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hidalgo (D.D.R. 063).

6.3.1 Materia orgánica (M.O.).

El contenido de materia orgánica varía de 1.2 a 3.9 % con un promedio de 2.93%, por encontrarse contenida en el nivel de materia orgánica de 2.0 a 3.0 % se consideran estos suelos como medianamente ricos, de acuerdo con la escala para juzgar el contenido de materia orgánica (SARH, 1982).

La materia orgánica, es una fuente de elementos nutritivos (N,P,S) para las plantas, además contrarresta los efectos nocivos de sodio intercambiable en los suelos, mejora e impide la deterioración de las condiciones físicas del suelo por su interacción con los materiales de intercambio catiónico debido a su utilización como material energético para los microorganismos, los cuales inducen la agregación estable de

las partículas del suelo y disminuyen indirectamente la densidad aparente de los mismos.

6.3.2 Fósforo (P).

El fósforo asimilable determinado por el método de Olsen y Col. fluctúa de 1.6 a 14.9 ppm con un promedio de 7.84 ppm, valor catalo como medio según Thomas y Peaslee (1973). Se hace indispensable para el crecimiento, maduración y formación de semillas.

6.3.3 Reacción del suelo (pH).

Los valores de pH en estos suelos fue de 7.5 a 8.5 con un nivel promedio de 8.0, encontrándose en niveles donde estarían disponibles los metales pesados o niveles alcalinos donde sería benéfico su aparentemente inactividad o precipitación.

6.3.4 Conductividad eléctrica (C.E.).

La conductividad eléctrica en estos suelos varía de 0.3 a 0.92 mhos/cm, con un promedio de 0.46 mhos/cm, lo que indica que son suelos normales (conductividad eléctrica menor de 4 mhos/cm, y 0-15% Na intercambiable), si es que no tiene un exceso de sodio intercambiable, según el Departamento de Agricultura de los E.U.A. (1974).

6.3.5 Sales Solubles (cationes y aniones).

6.3.5.1 Calcio (Ca^{++}).

La variación de calcio fue de 1.5 a 3.8 meq/l con promedio de 2.5 meq/l, se consideran normales (Richards, 1954).

6.3.5.2 Magnesio (Mg^{++}).

El nivel de magnesio en los suelos, varió de 0.5 a 3.7 meq/l con un promedio de 1.8 meq/l, clasificando estos suelos como normales de acuerdo con Richards (1954). El magnesio, es un constituyente de la clorofila y desempeña un importante en la asimilación del fósforo.

6.3.5.3 Sodio (Na^+).

La concentración de sodio, osciló entre 0.4 y 1.75 meq/l con un promedio de 0.92 meq/l. Se considera que este contenido de sodio es normal. El sodio, es un catión que desde el punto de vista nutricional se considera no esencial, aunque es un elemento importante en el metabolismo de las plantas C4 y CAM, además es importante para la clasificación de suelos.

6.3.5.4 Potasio (K^+).

65

El nivel de potasio varió de 0.13 a 0.90 meq/l con un promedio de 0.47 meq/l. El potasio se considera de poca importancia en la clasificación de los suelos, según Palacios (1970), con respecto a sales solubles.

6.3.5.5 Carbonatos (CO_3^{2-}).

La variación de carbonatos en la pasta de saturación del suelo fluctúa desde trazas hasta 1.87 meq/l con un promedio de 0.18 meq/l.

6.3.5.6 Bicarbonatos (HCO_3^-).

El nivel de bicarbonatos en el suelo varió de 2 a 7 meq/l con un promedio de 4.2 meq/l, estos valores se consideran normales, según Richards (1954).

6.3.5.7 Sulfatos (SO_4^{2-}).

La variación de sulfatos fluctúa desde 0.7 hasta 4.6 meq/l con un promedio de 1.7 meq/l, considerándose normales en sulfatos, según Palacios (1970).

6.3.5.8 Cloruros (Cl^-).

La concentración de cloruros oscilaron de 1.1 a 7.2 meq/l con un promedio de 3.5 meq/l.

6.4 Niveles de plomo, cadmio y cromo extractables en suelos.

Tabla 8. Variación y niveles promedio en las características físicas y químicas del extracto de saturación de los suelos regados con aguas residuales en los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia Hgo. Septiembre de 1987.

Contenido	Variación		Promedio
M.O. en %	1.20	3.90	2.93
P en ppm	1.60	14.90	7.84
pH	7.50	8.60	8.03
C.E. en mmhos/cm	0.30	0.92	0.46
Ca ⁺⁺ en meq/l	1.50	3.80	2.50
Mg ⁺⁺ en meq/l	0.50	3.70	1.80
Na ⁺ en meq/l	0.40	1.75	0.92
K ⁺ en meq/l	0.13	0.90	0.47
CO ₃ ⁼ en meq/l	T	1.87	0.18
HCO ₃ ⁼ en meq/l	2.00	7.00	4.20
SO ₄ ⁼ en meq/l	0.7	4.60	1.70
Cl en meq/l	1.10	7.20	3.50
Textura	Mig-Arc	Arcilloso	Arcilloso
Metales Pesados			
Pb en ppm	T	0.76	0.36
Cd en ppm	T	0.50	0.17
Cr en ppm	T	0.17	0.05

T - trazas

En la Tabla A-4, se indican las concentraciones de contaminantes de plomo, cadmio y cromo (expresados en ppm) en suelos regados con agua residuales en Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo. (D.D.R 063). La tabla 8, indica la variación y contenido promedio de tales contaminantes.

6.4.1 Plomo (Pb).

El contenido de plomo en los suelos osciló, entre trazas y 0.76 ppm con un promedio de 0.36 ppm. Mascareño (1974) en el mismo Distrito de Riego encontró valores de 3.63 ppm. El promedio que obtuvo Acosta (1980) fue de 3.08 ppm y Méndez (1980), determinó 204.41 ppm de plomo total (Tabla 9). Es probable que esta divergencia se deba a:

- 1) Metodología diferente. Los autores aquí citados, no hacen referencia del método utilizado, solo mencionan que efectuaron las lecturas de los metales plomo, cadmio y cromo en el espectrofotómetro de absorción atómica.
- 2) Sitios de muestreo. Mascareño, en la identificación de los sitios de muestreo de suelos indica carretera kilómetro, propietario, localización y municipios; dandonos a entender que sus muestras fueron tomadas cerca de carreteras. Esto es importante porque existen evidencias de que deposiciones de plomo procedentes de las emanaciones de los vehículos son mayores entre más cerca se este del borde de las

carreteras, así mismo si son o no caracterizadas por un tráfico denso de vehículos, según Sanchidrian y Mariño (1978). Los otros autores no indican claramente sus sitios de muestreo.

- 3) Formación de quelatos de plomo. Lagerwerff (1971), indica que los quelatos de la materia orgánica de plomo son de baja solubilidad y por tanto, cuando se hace la determinación de plomo soluble, éste no se considera. También debido a la naturaleza divalente y a la fuerte adsorción de plomo, las capas superficiales de los suelos contienen más plomo que los horizontes más profundos.

Swains y Mitchell (1960) encontraron contenidos de 20 a 30 ppm de plomo en los horizontes más bajos comparados con 550 ppm de plomo total en horizonte A. Por otra parte, las determinaciones que efectuó Méndez fue de plomo total, mientras que en este trabajo solamente se determinó el soluble.

6.4.2 Cadmio (Cd).

La concentración de cadmio en los suelos varió desde trazas a 0.50 ppm. con un promedio de 0.165 ppm. En años anteriores, Mascareño (1974) encontro una concentración media de 0.02 ppm, mientras que Acosta (1980) encontro 3.35 ppm. Comparando los datos con Mascareño se observa un incremento en las concentraciones; sin embargo, Acosta muestra valores más

Tabla 9. Concentración de plomo, cadmio y cromo (ppm) en suelos regados con aguas negras en el Valle del Mezquital, Hgo. Determinados por diferentes autores.

Autor	Año	Plomo	Cadmio	Cromo	
Méndez García	1980	204.40	-	-	
Mascareño Castro	1974	3.63	0.02	T	
Acosta Lara	1	1980	3.08	3.354	0.602
	2		1.95	0.267	0.028
	3		1.90	0.408	0.493
García Zúñiga	1987	0.36	0.165	0.045	

T - Trazas

altos. Hay varios factores que intervienen en el grado de acumulación y disponibilidad del cadmio en el suelo; uno de ellos, es el contenido de sodio, materia orgánica y sulfatos en el agua y suelos. Matt (1971) citado por Mascareño (1974), señala que la baja acumulación de cadmio en el suelo posiblemente se deba a una inhibición por el pH alcalino. También podrían ser considerados los mismos factores que para plomo.

También las concentraciones de cadmio en el suelo están por arriba de los límites permisibles, ya que se requiere para un suelo arenoso un límite de 0.01 ppm y para un suelo arcilloso 0.05 ppm.

6.4.3 Cromo (Cr).

Este elemento varió desde trazas a 0.017 ppm con un promedio de 0.05 ppm, de acuerdo a la Tabla 9. Observamos que Mascareño (1974) no encontró cromo asimilable en su estudio, mientras que Acosta (1980) registra un promedio de 0.602 ppm. La toxicidad del cromo es muy relativa, ya que parece ser se limita al estado hexavalente, el cual no se encuentra normalmente en la naturaleza. En el suelo para que perdure el Cr^{6+} tendrían que darse condiciones de alcalinidad y de perfecta aireación que son verdaderamente difíciles de producirse, Sanchidrian y Mariño (1978).

6.5 Niveles de plomo, cadmio y cromo en tejidos vegetales.

La concentración de estos contaminantes en tejidos vegetales regados con aguas residuales en los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo. (D.D.R. 063); se muestran en las tablas A-6 y A-7, observandose lo siguiente:

- 1) El comportamiento de la planta aparentemente enferma es inverso al de la planta sana en relación con la dinámica de Pb, Cd y Cr; por ejemplo, en el cultivo normal de alfalfa, el tallo es el órgano donde se registra un mayor nivel de plomo y cadmio, mientras que en el cultivo enfermo, los niveles de estos contaminantes son mayores en la hoja; lo mismo sucede en los cultivos de chile y frijol, excepto que en éste caso los mayores niveles de

contaminantes son encontrados en las hojas de los cultivos sanos.

- 2) De los elementos determinados, el plomo por planta aparece en mayor concentración en todos los cultivos tanto en sanos como en los enfermos; así también de los niveles promedio de los tres elementos, el plomo muestra el mismo comportamiento (Tabla 10).

No obstante que los niveles promedio de plomo son alcanzados con mayor facilidad en las plantas de chile (\bar{x} = 27.9 ppm), que en las de maíz (\bar{x} = 26.7 ppm) y alfalfa (\bar{x} = 26.2 ppm).

