



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ACATLÁN**

**DISEÑO HIDRÁULICO DE COLUMNAS
EXPERIMENTALES EMPACADAS CON
SUELOS DEL VALLE DE TULA**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL
P R E S E N T A
VIRGINIA MARTÍNEZ GARCÍA

ASESORA: DRA. ALMA C. CHÁVEZ MEJÍA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Enunciado de Misión

Emprenderé cada día con optimismo y una sonrisa, seré fiel a Dios y leal a mis principios.

No permitiré que el miedo me detenga, fijaré metas, las afrontaré con seguridad, comprometida conmigo misma, en vista de superarme y defender mi autonomía.

Procederé de forma generosa, atenta y respetuosa con los demás, disfrutaré y protegeré a mi familia pero apartaré tiempo para mí.

Jamás consentiré que alguien me haga sentir inferior, me impida realizarme y ser una mujer exitosa.

Viviré feliz con lo que tengo, pero mantendré la esperanza y confiaré en que lo mejor está por venir.

Virginia

AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, en particular a la FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN, por darme la oportunidad de instruirme en sus aulas.

Al INSTITUTO DE INGENIERÍA de la UNAM, en especial al GRUPO DE TRATAMIENTO Y REÚSO y a la Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros, por la información, soporte técnico y facilidades proporcionadas para el desarrollo de esta tesis.

A mi asesora de tesis la Dra. Alma Concepción Chávez Mejía y a la M. en I. Rosa María Murillo Torres por las enseñanzas que me transmitieron y el apoyo brindado en la elaboración del presente trabajo.

A los catedráticos que compartieron esmerada y desinteresadamente su tiempo y sus conocimientos conmigo.

A compañeros y grandes amigos que a través del tiempo he conocido, que me aceptaron y me otorgaron su afecto, consejos, apoyo y que de alguna manera, siempre estuvieron ahí.

Y en general a todas las personas que han colaborado en este proyecto, mi infinita gratitud...

Virginia Martínez García

DEDICATORIA

Con aprecio, devoción y respeto a dos maravillosos seres que siempre han estado conmigo, me han respaldado en todas las decisiones que he tomado y con sus sacrificios y dedicación han hecho mi vida inmensamente feliz: MIS PADRES, José Luíz Martínez Tavares y Juana García Maqueda, este es un pequeño tributo a su maravilloso apoyo, soy muy afortunada de ser su hija, son extraordinarios, los amo.

Con afecto a MIS HERMANOS que han compartido su vida, energía y creatividad conmigo: José Luíz y Sara Dehny, nunca dejarán de ser mis niños gracias por su fuerza y gran corazón, los adoro a ambos.

Con inmenso cariño a la luz de mi vida, siempre han sido mi inspiración, conocerlos me ha alentado durante mucho tiempo a alcanzar mis sueños, jamás olvidare lo que significan para mí.

Con admiración, a las personas de las que he recibido atenciones, aprecio y motivación: MI FAMILIA, son incomparables, los quiero.

A toda la gente que me ha acompañado y ha creído en mí, que de una forma u otra me ayudaron en la realización de este objetivo y que han contribuido con su granito de arena en mi formación como ser humano y como profesionista, los estimo a todos.

Vicky

ÍNDICE GENERAL

DISEÑO HIDRÁULICO DE COLUMNAS EXPERIMENTALES EMPACADAS CON SUELOS DEL VALLE DE TULA

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
PRÓLOGO.....	1
INTRODUCCIÓN.....	4
RESUMEN.....	8
1 ANTECEDENTES.....	10
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	11
1.1.1 <i>Panorama Regional</i>	11
1.1.2 <i>Localización Geográfica y Política</i>	12
1.1.3 <i>Superficie, límites y accesos</i>	13
1.1.4 <i>Población y Actividades Económicas</i>	14
1.1.5 <i>Fisiografía</i>	15
1.1.6 <i>Edafología</i>	15
1.1.7 <i>Geología</i>	17
1.1.8 <i>Clima</i>	17
1.1.9 <i>Uso de suelo</i>	17
1.1.10 <i>Hidrología</i>	18
1.1.11 <i>Hidrogeología</i>	18
1.1.12 <i>Balance Hidráulico</i>	20
1.1.13 <i>Usos del agua</i>	21
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	22
1.2.1 <i>Reuso de agua residual en el DR 003 Tula para riego agrícola</i>	23
1.2.2 <i>Problemas derivados del Uso de Agua Residual</i>	24
1.2.3 <i>Ventajas y desventajas</i>	25
1.2.4 <i>Recarga y descarga del Acuífero</i>	26
1.2.5 <i>Caracterización del agua residual y del agua del acuífero</i>	27
1.2.6 <i>Importancia de estudiar el destino y transporte de los contaminantes del agua residual</i>	28
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 TRATAMIENTO NATURAL.....	30
2.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO NATURAL POR SUELO.....	31
2.3 CASOS PRÁCTICOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO NATURAL POR SUELO.....	32
2.4 TIPOS DE SISTEMA DE TRATAMIENTO NATURAL POR SUELO.....	33

2.4.1	Sistema de baja carga (BC)	33
2.4.2	Sistema de infiltración rápida (IR)	34
2.4.3	Sistema de riego superficial (RS)	35
2.5	CONSIDERACIONES IMPORTANTES DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO NATURAL POR SUELO	35
2.5.1	Calidad del agua residual y mecanismos de tratamiento	36
2.5.1.1	Sólidos suspendidos	36
2.5.1.2	Materia Orgánica	36
2.5.1.3	Nitrógeno	36
2.5.1.4	Fósforo	38
2.5.1.5	Trazas de elementos	38
2.5.1.6	Microorganismos	38
2.5.1.7	Compuestos Orgánicos	39
2.5.2	Eficiencia de remoción de contaminantes en un SAT	40
2.5.3	Salud Pública	40
2.5.3.1	Agentes patógenos	40
2.5.3.2	Calidad del agua subterránea	41
2.5.3.3	Calidad de los cultivos	41
2.6	DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO NATURAL POR SUELO (SAT)	42
2.6.1	Propiedades del suelo	42
2.6.1.1	Tamaño de la partícula	43
2.6.1.2	Textura	44
2.6.1.3	Estructura	45
2.6.1.4	Color	46
2.6.1.5	Consistencia	46
2.6.1.6	Profundidad	46
2.6.1.7	Densidad	47
2.6.1.8	Pesos	48
2.6.1.9	Relación de vacíos	48
2.6.1.10	Porosidad	48
2.6.1.11	Grado de saturación	48
2.6.1.12	Contenido de agua	48
2.6.1.13	Propiedades químicas	49
2.6.1.14	Propiedades hidráulicas	49
2.6.2	Diseño preliminar	51
2.6.2.1	Evaluación y elección del emplazamiento	51
2.6.2.2	Parámetros de diseño	52
2.6.2.3	Carga hidráulica del proyecto	52
2.6.2.4	Nivel de pretratamiento	52
2.6.2.5	Elección de los cultivos	52
2.6.2.6	Selección del sistema de distribución	53
2.6.2.7	Superficie necesaria y distribución espacial	56
2.6.2.8	Sistemas de recuperación de efluente	56
2.6.2.9	Necesidades de almacenamiento y consideraciones climáticas	56
2.6.2.10	Drenaje	56
2.6.2.11	Control de la escorrentía superficial	56
2.6.2.12	Selección y control de los recubrimientos vegetales	56
2.6.3	Proyecto constructivo	57
3	ESTADO DEL ARTE	60
3.1	PROYECTO EN EL VALLE DE TULA	61
3.2	ADSORCIÓN	62
3.3	SIMULACIÓN DEL SAT EN EL LABORATORIO	63
3.4	PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE LAS COLUMNAS QUE SIMULARÁN EN LABORATORIO EL SAT DEL VALLE DE TULA	75
3.4.1	Características de las columnas	75
3.4.1.1	Material	75
3.4.1.2	Dimensiones	75
3.4.2	Material de empaque	75

3.4.2.1	Volumen de muestra	75
3.4.3	Compuesto o variable que se estudiará	76
3.4.4	Número de columnas.....	76
3.4.5	Montaje	76
3.4.6	Modo de operación.....	76
3.4.6.1	Trazador.....	76
3.4.7	Recolección del lixiviado.....	77
3.5	JUSTIFICACIÓN.....	77
3.6	OBJETIVOS METAS Y ALCANCES	78
4	METODOLOGÍA	79
4.1	MATERIAL DE EMPAQUE.....	81
4.1.1	Caracterización de los suelos	82
4.1.1.1	Muestreo	82
4.1.1.2	Tamizado.....	84
4.1.1.3	Conductividad Eléctrica (CEs).....	85
4.1.1.4	Potencial de Hidrógeno (pH).....	87
4.1.1.5	Densidad Aparente.....	88
4.1.1.6	Textura de suelos por el método de Bouyoucos.....	89
4.1.1.7	Materia Orgánica.....	94
4.1.1.8	Capacidad de Intercambio Catiónico Total (CICT)	97
4.1.2	Volumen de muestra	100
4.2	FTALATOS	100
4.2.1	Di-2-Etil Hexil Ftalato (DEHF)	100
4.2.2	Butilbencil ftalato (BBF)	102
4.3	ESPECIFICACIONES DE LAS COLUMNAS	103
4.3.1	Material.....	103
4.3.2	Dimensiones	103
4.3.3	Número de columnas.....	104
4.4	MODO DE OPERACIÓN.....	104
4.4.1	Trazador	104
4.4.2	Recolección del lixiviado.....	105
4.5	DISEÑO FINAL.....	105
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	107
5.1	CARACTERÍSTICAS DEL SUELO.....	109
5.2	ATRIBUTOS DEL AGUA SINTÉTICA (FTALATOS)	111
5.3	ESPECIFICACIONES DE LAS COLUMNAS	112
5.3.1	Opción A	112
5.3.1.1	Material y dimensiones	112
5.3.1.2	Número de columnas.....	113
5.3.1.3	Operación de las columnas.....	114
5.3.1.4	Montaje de columnas	115
5.3.1.5	Dispositivos y accesorios	115
5.3.1.6	Diseño final	117
5.3.2	Opción B.....	119
5.3.2.1	Material y dimensiones	119
5.3.2.2	Montaje de columnas	121
5.3.2.3	Dispositivos y accesorios.....	121
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
6.1	CONCLUSIONES	125
6.2	RECOMENDACIONES.....	129
	GLOSARIO.....	131
	BIBLIOGRAFÍA.....	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio.....	11
Figura 1.2. Ubicación del Distrito de Riego 003 Tula.....	12
Figura 1.3. Área del Distrito de Riego 003 Tula.....	13
Figura 1.4. Tipos de suelo del Distrito de Riego 003 Tula.....	16
Figura 1.5. Mantos Acuíferos en el DR 003.....	19
Figura 1.6. Balance hidráulico y uso del agua en la subregión Valle de Tula.....	21
Figura 1.7. Riego agrícola con agua residual de la ciudad de México.....	22
Figura 1.8. Embalses y Canales del DR 003.....	23
Figura 1.9. Riego con agua residual en el Valle de Tula.....	25
Figura 1.10. Manantial Cerro Colorado.....	26
Figura 2.1. Sistema de baja carga.....	33
Figura 2.2. Sistema de infiltración rápida.....	34
Figura 2.3 Sistema de riego superficial.....	35
Figura 2.4. Triangulo de textura de suelos.....	44
Figura 2.5. Tipos principales de estructuras de suelo.....	45
Figura 2.6. Esquema de una muestra de suelo.....	47
Figura 2.7 Técnicas de irrigación y patrones de distribución.....	53
Figura 2.8 Sistema de aspersión a y b.....	54
Figura 2.9 Sistema de aplicación superficial a y b.....	55
Figura 2.10 Sistema de aplicación por goteo.....	55
Figura 4.1. Suelo vertisol.....	81
Figura 4.2. Suelo leptosol.....	81
Figura 4.3. Punto de muestro.....	82
Figura 4.4. Localización de puntos de muestreo usando el geoposicionador (GPS).....	83
Figura 4.5. Retiro de la capa superficial.....	83
Figura 4.6. Muestreo en campo.....	84
Figura 4.7. Suelo tamizado.....	84
Figura 4.8. Báscula.....	86

Figura 4.9. Muestras de suelo en agitador.....	87
Figura 4.10. Probeta 10 ml	88
Figura 4.11. Eliminación de materia orgánica.....	90
Figura 4.12. Adicción de reactivos y reposo.....	90
Figura 4.13. Vaciado en el agitador mecánico (batidora).....	90
Figura 4.14. Hidrómetro de Bouyoucos y Termómetro	91
Figura 4.15. Calibración del hidrómetro	91
Figura 4.16. Aforo.....	92
Figura 4.17. Agitación con aire y primera lectura.....	92
Figura 4.18. Segunda lectura después de dos horas.....	93
Figura 4.19. Dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado	94
Figura 4.20. Agua destilada y ácido fosfórico	95
Figura 4.21. Titulación	95
Figura 4.22. Vire de la técnica de materia orgánica.....	96
Figura 4.23. Tubos de centrifuga con muestras de suelo	98
Figura 4.24. Centrífuga	98
Figura 4.25. Titulación de la técnica de capacidad de intercambio catiónico.....	99
Figura 5.1. Dimensiones de la columna.....	112
Figura 5.2. Número de columnas.....	113
Figura 5.3. Laboratorio de Ingeniería Ambiental.....	115
Figura 5.4. Distribución del relleno de la columna.....	116
Figura 5.5. Diseño del dispositivo.....	117
Figura 5.6. Columna SR 25	119
Figura 5.7. Columna automatizada	120
Figura 5.8. Montaje de columna automatizada	121
Figura 5.9. Bomba peristáltica	121
Figura 5.10. Data Logger.....	122
Figura 5.11. Colector de fracciones	122

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1. Balance Hidrológico para la Subregión Tula (volúmenes en mill m³/año).....</i>	20
<i>Tabla 1.2. Embalses y Canales del DR 003.....</i>	23
<i>Tabla 1.3. Parámetros orgánicos removidos por el suelo.....</i>	27
<i>Tabla 2.1 Países que utilizaron el sistema de aplicación al terreno.....</i>	32
<i>Tabla 2.2 Calidad del agua del efluente (mg/l).....</i>	40
<i>Tabla 2.3 Clasificación de los suelos de acuerdo al tamaño de la partícula y malla regularmente usada en la determinación de la granulometría.....</i>	43
<i>Tabla 2.4. Etapas del diseño preliminar de sistemas de tratamiento natural con suelo.....</i>	51
<i>Tabla 2.5 Comparación entre los diferentes parámetros para los sistemas del SAT y el Valle de Tula.</i>	58
<i>Tabla 3.1 Resumen de los estudios de suelo en columnas de laboratorio.</i>	70
<i>Tabla 4.1. Grados de salinidad en suelos.....</i>	85
<i>Tabla 4.2. Factor de corrección (F) para medición de conductividad eléctrica.....</i>	86
<i>Tabla 4.3. Factor de corrección por temperatura.....</i>	93
<i>Tabla 4.4. Características del suelo por la CICT.....</i>	97
<i>Tabla 5.1 Resumen de características de los diseños de columnas.....</i>	108
<i>Tabla 5.2 Propiedades físicas de los suelos.....</i>	110
<i>Tabla 5.3 Propiedades químicas e hidráulicas de los suelos.....</i>	110
<i>Tabla 5.4 Principales propiedades de los compuestos seleccionados.....</i>	111
<i>Tabla 5.5 Numero de columnas.....</i>	113
<i>Tabla 5.6 Características de las columnas.....</i>	118
<i>Tabla 5.7 Balance entre las dos opciones de columnas.....</i>	123

PRÓLOGO

PRÓLOGO

Los últimos estudios relativos a la cuantificación de los recursos hídricos reportan que la cantidad de agua en la Tierra se mantiene constante; sin embargo, la calidad se deteriora y el agua utilizable por el ser humano se ha reducido en gran medida, pues la población humana ha aumentado drásticamente, y por lo tanto ha crecido también la necesidad que tenemos de este recurso, lo que en pleno siglo XXI nos ha llevado a enfrentar una importante crisis mundial de recursos hídricos (UNAM, 2003).