En cuanto al menor contenido de plomo en alfalfa, pueda deberse a que se efectúan cortes cada mes disminuyendo con ello el plomo que normalmente puede acumularse.

- 3) La mayor concentración de cadmio por planta la observamos en tallo de alfalfa (15.9 ppm), pero los niveles promedio de este elemento se acumulan más en alfalfa y chile (\bar{x} = 12.3 ppm) que en maíz (\bar{x} = 11.4 ppm) (ver Tabla 11).
- 4) La tendencia general del cromo en la mayoría de los cultivos sanos analizados, existe una mayor acumulación en hoja, encontrándose los mayores niveles promedio en el cultivo de chile (11.1 ppm), que en alfalfa (\bar{x} = 10.7 ppm) y ésta mayor que en maíz (\bar{x} = 8.4 ppm).

6.5.1 Plomo (Pb).

La concentración de plomo en tejidos vegetales fluctuó de 12.7 a 43.9 ppm con un promedio de 26.4 ppm.

De acuerdo a lo indicado en la tabla 12, Mascareño (1974) reporta niveles sumamente altos de plomo con un promedio de 525 ppm en alfalfa, él considera que están dentro de los reportados por Bryce-Smith en pastos de Birmingham crecidos en suelos muy cercanos a las carreteras con tráfico muy denso.

Acosta (1980) reporta un promedio de 19 ppm en alfalfa, y Méndez (1980) para el mismo cultivo 11.2 ppm, en maíz 8.0 ppm y en calabaza 15.2 ppm. Comparando estos datos con los determinados en éste estudio en alfalfa con 26.2 ppm, en maíz 26.7 ppm, en calabaza 34.3 ppm y en chile 27.9 ppm, podemos observar que han aumentado las concentraciones en un 100 % aproximadamente; sin embargo, no son tan elevados como los reportados por Mascareño.

6.5.2 Cadmio (Cd).

Los niveles de Cadmio en tejidos vegetales oscilaron de 9.5 a 15 ppm con un promedio de 11.88 ppm.

Comparando estos resultados con los reportados por Mascareño (1974), en alfalfa reporta una concentración media de 0.04 ppm., Acosta (1980) también en alfalfa reporta 1.53 ppm. Estos resultados son inferiores a los reportados en alfalfa (11.91 ppm) en éste estudio.

Se conoce que al igual que con otros metales pesados un

Tabla 10. Variación y niveles promedio de contaminantes en tejidos vegetales regados con aguas residuales en los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo.

Contenido (ppm)	Variación	Promedio
Pb	12.7 - 43.9	28.40
Cd	9.5 - 15.1	11.88
Cr	2.0 - 23.1	10.06

Tabla 11. Niveles promedio por cultivo de contaminantes en tejidos vegetales regados con aguas residuales en los Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo.

Cultivo	No. de muestras	Ploomo ppm	Cadmio ppm	Cromo ppm
Alfalfa	9	26.2	12.3	10.7
Calabaza *	2	34.1	10.9	12.7
Chile	7	27.8	12.3	11.1
Frijol *	1	36.2	11.8	15.7
Maiz	9	26.7	11.4	8.4

* No se consideró en la discusión por que el número de muestras es muy reducido.

incremento en el pH del suelo por alcalinización suprime en cierta forma la captación de cadmio (Lagerwerff 1971), además que este elemento es fácilmente absorbido a través de las raíces de plantas de importancia alimenticia, usualmente en los principales granos: trigo, maíz, arroz, avena. Schroeder y Balassa (1961) han encontrado que se mueve rápidamente y en forma fácil de las raíces hacia las hojas del rábano.

6.5.3 Cromo (Cr).

El contenido de cromo varió de 2.0 a 23.1 ppm con un promedio de 10.06 ppm.

En la Tabla 12 observamos que Mascareño (1974) reporta en alfalfa un promedio de Cromo de 0.18 ppm, mientras Acosta reporta 2.4 ppm para el mismo cultivo, y Méndez (1980) indica 9.2 ppm, en maíz 4.0 ppm y calabaza 14.7 ppm. En este estudio, los resultados obtenidos son: para alfalfa 10.7 ppm, para maíz 8.4 ppm y en chile 11.1 ppm. Se puede observar que el resultado reportado por Mascareño es muy bajo en comparación con los otros autores para el mismo cultivo.

El contenido de cromo en plantas ha recibido mucha atención desde el relativamente reciente descubrimiento, que el cromo participa en el metabolismo de la glucosa y colesterol, por consiguiente es esencial al hombre y animales. En cuanto a que si es ó no esencial a las plantas es escasa la literatura; sin embargo, Anderson (1974) reporta

Tabla 12. Concentración de Metales Pesados (expresados en ppm) en tejidos vegetales regados con aguas negras en el Valle del Mezquital, Tula, Hgo. Determinados por diferentes autores.

Autor y Año	Cultivo	Cd	Cr	Pb
Mascareño Castro (1974)	Alfalfa	0.04	0.18	525.00
Acosta Lara (1980)	Alfalfa 1	1.53	2.40	19.00
	2	2.10	2.88	21.00
	3	2.04	3.76	26.00
	Jitomata 2	-	1.38	0.17
	3	-	1.83	-
Méndez García (1980)	Alfalfa	-	9.20	11.21
	Maiz	-	4.00	8.00
	Trigo	-	6.00	10.00
	Cebada	-	15.30	12.66
	Calabaza	-	14.70	15.20
García Zúñiga (1987)	Alfalfa Tallo	11.91	8.52	31.30
	Hoja	12.23	13.75	25.96
	Maiz Hoja	11.40	7.77	27.80
	Calabaza H y T	10.90	12.75	34.25
	Frijol Tallo	11.80	15.70	25.50
	Hoja	11.80	15.70	47.00
	Chile Tallo	12.76	12.40	27.00
	Hoja	11.93	9.70	27.00
			11.50	16.75

1 Aguas Negras

2 Aguas Blancas

3 Agua Mezclada

toxicidad en avena teniendo un contenido de cromo de 49 ppm (materia seca). Turner y Rust citados por Aubert (1980), observaron síntomas iniciales de toxicidad de cromo al agregar 0.5 ppm del elemento en la solución nutritiva y 60 ppm a un suelo cultivado.

Bassam citado por Aubert (1980), subraya que el comportamiento del Cr es gobernado por pH del suelo y el potencial redox. Bajo el mismo potencial redox de 500 mv, predomina el Cr^{3+} a pH 5, $Cr(OH)_3$ se forma entre pH de 5 a 7 y el CrO_4^{2-} ocurrió a pH mayor de 7. El ión cromato CrO_4^{2-} es relativamente móvil y fácilmente adsorbido por arcillas y óxidos hidratados.

Aunque la toxicidad de Cr dependa del estado de oxidación, pero es también relacionado con formas aprovechables de cromato. Es importante señalar que Sanchidrian (1978), indica que la toxicidad del Cr es muy relativa ya que parece ser, se limita al estado hexavalente (Cr^{6+}), el cual es muy inestable bajo condiciones normales de suelo.

6.6 Grado de asociación de las propiedades químicas del agua y plomo, cadmio y cromo.

Para conocer si existe alguna asociación entre los contaminantes y las propiedades químicas del agua, se analizaron estadísticamente todos los valores obtenidos de las muestras de agua con Pb, Cd y Cr en agua, suelo y tejido vegetal. En la Tabla A-9 se indica la relación, mencionándose

el coeficiente de determinación (R^2), la significancia y descripción de la Ecuación Matemática del Modelo Lineal, se tiene que $y = a + bx$; donde y = valor de predicción, a = ordenada del punto donde la línea cruza el eje de las x , b = valor de la pendiente que indica el aumento o disminución de la variable "y" con respecto a las variaciones de la variable x . En la Tabla 13 se describen las relaciones de mayor importancia, y se deduce lo siguientes:

El pH interfiere en un 46.7 % en la variación del Cd soluble en agua residual, es decir al aumentar el pH disminuye el Cd soluble ya que el coeficiente de determinación $R^2 = 0.4672$. Hay una estrecha relación entre K^+ y Cd con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.2825$, o sea que el 28.2 % de K^+ está relacionado con el aumento de Cd, los bicarbonatos y cloruros por tener un coeficiente de determinación positivo, también contribuyen en el aumento de la concentración de Cd en solución; siendo para los bicarbonatos $R^2 = 0.5566$ y cloruros $R^2 = 0.5376$. El sodio $R^2 = 0.3549$, los bicarbonatos $R^2 = 0.2602$ y cloruros $R^2 = 0.3157$ disminuyen el cromo soluble en agua. Se observa que el sodio contribuya en la disminución del plomo en tallo y los sulfatos disminuyen la concentración de plomo en agua.

Una posible explicación de dicho comportamiento pudiera ser considerado que estos elementos actúan como ácidos de Lewis (ver Pág. 14), tanto el K^+ , Ca^{++} , Na^+ e H^+ son ácidos.

Tabla 13. Relación entre las propiedades químicas del agua y contaminantes Pb, Cd, y Cr, mencionándose el coeficiente de determinación (R^2), nivel de significancia y descripción de la ecuación del modelo lineal.

Relación	R^2	Significancia	Ecuación Matemática
pH y Cd (A)	0.4672	**	$Y = 0.2055 - 0.0240 x$
Na y Cr (A)	0.3549	*	$Y = 2.5436 - 0.0193 x$
Na y Pb (A)	0.1784	o	$Y = 40.8027 - 0.4268 x$
K y Cd (A)	0.2825	*	$Y = 0.0002 + 0.0013 x$
CO ₂ y Cr (A)	0.6107	**	$Y = 3.0201 - 0.3299 x$
HCO ₃ y Cd (A)	0.5566	**	$Y = -0.0067 + 0.0030 x$
HCO ₃ y Cr (A)	0.2602	*	$Y = 2.4753 - 0.0496 x$
Cl y Cd (A)	0.5376	**	$Y = -0.0145 + 0.0025 x$
Cl y Cr (A)	0.3157	*	$Y = 2.6782 - 0.0472 x$
SO ₄ y Pb (A)	0.4617	**	$Y = 3.0317 - 0.0461 x$
SO ₄ y Cr (A)	0.2874	*	$Y = 1.7627 + 0.0464 x$

** significancia al 1 % A - agua T - tallo

* significancia al 5 %

o significancia al 10 %

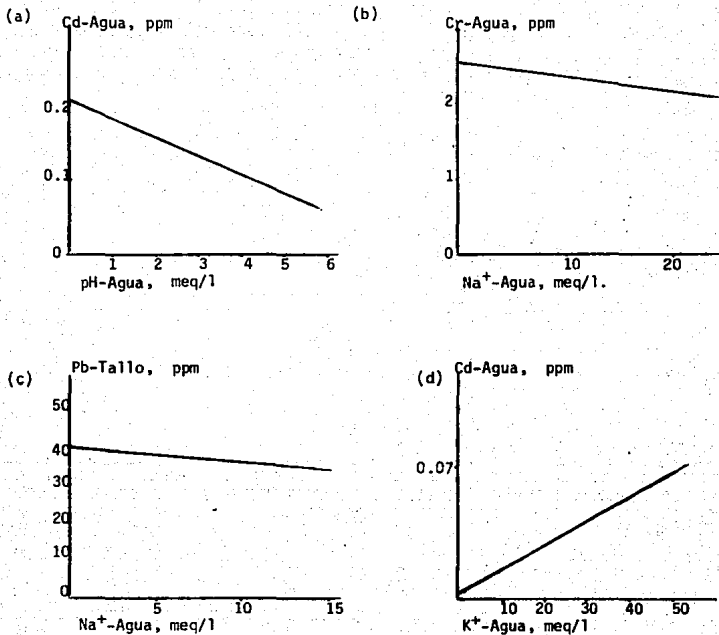


FIGURA 2-5.

Efecto del pH (a), sodio soluble (b), sodio soluble (c) y K⁺ soluble (d) sobre la concentración del Cd, Cr soluble y Pb vegetal.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

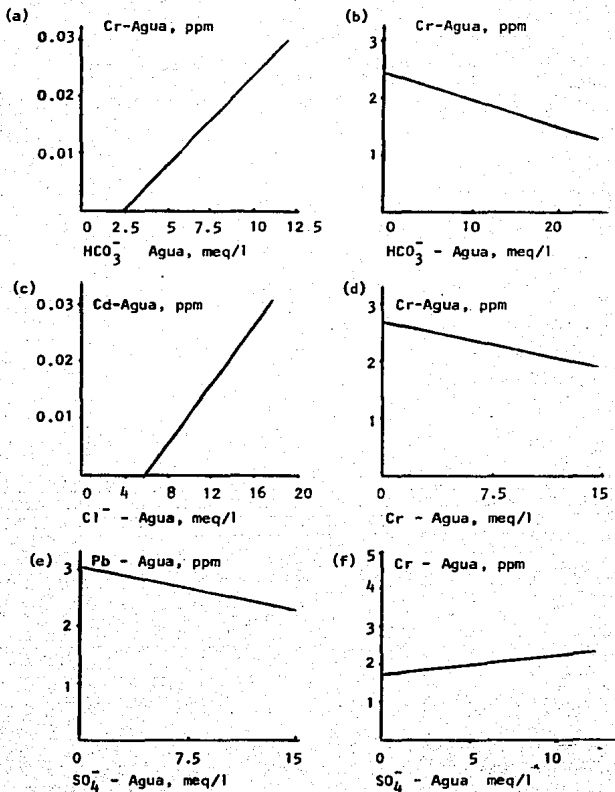


Figura 6-11. Efecto de los iones solubles, bicarbonatos (a,b), cloruros (c,d) y sulfatos (e,f) sobre la concentración del Cd, Cr y Pb solubles.

fuerzas y por tanto tienen más posibilidad de interacción con el agua en la solución; mientras que el cadmio y cromo son ácidos débiles por lo que su posibilidad de interacción es menor. En cuanto al Pb, se considera en la línea limitrofe. Pudiera representarse este comportamiento de la siguiente manera: si pensamos que las moléculas de agua en la solución, debido a su polaridad, puede asemejarse a una barra viscosa sobre la cuál pueden adherirse los ácidos de Lewis; entonces, mientras más fuertes son éstos tendrán mayor posibilidad de interacción dejando sin posibilidad a los más débiles y por tanto éstos últimos permanecerán libres en la solución; es decir, solubles.

6.7 Grado de asociación de las propiedades físicas y químicas del suelo y Pb, Cd y Cr.

Se relacionó estadísticamente el grado de asociación existentes entre las propiedades físicas y químicas del suelo con los contaminantes presentes en el suelo, agua y tejido vegetal; en la Tabla 13, se indican las relaciones de mayor importancia y en la Tabla A-9 se indican todas las relaciones encontradas.

Los bicarbonatos se encuentran estrechamente relacionados con el Pb soluble en el suelo, con un $R^2 = 0.3981$. La ecuación muestra que al aumentar los bicarbonatos en el suelo el plomo aumenta, así mismo se relacionan positivamente con el Cr y Pb contenidos en tejido vegetal (tallo y hoja), mien

tras que con la textura de los suelos disminuye la asimilación del Pb por la planta.

En la tabla 15, se observa el comportamiento general por cada metal.

- 1) Si aumenta Ca^{++} en agua, éste aumenta en suelo; favoreciendo la disponibilidad de plomo a las plantas, sucediendo lo mismo con los bicarbonatos (HCO_3^-).
- 2) El potasio disponible en suelo y el magnesio en el agua, favorece la incorporación de plomo por las plantas.
- 3) El cloro en el agua favorece la disponibilidad del plomo en el suelo mientras que las arcillas (textura arcillosa) y el sodio disponible la inhiben.

Tabla 14. Relación entre las propiedades físicas y químicas del suelo y contaminantes, mencionándose el coeficiente de determinación (R^2), significancia y descripción de la ecuación del modelo lineal.

Relación	R^2	Significancia	Ecuación Matemática
HCO y Pb (S)	0.3981	**	$Y = -0.579 + 0.140 x$
HCO y Cr (H)	0.2716	*	$Y = 4.7538 + 1.885 x$
HCO y Pb (T)	0.2301	*	$Y = 15.4731 + 4.500 x$
Tex. y Pb (H)	0.2053	o	$Y = 54.9735 - 0.495 x$

o significancia al 10 %

A - agua

* significancia al 5 %

T - traza

** significancia al 1 %

S - suelo

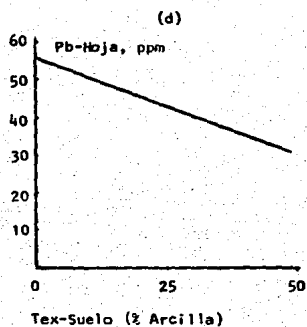
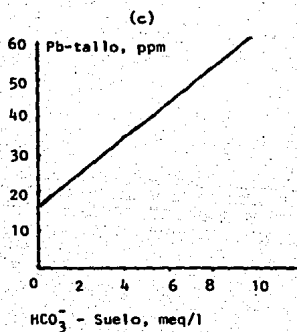
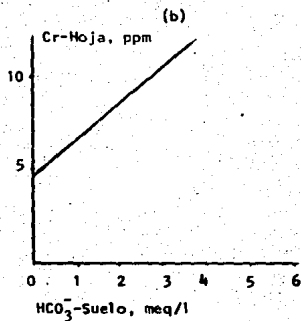
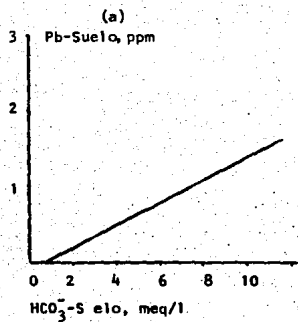


Figura 12. Efecto de bicarbonatos solubles (a, b, c) y textura (d) sobre la concentración del Pb soluble, y Cr y Pb vegetal.

- 4) La concentración de Cd en tejidos vegetales se ve disminuido por el aumento de materia orgánica y sulfatos en el suelo; el Na^+ en el suelo también disminuye el cadmio asimilable; mientras que los sulfatos aumentan dicho elemento en el suelo. Esto podría explicarse por la diferencia en cargas y por los diferentes potenciales electroquímicos de cada elemento (tabla 16).
- 5) La concentración de Cr en tejido vegetal (tallo) se ve favorecida al aumentar el potasio y bicarbonatos en el suelo (tabla 16).
- 6) Una posible explicación fisiológica de la entrada de estos metales (Pb, Cd y Cr) a la planta, es de acuerdo al mecanismo de absorción general de iones (fig. 16), además por no ser nutrientes esenciales de la planta; es decir no tienen una función determinada estando sujetos a una translocación por vía floema a todas partes de la planta. Por otra parte, es razonable suponer que los mecanismos naturales de incorporación de nutrientes están estrechamente relacionados con los procesos físico-químicos de la dinámica de nutrientes en el suelo por lo que se espera que la incorporación de plomo cadmio y cromo sea una respuesta de la planta para no permitir que se altere dicha dependencia de la solución del suelo-raíz y/o consiguientemente alterarse la incorporación de iones y otros procesos fisiológicos vitales en el crecimiento y desarrollo. Así mismo, una vez que los metales pesados han sido

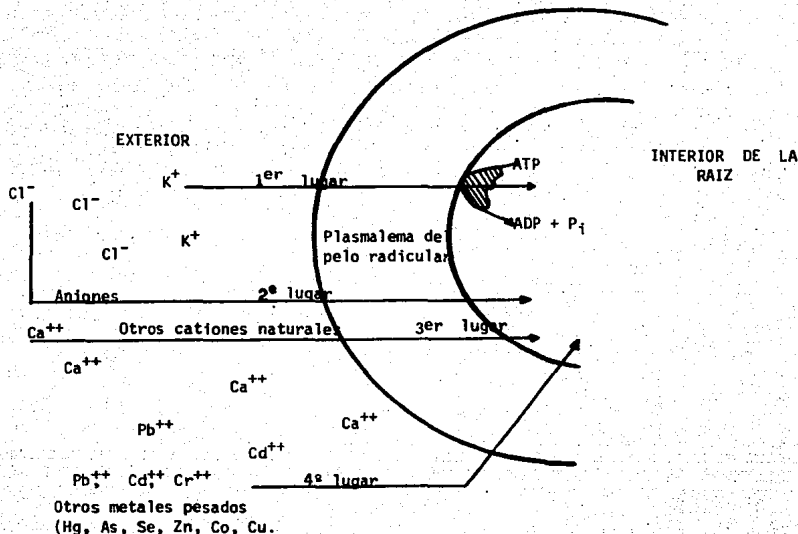


FIGURA 16.

Resumen de la incorporación de nutrientes a la raíz.

Los mecanismos de transporte que facilitan la incorporación de nutrientes a las raíces están sincronizados de tal modo que la incorporación más rápida que resulta es la del ión K^+ por transporte activo. Luego por otros mecanismos, se desencadena la incorporación del resto de cationes (Grajales, 1987) puesto que el K^+ disponible en el suelo favorece la incorporación del plomo, sería lógico sugerir que el calcio también lo favorezca en base a los mecanismos naturales de la incorporación de nutrientes.