De acuerdo a cifras del Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) en el mundo, más del 40 % de la población mundial carecen de saneamiento básico y más de 1,000 millones de personas siguen utilizando para beber fuentes de agua no aptas para el consumo, además, dentro de los próximos 50 años la población mundial se incrementará en un 40 a 50 %, este crecimiento poblacional y aunado a la industrialización y la urbanización ocasionará serios problemas para el medio ambiente. (Guerrero, M. V., 2006).

Los recursos hídricos son un elemento fundamental para el desarrollo equilibrado de cualquier nación. Sin embargo, la compatibilidad de las actividades humanas con esta realidad es un proceso que reviste una gran complejidad, es por ello una temática que carece históricamente de un análisis y planeación adecuados desde una perspectiva integrada y bajo la consideración de horizontes temporales de corto, mediano y largo plazos, hoy en día, la escasa disponibilidad de los recursos hídricos, así como su destrucción gradual y su creciente contaminación, obliga a que se lleve a cabo una planificación y una ordenación integrada de los recursos hídricos.

El concepto de gestión integrada de recursos hídricos es un proceso constituido por un conjunto de acciones gerenciales de orden técnico, administrativo, legal, financiero y económico, se basa en que el agua es parte de los ecosistemas, es un recurso natural, un bien social y bien económico cuya cantidad y calidad determinan su uso, puede ser entendido como el desarrollo y la gestión coordinados del agua, el suelo y los recursos relacionados para optimizar el bienestar económico y social, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales, se considera que el desarrollo es sustentable cuando satisface las necesidades de la presente generación sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para que satisfagan sus propias necesidades.

La preocupación a nivel internacional por el recurso hídrico ha convocado a varios foros internacionales, recientemente, el IV Foro Mundial del Agua se celebró en la Ciudad de México en marzo de este año, cuyo eje rector fue: "Las acciones locales para un reto global", todo ello con el fin de alertar a la comunidad sobre la urgencia de cambiar el enfoque con el que tradicionalmente se han venido administrando los recursos hídricos, es decir, respondiendo a la demanda de manera fraccionada, con muy poca planificación y escasa información histórica sobre el comportamiento de los recursos y el crecimiento de las actividades económicas y de población que la demandan.

Es evidente el estrés de los recursos hídricos por la demanda y deterioro de su calidad que enfrentan algunos países en las distintas regiones del mundo, en consecuencia, desde su creación en el año 2000, el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) ha prestado apoyo para la elaboración de 17 estudios de casos en 41 países, entre los que se encuentra: el de “Gestión sostenible del agua urbana en el Estado de México” (http://www.unesco.org/water/wwap/index_es.shtml), esta es una zona de gran influencia e importancia, pues, buena parte de su desarrollo esta inmerso en el Valle de México el cual ocupa menos del 0.5 % del territorio nacional, concentra el 20% de la población del país y genera una tercera parte del PIB nacional (CONAGUA, 2004).

A pesar de que en México se reconoce al agua como recurso estratégico, asunto de seguridad nacional y se ha convertido en elemento central de la política ambiental todavía no tenemos una cultura de aprovechamiento de recursos; la descarga del agua que utilizamos indiscriminadamente con productos tóxicos de lenta y costosa degradación, o simplemente, porque la dejamos ir sin provecho se devuelve al cauce de los ríos conteniendo un sinfín de contaminantes que provocan serios daños a los cuerpos de agua y a los suelos.

No es posible sufragar permanentemente el costo económico, social y ambiental de abastecer a las grandes urbes con escurrimientos superficiales importados desde enormes distancias, agotar los acuíferos o alterar la calidad de las aguas rebasando límites de renovación natural ó económicamente factibles.

Tampoco es posible enfrentar el problema del agua como si la disponibilidad del recurso fuera ilimitada y gratuita, las carencias, que serán cada vez más en esta materia, nos obliga a reflexionar, investigar y practicar más y mejores formas de proteger y economizar el recurso vital, de tratar la ya utilizada y de potabilizar a bajos costos el agua salada.

La ingeniería civil, conocedor de esta realidad desde hace tiempo, tiene la gran responsabilidad junto con otras disciplinas de ayudar a la población a tomar conciencia de que la vida de nuestro planeta y el desarrollo socioeconómico dependen principalmente de que aprovechemos de manera más racional el agua.

He aquí un reto para los ingenieros y un compromiso con nuestra descendencia y con el lugar que habitamos, ya no podemos darnos el lujo de desperdiciar ni una gota pues los conflictos por el agua se dan actualmente sólo entre regiones, pero es muy posible que la necesidad de este recurso desencadene en parte las guerras del futuro (UNAM, 2003).

El primer paso para mitigar esta terrible situación y hacer posible un aprovechamiento sostenible del agua, es poseer el conocimiento de las causas que originan su escasez, así como de las principales herramientas para corregir el problema, la tarea consiste en trabajar con otros especialistas y la sociedad para buscar las sinergias del conocimiento y recursos y resolver este gran reto del siglo XXI.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El cambio de uso del suelo de áreas verdes a actividades productivas representa una alteración para la recarga de mantos acuíferos y la disponibilidad de aguas superficiales, tanto por la deforestación inherente y la disminución en la capacidad de infiltración en el suelo, como por la pérdida de acuíferos aptos para la extracción sustentable del recurso, además del incremento en la demanda de agua que este cambio implica (SEMARNAT, 2002).

La infiltración de aguas residuales sin tratamiento, especialmente de aquellas que contienen sustancias tóxicas y compuestos orgánicos persistentes como: metales pesados, grasas, aceites, derivados de combustibles, solventes industriales, así como miles de microorganismos que son liberados en la superficie y migran o se desplazan hacia el subsuelo, está provocando la contaminación de los acuíferos en un proceso lento pero constante y cuyo control presenta muchas dificultades (CNA, 2001).

México es uno de los países con mayor experiencia en la irrigación con aguas negras, desde 1890 el agua residual producida en el Valle de México es enviada a través de conductos artificiales al Valle de Tula, ubicado en el estado de Hidalgo, donde es empleada sin tratamiento, para irrigación agrícola de más de 90,000 ha de cultivo (OMS, *et al.*, 1996).

El Valle de Tula tiene una importancia histórica como sistema de riego con aguas residuales actualmente, por sus elevadas láminas de riego, 1.78 m/año , y su distribución en canales sin revestir se ha producido una recarga artificial del acuífero de Tula de alrededor de 13.3 veces más que la recarga natural (Jiménez *et al.*, 2000). Esto ha traído como consecuencia la elevación del nivel freático y la aparición de nuevos puntos de descarga a la superficie en forma de manantiales (Jiménez *et al.*, 1999). El agua infiltrada que proviene del riego con aguas negras de la Zona Metropolitana de la ciudad de México (ZMCM), es usada como la única fuente de suministro local de 450 mil habitantes del Valle de Tula, recibiendo como único método de tratamiento la adición de cloro. Ello a pesar de que diversos estudios demuestran la presencia de algunos contaminantes no considerados en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA -1994, que pueden afectar la salud de la población (Cifuentes, *et al.*, 1994; OMS, *et al.*, 1996; Jiménez, *et al.*, 1999).

Resultados preliminares realizados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, establecieron que la calidad del agua de los manantiales y pozos es por mucho de mejor calidad que el agua residual utilizada en el riego (Jiménez *et al.*, 1999), esto porque durante el recorrido del agua residual a través del suelo se remueven o transforman gran parte de los contaminantes, el suelo funciona como un sistema depurador natural por su capacidad de degradar o inmovilizar los contaminantes y exhibe al Valle de Tula como un tratamiento de infiltración natural no convencional.

Al tratamiento de infiltración natural del suelo se le conoce como Tratamiento Natural Suelo-Acuífero (*Soil Aquifer Treatment* ó *SAT*) (Metcalf y Eddy, 1996) y se caracteriza por ser un proceso de depuración de agua residual al aplicarla en forma directa al suelo. Los sistemas *SAT* han sido empleados en otros países y su aplicación va en aumento, sin embargo, es un tema relativamente nuevo en México, aún no se cuenta con información suficiente para su diseño y operación, además se debe considerar que cada caso es diferente pues su capacidad de remover contaminantes depende de las características del lugar en el que opera.

Actualmente, se cuenta con un estudio de factibilidad que muestra la viabilidad de un proyecto para aprovechar 7.5 m³/s (1.5 m³/s para abastecimiento local y 6 m³/s para la ZMCM). Este estudio necesita profundizarse, considerando el desempeño de las áreas de riego y sus acuíferos subyacentes, se trata de un proyecto de recarga controlada y reuso intensivo del agua residual. Pero se requiere continuar con estudios detallados de este proceso, con el fin de mejorarlo y volverlo más eficiente. (CONAGUA, 2005).

Para conseguir un manejo adecuado y preservación de los sistemas de irrigación con aguas residuales se requiere conocer la hidrogeología, la calidad del agua, los procesos de infiltración, el movimiento y transformación natural de los contaminantes, pues la combinación de la capacidad de almacenaje del suelo, por un lado, y la entrada de productos químicos al mismo, por otro, determina el tipo de la respuesta medioambiental.

Entre las formas de conocer el comportamiento de un sistema *SAT* en cuanto a la remoción de sus contaminantes se encuentran los ensayos de laboratorio en columnas empacadas con muestras de suelos representativos de la zona de estudio. Dichas columnas se deben diseñar para simular condiciones cercanas a las reales, por lo que se debe tomar en cuenta aspectos climatológicos, poblacionales, uso de suelo, tipos de parcelas y cultivos, caracterización en suelos, tipo de aguas residuales y subterráneas de la zona entre otros.

Es a partir de lo antes mencionado donde radica la importancia de esta tesis, puesto que dará herramientas para realizar una serie de estudios en pruebas piloto con la finalidad de determinar la capacidad que presenta el suelo para adsorber compuestos orgánicos, que son uno de los contaminantes de mayor importancia.

Por ello, el objetivo de este estudio fue encontrar el diseño de las columnas más conveniente y establecer su uso en discontinuo con base en las condiciones específicas del proyecto. Es necesario plantear las características de las columnas, los dispositivos necesarios y establecer la distribución para su buen funcionamiento, además fijar el modo de operación, especificar el volumen de efluente y los periodos para agregarlo y los periodos para recolectar los lixiviados.

La meta es que las columnas sean capaces de lograr resultados confiables que puedan analizarse para evaluar la remoción de los contaminantes, estimar los impactos potenciales y planificar las actividades permitidas y prohibidas en cada tipo de medio.

En el proyecto los aspectos tiempo y costo fueron obviamente decisivos en el desarrollo y avance del trabajo, por lo que el alcance de esta tesis fue sólo plantear el diseño apropiado, el ensamble y manejo de las columnas, así como la recolección del lixiviado e interpretación de los resultados serán temas de trabajos posteriores.

Los resultados obtenidos apoyarán a futuros proyectos de tratamiento y reuso de agua residual en México; ya que una vez conocido el funcionamiento ayudará a tomar medidas y definir estrategias para manejar el Valle de Tula como un *Sistema de Tratamiento Natural* en condiciones controladas y consecuentemente, proteger y evitar que los suelos se saturen y dejen de cumplir con su función depuradora aumentando el riesgo de contaminar los acuíferos con concentraciones peligrosas de sustancias que pondrían en riesgo la salud de los usuarios de los manantiales y pozos que la utilizan como fuente de agua potable y prevenir un posible desastre ambiental o sanitario ayudando así, a sentar las bases para el desarrollo de este tipo de sistemas de tratamiento práctico, eficiente, económico y estratégico para proteger los recursos hídricos en las zonas de riego.

La presente tesis esta estructurada en seis capítulos, iniciando con un resumen del trabajo. El primer capítulo contiene los antecedentes, en él se ofrece una descripción del área de estudio así como la situación del reuso en el DR 003, se explican los efectos, la problemática, las ventajas y desventajas de esta medida, además hace una comparación entre las características del agua residual y del agua de pozos ubicados en la zona.

El segundo capítulo presenta la revisión bibliográfica acerca de la importancia del tratamiento natural suelo-acuífero, se analizan las características del agua y sus mecanismos de tratamiento, los tipos de SAT, las eficiencias que presentan, las propiedades del suelo que influyen en su capacidad depuradora y las consideraciones importantes para su diseño.

El tercer capítulo exhibe el proyecto del Valle de Tula, reúne los trabajos que se han realizado con columnas, se resumen los mecanismos que utilizaron, los resultados y las conclusiones a las que llegó cada autor, se detallan los puntos necesarios para el diseño del mecanismo, se justifica el proyecto y se determinan los objetivos y alcances de la tesis.

El cuarto capítulo expone la metodología que se estableció para determinar todos los puntos que se consideraron: las características de las columnas, el muestreo y las técnicas que fueron montadas para la caracterización de los suelos, las propiedades de los compuestos orgánicos que se estudiaron y se indica el montaje y modo de operación adecuados para la simulación del SAT del Valle de Tula. El quinto capítulo presenta los resultados y la discusión de los mismos. Se explican los fundamentos de cada etapa y los productos y logros finales y por último, en el sexto capítulo se incluyen las conclusiones obtenidas y las recomendaciones.

Adicionalmente, se presentan un glosario para un mejor entendimiento de la tesis, que explica algunos términos que pueden causar confusión y la bibliografía consultada como apoyo para la realización de la tesis.

RESUMEN

RESUMEN

El Valle de Tula localizado en el estado de Hidalgo, funciona como uno de los ejemplos de reuso más importante a nivel mundial. Sin embargo, es indispensable lograr el desarrollo de los sistemas de tratamiento de las descargas del Valle de México, con el fin de garantizar condiciones sanitarias adecuadas para el reuso agrícola y contribuir a la preservación de la calidad del agua infiltrada. Con la potabilización adecuada del agua de estos acuíferos y su reuso para fines urbano-domésticos se estaría consiguiendo un extraordinario sistema de reuso intensivo y reciclaje (CONAGUA, 2005).

Comparados con otros estudios los ensayos en columnas de suelos son una forma ventajosa, cómoda y económica para estudiar la remoción de compuestos orgánicos en suelos y su capacidad para llevar a cabo el proceso de adsorción y estimar un tiempo de saturación (vida útil) de los mismos.

Esta tesis aborda la parte teórica del ensayo en columnas experimentales, no obstante el aporte al proyecto es trascendental puesto que el presente trabajo es un primer acercamiento al estudio del SAT en México.

La tesis establece el diseño de columnas experimentales de suelo para efectuar ensayos que simulen el SAT en el laboratorio y que sirva de base para conocer el comportamiento del suelo como depurador de agua residual.

Los resultados de las pruebas de laboratorio ayudarán a determinar si los compuestos orgánicos están presentes en agua residual, suelo y agua de abastecimiento, y averiguar si limitan el buen funcionamiento del SAT, con lo que se puede modificar la reglamentación para restringir su presencia y su límite máximo permisible en aguas empleadas para riego y también serán útiles para establecer criterios de manejo de las zonas de riego y tomar las medidas necesarias para que opere como un SAT controlado.

Se inició describiendo las condiciones y aspectos que se presentan actualmente por la utilización de agua residual en riego en el Valle de Tula y más específicamente en el DR003.

A continuación se hizo una revisión de la bibliografía acerca del SAT, de sus ventajas y desventajas y los requerimientos para su diseño, acompañado de una explicación relativa a la influencia de las propiedades del suelo en su desempeño.

Posteriormente se elaboró un análisis profundo de trabajos anteriores sobre simulaciones de columnas en laboratorio, comparando los atributos de las columnas, condiciones iniciales, el desarrollo, los beneficios y los resultados de cada autor con el objetivo de establecer cuales tienen similitud con el proyecto y servirían de apoyo para el diseño de las columnas.

Entre los compuestos orgánicos presentes en el agua residual que se aplica para irrigación del DR003 se eligieron el Butilbencil ftalato y el Di-2-Etil Hexil ftalato, por su peligrosidad y por su afinidad al suelo, estos ftalatos se aplicarán como agua sintética con una dilución y volumen específico.

En la elección de cada uno de los atributos, de acuerdo a las restricciones del proyecto, primeramente se seleccionó el vidrio, como material, por la naturaleza de los compuestos orgánicos que se estudiarán, después las dimensiones de 45 centímetros de largo y 3 de diámetro interior para garantizar una muestra representativa con una profundidad de 30 centímetros del suelo y el paso de contaminantes.

Se recolectaron muestras de suelo Vertisol y Leptosol y la caracterización se realizó con técnicas adecuadas montadas en el laboratorio.