Tabla 15. Relación entre las Propiedades analizadas en agua^o y suelo con el Plomo como contaminante, en los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitala-- laquia Hgo. (D.D.R. 063).

Relación	R ²	Significancia	Ecuación Matemática
Ca ⁺ y Pb (T)	0.1205	o	Y = 20.7075 + 1.9749 x
Ca y Pb (S)	0.1835	o	Y = -0.0681 + 0.1723 x
HCO ₃ ⁻ y Pb (S)	0.1194	o	Y = 0.1279 + 0.0248 x
HCO ₃ ⁻ y Pb (S)	0.3981	**	Y = -0.0579 + 0.1399 x
HCO ₃ ⁻ y Pb (T)	0.2301	*	Y = 15.4731 + 4.5004 x
K y Pb (H)	0.1230	o	Y = 20.1489 + 16.9343 x
Mg ⁺ y Pb (T)	0.1755	o	Y = 19.2809 + 2.9253 x
Cl ⁻ y Pb (S)	0.1408	o	Y = 0.0314 + 0.0232 x
Tex. y Pb (H)	0.2053	o	Y = 54.9735 - 0.4950 x
Tex. y Pb (T)	0.1401	o	Y = 52.4562 - 0.4326 x
Na ⁺ y Pb (T)	0.1784	o	Y = 40.8027 - 0.4268 x
SO ₄ ⁻ y Pb (A)	0.4617	**	Y = 3.0317 - 0.0461 x

** significancia al 1 %

* significancia al 5 %

o significancia al 10 %

A - agua

S - suelo

H - hoja

T - tallo

Tabla 16. Relación entre las propiedades analizadas en agua¹ y suelos con el cadmio y cromo como contaminantes, en los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquias Hgo. (D.D.R. 063).

Relación	R ²	Significancia	Ecuación Matemática
M.O. y Cd (H)	0.1173	e	Y = 13.5335 - 0.7424 x
SO ₄ y Cd (H)	0.1581	e	Y = 13.2524 - 0.3081 x
Na y Cd (S)	0.1136	e	Y = 0.3108 - 0.1394 x
SO ₄ y Cd (S)	0.1149	e	Y = 0.0694 - 0.0247 x
Ca y Cd (A)	0.1144	e	Y = 0.0026 + 0.0076 x
Na y Cd (A)	0.1647	e	Y = 0.0065 + 0.0005 x
K y Cd (A)	0.2825	*	Y = 0.0002 + 0.0013 x
HCO ₃ y Cd (A)	0.5566	**	Y = -0.0067 + 0.0030 x
Cl y Cd (A)	0.5376	**	Y = -0.0145 + 0.0025 x
Ca y Cd (A)	0.1991	e	Y = 0.0356 - 0.0034 x
pH y Cd (A)	0.4672	**	Y = 0.2055 - 0.0240 x
K y Cd (T)	0.1138	e	Y = 4.3075 + 14.3400 x
HCO ₃ y Cr (H)	0.2716	*	Y = 4.7538 + 1.8845 x
Mg y Cr (A)	0.1954	e	Y = 1.6802 + 0.0990 x
SO ₄ y Cr (A)	0.2874	e	Y = 1.7227 + 0.0464 x
HCO ₃ y Cr (S)	0.1344	e	Y = 0.0888 - 0.0145 x
Na y Cr (A)	0.3549	*	Y = 2.5436 - 0.0193 x
CO ₃ y Cr (A)	0.6107	**	Y = 3.0201 - 0.3299 x
HCO ₃ y Cr (A)	0.2602	*	Y = 2.4753 - 0.0496 x
Cl y Cr (A)	0.3157	*	Y = 2.6782 - 0.0472 x

** significancia al 1 %

* significancia al 5 %

e significancia al 10 %

A - agua

S - suelo

H - hoja

T - tallo

incorporados entonces cada especie de planta crea mecanismos para que no afecten su metabolismo, quizás por medio de translocarlos vía corriente transpiratoria a las hojas, sin ser asimilados puesto que no son elementos esenciales y de ahí por vía floema transportados a otra parte de la planta.

Debe señalarse que estas comparaciones se hicieron en el mismo órgano pero no en la misma especie, por lo que queda abierta la investigación a este nivel, sobre todo porque otros autores señalan que la incorporación y toxicidad depende de la especie, lo cual concuerda con la posible explicación citada anteriormente.

También es importante tomar en cuenta que para un entendimiento más claro del efecto de contaminantes sobre las plantas, se necesita observar los niveles de los mismos en cada uno de los órganos de cada especie, llegando hasta la madurez fisiológica, procedimiento que no se efectuó por completo en este trabajo por muchas limitantes.

6.8 Grado de asociación entre contaminantes en el suelo-planta y agua-planta.

Se relacionó estadísticamente el grado de asociación entre contaminantes del suelo-planta y agua-planta, con la finalidad de detectar algún efecto antagónico o de sinergismo entre ellos. En la tabla 14 se presentan las relaciones con

un nivel de significancia de 1 %, 5 % y 10 %. Se observan dos relaciones importantes:

- 1) La relación Pb - Cr con una $R^2 = 0.3234$ y
- 2) La relación Cr - Cd con una $R^2 = 0.1096$.

En la relación Pb - Cr al disminuir el plomo del suelo, lo cual indica que es incorporado a la raíz, aumenta la incorporación y translocación del cromo a la hoja, siendo esto quizá como de los mecanismos de respuesta de la planta a la presencia de dichos contaminantes en el suelo.

Por otra parte en la relación Cr - Cd al disminuir el cromo del suelo aumenta cadmio en la hoja, indicando posiblemente que los mecanismos que usa la planta para responder a estos agentes contaminantes incluyen tanto procesos en la incorporación y en la translocación vía xilemática. Es digno observar que primero se incorpora el plomo, luego el cromo y finalmente el cadmio; pero la incorporación del cromo es seguida inmediatamente por su translocación xilemática a la hoja, siguiendo el cadmio y al final el plomo, como si pareciera que la raíz de la planta enviara una señal en forma de cromo (debido a que de los tres elementos es el menos tóxico, y su toxicidad se limita a cromo hexavalente, que es muy inestable en el suelo).

En la relación Agua-Planta, podemos observar que al aumentar Pb en agua disminuye Cr en planta. Esto se explica por la competencia iónica que existe entre estos metales.

Tabla 17. Relación entre contaminantes en suelo-planta y agua-planta. Mencionandose el coeficiente de determinación, nivel de significancia y descripción de la ecuación matemática de modelo cuadrático. En los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atlatlaxquia, Hgo. (D.D.R. 063).

Relación	R ²	Signif.	Ecuación Matemática
Suelo-Planta			
Pb y Cr (H)	0.3234	*	$Y = 8.80 - 13.62 x + 33.83 x^2$
Cr y Cd (H)	0.1096	e	$Y = 12.06 + 10.76 x - 179.45 x^2$
Cr y Cr (T)	0.1372	e	$Y = 12.06 + 10.76 x - 179.45 x^2$
Agua-Planta			
Pb y Cr ()	0.1200	e	$Y = -35.93 + 39.12 x - 8.00 x^2$

* significancia al 5 %

e significancia al 10 %

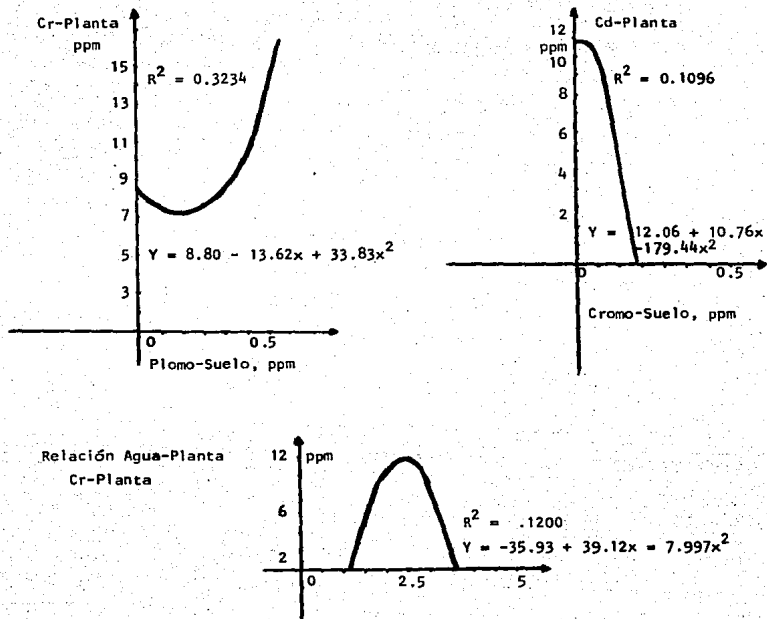


Figura 17. Relación entre los contaminantes de Suelo-Planta y Agua-Planta, Indicando el Coeficiente de Determinación (R^2), la Significancia y Ecuación Matemática. Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo.

7. CONCLUSIONES.

EL AGUA RESIDUAL UTILIZADA EN EL D.D.R. 063, NO TIENE LAS CARACTERISTICAS ESTABLECIDAS POR LAS INSTITUCIONES NACIONALES (S.S.A, SARH, GOBIERNO DEL ESTADO) E INTERNACIONALES (OMS) PARA SU REUSO EN LA AGRICULTURA, REFORZANDO EL HECHO DE QUE AL UTILIZARLA CONTAMINA EL SUELO, LOS TEJIDOS VEGETALES Y POSIBLEMENTE EL AGUA SUBTERRANEA, COMO LO NOTAMOS A CONTINUACION:

1.- Los metales estudiados se van acumulando paulatinamente en el suelo, principalmente en la superficie; no obstante que sean pequeñas concentraciones éstos, son muy significativos en la incorporación y translocación por las plantas, dependiendo de factores como la salinidad, el pH, la materia orgánica, los iones bicarbonatos, la textura, la concentración de estos y otros que no fueron considerados en este estudio pero son reportados por otros autores.

2.- Los niveles mayores que el valor permisible para Cd y Cr encontradas en estos suelos, permite catalogarlos como suelos contaminados; y si no se tiene buen cuidado de ellos, se convertirán en suelos estériles para fines agrícolas.

3.- Los tejidos vegetales también se encuentran contaminados; y esto conduce a un efecto inicial sobre su crecimiento y desarrollo.

a).- Disminuyen los rendimientos.

b).- Se hace difícil el establecimiento de cultivos como

el frijol.

c).- Las plantas presentan características que les confieren la apariencia de enfermas tales como:

- Coloraciones negras en tallos y frutos.
- Mueren antes que los de color normal.
- Clorosis en plantas, aún cuando puede ser debida a otros factores.
- Mayor susceptibilidad al ataque en las raíces por bacterias y hongos.