Finalmente se eligieron los dispositivos de entrada y salida, y se estableció el montaje de las columnas más adecuado. Se estipuló el modo de operación de las columnas, ello se logró examinando las condiciones y particularidades de la zona de estudio.

ANTECEDENTES

1 ANTECEDENTES

Desde 1940 el Valle de Tula ha sido analizado por diversos investigadores con diferentes enfoques y para distintos fines estudiando aspectos sociales, sanitarios, políticos, económicos, de población, de flora, fauna, clima, suelos, recursos naturales, etc. Sin embargo, con la transformación de algunas zonas áridas en Distritos de Riego con agua residual se han interesado en los últimos años también en los efectos benéficos como aporte de materia orgánica y nutrientes para el suelo y en el impacto ambiental y a la salud que pudieran presentarse en el lugar con la presencia de patógenos y metales pesados como consecuencia de esta medida (PAOT, 2004).

Por ello a continuación se describen algunos aspectos generales del Valle de Tula y la correlación que lo vincula con la ZMCM, así como las ventajas y desventajas de esta conexión.

1.1 Descripción de la zona de estudio

1.1.1 Panorama Regional

En la Figura 1.1 se observa la zona de estudio, la cual pertenece a la mesorregión 3 Centro; a la región hidrológico-administrativa XIII Valle de México y a la subregión Valle de Tula (CNA, 2001).

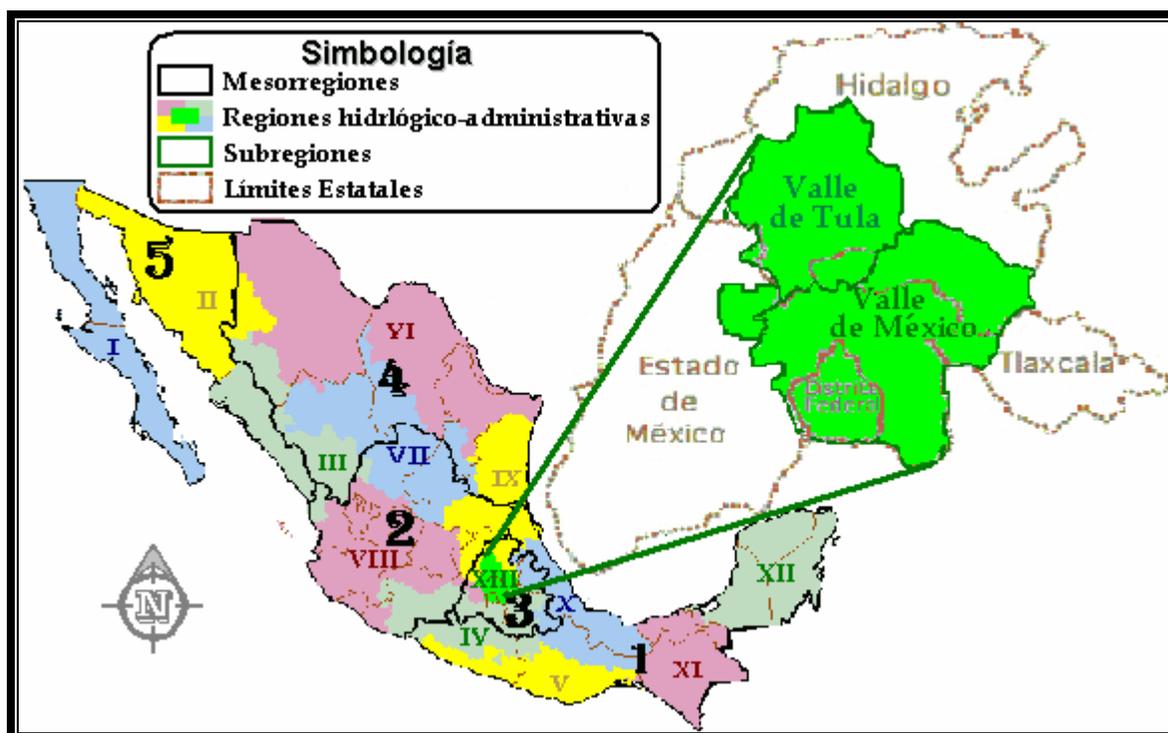


Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio

La Subregión cuenta con 3 Distritos de Riego: el Distrito de riego 003 (DR 003 Tula); el Distrito de riego 100 (DR 100 Alfajayucan) y el Distrito de riego 112 (DR 112 Ajacuba); aunque el DR 003 Tula es el más importante y por ello se realiza una descripción general (CONAGUA, 2005a).

1.1.2 Localización Geográfica y Política

El DR 003 se ubica en el Valle de Tula o Valle del Mezquital, como se denomina coloquialmente, al centro suroeste del estado de Hidalgo, situado en lo alto de la meseta mexicana a 90 km. al norte de la Ciudad de México y 70 km. de la Ciudad de Pachuca, entre los paralelos 19° 40' Y 20° 29' de latitud norte y los meridianos 99° 27' y 99° 57' de longitud oeste, con una altitud media de 1985 m sobre el nivel del mar (Jiménez, *et. al.*, 1999).

En la Figura 1.2 aparecen los municipios que comprenden el DR 003-Tula son 17: Actopan, El Arenal, Ixmiquilpan, San Salvador, Francisco I. Madero, Santiago de Anaya, Mixquiahuala de Juárez, Progreso de Obregón, Chilcuautla, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tepetitlán, Tetepango, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Tula de Allende (CNA, 2004a).

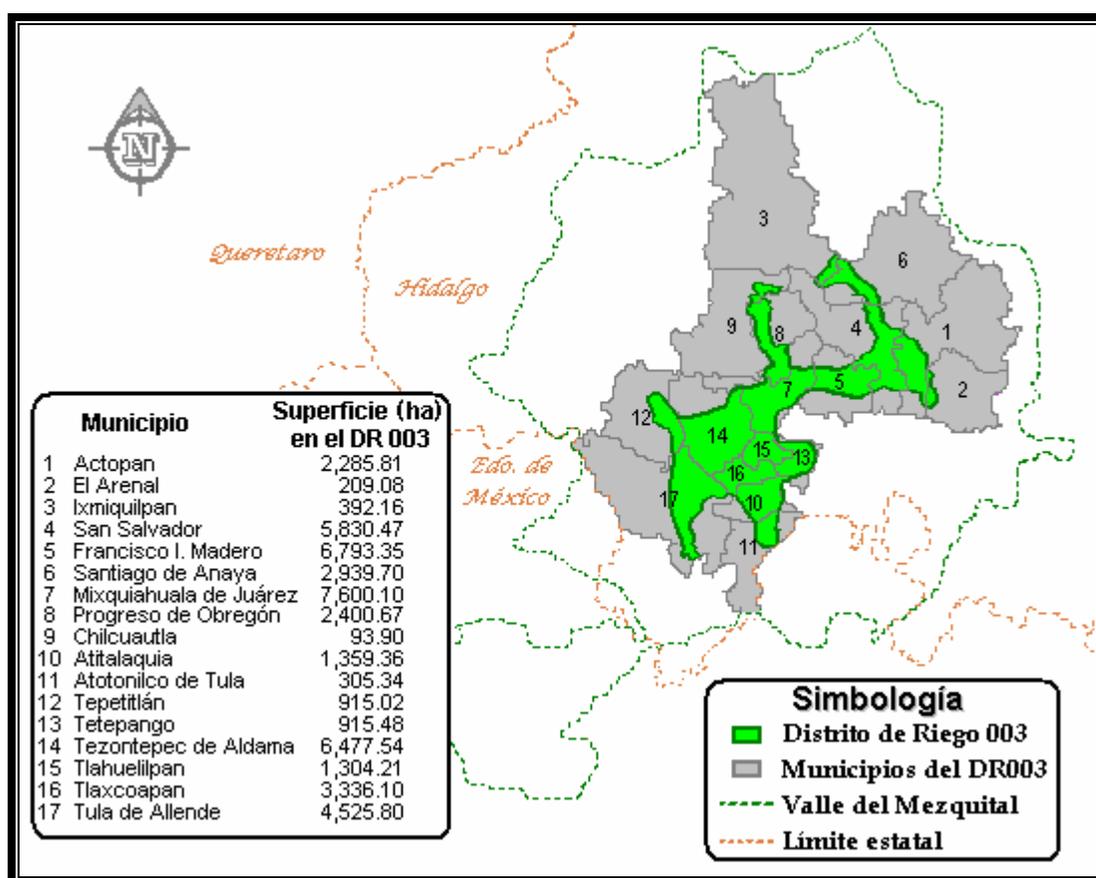


Figura 1.2. Ubicación del Distrito de Riego 003 Tula

1.1.3 Superficie, límites y accesos

La extensión del DR 003 es de 51,425.23 ha, representado en la Figura 1.3; limita al norte con el Valle de Ixmiquilpan, el poblado del mismo nombre y los cerros San Miguel, Tepatepec y Gaxido; al este, con el Valle y la sierra de Actopan; al sur con los cerros El Gorrión y Mexe y los poblados Atotonilco de Tula y Ajacuba y finalmente al oeste con la sierra Xinthe (CNA, 2004a).

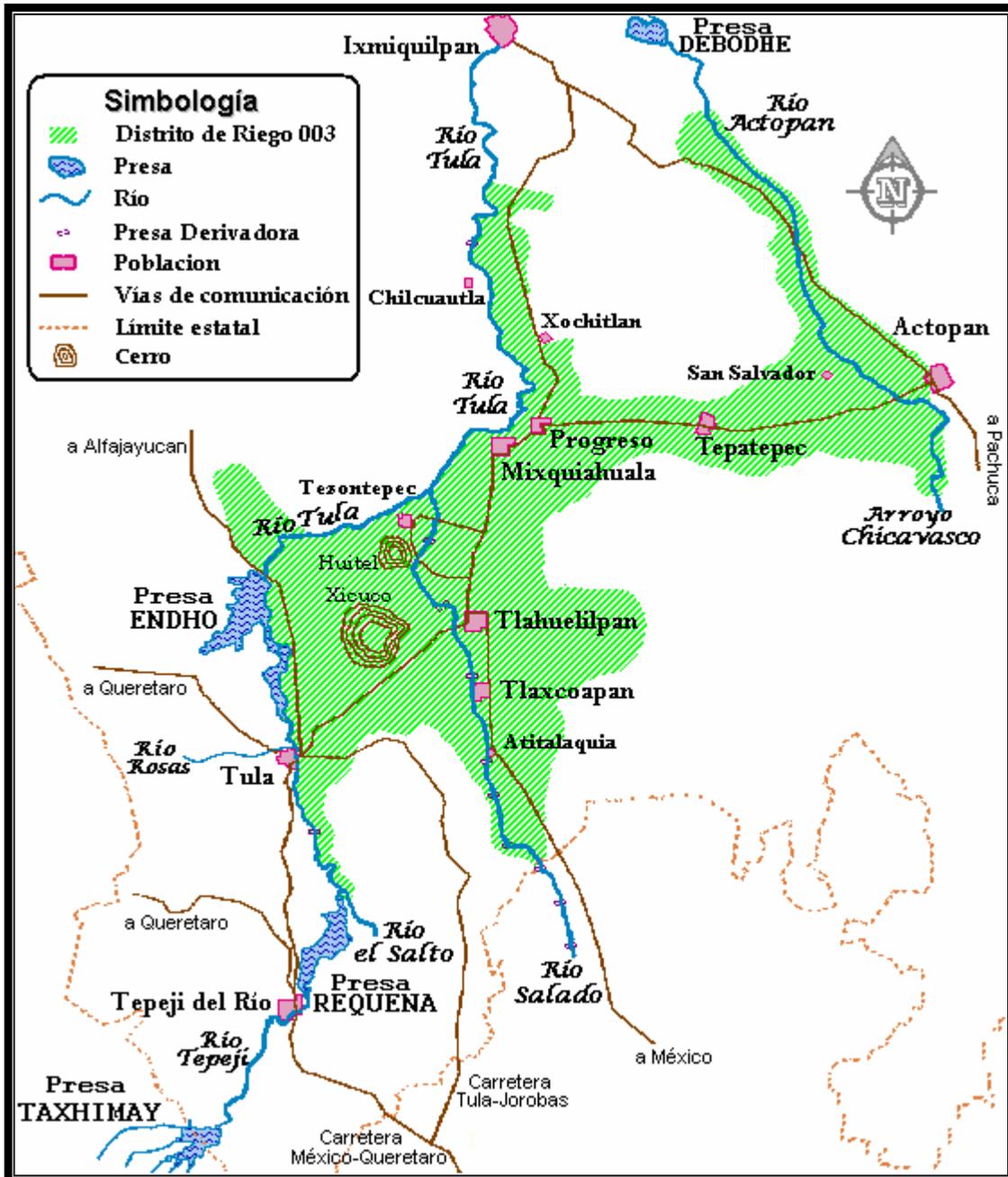


Figura 1.3. Área del Distrito de Riego 003, Tula

El acceso a la zona de estudio es por: la carretera federal No. 85 México-Laredo, que une a los poblados de El Arenal-Actopan, Lagunilla e Ixmiquilpan, que hacia el sur permite la comunicación con la ciudad de Pachuca y la ciudad de México y hacia el poniente permite comunicación con la ciudad de Tula. Por otro lado la carretera estatal que une las carreteras México-Querétaro con la anterior, y comunica los poblados de Tula, Tlahuelilpan, Mixquiahuala y Tepatepec; además de incorporarse caminos pavimentados, de brecha y terracería que unen a todos los poblados. Actopan cuenta con un pequeño aeropuerto que permite comunicación con cualquier lugar en el estado de Hidalgo y estados vecinos.

Por otra parte se cuenta con vías de ferrocarril, como la línea México-Nuevo Laredo, que cruza de este a oeste la zona, pasando por Tula y lo une con la ciudad de Pachuca y la línea México-Guadalajara que cruza en la parte Sur (Silva de la R., 1996).

1.1.4 Población y Actividades Económicas

De acuerdo con el censo del INEGI en la región había aproximadamente 502,347 habitantes en el año 2000. La situación geográfica del DR 003 y su cercanía a la capital de la república le han beneficiado en el aspecto económico, lo que se traduce en avance industrial y agrícola.

Existen dos actividades preponderantes que regulan a la población económicamente activa: la agricultura y la industria; el 61.3% se dedica a la agricultura, la industria absorbe al 15.8% del total de los trabajadores; de esta cifra, poco más de la mitad se concentra en actividades mineras y en la construcción de equipo y material de transporte. El comercio brinda oportunidades de empleo a 5.7% del total de los trabajadores; los servicios, a 11.6% y las actividades no específicas, a 5.6% (CNA, 2004^a). Los polos de desarrollo se ubican principalmente en Tula de Allende, donde se localizan industrias de transformación, extractivas, de construcción y maquiladoras, siendo las más importantes la Termoeléctrica, la Refinería Petrolera de Tula, las cementeras Cruz Azul y Tolteca (CEPIS, 2002).

En lo que respecta a la agricultura en gran parte de la zona se cultiva alfalfa con rendimientos superiores al promedio nacional. Productos importantes son también maíz, trigo, frijol, avena forrajera, jitomate, calabaza y chile. Existen actividades complementarias de menor importancia como la fruticultura en la cual destaca la producción de durazno, higo, tuna y maguey. En lo referente a ganadería el Valle del Mezquital no sobresale en esta actividad, excepto quizás en bovino de carne y leche, porcino, caprino y aves de corral. Asimismo, en manantiales de San Salvador existe una acuicultura incipiente (Silva de la R., 1996).

1.1.5 Fisiografía

De acuerdo al esquema de regionalización del INEGI la región de estudio pertenece al eje Neovolcánico, la principal planicie del DR 003 es el Valle de Tula-Actopan el cual abarca casi la totalidad de la zona de riego. Se inicia en la ciudad de Tula, con 2030 msnm de altura descendiendo suavemente hasta el poblado de Mixquiahuala con 1999 msnm (Jiménez, *et. al.*, 1999).

Se encuentra limitado al norte por la sierra de San Miguel de la Cal, al oeste por la sierra de Xinthe, al este por la sierra de Pachuca, al sureste por la sierra de Chicvasco y al sur por los lomeríos de Tepeji del Río.

Existen sierras aisladas como la de San miguel de la Cal, que abarca una superficie aproximada de 18 km², siendo este cerro el de mayor elevación con 2800 msnm, dentro del Valle. Esta sierra separa el Valle de Actopan, el de Ixmiquilpan y el de Tula.

La Sierra Xinthe alcanza una altitud máxima de 2700 msnm. El Valle tiene una dirección noroccidental y escurren sus aguas al Río Tula (Jiménez, *et. al.*, 1999).

1.1.6 Edafología

El 75% de los suelos son de ladera, montaña y planicie. El 89% son franco arenoso someros a ligeramente profundos, 10% son arcillosos y 1% franco arenoso profundos de Vega.

El DR 003 se compone por 6 tipos de suelos que se distinguen en la Figura 1.4 y son: a) Rendzina, b) Vertisol pélico, c) Feozem háplico y d) calcárico, e) Leptosol y f) Fluvisol.

En general, se puede considerar tres zonas representativas (Jiménez, *et. al.*, 1999) que a continuación se describen:

Zona Actopan: Predominan los suelos fluvisoles y feozem háplico, localizados en las vegas de los ríos de la región, son profundos llegando hasta 200 cm. La textura dominante es gruesa por lo que es mala para la agricultura, la topografía es plana con drenaje superficial rápido e interno deficiente y los suelos son jóvenes. El suelo superficial coincide con la capa arable (cultivable) la cual presenta rico contenido de materia orgánica, puesto que proviene del desarrollo de raíces y residuos de cosechas, la textura es franco y aunque es buena para la agricultura, la capa tiene 27 cm. de profundidad lo cual provoca que las raíces de los cultivos que están entre 60 y 180 cm., no logre absorber los nutrientes; puesto que llegan al subsuelo donde hay una mala textura y un contenido pobre de materia orgánica.

Zona Progreso: Predominan los suelos feozem calcáricos y leptosoles localizados en las lomas de los cerros. Son de poco espesor; topografía inclinada; textura media y fina; drenaje superficial muy rápido e interno difícil. En esta zona, también el suelo superficial coincide con la capa arable y es de una profundidad de 20 cm. con textura franco arenosa y un contenido medio de materia orgánica. Es un suelo difícil para la agricultura ya que tanto raíces como el agua tienen problemas para atravesar la capa del subsuelo, por estar formada de calizas.

Zona Tepatepec: Predominan los suelos vertisol pélico y feozem. Con una profundidad entre 50 y 150 cm., textura media a fina; topografía plana o inclinada; drenaje superficial moderado e interno deficiente; son suelos desarrollados o maduros; la capa arable se encuentra igual que las anteriores, mide 25 cm., la textura es migajón, pobre contenido de materia orgánica; la capa del subsuelo tiene la misma textura que la superior y la cantidad de materia orgánica es muy pobre.

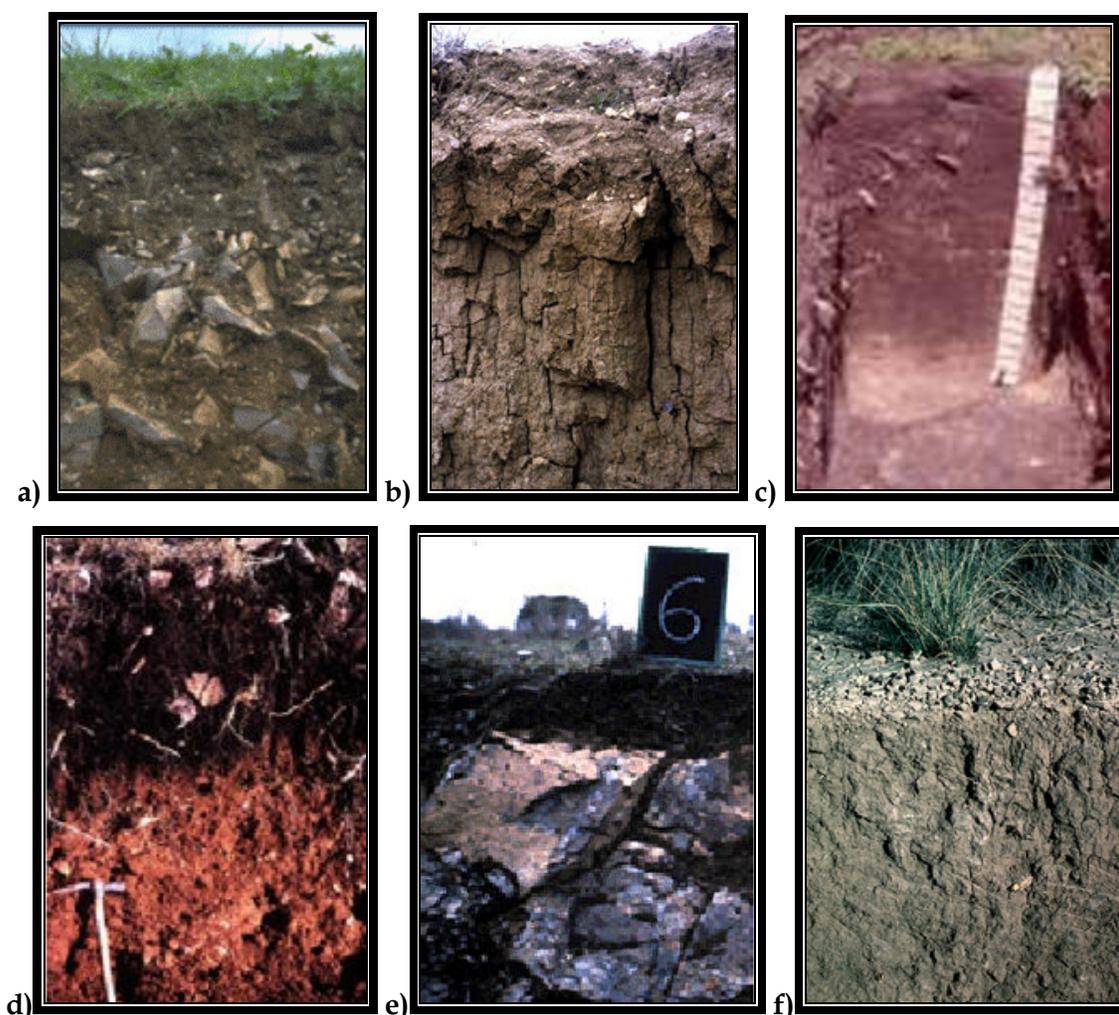


Figura 1.4. Tipos de suelo del Distrito de Riego 003 Tula

1.1.7 Geología

La zona de estudio esta formada por un Valle dividido por serranías, cerros separados y aislados. La mayor parte de estas elevaciones están constituidas principalmente por rocas volcánicas y rocas sedimentarias marinas. Las rocas sedimentarias marinas son, de abajo hacia arriba: la formación el Doctor del Cretácico Inferior (calizas), las formaciones Soyatal y Cuautla del Cretácico Superior (calizas y capas de arcilla) y la formación Mexcala del Cretácico Superior (limonitas, lutitas, calizas y areniscas). El Terciario está representado por rocas clásticas continentales y volcánicas, mientras que el Cuaternario por rocas volcánicas procedentes de derrames basálticos, aluviones y material clástico (Jiménez, *et. al.*, 1999).

1.1.8 Clima

El clima que prevalece es BS1kw(i)gw''; definido como un clima seco semiárido, templado con lluvias en verano, la temperatura anual varía entre 12° a 18 ° C, el mes más cálido es antes del solsticio de verano; la precipitación anual varía entre 435 y 618 mm. en las diferentes regiones del Valle, y la evaporación es de 1 524 mm. en promedio, que supera los valores de lluvia anual; la zona es deficiente en lluvias y con gran variación de la precipitación de una época a otra, durante el mes más húmedo se registra lluvia en una cantidad por lo menos diez veces mayor que en el mes más seco, la época seca es en invierno y una corta temporada en verano (Jiménez, *et. al.*, 1999).

1.1.9 Uso de suelo

De la superficie que ocupa el DR 003 Tula el 81.80 % es de uso agrícola, el 10.10% de uso forestal y el 8.1% restante de otros como cuerpos de agua, área sin vegetación, zona urbana, caminos e instalaciones. Las actividades agrícolas se ven afectadas por el tipo de pendientes, la profundidad de los suelos y el clima, en el valle de laderas tendidas, lomeríos suaves y colinas esta actividad se lleva a cabo sin ninguna restricción. Las posibilidades de uso pecuario se realizan sin ningún problema en praderas cultivadas, se lleva a cabo el pastoreo de ganado caprino, ovino, bovino de leche y bovino de carne, generando una producción económicamente importante.

La mayor presión sobre este recurso natural no renovable son el cambio de uso del suelo desplazando la vegetación natural por las actividades agropecuarias y por la deforestación, prácticas agrícolas y pecuarias inadecuadas, condición climática, topográfica y edáfica, uso inadecuado de aguas residuales, uso excesivo de agroquímicos, explotación inadecuada de minerales y materiales metálicos y no metálicos y la disposición de residuos sólidos.

1.1.10 Hidrología

El DR 003 hidrológicamente se localiza en la cuenca alta del río Panuco (CONAGUA, 2004) y aprovecha las aguas de tres corrientes de régimen perenne que cruzan la zona con una dirección preponderante de sur a norte y son: los ríos Salado, Tula (con sus afluentes: el Salto, Tepeji, Rosas y Tlautla) y Actopan.

El río Salado recibe las aportaciones de los túneles de Tequisquiac que por el gran canal del desagüe drenan la cuenca cerrada de una parte del Estado de México y recibe las aguas negras de la ciudad de México, continúa hasta Atitalaquia donde se derivan parte de sus aguas hacia el DR 003. Aguas abajo descarga al río Tula a la altura de la localidad Mangas.

El río Tula nace en la Sierra la Catedral e inicia su recorrido con una dirección de N-NW bajo el nombre de río San Jerónimo; al llegar a la presa Taxhimay modifica rumbo y nombre a N-NE y río Tepeji respectivamente, aguas abajo a la altura del poblado del mismo nombre es interceptado por la presa Requena con el fin de controlar las descargas, a partir de este punto cambia de nombre definitivamente por el de río Tula. Durante este trayecto el río El Salto (que lleva este nombre desde la salida artificial del tajo de Nochistongo, en donde toma las aguas negras del Emisor Central) se une al río Tula. Al poniente del poblado de Tula, el río almacena sus aguas en la presa Endhó, después de pasar el poblado de Tezontepec, recibe el aporte más importante constituido por el río Salado, continua hacia el norte y en las cercanías de Ixmiquilpan, se une al río Actopan. El río Tula desemboca al río San Juan en las cercanías de Zimapán y con el aporte del río Hondo, constituye el río Moctezuma. Este río es uno de los afluentes más importantes del río Pánuco, que desemboca en el Golfo de México.

El río Actopan es conocido aguas arriba como arroyo Chicavasco, en las cercanías del poblado de Actopan cambia de nombre por el de río Actopan, continua hacia el noroeste, aguas abajo desemboca a la presa Debohdé y continua hasta unirse al río Tula (Castillo, 1997).

1.1.11 Hidrogeología

Los estudios mencionan la existencia de tres mantos acuíferos (Jiménez, *et. al.*, 1999).

En la región Tula se encuentra el *primer acuífero*, es somero y de profundidad variable, localizado irregularmente en los aluviones cuaternarios de origen fluvial cuya recarga proviene principalmente de las infiltraciones del agua de lluvia, de las aguas de riego y del flujo de agua subterránea, a este acuífero se le considera libre; esta depositado en suelos piroclásticos interrumpido con calizas lacustres, arcillas y arenas.

El *segundo acuífero*, el principal del valle; constituido por basaltos fracturados, situado al sur de Tlahuelilpan con depósitos casi superficiales de arcillas, lo cual provoca un mayor confinamiento, el nivel del agua esta cercano a la superficie, pero hacia el sureste se profundiza por la elevación de la topografía y por haber mayor infiltración debido a que existe material superficial más permeable; abarca también la zona de Mangas, en donde el nivel estático es somero y se encuentra influenciado por los canales y por los ríos Tula y Salado; el acuífero continua al norte de Mixquiahuala, presentando rocas calizas y posteriormente el flujo se desvía al oriente pasando por la región de Tepatepec siguiendo a la región de Actopan; las aguas de este acuífero se encuentran mezcladas con aguas provenientes del riego lo cual hace pensar que la incursión de aguas residuales en el acuífero basáltico se debe a la infiltración a través del acuífero somero.

En la parte de San Salvador se localiza el *tercer acuífero* de calizas cretácicas; la zona de Mangas y San Salvador presenta depresión topográfica por lo que recibe escurrimientos superficiales y descargas subterráneas.

El flujo general es de sur a norte, en el área del río Tula, en el área del río Actopan es de sur y oriente hacia el norte; a la altura de Ixmiquilpan, los ríos determinan el flujo general de las aguas subterráneas (Figura 1.5).

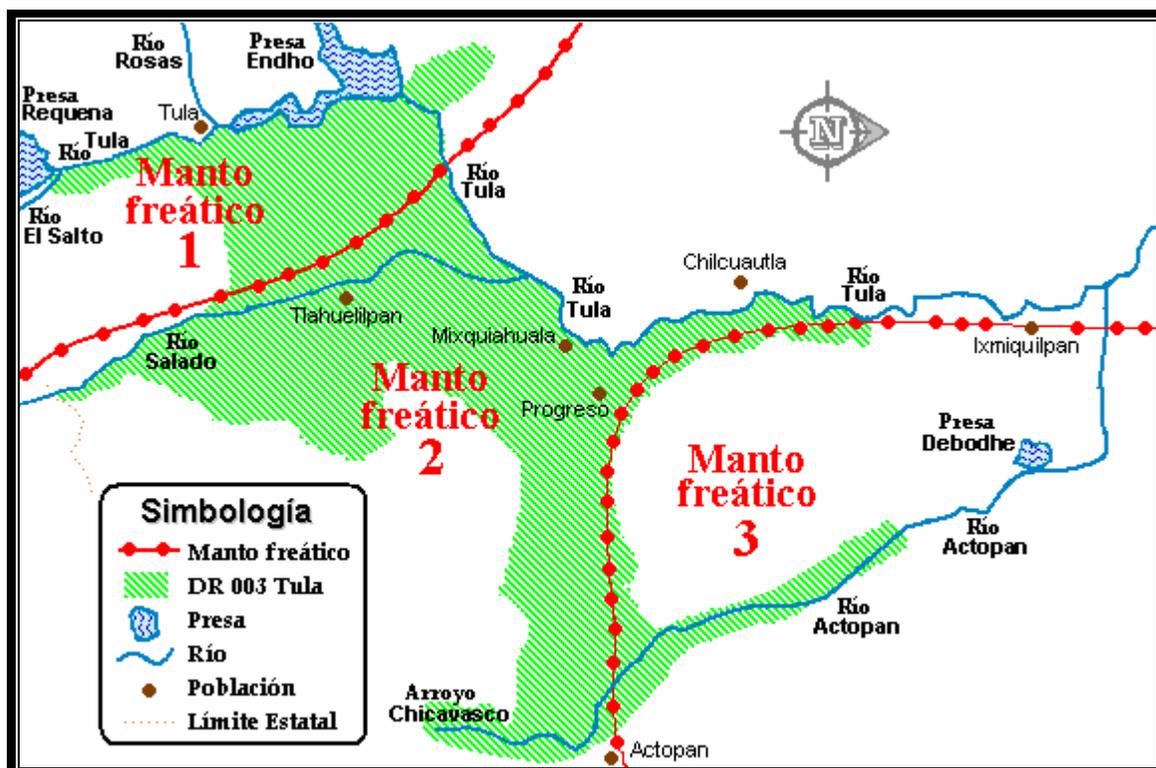


Figura 1.5. Mantos Acuíferos en el DR 003

1.1.12 Balance Hidráulico

Se obtiene de acuerdo con los análisis de disponibilidad de agua superficial y subterránea, la identificación de los volúmenes utilizados por diferentes tipos de usuarios, así como las relaciones hidrológicas entre cuencas y representa la situación actual del agua y su perspectiva a futuro.