Por otra parte también, la contaminación de los tejidos vegetales producen un efecto directo sobre la cadena alimenticia, de tal manera que si se hicieran análisis de productos como la carne, la leche y derivados, encontraríamos niveles mayores que los permisibles para Cd, Cr y Pb (0.5 ppm) en tales productos; estudios que ya han sido efectuados en esta región en décadas pasadas, señalan que la leche de vacas alimentadas con forrajes provenientes de dicho distrito, contenían concentraciones superiores a los niveles recomendables de plomo (9 mg/l), cadmio (0.6-3 mg/l) y cromo (1.5-3 mg/l). Suponiendo que la población del área de estudio ingiera 300 ml de leche diariamente y con ello 2.7 mg/día de Pb, 0.9 mg/día de Cd y Cr; estos niveles son tóxicos para la salud del hombre a través del tiempo; como se ha citado, para producir intoxicaciones por vía digestiva se requiere una dosis de 1 a 2 mg/día de estos contaminantes durante varios meses (pág. 26).

El agua residual utilizada para la agricultura en esta zona no solo contiene los metales pesados aquí tratados, sino que también muchos otros como cobre, zinc, arsénico, mercurio, fierro, aluminio que actúan antagónicamente o sinérgicamente dañando el rendimiento y calidad de los productos; además, la cantidad tan grande de coliformes fecales (10^6 c.f./100 ml) que contiene el agua, la hace aún más indeseable, por ello es importante, que si aún podemos detener el avance de la contaminación, para no llegar a consecuencias mayores como en Fuchu, Japón o el caso del imperio Romano, se sugiere lo siguiente:

1).- Que el agua para reuso sea tratada, principalmente desde donde se está emitiendo el contaminante, o bien que se realice este tratamiento en el mismo Distrito de Riego en colaboración con los organismos o empresas que contaminan.

2).- Utilizar en forma integral las alternativas tecnológicas que se disponen para el tratamiento de aguas residuales, es decir combinar el tratamiento biológico con el químico y físico de tal manera que se minimicen los costos y que la eficiencia en cuanto a disminución de contaminantes sea la máxima, no solo se piensa en disminuir los metales aquí estudiados, sino también otros como: cobre, zinc, mercurio, fierro, aluminio, etc y que no fueron mencionados,

al igual que los contaminantes biológicos.

Para el tratamieneto biológico, se sugiere investigar el diseño de las lagunas por predio, es decir que cada agricultor sacrifique una parte de su terreno, para embalsar durante cierto tiempo el agua que será utilizada en cada riego dependiendo de la calidad de ésta, resultando más conveniente el sacrificio de una pequeña porción de terreno que si en 20 años más o menos, dichos terrenos tendran que ser sacrificados en su totalidad por ser suelos agrícolas altamente contaminados y estériles desde el punto de vista de la contaminación o bien provocando daños más directos a la población.

3) Se deben llevar a cabo inmediatamente investigaciones para determinar los efectos de envenenamiento crónico por bajos niveles de plomo, en las poblaciones afectadas, investigandose también sobre el paso del Pb, Cd y Cr a través de las cadenas alimenticias y de sus efectos crónicos sobre los ecosistemas; no solamente con estos metales, sino con otros que presentan el mismo grado de peligrosidad.

4).- Que problemas de este tipo se den a conocer en las aulas para identificarlos y de alguna forma plantear otras alternativas.

9. BIBLIOGRAFIA

- Acosta, Lara Eduardo, y Ortega Ledezma M.T. (1980). Calidad del Agua en la Cuenca del Valle de México; Proyecto, ZC 8010. Comisión del Plan Nacional Hidráulico, México.
- Ahlberg, J., C. Ramel and C. A. Wachtmeister (1972). Organolead compounds shown to be genetically active. *Ambio* 1:29-31.
- Andersson, A. and K.O. Nilsson (1974). Influence of lime and soil pH on cadmium availability to plants. *Ambio* 3:198-200.
- Aubert, H. (1980). Trace Elements in Soils and Plants. Amsterdam, Elsevier, 1977. 395 pp.
- Biddappa, C. C. and Mitsuo Chino (1981). EPMA studies on the mode of entry and Localization of Cadmium and Lead in Rice Root. *Soil Sci. Plant Nutr.* 27 (1): 93-103.
- Borja, Jiménez Ma. de los Angeles (1985). Determinación de Metales Pesados (Plomo, Mercurio, Arsénico, Cobre, Cadmio) en sangre y orina. Tesis (Químico Farmacobiólogo), Fac. de Química, UNAM, México. 153 pp.
- Bouyoucos, G.L. (1936). Directions of Making Mechanical Analysis of soil by Hydrometer Method. *Soil Sci.* 42: 25-30.
- Brian, E. Davies (1980). Trace Element Pollution: Applied Soil Trace Elements. Ed. John Wiley y Sons Ltd, Great Britain; p. 287-351.

- Broyer, T.C., C.M. Johnson and R.E. Pauli (1972). Some aspects of lead in plant nutrition. *Plant and Soil*, 2:301-13.
- Cajuste, L. (1977). *Química de Suelos*. Ed. E.N.A., C.P. Chapingo, México.
- Cajuste, L. (1988). *Contaminación en Agua y Suelos Agrícolas*. Memoria del Simposio del 21° Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo; Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. México.
- Cantú, García Magdalena (1983). *Evaluación de los Estudios realizados para la planeación del Reuso de las Aguas Residuales en la Agricultura (Parte 1)*. SARH, México.
- Castellanos, López O. y Colli Misset J. (1988). *Aguas Subterráneas de los Valles de Tula, Apaxco, Mixquiahuala y Actopan, Hgo.*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, SARH, México.
- Casterline, L. James and Barnett M. Neal (1982). Cadmium Binding Components in Soybean Plants. *Plant Physiol.*, 69:1004-7.
- Castillo, Villavicencio Gerardo (1987). *Clasificación de Aguas Residuales para Riego Agrícola; Desarrollo y Medio Ambiente, Memoria tomo 1*, Asociación Mexicana contra la Contaminación del Agua y del Aire A.C. México.
- Cavallaro, N. and McBride M.B. (1980). Activities of Cu^{++} and Cd^{++} in Soil Solutions as Affected by pH. *Soil Sci. Soc. A.M.J.* Vol 44, New York.

- CEPIS (1986). Seminario Regional de Investigación sobre Lagunas de Estabilización. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima-Perú; 224 pp.
- Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, SRH (1970). La Investigación del Efecto que Producen en los Cultivos y en el Ganado, el Empleo de Aguas Negras conteniendo Detergentes; México.
- Cruz, Díaz Jaime (1984). El uso de los parámetros Q/F y de los potenciales químicos (potasio, calcio y magnesio) como una medida de la disponibilidad nutricional en algunos suelos cañeros de México. Tesis de Maestro en Ciencias. Chapingo, México. p.95.
- Cubillas, Castro B.H. (1980). Impacto de las Aguas Negras Utilizadas sobre Suelos y Cultivos de Alfalfa en el D.R. 03 Tula, Hgo., Tesis (Biólogo), Fac. Ciencias UNAM México. 54 pp.
- Dowdy, R.H. and Volk V.V. (1986). Movement of Heavy Metals in Soils. Chemical Mobility and Reactivity in Soil Systems; USA. p. 229-40
- Environmental Protection Agency (1979). Environmental Pollution Control Alternatives: Municipal Wastewaters; Centro for Environmental Research Information, United States.
- FAO (1984). Recommended maximum concentration of trace elements in irrigation water, Booker Tropical Soil Manual; Edited

- by J.R. Landon, USA, New York. P.172.
- Fiussello, N. and M.T. Molinari (1973). Effects of lead on plant growth. *Allionia*, 19: 89-96.
- Flores, Ayala Lucio (1987). *Análisis de Metales Peligrosos a la Salud en las Aguas Residuales de CIVAC; Desarrollo y Medio Ambiente, Memoria, Tomo 1; Asociación Mexicana contra la Contaminación del Agua y del Aire, A.C. México.*
- Foy, C.D., R.L. Chaney and M.C. White (1978). The Physiology of metal toxicity in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 29: 511-66.
- Friberg, L., M. Piscator, G. Nordberg and T. Kjellstrom (1974). *Cadmium in the Environmental*, 2nd ed., CRC Press, Cleveland Ohio, 248 pp.
- Gloyha, E. Earnest (1979). *Estanques de Estabilización de Aguas Residuales; Organización Mundial de la Salud, Ginebra, Suiza.*
- Grajales, M. Ofelia y Martínez H. Elva (1987). *Fisiología Vegetal. FES-C, UNAM; México, p. 69-112.*
- Hampp, R.H. Ziegler and I. Ziegler (1973a). The effect of lead ions on the ^{14}C fixation and on the ATP, synthesis by spinach chloroplasts. *Biochem. Physiol. Pf Lanz.* 164:126-34.
- Hansen, R.K. and R.H. Hall (1977). An improved general method for the reduction of analytical errors in flame emission and atomic absorption spectrometry. *Anal. Chim. Acta,*

92:307-20.

- Hevesy, G. (1923). The absorption and translocation of lead by plants. A contribution to the application of the method of radioactive indicators in the investigation of the change of substance in plants. *Biochem. J.* 17:439-45.
- Hitoshi, Obata and Masanao Uneyayashi (1986). Characterization of Cadmium-Binding Complexes from the Roots of Cadmium-treated Rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.* 32(3): 461-67.
- Hutchinson, F.E. (1970). Environmental Pollution from high ways Deicing Compounds. *J. of Soil and Water Conservation* 25 (4): 517-22.
- Jackson, M.L. (1976). *Análisis Químicos de Suelos*. Ed. Omega, S.A., Barcelona, Madrid. 662 pp.
- Kannan, S. and H. Keppel (1976). Absorption and transport of Pb^{++} in young pea seedlings. *Z. Naturforsch.* 31:393-6.
- Karamanos, R.E., J.R. Bettany and J. W. Stewart (1976). The uptake of native and applied lead by alfalfa and bromegrass from soil. *Can. J. Soil Sci.*, 56:485-94.
- Kenneth, S. MacLean and Winston M. Langille (1980). Extractable Heavy Metals in Atlantic Coast Soils. *Commun. In Soil Sci. and Plant Anal.*, 11 (11): 1041-49.
- Koeppel, E. David (1981). *Lead: Understanding the Minimal toxicity of Lead in Plants. Effect of Heavy Metal Pollution on Plants*, Illinois, USA. p. 55-75.

- Koeppa, D. E. (1977). The uptake, distribution, and effect of cadmium and lead in plants. *Sci. Tot. Environ.* 7:197-206.
- Lagerwerff, J.V. (1971). Uptake of Cadmium, Lead and Zinc by Radish from Soil and Air. *Soil Sci.*, 11: 129-33.
- Lagerwerff, J.V. (1971). Plomo, Mercurio y Cadmio como Contaminantes Ambientales. p. 655-701.
- Lapades, D.N. (1974). Dictionary of Scientific and Technical Terms. McGraw-Hill, New York, 674 pp.
- Lee, K.C., B. A. Cunningham, K.H. Chung, G.M. Panisen and G.H. Liang (1976). Lead effects on several enzymes and nitrogenous compounds in soybean leaf. *J Environ. Qual.* 5:357-9.
- Lewis, G.N. (1923). Valence and the Structure of Molecules. The Chemical Catalogue Co., New York.
- Lindsay, Willar Lyman (1976). Chemical Equilibria in Soils. Colorado State University, USA. p 78-85.
- Longan, and Chaney (1983). Utilization of Municipal Wastewater and Sludge on Land Metals. U.S. Environmental Protection Agency, University of California-Kearney Foundation of Soil Science., Riverside, USA.
- López, Garrido Pedro y Martínez Z. Carmen (1987). Sistema de Lodos Activados con aereación y mezclado Hidráulico. Desarrollo y Medio Ambiente, Memoria Tomo 1., Asociación Mexicana contra la Contaminación del Agua y del Aire, A.

C. México.

- Luna, Aguilar Martín (1981). Determinación de Cadmio en Tabaco por Absorción Atómica. Tesis (Químico), Fac. Química, UNAM, México.
- Macedo, de la Concha Lilia (1984). Salud y Medio Ambiente. La Salud y las Adicciones; UNAM, Coordinación de Extensión Universitaria, Dirección General de Extensión Académica, Pub. 25, México. 63 pp.
- Martínez, A. José y Cabello V. Daniel (1969). Estudio Agrológico Detallado del D.R. 03 de Tula, Hgo. y Ampliaciones. SRH, México.
- Mascareño, C.F. (1974). Estudio Preliminar sobre Contaminación de los Suelos y de la Producción Agrícola en el Distrito de Riego 03 por el Uso de Aguas Negras de la Ciudad de México. Tesis de Maestría en Ciencias C.P. Chapingo, México. 114 pp.
- Matt, K. John (1971). Influence of Soil Properties and Extractable Zinc on Zinc Availability. Soil Science. 113 (3): 222-27.
- Matt, K. John (1972). Uptake of Soil-Applied Cadmium and Its Distribution in Radishes. Canadian J. of Plant Sci. 52: 715-19.
- Méndez, García Teodoro (1982). Estudio sobre Contaminación en Suelos Agrícolas del Valle del Mexquital, Hgo. por ABS, Boro, y Metales Pesados, por el Uso de Aguas Negras de la Ciudad de México. Tesis (Biólogo) Fac. de Ciencias,

UNAM, Mexico. 118 pp.

- Marakchiiska, M., H. Karalova and. Yordanov (1976). The effect of lead applied through the roots on the growth of phaseolus vulgaris. Compt. Rend. Acad. Bulgare Sci. 29: 1819-21.
- Miller, R. J. and D. E. Koepe (1971). Accumulation and Physiological effects of lead in corn. Proc. Univ. Missouri 4th Annual Conf. on Trace Substances in Environ. Health, Columbia, Mo. p. 186-93.
- Muknerji, S. and P. Maitra (1976). Toxic effects of lead on growth and metabolism of germinating rice (*Oryza sativa* L.) seeds and on mitosis of onion (*Allium cepa* L.) roottip cells. Ind. J. Exp. Biol. 14 : 519-21.
- Olsen, S. R. y L. A. Dean (1975). Phosphorus. En: Black C.A. et al (eds) Methods of soil chemical analysis. Part 2 Agronomy 9:1035-1049. Amer. Soc. of Agron. Madison, Wis.
- Page, A. L. and T. J. Ganje (1970). Accumulation of lead in soils for regions of high and low motor vehicle traffic density. Environ. Sci. Technol. 4 : 140-2.
- Page, A.L. and Co. (1972). Cadmium Absorption and Growth of various Plant Species as Influenced for Solution Cadmium Concentration. J. Environmental Quality, 1(3): 289-91.
- Page, A.L. and A.C. Chang (1975). Trace element and plant nutrient constraints of recycling sewage sludge on agriculture land. Proc. Second Nat. Conf. of water

reuse: water is interface with energy, air, and solids, sponsored by Am. Inst. Chem. Eng. and U.S. Environ Protect. Agency Chicago, USA.

Page, A.L., Bingham F.T. and Chang A.C. (1981). Cadmium; Effect of Heavy Metal Pollution on Plants; USA. p. 77-109.

Palacion, V. Oscar y Aceves N. Everardo (1970). Instructivo para el Muestreo, Registro de Datos e Interpretación de la Calidad del Agua para Riego Agrícola. Rama de Riego y Drenaje C.P. Chapingo, México. Serie de Apuntes No. 15. 49 pp.

Peaslee, D. E. and Thomas, G. W. (1983). Testing soils for phosphorus. Soils testing and plant analysis; Edited by Co. James d. Beaten. Soil Sci. Amer. Inc. Madison, Wis. USA p.130.

Personal de Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América (1974). Suelos Salinos y Sódicos; Departamento de Agricultura de los Estados Unid Ed. Limusa, México, 172 pp.

Phipps, D.A. (1981). Chemistry and Biochemistry of Trace Metal in Biological Systems; Effect of Heavy Metal Pollution on Plants. p. 1-53.

Phipps, D.A. (1976). Metals and Metabolism. Oxford University Press, Oxford. 122 pp.

Rico, Martínez Mauricio; Sánchez C. M. y Figueroa M.A. (1987). Estudio del Uso del Lirio Acuático para la

- purificación del Agua Residual. Comisión del Lago de Texcoco, SARH; México. 21 pp.
- Richards, L.A. (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, U.S.D.A. Handbook 60. Washington, D.C.
- Rodríguez, Sanchidrian J. y M. Mariño Aguilar (1979). Estudio de la Contaminación de Suelos y Plantas por Metales Pesados en los Entornos de las Autopistas que confluyen en Madrid I. Autopistas de Barajas y Valencia.. Anales de Edafología y Agrobiología, Madrid. XXXVIII, 7-8: 1377-89.
- Rodríguez, Sanchidrian J. y M. Mariño Aguilar (1979). Estudio de la Contaminación de Suelos y Plantas por Metales Pesados en los Entornos de las Autopistas que confluyen en Madrid II, Contaminación de Suelos. Anales de Edafología y Agrobiología, Madrid. XXXVIII, : 1385-88.
- Rodríguez, Sanchidrian J. y M. Mariño Aguilar (1980). Estudio de la Contaminación de Suelos y Plantas por Metales Pesados en los Entornos de las Autopistas que confluyen en Madrid III, Contaminación de Plantas. Anales de Edafología y Agrobiología, Madrid. XXXVIII, 7-8:21010-27.
- Rolfe, G.L. (1973). Lead uptake by selected tree seedlings. J. Environ Qual. 2: 153-7.
- Rolfe, G.L. and F.A. Bazzaz (1975). Effects of lead contamination on transpiration and photosynthesis of loblolly pine and autumn olive. For. Sci. 21: 33-5.
- Saenz, Forero Rodolfo (1985). Manual de Lagunas de

Estabilización y otros Sistemas Simplificados para el Tratamiento de Aguas Residuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, (CEPIS/OPS/OMS), Lima Perú. 137 pp.

SARH, (1980). Investigación del Comportamiento de la Calidad del Agua en función de descargas de Contaminación y sus efectos en la flora y fauna acuática. Elaborado por ECO Ingeniería, S.A. México. 48 pp.

SARH, (1982). Proyecto de un Sistema de Tratamiento por Disposición en Tierra de las Aguas Residuales del Area Metropolitana de la Ciudad de México, Mediante su Aprovechamiento en los Distritos de Riego 88, 03 y 27, México. 286 pp.

SARH, (1980). Evaluación del Impacto Ambiental del Transporte y Uso de las Aguas Residuales del Area Metropolitana del Valle de México en la Agricultura, México.

Schnitzer, M. (1968). Reactions between Organic Matter and Inorganic Soil Constituents. Int. Cong. Soil Sci., Trans 9th (Adelaide, Aust), 1: 635-44.

Schroeder, H.A. and J.J. Balassa (1961). Abnormal Trace Metals in Man Cadmium. J. Chronic Dis. 14: 236-58.

Schulze, H. and J.J. Brand (1978). Lead toxicity and phosphate deficiency in Chlamydomonas. Plant Physiol. 62: 727-30.

Sekerka, V. and M. Bobak (1974). Influence of lead on the plant cell. Acta Fac. Rarum. Nat. Univ. Comenianae

- Physiol. Plant. 9: 1-12.
- Singer, M. and L. Hanson (1969). Lead accumulation in soils near high-ways in the twin cities metropolitan area. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 33: 152-53.
- SRH, (1976). Subsecretaría de Planeación. Reuso del Agua en la Agricultura, la Industria, los Municipios y en la Recarga de Acuíferos. (tercera etapa). Dirección General de Usos de Agua y Prevención de la Contaminación, México.
- Stofen, D. (1974). Subchemical Lead Poisoning. Academic Press London and New York.
- Swaine, D. J. and R.L. Mitchell (1960). Trace element distribution soil profiles. J. Soil Sci. 1: 347-68.
- Underwood, E.J. (1977). Trace Elements in Human Nutrition, 4a. Ed. Academic Press.
- U.S. Environmental Protection Agency (1972). Water Quality Criteria, USA.
- U.S. Environmental Protection Agency (1975). Evaluation of Land Application Systems; USA.
- U.S. Environmental Protection Agency (1977). Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater, USA.
- U.S. Environmental Protection Agency (1974). Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes, USA. p. 78-113.
- U.S. Environmental Protection Agency (1979). Environmental Pollution Control Alternatives: Municipal Waste Wastes. Center for Environmental Research Information, USA. 79

PP.