La cantidad de agua disponible varía considerablemente de la región Valle de México a la de Valle de Tula, y la población que se asienta en cada una de ellas no necesariamente corresponde con esta disponibilidad. Uno de los indicadores más utilizados en el mundo para detectar posibles problemas de agua, es el que se refiere a la disponibilidad natural media per cápita. En la región XIII, la disponibilidad natural media per cápita se estima en 149 m³/hab/año. En cuanto a las subregiones, existe un contraste en relación con este indicador ya que, mientras que en Tula se tiene una disponibilidad de 1 610 m³/hab/año, en el Valle de México es de tan sólo 84 m³/hab/año, y resulta ser el menor a nivel nacional; para el país es de 4 505 m³/hab/año, como punto de comparación se tiene que en Suiza es de 5 802.2 y en Canadá de 94 373 (CONAGUA, 2005a).

De la Subregión Valle de México (Tabla 1.1) escurren 1,588 millones de metros cúbicos (mill m³) anuales, que incluye aguas residuales y excedentes de lluvia, hacia la Subregión Tula, que se suma al escurrimiento anual vírgen de 850 mill m³. La recarga anual de agua subterránea se estima en 336 mill m³; las extracciones anuales son del orden de 296 mill m³. Se presenta una condición de subexplotación en 40 mill m³ /año (CNA, 2003). En la cuenca de Tula se genera un escurrimiento directo excedente de 780 mill m³ y el retorno de agua residual es del orden de 167 mill m³ por lo que escurre hacia la Región IX Golfo Norte anualmente 947 mill m³ (PAOT, 2004).

Tabla 1.1. Balance Hidrológico anual para la Subregión Tula (volúmenes en mill m³/año)

Escurrecimiento desde el Valle de México	1,588
Lluvia	3,510
Evapotranspiración	1,544
Escurrecimiento vírgen	850
Escurrecimiento excedente	780
Infiltración	336
Extracción de aguas subterráneas	296
Balance	40
Reuso	167
Escurrecimiento aguas abajo	947

1.1.13 Usos del agua

En el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos se establece que la propiedad de las aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponde originalmente a la Nación. Por lo tanto, las aguas nacionales son bienes de dominio público, son intransferibles, imprescriptibles e inembargables.

La explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, sólo podrá realizarse por los particulares mediante concesiones que otorgue el Ejecutivo Federal, de acuerdo con las reglas y condiciones estipuladas en las leyes (CONAGUA, 2004).

La cantidad de agua que las personas utilizan depende no sólo de las necesidades mínimas y de cuánta y que calidad de agua se dispone para el uso, sino también del nivel de desarrollo económico y del grado de urbanización.

En la región de estudio existen tres categorías predominantes del uso de agua: para la agricultura, la industria y público urbano (CNA, 2004).

Anualmente, en el Valle de Tula el agua para los diferentes usos se distribuye como se muestra en la Figura 1.6; 2,438 mill m³, procedentes de la exportación del Valle de México más el escurrimiento virgen, se distribuyen de la manera siguiente: 97 % agricultura, 2.5 % industrial y 0.5 % uso público urbano; los 296 mill m³, derivados de la extracción de aguas subterráneas, en: 26 % agricultura, 15 % industrial y 59 % uso público urbano (CNA, 2003).

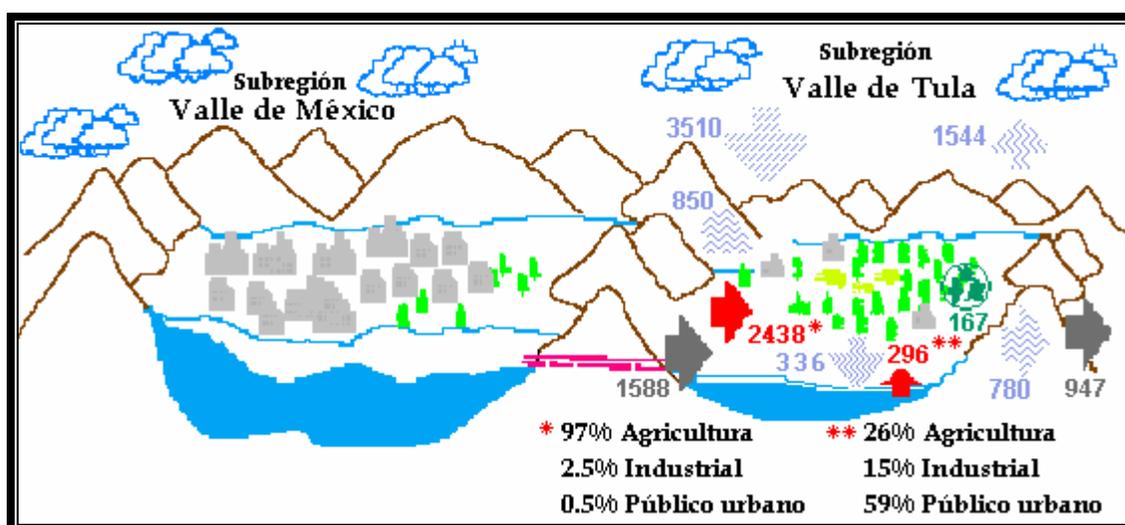


Figura 1.6. Balance hídrico y uso del agua en la subregión Valle de Tula

1.2 Descripción del problema

Cabe destacar que el desalojo de aguas hacia el Valle de Tula tiene su origen en aspectos naturales más que sociales, ya que el desagüe natural del Valle de México (Huehuetoca y el Tajo Nochistongo, 1783) siempre ha sido por gravedad, hacia la región del Valle de Tula. Para finales del siglo XIX la ciudad ubicada en los Valles Centrales, hoy Distrito Federal, seguía padeciendo de inundaciones graves, por lo que en 1886 se inicia el proyecto del túnel de Tequisquiac y Gran Canal de Desagüe (G. E. H., 2002).

Actualmente, el Valle de Tula recibe las aguas residuales de la Ciudad de México, a través de tres conductos artificiales representados en la Figura 1.7: el Emisor Central (1975-1980), el Emisor Poniente (1960-1969) y el Gran Canal (1950-2004); un total de 60 m³/s de aguas, 80% corresponden a las aguas negras y un 20 % proviene de los excedentes pluviales, aunadas a las aguas superficiales de las presas Taxhimay, Requena y Endhó, se utilizan para regar más de 90,000 ha de cultivo en los tres distritos de riego del Valle de Tula (Jiménez y Chávez, 2003).

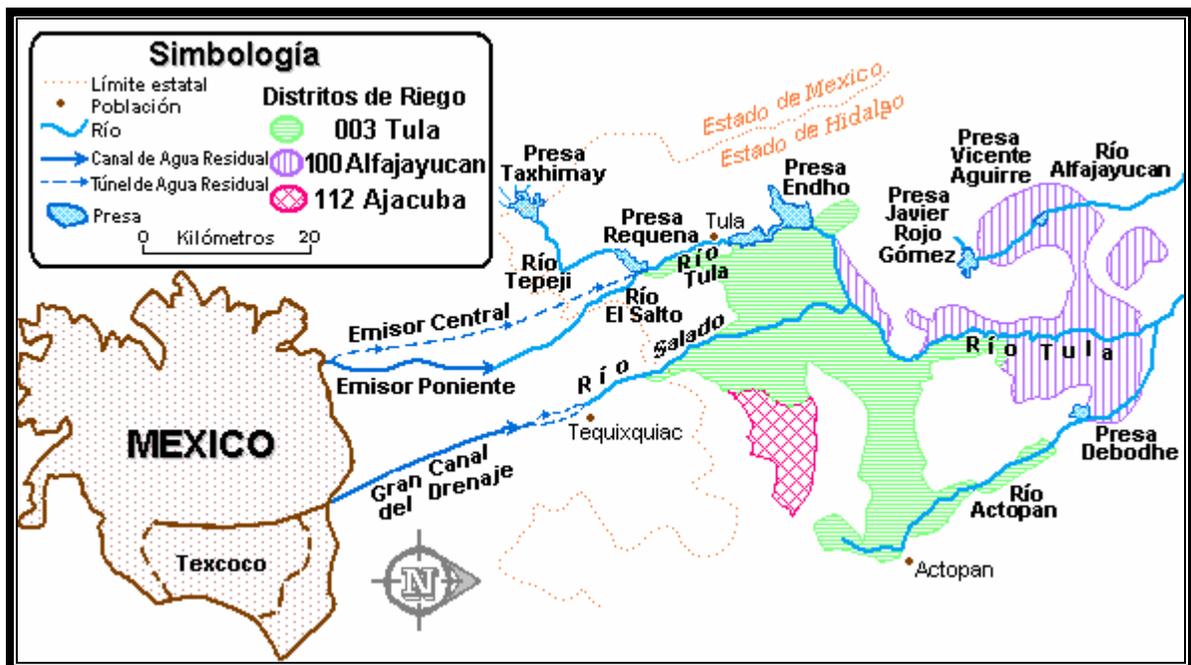


Figura 1.7. Riego agrícola con agua residual de la ciudad de México

A causa de la baja capacidad instalada de tratamiento, la mayor parte del agua se reutiliza sin previo tratamiento. Las zonas de riego funcionan como un gran sistema de purificación natural, con el grave inconveniente de ocasionar problemas de salud pública, al presentarse el flujo de las aguas negras a cielo abierto desde las zonas urbanas del Valle de México hasta las zonas de riego en el valle del Mezquital (Romero, 1997).

1.2.1 Reuso de agua residual en el DR 003 Tula para riego agrícola

En el DR 003, el más importante de los distritos de riego, se irrigan 50,130 ha beneficiando a 32,549 usuarios; el área involucra una serie de embalses y canales (Tabla 1.2); la función de las presas consiste en almacenar y administrar el agua proveniente de los ríos y la de los canales de riego, además de controlar los excedentes.

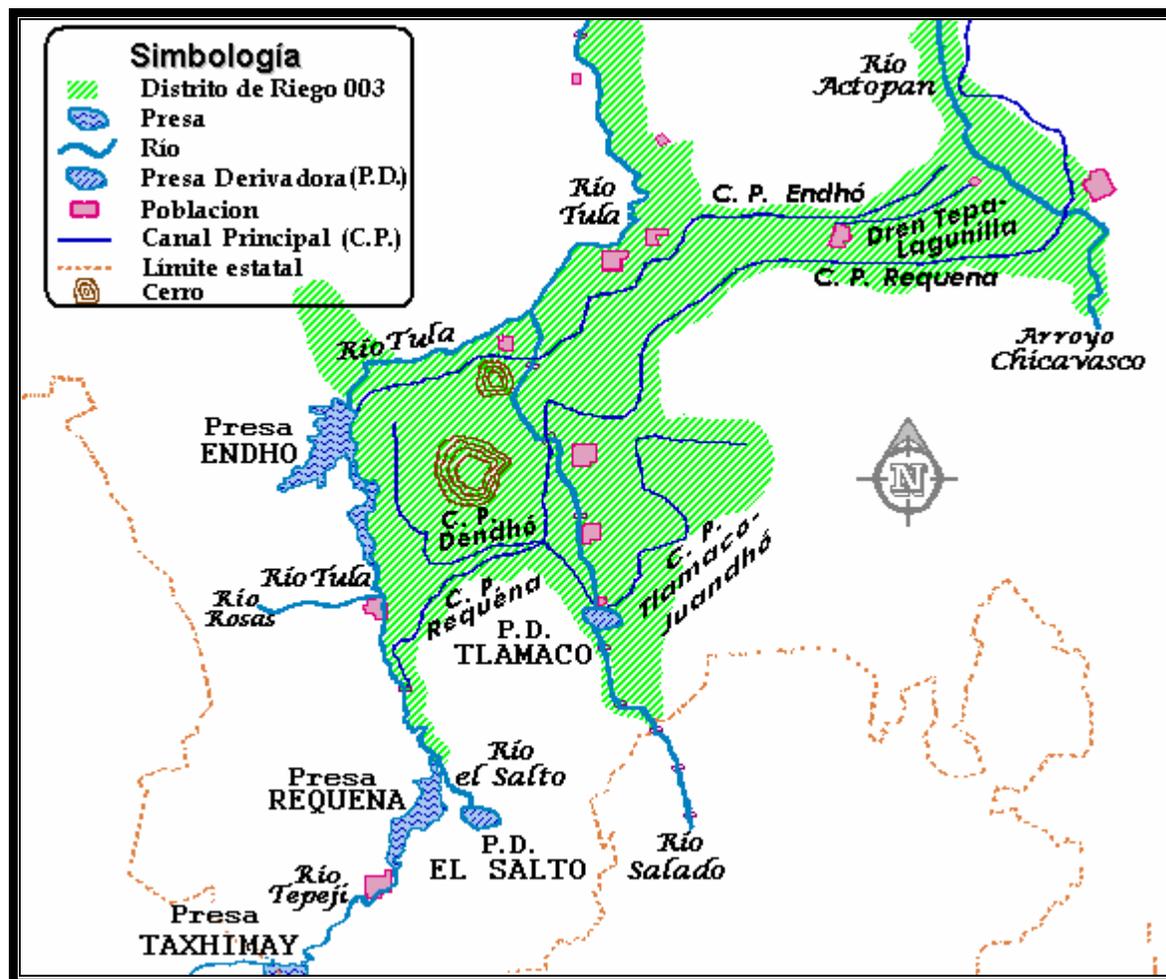


Figura 1.8. Embalses y Canales del DR 003

Tabla 1.2. Embalses y Canales del DR 003

Presa	Capacidad	Volumen anual utilizado m ³
Taxhimay	50,600 hm ³	45'600,000
Requena	95,000 hm ³	37'500,000
Endhó	202,250 hm ³	405'800,000
Derivadora Tlamaco	25 m ³ /s	729'032,000
Derivadora El Salto	50 m ³ /s	64'055,000

Canales		Capacidad m ³ /s	Longitud km.
Primarios	Endhó	15	676.7
	Tlamaco-Juandhó	50	
	Requena	15	
	Dendhó	15	
	Dren Tepa-Lagunilla	15	
Secundarios y Terciarios			564.8

A pesar de que los suelos del DR 003 se pueden considerar como inapropiados agrícolamente por ser muy delgados y con subsuelo inmaduro, su explotación con las aguas negras mezcladas con agua de lluvia ha permitido rendimientos comparables ventajosamente con los de otras importantes áreas de riego (Romero, 1997).

1.2.2 Problemas derivados del Uso de Agua Residual

Generalizando se pueden plantear dos tipos de problemas derivados del uso de agua residual en la agricultura; el primero es la contaminación de los suelos y mantos acuíferos por sales, boro, metales pesados y otros agentes químicos tóxicos, con el consiguiente perjuicio a la productividad agrícola, y el segundo sería de tipo sanitario, causado por la presencia de organismos patógenos y materia orgánica en las aguas residuales (INSP, 1995 y CEPIS, 2002).

Aún cuando la normatividad establece la no-utilización de esta agua residual en el cultivo de productos de consumo directo deja de lado el aspecto del contacto ocupacional, que expone considerablemente a los trabajadores agrícolas y a sus familias a una serie de riesgos en materia de salud, especialmente vulnerables a éstos son los infantes de familias campesinas clasificados como grupo de alto riesgo. La prevalencia de infección por *Ascaris lumbricoides* en el grupo de mayor riesgo (1 a 4 años), es superior en 600 por ciento en la población que usa agua negra con relación al grupo que utiliza agua de temporal (Cifuentes, *et al.*, 1994).

El riesgo por el uso de las aguas residuales para riego se incrementa si se considera que el agua de los canales en muchas de las ocasiones se utiliza también para quehaceres domésticos, tales como: lavado de ropa, utensilios de cocina y aseo, debido a la falta de otras fuentes; se debe considerar que las aguas residuales provenientes de las ciudades no solamente transportan microorganismos patógenos. Estas descargas son una mezcla de las aguas provenientes de industrias, usos domésticos y centros de alto riesgo como hospitales, las cuales contienen una mezcla de sustancias químicas, elementos minerales, patógenos y en general materia orgánica (Anzaldo, 1995)

Adicionalmente se deben considerar los problemas de salud derivados de la ingestión de productos regados con aguas residuales. Se estima que en el año 1997 en el Valle de Tula se regaron 403 ha de cultivos restringidos, es decir, aquellos que se consumen crudos y que tienen contacto directo con el suelo o el agua residual, sin embargo, es sumamente difícil establecer el grado en que este límite es violado ya que se carece de la capacidad suficiente para vigilar su cumplimiento (Sotomayor, 1998 y Ruiz, *et al.*, 1997)

1.2.3 Ventajas y desventajas

A pesar de la larga historia de la utilización de agua residual en muchas partes del mundo, la “seguridad” de la reutilización es todavía una cuestión difícil de definir y el “riesgo” aceptable para la salud ha sido ampliamente debatido. El DR 003 ha tenido importantes beneficios así como grandes desventajas a consecuencia de esta medida (Figura 1.9).