- Valciukas, S.A. (1978). Central Nervous System Dysfunction Due to Lead Exposure; *Science*, 201: 465-67.
- Valee, B.L. and D.D. Ulmer (1972). Biochemical effect of mercury, cadmium and lead. *Ann Rev. Biochem.* 41: 91-128.
- Vigueras, Cortés J.M. (1988). Tratamiento Biológico de Aguas Residuales con Plantas Acuáticas Vasculares. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), IPN. Unidad Durango. México.
- Walker, W.M., J.E. Miller and J.J. Hassett (1977). Effect of lead and cadmium upon the boron, copper, manganese and zinc concentration of young corn plants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 8: 57-66.
- Walkley, A. (1947). A Critical Examination of a Rapid Method for Determination Organic Soil Constituents. *Soil Sci.* 63: 251-64.
- Wear, J. I., and C. E. Evans (1968). Relationships of zinc uptake by corn and sorghum to soil zinc measured by three extractants. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*
- Wong, D. and Grovandjee (1976). Effects of lead ions on photosystem I in isolated chloroplasts: Studies on the reaction center P 700. *Photosynthetica*, 10: 241-54.
- World Health Organization (1972). Evaluation of certain food additives and contaminants. Mercury, Lead, and Cadmium. WHO Technical Report Series No. 505, Sixteenth Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives.

WHO, Geneva.

Yañez, Cossio Favián (1982). Evaluación de Lagunas de Estabilización, Manual de Métodos Experimentales, CEPIS/OPS/OMS Lima, Perú. Serie técnica No. 24, 181 pp.

A P E N D I C E

Tabla A-1 Muestreo de Suelo, Agua y Tejido Vegetal.

No. MUESTRA	CULTIVO	FECHA	LUGAR	OBSERVACIONES
1	Alfalfa	20/09/87	Km 2 carretera Doxey-Teocalco	Edo. fisiológico: maduro 9 meses de establecida, planta sana y enflora 1.8 años de establecida.
2	Maíz	27/09/87	Km 12.2 del canal de Fsa. Tlamaco-Juandho	
3	Alfalfa	27/09/87	Km 9.5	
4	Chile	20/09/87	Canal principal teocalco (Licudora)	
5	Alfalfa	27/09/87	Km 5.3 canal de Fsa. Tlamaco-Juandho Rancho Chihuahua (Puente amolía margen izq.)	
6	Frijol	20/09/87	Río Salado, márgen derecho	Edo. fisiológico: maduro, último corte.
7	Chile	20/09/87	Km 2 carretera Doxey-Teocalco (se poco transitada)	Deficiencias nutricionales.
8	Maíz	27/09/87	Rancho de la Fan. Lagos (Km 5.3 canal Tlamaco-Juandho)	Planta c/pigmentación negroide
9	Chile	10/10/87	Parcela Ejidal de Bartolo García	Edo. fisiológico: elote.
10	Maíz	27/09/87	Márgen izquierdo del Río Salado entre Tlaminulpa y la Hacienda Dendho. Mpio. de Atitalaquia.	
11	Calabaza	27/09/87	San Miguel Tlaxcoapan, Hgo.	Ultimo Corte, 1.8 años, alfalfa
12	Alfalfa	27/09/87	Prepa de las Cadenas (márgen izquierdo del Río Salado)	un poco rala
13	Maíz	27/09/87	Entre la presa las Cadenas y carretera Tlaxtlahuailipan	Estado fisiológico: maduro, cultivo en plena producción, cultivo en producción, cloróticas
14	Chile	27/09/87	Márgen derecho del Río Salado. Rancho "Presas las Cadenas".	1 de cada 6, pigmentos negros
15	Chile	10/10/87	400 m adentro del km 2.5 de la carretera Tlahuailipan, Tula, márgen derecho.	1.0 año de establecida Edo. fisiológico: elote
16	Alfalfa	10/10/87	200 m del Pozo de agua potable Tlaxcoapan	último corte, suelo c/fragmentos
17	Maíz	10/10/87	Teoquiapa, Mpio. de Atitalaquia	roca c/éliza.
18	Chile	10/10/87	Tlaminulpa, Mpio. de Atitalaquia	clorosis, dif. nutriciona. Elote, suelo c/fragmentos de roca - c/éliza.
19	Alfalfa	12/10/87	Ejido de Atitalaquia	
20	Maíz	12/10/87	0.5 km de Tlamaco Mpio. de Atitalaquia	
21	Maíz	12/10/87	300 m adentro del km 3 de la carretera Atitalaquia-Apaxco	
22	Alfalfa	12/10/87	Tlaminulpa, Mpio. de Atitalaquia (20 m del Río Salado).	2 años de establecida, un poco rala Edo. fisiológico: elote
23	Maíz	10/10/87	Km 1 carretera Tlahuailipan-Tula, márgen izquierdo	suelo agrietado.
24				
25	Calabaza	10/10/87	Márgen derecho del canal de poro. Tlamaco-Juandho (Bajallito)	Ultimo corte
26	Maíz	10/10/87	300 m adentro del km 1.5 carretera Tlaminulpan Tula márgen derecho	Planta con pigmentación negroide
27	Chile	29/09/87	Rancho Sánchez Donis, Teltipan, Mpio de Tlaxcoapan, Planta con	

Tabla A-2 Concentración de Metales Pesados (ppm) como plomo, cadmio y cromo en muestras de aguas residuales en los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitlaquia; Hgo. (D.D.R. 063).

Muestras	Pb	Cd	Cr
1	2.7	0.045	2.0
2	2.5	0.032	1.4
3	2.5	0.020	0.83
4	3.0	0.032	1.4
5	2.5	0.025	2.4
6	3.0	0.032	1.4
7	2.5	0.013	2.6
8	3.1	T	1.9
9	2.5	0.013	2.3
\bar{x}	2.7	0.023	1.85

T - Traza

Tabla A-3. Características físicas y químicas de los suelos regados con aguas residuales en los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia; Hgo. (D.D.R. 063).

Muestras	M.O. %	P ppm	Textura	pH	C.E. mmhos/cm	Ca -meq/l-	Mg
1	2.4	9.3	Arcillosa	7.6	0.318	3.3	2.3
2	3.9	14.9	Mig-Arc.	8.1	0.52	3.7	3.7
3	3.4	10.3	Arcilloso	7.6	0.50	2.8	1.5
4	1.8	6.9	Arc-Are.	8.0	0.44	2.8	1.0
5	1.5	13.6	Arcilloso	8.3	0.34	2.5	1.8
6	1.2	7.4	Arcilloso	8.2	0.51	3.0	1.7
7	3.8	6.1	Arcilloso	7.8	0.33	2.5	1.8
8	1.5	3.4	Arcilloso	8.4	0.46	2.5	1.8
9	2.7	3.7	Arcilloso	8.2	0.50	2.5	1.8
10	2.0	1.6	Arcilloso	8.6	0.43	1.5	0.5
11	3.1	10.3	Arcilloso	7.6	0.50	2.7	1.3
12	1.8	6.3	Arcilloso	8.0	0.50	2.7	2.0
13	2.4	9.6	Arcilloso	8.1	0.45	3.0	1.2
14	3.1	8.9	Arcilloso	7.9	0.45	3.2	2.0
15	2.2	8.3	Arcilloso	7.5	0.30	2.0	2.0
16	1.8	7.1	Arcilloso	7.9	0.40	1.5	0.7
17	2.9	4.5	Arcilloso	8.1	0.33	1.5	1.5
18	1.2	7.7	Arcilloso	8.4	0.63	2.5	2.0
19	2.7	8.9	Arcilloso	7.9	0.41	2.6	2.5
20	3.0	5.1	Arcillosa	8.3	0.73	2.0	1.7
21	2.4	7.1	Arcilloso	8.2	0.40	1.7	1.7
22	1.5	7.7	Arcilloso	8.2	0.37	2.2	1.0
23	2.1	7.4	Arcilloso	8.0	0.47	2.5	1.8
24	1.6	8.8	Arcilloso	8.0	0.42	1.8	1.5
25	1.8	11.0	Arcilloso	8.0	0.34	2.0	2.8
26	2.1	8.0	Arcilloso	7.8	0.92	3.8	3.5

Continuación de la tabla A-3.
 Características físicas y químicas ...

113

Muestra	K ⁺	Na ⁺	CO ₃ ⁼⁼	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻
meq/l						
1	0.6	0.91	T	2.7	0.7	1.4
2	0.7	1.31	T	7.0	4.5	4.9
3	0.9	0.96	T	5.3	4.6	4.6
4	0.4	1.31	T	4.7	1.5	2.3
5	0.4	0.59	T	3.0	2.9	3.8
6	0.6	1.22	T	4.2	2.7	6.1
7	0.3	0.67	T	5.2	1.0	1.1
8	0.2	0.40	T	5.3	1.7	5.7
9	0.2	0.80	T	3.0	1.2	3.0
10	0.2	0.80	1.87	2.5	3.4	2.7
11	0.9	1.31	T	4.0	3.1	3.4
12	0.6	1.00	T	4.2	1.7	2.3
13	0.6	1.00	T	4.8	2.7	5.3
14	0.9	1.26	T	2.0	2.6	3.4
15	0.5	0.61	T	2.8	2.7	1.9
16	0.3	0.80	T	4.0	2.6	4.9
17	0.4	0.50	T	4.2	1.0	3.4
18	0.3	1.52	T	5.7	1.0	7.2
19	0.6	0.50	T	4.5	0.9	3.8
20	0.4	1.75	T	4.3	2.4	4.2
21	0.6	0.65	T	6.0	0.7	2.3
22	0.5	0.60	T	4.0	1.4	3.4
23	0.5	0.61	T	3.5	1.7	1.5
24	0.4	1.00	T	5.3	0.7	3.0
25	0.4	0.65	T	4.2	1.0	3.0
26	0.4	1.52	T	3.3	1.2	3.0

T - trazas

Tabla A-4. Concentración de Metales Pesados (ppm) en suelos regados con aguas residuales en los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan, y Atitalaquia; Hgo. (D.D.R. 063).

Muestra	Pb	Cd	Cr
1	0.76	0.104	T
2	0.56	0.064	T
3	0.76	0.440	0.17
4	0.52	0.056	T
5	0.52	0.104	T
6	0.64	0.052	T
7	0.52	0.116	0.084
8	0.60	0.080	T
9	0.40	0.136	0.11
10	0.60	0.056	T
11	0.48	0.176	T
12	0.52	0.048	T
13	0.52	0.044	0.044
14	0.56	0.064	T
15	0.13	0.500	0.053
16	0.13	0.165	0.062
17	0.13	0.149	0.044
18	0.26	T	0.062
19	0.39	0.282	0.053
20	T	T	0.053
21	0.26	0.182	0.053
22	T	0.282	0.053
23	T	0.182	0.089
24	0.13	0.182	0.089
25	T	0.483	0.110
26	T	0.332	0.110

T - traza

Tabla A-5. Variación y niveles promedio de contaminantes en la zona del distrito de riego 063 Valle del Mezquital Hidalgo.

Contenido (ppm)	Variación	Promedio
Aguas Residuales		
Pb	1.9 - 3.1	2.7
Cd	T - 0.05	0.023
Cr	0.83 - 2.6	1.85
Suelos Contaminados		
Pb	T - 0.76	0.36
Cd	T - 0.50	0.17
Cr	T - 0.17	0.05

T - traza.