Por un lado se puede señalar que el incremento de disponibilidad de agua fomentó el desarrollo y convirtió una zona árida y con recursos hídricos escasos, en fértiles áreas de riego originando una producción de alimentos que reflejó un impulso económico; además contribuyó a la disminución de la frecuencia e intensidad de las inundaciones en el Valle de México (CONAGUA, 2004).

El uso de aguas residuales para riego, ha significado un proceso de tratamiento de aguas, también ha proporcionado fertilidad a los suelos en las zonas de riego, por la aportación de elementos nutritivos para los cultivos y el agua que se infiltra en las áreas de riego se almacena en los acuíferos (Jiménez, *et. al.*, 2000).

Por otra parte las principales desventajas son la desecación del sistema lacustre del Valle de México, salinidad de suelos, contaminación bacteriológica y problemas de salud como la incidencia de enfermedades gastrointestinales y de la piel asociados con el uso y manejo de las aguas residuales sin tratar en cauces a cielo abierto que se traduce en costos asociados a la salud pública y la contaminación de los cuerpos de agua por la aportación de grandes cantidades de elementos contaminantes (Álvarez, *et. al.*, 2002).

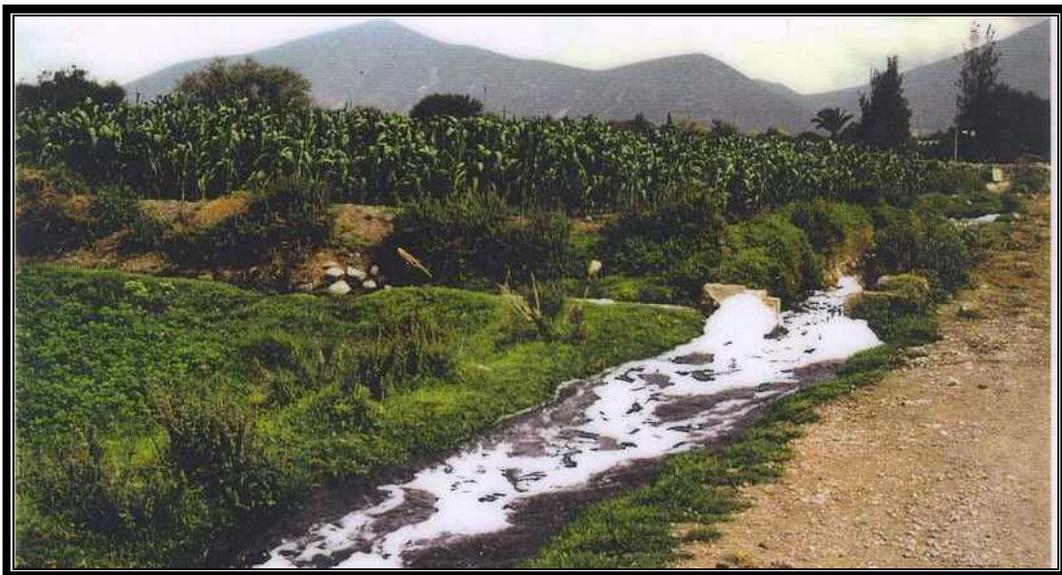


Figura 1.9. Riego con agua residual en el Valle de Tula

1.2.4 Recarga y descarga del Acuífero

La recarga natural de los acuíferos en la zona se da por diversos procesos como la infiltración, producto de la precipitación que captan los suelos y rocas que presentan un intenso fracturamiento, las cuales se presentan expuestas en sierras y lomeríos; entradas horizontales provenientes de otros estados; además se presenta una recarga artificial del acuífero del orden de 25 m³/s que equivale a 13.3 veces la recarga natural. Esto se debe a que, por una parte, los agricultores utilizan láminas de riego superiores a 1 m para lavar la salinidad de los suelos (Jiménez, *et. al.*, 1997) y, por otra, a que más del 50 % de los canales que distribuyen el agua de riego no están revestidos, de forma que el 25% del agua conducida se infiltra al subsuelo. Por ello, el nivel freático se ha elevado hasta en 10 metros de 1938 a 1990 (Jiménez, *et al.*, 1999 y OMS, *et. al.*, 1996).

La descarga de los acuíferos se encuentra compuesta por las salidas horizontales hacia otros estados. Pero además, como el área se encuentra afectada en la zona de Mangas-Tlahuelilpan-San Salvador por la presencia de niveles de agua someras en estas áreas la evapotranspiración es muy fuerte. Otra fuente de descarga la presentan los manantiales de los cuales el más importante es el Cerro Colorado (Figura 1.10). El área de Actopan se encuentra además afectada por descargas subterráneas con rumbo a Ixmiquilpan y finalmente se encuentra la extracción por bombeo (Silva de la R., 1996).

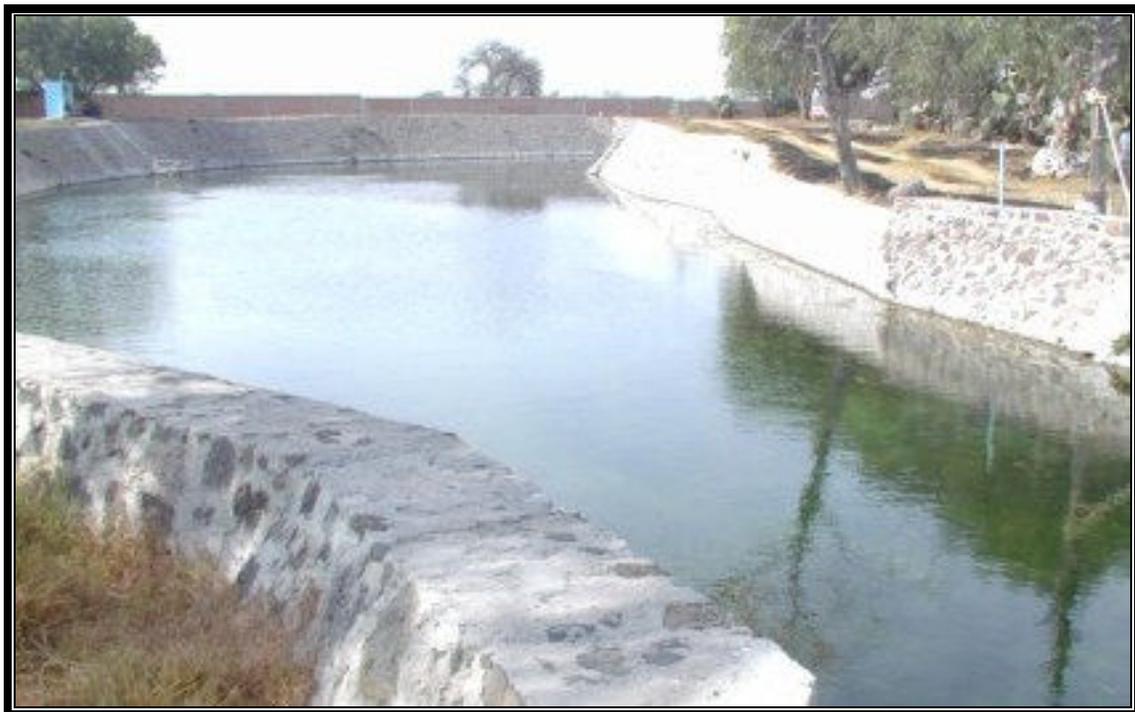


Figura 1.10. Manantial Cerro Colorado

1.2.5 Caracterización del agua residual y del agua del acuífero

En 1997 Jiménez realizó una evaluación en cuanto a la remoción de contaminantes en el suelo del Valle de Tula, en el estudio se caracterizó el agua residual del Emisor Central, del Emisor Poniente y drenajes primarios del Valle de México como referencia, y el agua utilizada para el abastecimiento de la población, procedente de los manantiales: Teocalco, Tezontepec y San Salvador que corresponde a la calidad de los acuíferos 1, 2 y 3 respectivamente, con el fin de conocer las eficiencias de remoción.

Entre las eficiencias medidas destaca la de la demanda química de oxígeno que es del orden del 98% (de 476 mg/ℓ a 10 mg/ℓ), la de la demanda bioquímica de oxígeno del 99% (de 451 a < 3 mg/ℓ), los sólidos suspendidos totales del 97% (de 118 mg/ℓ a 3 mg/ℓ), y la de carbón orgánico total del 90% (de 112 mg/ℓ a < 10 mg/ℓ). Además, se determinó que en la región existía una remoción considerable de compuestos orgánicos como se muestra en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Parámetros orgánicos removidos por el suelo

Parámetros (unidad en µg/ℓ)	Agua Negra	Pozo Teocalco	RP %	Pozo Tezontepec	RP %	Pozo San Salvador	RP %
o - Xileno	3.8-4	ND<5	100	ND<5	100	ND<5	100
Etilbenceno	1.2	ND< 5	100	ND<5	100	ND<5	100
m - Xileno	9.2	ND	100	ND	100	ND	100
p - cresol	46.5	ND	100	ND	100	ND	100
Cloroformo	0.2-0.8	ND	100	ND	100	ND	100
Tetracloroetileno	2	ND	100	ND	100	ND	100

RP -Remoción promedio

ND- No Detectado y por debajo del límite de detección

Fuente: Jínemez, *et. al.* 1997

Downs, *et. al.*, (2000) por su parte, reportaron que la mayoría de los microorganismos: coliformes totales y huevos de helmintos presentes en las aguas residuales son reducidos por su paso a través del suelo en 99.9% y 100%, respectivamente.

Actualmente, las eficiencias de remoción de contaminantes que existen en las aguas residuales, y que son depurados en su paso a través del suelo del Valle de Tula, son similares a las obtenidas por una planta de tratamiento secundario o terciario e incluso superiores para algunos contaminantes (Jiménez, *et. al.*, 1999), por ello es importante establecer como se lleva a cabo la remoción de dichos contaminantes en el subsistema.

1.2.6 Importancia de estudiar el destino y transporte de los contaminantes del agua residual

Desde 1981 Mendoza, hizo referencia a la situación que se manifestaba en el Valle del Mezquital en torno al riego con agua residual, en su trabajo señala lo atractivo que resulta el tratamiento de agua residual mediante la infiltración en la tierra, los beneficios y las limitaciones que presenta y las precauciones que se deben tener: áreas exclusivas y controladas, mantener el control de metales pesados y proporcionar los servicios sanitarios básicos necesarios para las personas que están en contacto con el agua residual.

Jiménez, *et al.*, 2003, concluyen que es evidente la capacidad filtro y amortiguadora que muestran los suelos del DR 003, y su probada efectividad en la remoción de compuestos orgánicos, metales pesados y microorganismos a partir de lo cual se concluye que la zona de irrigación actúa como un método de tratamiento y a su vez permite la recarga del acuífero, no obstante, hay un factor de riesgo debido a que no se sabe cuando llegará a saturarse la capacidad del suelo del DR 003, se considera imperativo investigar el destino de los contaminantes, así como los mecanismos principales que intervienen en su remoción.

Si la capacidad del sistema se satura, no se presentarán las mismas eficiencias de remoción de contaminantes y se manifestarán en los manantiales concentraciones peligrosas que pondrían en riesgo la salud de más de 450 mil habitantes que utilizan el agua de los manantiales como única fuente de abastecimiento (Jiménez y Chávez, 2003a).

Por lo que, es imprescindible realizar los proyectos de investigación que orienten las acciones, además de definir si es factible continuar con esta práctica y si fuera el caso tomar las precauciones necesarias, establecer los parámetros para preservar el volumen y la calidad del agua aprovechable y entonces operar el Valle de Tula como un Sistema de Tratamiento Natural controlado que sea además funcional y útil para los habitantes de la región.

Es por ello que a partir de los resultados de la experimentación en columnas empacadas con suelos de la región del Valle de Tula se evaluará el funcionamiento del Sistema de Tratamiento Natural Suelo-Acuífero, la capacidad depuradora del suelo y se podrá estimar un tiempo de saturación (vida útil) del suelo, porque conocer el funcionamiento de este tratamiento natural aportará las bases para definir si se continúa o no con este procedimiento.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tratamiento natural

En el sistema de tratamiento natural se engloban aquellos procedimientos o técnicas en los que la eliminación de las sustancias contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas se produce por componentes del medio natural, no empleándose en el proceso ningún tipo de aditivo químico, y en donde el efecto depurador se debe a la acción combinada de la vegetación, el suelo y los microorganismos presentes en ambos, y en menor medida, a la acción de plantas y animales superiores (Moreno, *et. al.*, 2003a).

Los sistemas de tratamiento natural se clasifican en: a) *Los sistemas de aplicación al terreno* que incluyen los sistemas de baja carga, de infiltración rápida y de riego superficial, y b) *Los sistemas acuáticos* que abarcan los terrenos pantanosos (naturales y artificiales) y sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas. Que tienen como rasgo común que la depuración se consigue a través de los procesos desarrollados en un sistema planta-suelo-agua.

En el medio ambiente natural, cuando interaccionan agua, suelo plantas, microorganismos y la atmósfera, se producen procesos físicos, químicos y biológicos. Con objeto de proporcionar tratamiento al agua residual los sistemas de tratamiento natural se diseñan para aprovechar estos procesos. Entre los procesos que intervienen incluyen: sedimentación, filtración, transferencia de gases, adsorción, intercambio de gases, intercambio iónico, precipitación química, oxidación y reducción química, conversión y descomposición biológica; junto con procesos propios de los sistemas de tratamiento natural tales como la fotosíntesis, foto-oxidación y la asimilación por parte de las plantas (Metcalf y Eddy, 1995).

Entre las ventajas que presentan los procedimientos naturales destaca: la eliminación eficaz de patógenos y la economía de su funcionamiento, pues requiere escaso personal para mantenimiento, consumo energético reducido y baja o nula producción de lodos y entre los inconvenientes se encuentran: la necesidad de espacio y la posibilidad de contaminar el medio si no se suministran adecuadamente.

El avance en el conocimiento de los mecanismos de dichos procesos ha permitido desarrollar criterios de diseño y operación para estos sistemas de depuración que son empleados para diversos propósitos como: almacenar agua en forma temporal y naturalmente, recuperar el nivel freático, almacenar el agua renovada para reuso, tratar el agua por el suelo, afinar la calidad de los efluentes y controlar la intrusión salina (Álvarez *et. al.*, 2002).

2.2 Sistema de tratamiento natural por suelo

El suelo es un sistema abierto en espacio y tiempo, puede considerarse como un sistema depurador natural porque es capaz de degradar o inmovilizar los contaminantes; estos entran al suelo como: contaminación natural, frecuentemente endógena, y contaminación antrópica, siempre exógena, para posteriormente salir por: volatilización, bioasimilación, disueltos en el agua y erosión.

Existen numerosos términos que se emplean para referirse a las técnicas que utilizan el suelo como sustrato depurador: infiltración directa sobre el terreno, tratamiento suelo-acuífero, geodepuración, etc. Este término es mayormente conocido como Tratamiento Natural Suelo-Acuífero o SAT (*Soil Aquifer Treatment*) pues el agua infiltrada sigue interaccionando con la matriz sólida del acuífero y puede decirse que el proceso de depuración no termina realmente hasta que después de ser captada, aflora en un manantial o en el lecho de un río (Metcalf y Eddy, 1995).

En este tipo de tratamiento el suelo cumple dos funciones: por un lado como medio receptor de las aguas residuales evitando de esta manera el vertido a otros medios, por otro lado, como agente activo pues tanto en su superficie como en su interior se produce el proceso de depuración eliminando nutrientes, materia orgánica, microorganismos y otros componentes como metales pesados o microcontaminantes orgánicos (Moreno, *et. al.*, 2003a).

La capacidad depuradora depende fundamentalmente de determinadas características de los horizontes superficiales como: la actividad microbiológica; que facilita la descomposición e inmovilización de los contaminantes, la arcilla y la materia orgánica; que adsorben a los contaminantes y permiten su inmovilización o liberación. La capacidad filtrante; que regula la facilidad de penetración de los contaminantes.