Tabla A-6 Concentración media de Metales Pesados (en ppm) en tejidos vegetales regados con aguas residuales municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo. (D.D.R.063).

No.	Cultivo	Pb	Cd	Cr
1	Alfalfa	39.5	10.1	11.0
2	Maíz	30.0	9.5	10.0
3	Alfalfa	29.9	9.7	11.8
4	Chile Criollo	43.9	12.3	10.9
5	Alfalfa	17.1	14.7	15.7
6	Frijol	36.3	11.8	15.7
7	Chile Chilaca	24.2	10.3	10.8
8	Maíz y Alfalfa	17.0	10.8	13.7
9	Chile	17.2	11.5	6.9
10	Maíz	12.7	10.7	9.9
11	Calabaza	25.5	12.7	11.8
12	Alfalfa	21.1	13.7	6.9
13	Maíz	16.6	11.8	7.8
14	Chile Criollo	32.7	13.5	23.1
15	Chile Serrano	30.0	12.9	13.8
16	Alfalfa	12.7	11.7	11.8
17	Maíz	16.6	13.1	8.8
18	Chile	29.9	14.1	5.0
19	Alfalfa	38.2	14.7	5.0
20	maíz	38.2	10.7	5.9
21	Maíz	38.2	11.0	5.9
22	Alfalfa	38.2	15.1	8.9
23	Maíz	34.3	9.5	7.8
24	Calabaza	43.0	9.1	13.7
25	Maíz	38.2	11.5	2.0
26	Chile	17.2	11.5	6.9

tabla A-7 Concentración de Contaminantes de Metales pesados (en ppm) en tejidos vegetales, regados con aguas residuales en los municipios de Tlaxcoapan, Tlaxiahuilpan y Atitalaquia, Hgo. (D.D.R. 063).

117

No	Cultivo	tipo de tejido	Pb	Cd	Cr
1	Alfalfa S	Tallo	64.6	10.2	5.9
		Hoja	30.0	10.2	29.5
	E	Raiz	21.6	9.5	3.9
		Tallo	34.3	9.5	5.9
2	Maiz	Hoja	47.0	11.0	9.9
		Hoja	30.0	9.5	10.0
3	Alfalfa	Tallo	34.3	10.2	4.0
		Hoja	25.5	9.1	19.6
4	Chile Criollo	Tallo	57.8	12.7	9.9
		Hoja	30.0	11.8	11.8
5	Alfalfa	Tallo	21.5	15.9	15.7
		Hoja	12.7	13.5	15.7
6	Frijol	Tallo	25.5	11.8	15.7
		Hoja	47.0	11.8	15.7
7	Chile Chilaca	Tallo	21.6	9.5	T
		Hoja	25.5	10.7	8.9
		Fruto	25.5	10.7	23.6
8	Maiz	Hoja	25.5	15.1	11.8
8	Alfalfa	Tallo	12.7	8.3	15.7
		Hoja	12.7	9.1	13.7
9	Chile	Tallo	12.7	11.5	3.9
		Hoja	21.6	11.5	9.8
10	Maiz	Hoja	12.7	10.7	9.9
11	Calabaza	Hoja y Tallo	25.5	12.7	11.8
12	Alfalfa	Tallo	25.5	13.5	5.9
		Hoja	16.6	13.9	7.8
13	Maiz	Hoja	16.6	11.8	7.8
14	Chile Criollo	Tallo	25.5	15.5	49.4
		Hoja	34.3	12.7	9.9
		Fruto	38.2	12.3	9.9
15	Chile Serrano	Tallo	30.0	13.9	15.7
		Hoja	30.0	11.8	11.8
16	Alfalfa	Tallo	12.7	10.2	11.8
		Hoja	12.7	13.1	11.8
17	Maiz	Hoja	16.6	13.1	8.8
18	Chile	Hoja	25.5	13.5	5.9
		Tallo	34.3	14.7	4.0
19	Alfalfa	Tallo	38.2	14.3	4.0
		hoja	38.2	15.1	5.9
20	Maiz	Hoja	38.2	10.7	5.9
21	Maiz	hoja	38.2	11.0	5.9
22	Alfalfa	Hoja	38.2	15.1	9.9
		Tallo	38.2	15.1	7.8
23	Maiz	Hoja	34.3	9.5	7.8
24	Calabaza	Hoja y Tallo	43.0	9.1	13.7
25	Maiz	Hoja	38.2	11.5	2.0
26	Chile Serrano	Tallo	12.7	11.5	3.9
		Hoja	21.6	11.5	9.8

S - sano

E - enferma

T - traza.

Tabla A-8 Concentración de Metales Pesados (en ppm) en hoja y tallo de vegetales regados con aguas residuales en los municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo. (D.D.R. 063).

No	Cultivo	Hoja			Tallo		
		Pb	Cd	Cr	Pb	Cd	Cr
1	Alfalfa	38.5	10.6	19.7	49.5	9.9	5.9
2	Maiz	30.0	9.5	10.0			
3	Alfalfa	25.5	9.1	19.6	34.3	10.2	4.0
4	Chile C.	30.0	11.8	11.8	57.8	12.7	9.9
5	Alfalfa	12.7	13.5	15.7	21.5	15.9	15.7
6	Frijol	47.0	11.8	15.7	25.5	11.8	15.7
7	Chile Ch.	25.5	10.7	8.9	21.6	9.5	T
8	Maiz	25.5	15.1	11.8			
8	Alfalfa	12.7	9.1	13.7	12.7	8.3	15.7
9	Chile	21.6	11.5	9.8	12.7	11.5	3.9
10	Maiz	12.7	10.7	9.9			
11	Calabaza	25.5	12.7	11.8	25.5	12.7	11.8
12	Alfalfa	16.6	13.9	7.8	25.5	13.5	5.9
13	Maiz	16.6	11.8	7.8			
14	Chile C	34.3	12.7	9.9	25.5	15.5	49.4
15	Chile S	30.0	11.8	11.8	30.0	13.9	15.7
16	Alfalfa	12.7	13.1	11.8	12.7	10.2	11.8
17	Maiz	16.6	13.1	8.8			
18	Chile S	25.5	13.5	5.9	34.3	14.7	4.0
19	Alfalfa	38.2	15.1	5.9	38.2	14.3	4.0
20	Maiz	38.2	10.7	5.9			
21	Maiz	38.2	11.0	5.9			
22	Alfalfa	38.2	15.1	9.9	38.2	15.1	7.8
23	Maiz	34.3	9.5	7.8			
24	Calabaza	43.0	9.1	13.7	43.0	9.1	13.7
25	Maiz	38.2	11.5	2.0			
26	Chile S	21.6	11.5	9.8	12.7	11.5	3.9

Tabla A-9 Relación entre las propiedades químicas del agua y contaminantes como Pb, Cd y Cr. Mencionando el coeficiente de determinación (R^2), nivel de significancia y descripción de la ecuación matemática. Municipios de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo. (D.D.R.063).

Relación	R^2	Significancia	Ecuación Matemática.
pH y Cd	(A) 0.4672	**	$Y = 0.2055 - 0.0240 x$
Na y Cd	(A) 0.1647	e	$Y = 0.0065 + 0.0005 x$
Na y Cr	(A) 0.3549	*	$Y = 2.5436 - 0.0193 x$
K y Cd	(A) 0.2825	*	$Y = 0.0002 + 0.0013 x$
Ca y Cd	(A) 0.1991	e	$Y = 0.0356 - 0.0034 x$
Mg y Cr	(A) 0.1954	e	$Y = 1.6802 + 0.0990 x$
HCO ₃ y Pb	(S) 0.1194	e	$Y = 0.1279 + 0.0248 x$
HCO ₃ y Cd	(A) 0.5566	**	$Y = -0.0067 + 0.0030 x$
HCO ₃ y Cr	(A) 0.2602	*	$Y = 2.4753 - 0.0496 x$
Cl y Pb	(S) 0.1408	e	$Y = 0.0314 + 0.0232 x$
Cl y Cd	(A) 0.5376	**	$Y = -0.0145 + 0.0025 x$
Cl y Cr	(A) 0.3157	*	$Y = 2.6782 - 0.0472 x$
SO ₄ y Pb	(A) 0.4617	**	$Y = 3.0317 - 0.0461 x$
SO ₄ y Cr	(A) 0.2874	*	$Y = 1.7627 + 0.0464 x$
Na y Pb	(T) 0.1784	e	$Y = 40.8027 - 0.4268 x$
Ca y Pb	(T) 0.1205	e	$Y = 20.7075 + 1.9749 x$
Mg y Pb	(T) 0.1755	e	$Y = 19.2809 + 2.9253 x$

** significancia al 1 % A - agua
 * significancia al 5 % S - suelo
 e significancia al 10 % T - tallo

Tabla A-10 Relación entre las propiedades físicas y químicas del suelo y contaminantes. Mencionando coeficiente de determinación (R^2), significancia y descripción de la ecuación matemática. Municipios de Tlaxcoapan Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hgo. (D.D.R. 063).

Relación	R^2	Significancia	Ecuación Matemática
Ca y Pb	(S) 0.1835	o	$Y = -0.0681 + 0.1723 x$
Na y Cd	(S) 0.1136	o	$Y = 0.3108 - 0.1394 x$
HCO_3 y Pb	(S) 0.3981	**	$Y = -0.0579 + 0.1399 x$
HCO_3 y Cr	(S) 0.1344	o	$Y = 0.0888 - 0.0145 x$
SO_4 y Cd	(S) 0.1149	o	$Y = 0.0691 + 0.0247 x$
Ca y Cd	(A) 0.1144	o	$Y = 0.0026 + 0.0076 x$
M.O. y Cd	(H) 0.2953	o	$Y = 13.5335 - 0.7424 x$
Tex. y Pb	(H) 0.2053	o	$Y = 54.9735 - 0.4950 x$
Tex. y Pb	(T) 0.1401	o	$Y = 52.4562 - 0.4326 x$
K y Pb	(H) 0.1230	o	$Y = 20.1489 + 16.9343 x$
K y Cr	(T) 0.1138	o	$Y = 4.3075 + 14.3400 x$
HCO_3 y Cr	(H) 0.2716	*	$Y = 4.7538 + 1.8845 x$
HCO_3 y Pb	(T) 0.2301	*	$Y = 15.4731 + 4.5004 x$
SO_4 y Cd	(H) 0.1581	o	$Y = 13.2524 - 0.3081 x$

** significancia al 1 %

* significancia al 5 %

o significancia al 10 %

A - agua S - suelo

T tallo