El SAT ha recobrado interés por sus grandes ventajas. Una de las cuales es de tipo económico, siempre y cuando se lleven a cabo bajo los criterios adecuados de diseño, y sobre todo el tipo de efluente a tratar, ya que el reuso del agua puede ser de gran utilidad en lugares donde existe escasez del líquido; sin embargo, las desventajas aparecen cuando estos sistemas no son aplicados en forma apropiada y se generan riesgos para la salud pública y existe también un riesgo asociado al vertido de aguas residuales industriales (Álvarez *et. al.*, 2002).

2.3 Casos prácticos del sistema de tratamiento natural por suelo

El tratamiento natural por suelo data de 1860 (Tabla 2.1), en algunos países de Europa y en Estados Unidos era práctica común aplicar el agua residual al suelo como un primer intento por controlar la contaminación del agua (Metcalf y Eddy, 1995).

Tabla 2.1 Países que utilizaron el sistema de aplicación al terreno

País	Fecha de inicio	Tipo de sistema
Inglaterra	1860	Utilización directa del agua residual
Francia	1869	Riego
Alemania	1874	Utilización directa del agua residual
Polonia	1882	Utilización directa del agua residual
Estados Unidos	1888	Infiltración rápida y Riego
Australia	1893	Riego
México	1890	Riego

En la primera mitad del siglo XX estos sistemas se sustituyeron en casi todos los países, sobre todo en los países desarrollados, por sistemas de tratamiento con estaciones depuradoras, por granjas, riego de parques y jardines o recarga de acuíferos; empero en 1972, sin embargo, renació el interés por los sistemas de tratamiento basados en la aplicación del terreno, como consecuencia del énfasis en las necesidades de reutilización del agua residual para riego.

En el mundo, numerosos estudios sobre el sistema de tratamiento natural por suelo se han llevado a cabo a lo largo de los últimos 30 años: Estados Unidos (Drewes and Fox, 1999; Quanrud, *et. al.*, 1996 y 2003; Bouwer, *et al.*, 1998 y 1999, Wilson, *et. al.*, 1995 y); España (Moreno, *et. al.*, 2003b), Chile (Castillo, *et. al.*, 2003), India (Nema, *et. al.*, 2001), Kuwait (Viswanathan, *et. al.*, 1999), Australia (Janson J., *et. al.*, 1989 y Ying, G. G., *et. al.*, 2003) Finlandia (Lindroos A. J., *et. al.*, 2002) Alemania (Schmitt D., *et. al.*, 2003), Israel (Oron G., 1996 y Kanarek and Michail, 1996), Japón (Li F., *et. al.*, 2002) y Cuba (Rovirosa M., 1999).

Los estudios demuestran que el sistema es capaz de remover microorganismos patógenos como bacterias, virus, protozoarios y helmintos, nutrientes en sus formas nitrogenadas y fosfatadas, compuestos orgánicos biodegradables e incluso compuestos orgánicos, además de ser un tratamiento con un costo de menos del 40 % del de un sistema convencional.

2.4 Tipos de sistema de tratamiento natural por suelo

En el tratamiento natural por suelo quedan englobadas todas aquellas técnicas en las que el elemento depurador principal es el suelo natural y la zona no saturada, al tratarse de un sistema basado en un filtro natural y tomando en cuenta la tasa de aplicación y la forma del flujo incluye tres tipos: a) *sistemas de baja carga*, b) *sistemas de infiltración rápida* y c) *sistemas de riego superficial* (Metcalf y Eddy, 1995).

2.4.1 Sistemas de baja carga (BC)

Constituyen el proceso de tratamiento natural más común hoy día, consiste en aplicar el agua residual sobre un terreno con vegetación para lograr tanto el tratamiento del agua residual como el crecimiento de la vegetación y en donde el proceso de depuración se lleva a cabo por la interacción en la matriz-suelo; una fracción del agua se percola al subsuelo, otra es consumida por la vegetación, mientras que otra fluye y una última parte se evapora (Figura 2.1). El tratamiento se produce conforme el agua aplicada percola en el terreno. El caudal aplicado por unidad de superficie del terreno lo que se le conoce como carga hidráulica, y la elección y control del tipo de vegetación depende de los objetivos del sistema y de las condiciones particulares del emplazamiento.

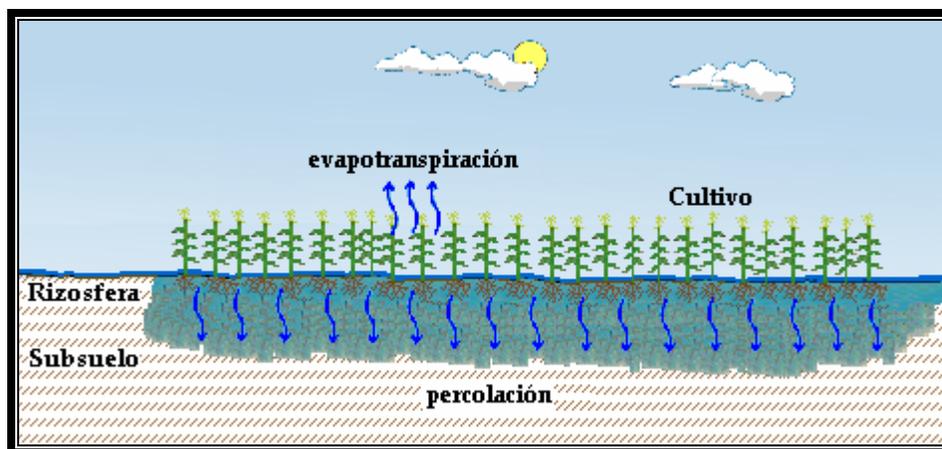


Figura 2.1. Sistema de baja carga

En función de los objetivos que pretende alcanzar, estos sistemas se clasifican en dos tipologías; en el tipo 1 el principal objetivo es el tratamiento del agua residual y la carga hidráulica aplicada no está controlada por la demanda de agua de la vegetación, sino por el parámetro de diseño, permeabilidad del terreno o carga de constituyentes. En los sistemas del tipo 2 el objetivo es la reutilización del agua residual, mediante producción de cosechas o por riego de espacios verdes, y suele conocerse como sistema de irrigación con agua residual sistemas de irrigación de cultivos.

Para mantener en el terreno condiciones predominantemente aerobias, se emplean ciclos de aplicación intermitentes, generalmente variables entre 4 y 10 días. El valor relativamente bajo de las cargas aplicadas, junto con la presencia de vegetación y al ecosistema activo del suelo, contribuye a que los sistemas de baja carga tengan el mayor potencial de tratamiento de los sistemas de tratamiento natural.

2.4.2 Sistemas de infiltración rápida (IR)

En estos sistemas, el agua recibe un tratamiento previo y se aplica al terreno en forma intermitente, normalmente mediante estanques o balsas de infiltración o de canales de poca profundidad. También se emplea la aplicación de agua residual mediante sistemas de aspersión de alta carga, en las balsas de infiltración no suele disponerse de tipo alguno de vegetación, pero esta es necesaria si se emplean sistemas de aspersión. Debido a que las cargas aplicadas son relativamente elevadas, las pérdidas por evaporación sólo representa una pequeña parte del agua aplicada, y la mayor parte del agua percola en el terreno proporcionando, de este modo, el tratamiento deseado (Figura 2.2).



Figura 2.2. Sistema de infiltración rápida

Los objetivos de diseño de los sistemas de infiltración rápida incluyen: 1) tratamiento del agua seguido de recarga de acuíferos, para aumentar los recursos hídricos o evitar la intrusión de aguas salinas, 2) tratamiento del agua seguido de su recuperación mediante sistemas de drenaje inferior o extracción por bombeo y 3) tratamiento del agua seguido por circulación subterránea y descarga a aguas superficiales.

El potencial de tratamiento de los sistemas de infiltración rápida es algo inferior al de los sistemas de baja carga debido a la menor capacidad de retención de los suelos permeables y a las mayores cargas hidráulicas empleadas.

2.4.3 Sistemas de riego superficial (RS)

Para estos sistemas el agua residual se distribuye por las partes altas del terreno con vegetación que se caracteriza por tener pendientes cuidadosamente seleccionadas, de modo que el agua pueda fluir en superficie desde las zonas altas hasta unas zanjas, donde hay recuperación de la escorrentía superficial, situadas en el extremo de la pendiente (Figura 2.3).

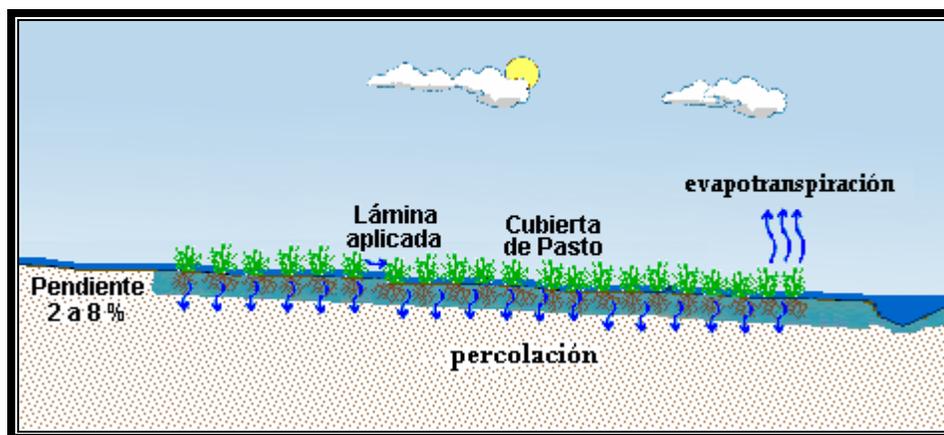


Figura 2.3 Sistema de riego superficial

Los sistemas de riego superficial se suelen emplear en emplazamientos con suelos o estratos subsuperficiales relativamente impermeables, aunque el proceso se ha adaptado a un intervalo amplio de permeabilidades ya que el terreno tiene tendencia a impermeabilizarse con el paso del tiempo. Por lo tanto, la percolación en el terreno es una vía hidráulica menor, y la mayor parte del agua aplicada se recoge en forma de escorrentía superficial. Parte del agua aplicada se pierde por evapotranspiración en un porcentaje variable que depende del clima de la región y de la estación del año. Los sistemas que explotan alternando fases de aplicación y de secado, dependiendo la duración de cada fase de los objetivos de tratamiento. La distribución del agua residual se puede llevar a cabo mediante aspersores de alta carga, rociadores de baja presión, o métodos superficiales como tuberías provistas de orificios.

2.5 Consideraciones importantes de diseño de los sistemas de tratamiento natural por suelo

Para que el diseño y operación del SAT resulten satisfactorios, es fundamental el conocimiento de las características del agua residual, los mecanismos de tratamiento, la información relacionada con la salud pública y las normas reguladoras aplicables (Metcalf y Eddy, 1995), por ello, a continuación se describirán cada uno de estos aspectos.

2.5.1 Calidad del agua residual y mecanismos de tratamiento

Como se mencionó, el tratamiento del agua residual en los sistemas de tratamiento natural se consigue mediante procesos físicos, químicos y biológicos naturales que se desarrollan en el ecosistema suelo-agua-planta. Los SAT con capaces de eliminar casi todos los constituyentes del agua considerados como contaminantes.

2.5.1.1 Sólidos Suspendidos Totales

En el sistema de riego superficial los sólidos suspendidos totales (SST) del agua residual se eliminan por sedimentación, favorecida por las reducidas velocidades de circulación, por la escasa profundidad, y por la filtración a través de las formas vegetales vivas y de los desechos vegetales. En los sistemas de baja carga e infiltración rápida los SST se eliminan principalmente por filtración en el terreno o en el medio subsuperficial, pero la mayor parte de los sólidos se quedan en la superficie y tienen tendencia a obturar o sellar las superficies de infiltración de estos sistemas, de modo que es preciso diseñarlos y explotarlos de forma que se minimice la pérdida de capacidad de infiltración.

2.5.1.2 Materia Orgánica

La materia orgánica, soluble o insoluble, se elimina por degradación microbiana. Los microorganismos suelen estar asociados a películas que se desarrollan sobre la superficie de las partículas de suelo, vegetación y desechos vegetales. En general estos sistemas se diseñan de tal modo que resulte posible mantener condiciones aerobias, con la intención de que la degradación de la materia orgánica se realice principalmente, gracias a la acción de los microorganismos aerobios ya que la descomposición aerobia suele ser más rápida y completa que la anaerobia, consiguiendo además evitar los problemas de olores asociados a los procesos de descomposición de esta. Como la capacidad de degradación aerobia de la materia orgánica de los sistemas de tratamiento natural por suelo está limitada por las transferencias de oxígeno de la atmósfera al sistema, se deben diseñar de un modo que la demanda bioquímica de oxígeno de la materia orgánica aplicada (carga de DBO) sea inferior a la velocidad estimada de transferencia de oxígeno al sistema.

2.5.1.3 Nitrógeno

La transformación y eliminación de nitrógeno en sistemas naturales implica una serie de procesos y reacciones complejas. Los mecanismos implicados en la eliminación de nitrógeno del agua residual dependen de la forma en que está presente el nitrógeno:

Nitrógeno orgánico: El nitrógeno orgánico asociado a los sólidos suspendidos se elimina por sedimentación y filtración. En fase sólida se puede incorporar directamente al humus del suelo, que consiste en moléculas orgánicas complejas de gran tamaño que contienen carbohidratos complejos, sustancias proteínicas y ligninas. Parte del nitrógeno orgánico se hidroliza para formar aminoácidos que se pueden descomponer, adicionalmente, para producir iones amonio.

Nitrógeno amoniacal: Puede seguir diferentes vías de descomposición, el amoníaco soluble puede eliminarse por volatilización directa a la atmósfera como amoníaco gas); aunque la mayor parte del amoníaco afluente y del convertido se absorbe temporalmente, mediante reacciones de intercambio iónico, sobre las partículas de suelo y sobre las partículas orgánicas dotadas de carga. El amoníaco absorbido es apto para el consumo por la vegetación y los microorganismos, o para la conversión a nitrógeno en forma de nitratos mediante la nitrificación biológica bajo condiciones aerobias.

Nitrógeno en forma de nitratos: El nitrógeno en forma de nitratos no sufre reacciones de intercambio iónico debido a su carga negativa, permanece en solución, y es transportado como parte del agua percolada. Si no se elimina por consumo de las plantas o por procesos de desnitrificación, el nitrato lixiviará o percolará alcanzando las aguas subterráneas subyacentes. En los sistemas BC e IR, puede originar riesgos para la salud pública, por lo tanto estos sistemas se deben diseñar y explotar de modo que se consiga el grado de eliminación del nitrógeno necesario para asegurar la protección de las aguas subterráneas. Para conseguir la eliminación de nitrógeno por asimilación de las plantas, es necesario recoger y retirar del sistema la vegetación, para evitar que el nitrógeno asimilado por las plantas vuelva a entrar al sistema en forma de nitrógeno orgánico.

Desnitrificación orgánica: Los nitratos también se eliminan por desnitrificación biológica y posterior liberación del óxido nitroso gaseoso y del nitrógeno molecular a la atmósfera. La desnitrificación biológica es el principal mecanismo de eliminación del nitrógeno en los sistemas de RS e IR. La desnitrificación se lleva a cabo por la acción de bacterias facultativas en condiciones anóxicas, además es necesario que la reacción carbono/nitrógeno sea suficientemente elevada. En los sistemas RS e IR la fuente de carbono proviene del agua residual aplicada, por lo que es imposible desnitrificar completamente efluentes secundarios con relación carbono/nitrógeno pequeña.

2.5.1.4 Fósforo

Los principales procesos de eliminación del fósforo que se producen en sistemas naturales son la adsorción y precipitación química, aunque las plantas también consumen parte del fósforo presente. El fósforo, normalmente presente en forma de ortofosfatos, es adsorbido por minerales arcillosos y determinadas fracciones orgánicas de la matriz del suelo. La precipitación química por calcio, hierro o aluminio, se produce a menor velocidad que los fenómenos de adsorción, pero es igualmente importante. El fósforo adsorbido suele permanecer retenido y es resistente al lixiviado. Los sistemas de RS presentan un potencial de eliminación de fósforo limitado.

2.5.1.5 Trazas de elementos

La eliminación de elementos traza, principalmente metales, se produce principalmente por mecanismos de sorción que engloban reacciones de adsorción y precipitación, y en menor grado, mediante la asimilación de algunos metales por parte de las plantas. Los metales son retenidos en el suelo o en los sedimentos. La capacidad de retención de metales de muchos suelos y sedimentos suele ser muy elevada, especialmente a pH superiores a 6.5. En condiciones anaerobias y a pH bajos, algunos metales son más solubles y pueden ser solubilizados en el agua.

La eliminación de metales varía de un sistema a otro, en función de las concentraciones del afluente y de las condiciones locales del emplazamiento. Para la mayoría de los metales, los rendimientos de eliminación observados se suele situar entre el 80 y el 95 %.

2.5.1.6 Microorganismos

Los mecanismos de eliminación de las bacterias y parásitos como protozoos y helmintos, comunes a la mayoría de los sistemas de tratamiento natural incluyen la muerte, retención, sedimentación, atrapamiento, depredación, radiación, desecación y adsorción. Los virus se eliminan casi exclusivamente por adsorción y posterior muerte.

Los sistemas de BC e IR, que contemplan el flujo de agua residual a través del terreno, permiten la eliminación completa de los microorganismos del agua percolada.

En los suelos de textura media a fina la eliminación total de los microorganismos presentes se puede conseguir con 1.5 m de transporte. En los sistemas de IR son necesarias mayores distancias de transporte, siendo el recorrido necesario en función de la permeabilidad del suelo y de la carga hidráulica.

2.5.1.7 Compuestos Orgánicos

La composición y uso de los compuestos orgánicos empezó en el siglo pasado y se incrementó después de la Segunda Guerra Mundial, se iniciaron graves problemas de contaminación del subsuelo y del agua subterránea, por los productos derivados de la posguerra. También empezaron a notarse problemas de contaminación de agua subterránea, por el mal confinamiento de productos industriales y por la influencia de percolación de aguas residuales industriales. Muchas moléculas orgánicas acaban en el agua y permanecen, en algunos casos, largos períodos de tiempo. En experimentos de laboratorio con animales se ha comprobado que dosis no letales pueden producir cáncer, defectos genéticos, reducción en la fertilidad y cambios en el sistema inmunológico.

Los compuestos orgánicos se caracterizan por ser muy estables químicamente, son productos fabricados por el hombre y forman estructuras moleculares complejas integradas principalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, y no se eliminan con facilidad; son difíciles de degradar por los microorganismos y pueden permanecer en el ecosistema decenas de años y algunas de ellas van acumulándose en los tejidos.

Los compuestos orgánicos más utilizados y los que la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos clasificó en 1979 como prioritarios, por ser los más frecuentes en las aguas residuales, están constituidos por los siguientes grupos según su estructura química: hidrocarburos aromáticos policíclicos, éteres halogenados, ésteres del ácido ftálico, bifenilos policlorados (PCB's), plaguicidas clorados, hidrocarburos alifáticos halogenados, aromáticos policíclicos y nitrosaminas. Destacan entre estos productos conocidos como el DDT y todos aquellos usados como insecticidas (Chávez, 1996).

Se eliminan del agua residual por volatización y adsorción seguidas de degradación biológica o fotoquímica. En general los sistemas naturales permiten eliminar una fracción importante de estos compuestos, sin embargo, los datos de que se dispone en la actualidad no permiten predecir los rendimientos de eliminación de compuestos individuales.

Los aceites y grasas son difíciles de metabolizar por las bacterias y flotan formando películas en el agua que dañan a los seres vivos. Los fenoles pueden estar en el agua como resultado de contaminación industrial y cuando reaccionan con el cloro que se añade como desinfectante forman clorofenoles que son un serio problema porque dan al agua mal olor y sabor. También existe la contaminación con insecticidas, petróleo y otros hidrocarburos.

2.5.2 Eficiencia de remoción de contaminantes en un SAT

En la Tabla 2.2 se muestra la calidad del agua tratada prevista para cada uno de los sistemas naturales por suelo. Como se presenta en dicha tabla, el sistema de BC es el que presenta mayor eficiencia en el tratamiento de agua residual.

Tabla 2.2 Calidad del agua del efluente (mg/l)

Parámetros	Sistema de baja carga		Sistema de infiltración rápida		Sistema de riego superficial	
	media	max.	media	max.	media	max.
DBO	< 2	< 5	5	< 10	10	< 15
Sólidos Suspendidos	< 1	< 5	2	< 5	10	< 20
N-NH ₄ (nitratos de amonio)	< 0.5	< 2	0.5	< 2	< 4	< 8
N total	3	< 8	10	< 20	5	< 10
P total	< 0.1	< 0.3	1	< 5	4	< 6
Coliformes fecales NMP/100 ml	0	< 10	10	< 200	200	< 2000

a Percolación del efluente primario o secundario a través de 1.5 m de suelo.

b Percolación del efluente primario o secundario a través de 4.5 m de suelo.

c Escorrentía del agua residual municipal a lo largo de aproximadamente 45 m de pendiente.

2.5.3 Salud Pública

Los aspectos de la salud pública relacionados con la aplicación del agua residual al suelo son:

a) los agentes patógenos y la posible transmisión de enfermedades a formas biológicas superiores, incluyendo los seres humanos; b) las sustancias químicas que pueden alcanzar las aguas subterráneas y plantear problemas para la salud si se ingieren, y c) la calidad de los cultivos cuando éstos se riegan con efluentes de agua residual y hay contacto directo con los agricultores, provocando enfermedades en la piel y gastrointestinales.

2.5.3.1 Agentes patógenos

El agua debe de estar libre de cualquier tipo de microorganismos, como bacterias, protozoarios, helmintos y virus, que pueden dañar su salud y/ o causar enfermedades graves al consumidor, como el cólera, la disentería, la hepatitis y otras.

Es importante destacar que cualquier conexión entre los agentes patógenos como bacterias, virus, protozoarios y parásitos que entran al agua provenientes de desechos orgánicos aplicados al terreno a través del agua residual y el contagio de enfermedades por animales o seres humanos requiere una larga y compleja cadena de sucesos epidemiológicos. No obstante, estas cuestiones se han planeado, el problema subsiste, y es necesario adoptar precauciones a la hora de tratar la posible transmisión de enfermedades.

2.5.3.2 Calidad del agua subterránea

Los sistemas en los que parte del agua residual percola en el terreno hasta las aguas subterráneas que se emplean, o que se puede emplear, para el abastecimiento del agua potable, se deben diseñar y explotar de modo que se mantenga la calidad de las aguas subterráneas receptoras que se establecen en las Normas Oficiales Mexicanas.

La concentración de nitrato (agente causante de la metahemoglobinemia en los niños), esta limitada en la normativa de aguas potables, para lo que es necesario asegurar que las operaciones de pretratamiento y tratamiento natural permitan una eliminación de nitrógeno suficiente.

Los metales aplicados a los sistemas naturales no representan una amenaza para la calidad de las aguas subterráneas ya que los elementos de traza suelen eliminarse de las aguas percoladas mediante adsorción o precipitación química en los primeros metros del suelo.

Estudios de los efectos a largo plazo, han podido constatar que la concentración de metales no presenta aumentos notables por encima de los valores normales en los suelos de uso agrícola y la eliminación bacteriana de los efluentes que circulan a través de los suelos es prácticamente completa, sólo roca fracturada puede proporcionar una vía de circulación para las bacterias, pero se puede evitar llevando a cabo exploraciones geológicas adecuadas.

2.5.3.3 Calidad de los cultivos

Los metales de traza quedan retenidos en el suelo y en los sedimentos de los sistemas de tratamiento natural y están disponibles para su asimilación por parte de las plantas.

Desde el punto de vista de la salud pública, el metal que merece mayor atención es el cadmio, ya que se puede acumular en las plantas hasta alcanzar niveles tóxicos para animales y para el ser humano, siendo inferiores a los niveles tóxicos para las propias plantas.

Para la mayoría de las aplicaciones del agua residual, la acumulación de cadmio representa un problema serio.

Las plantas no asimilan otros metales que merecen especial atención, como el plomo, o estos resultan fitotóxicos a niveles muy inferiores a las concentraciones que pueden constituir riesgos tóxicos dentro de la cadena alimenticia por ejemplo zinc, cobre y níquel.

2.6 Diseño del sistema de tratamiento natural por suelo (SAT)

El diseño de un sistema SAT, consta de dos etapas: el diseño conceptual o ingeniería de diseño y el proyecto constructivo.

La fase de los estudios previos es básica pues permitirá evitar la realización de otros más caros y asegurar con suficiente garantía al menos tres aspectos para asegurar el buen funcionamiento del sistema depurador: *a)* capacidad de admitir la carga contaminante vertida, *b)* depurar hasta los niveles exigidos por la legislación, y *c)* mínimo impacto sobre el medio ambiente o al menos no sobrepasar los límites establecidos.

A pesar de ello, y debido a que esta metodología se basa en el comportamiento de un medio natural (el suelo) establecer su comportamiento a largo plazo requiere de la realización de estudios normalmente más sofisticados y de difícil interpretación, ya que las variables de las cuales depende su funcionamiento son mayores y no pueden controlarse de manera artificial.

Ya que están determinadas por las propiedades del suelo, la capacidad depuradora depende fundamentalmente de características de los horizontes superficiales y de los siguientes constituyentes: **la actividad microbiológica**, que facilita la descomposición e inmovilización de los contaminantes; **la arcilla y la materia orgánica**, que mediante reacciones fisicoquímicas adsorben a los contaminantes y permiten su inmovilización o liberación y **la capacidad filtrante**, que regula la penetración de los contaminantes (García y Dorronsoro, 2004).

2.6.1 Propiedades del suelo

No todos los suelos tienen las características adecuadas para admitir un SAT; muchas de las deficiencias y fallos ocurridos en instalaciones de este tipo de sistemas se ha atribuido a una insuficiente caracterización del suelo (Moreno *et. al.*, 2003a).

Por ello, se deben considerar las propiedades siguientes: física, influye sobre las propiedades hidráulicas (tamaño de la partícula, textura, densidad, color, estructura, porosidad y profundidad); química, influye en la capacidad de depuración del suelo (pH, capacidad de intercambio catiónico, niveles de nutrientes, capacidad de adsorción y filtración para iones inorgánicos) e hidráulica, permite conocer la cantidad de agua que puede ser infiltrada por unidad de superficie (capacidad de infiltración y permeabilidad).

Dada la importancia, a continuación se describe cada una de las propiedades de los suelos y como influyen en la capacidad de tratamiento.

2.6.1.1 Tamaño de la partícula

Los constituyentes minerales o inorgánicos de los suelos están compuestos de pequeños fragmentos de roca y de varios minerales.

Las cuatro clases de partículas inorgánicas más importantes son: grava, arena, limo y arcilla.

La prueba de granulometría de un suelo consiste en determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas del suelo de acuerdo a su tamaño.

La granulometría influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de agua y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la tierra. Por esta razón la resistividad de la grava es superior a la de la arena y de que ésta sea mayor que la de la arcilla.

La obtención de los tamaños y distribución de las partículas en suelos gruesos, se obtiene por el método de cribado por mallas y consiste en hacer pasar el suelo por mallas de aberturas conocidas representadas en la Tabla 2.3 (Juárez y Rico, 2001). Para obtener el contenido de grava, de arena y de finos, y se expresan en porcentajes.

Tabla 2.3 Clasificación de los suelos de acuerdo al tamaño de la partícula y malla regularmente usada en la determinación de la granulometría.

Material	Características	Tamaño mm.	No. de Malla (abertura)
Roca	---	Mayor de 70	3 (3")
Grava	Gruesa	30 a 70	1 (1")
	Media	5 a 30	4 (4.76 mm.)
	Fina	2 a 5	10 (2.0 mm.)
Arena	Gruesa	1 a 2	20 (0.84 mm.)
	Media	0.2 a 1	60 (0.25 mm.)
	Fina	0.1 a 0.2	100 (0.149 mm.)
Polvo	Grueso	0.05 a 0.1	200 (0.074 mm.)
	Fino	0.02 a 0.05	---
Limo	Grueso	0.006 a 0.02	---
	Fino	0.002 a 0.006	---
Arcilla	Grueso	0.0006 a 0.002	---
	Fino	0.0002 a 0.0006	---
Ultra-Arcilla	---	0.00002 a 0.0002	---

2.6.1.2 Textura

La textura es importante porque determina dos propiedades fundamentales del suelo como depurador: funcionamiento como filtro mecánico y sus propiedades hidráulicas, los suelos de textura arcillosa tienen una alta capacidad de autodepuración.

Se define en base al porcentaje relativo de los tres tamaños de partícula menor de 2 mm. de diámetro clasificándolas como: arena, arcilla y limo. Y se obtiene al aplicar el análisis de una suspensión del suelo con hidrómetro (densímetro), que se basa en la ley de STOKES, que dice: "la velocidad de caída de las partículas esféricas en un medio fluido es proporcional al cuadrado del radio de dichas partículas" y se obtiene así la textura del suelo.

Existen varios procedimientos, uno de ellos es el método de Bouyoucos, que utiliza la velocidad diferencial de sedimentación de las partículas de suelo en agua.

Generalmente se recurre al empleo de un diagrama triangular para representar la situación de un determinado material en la clasificación de textura. En la Figura 2.4 se representa el triángulo de textura de uso común en estudios edafológicos.

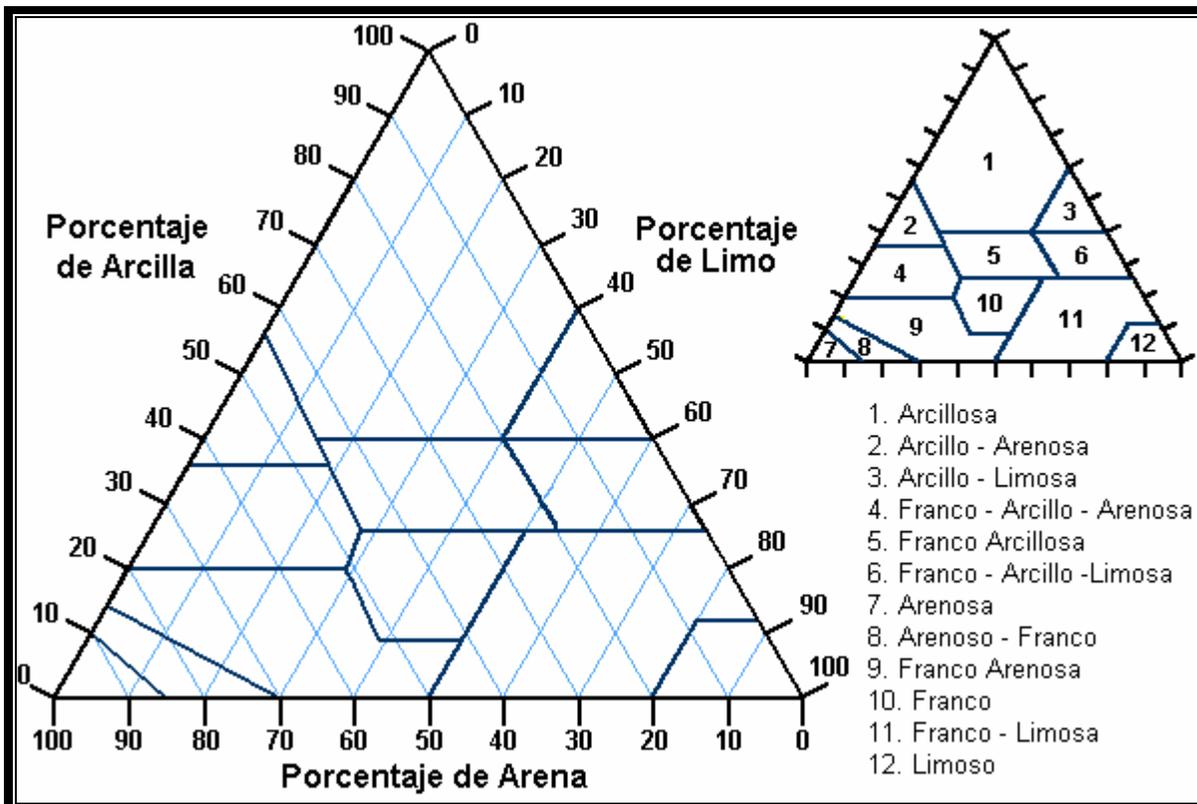


Figura 2.4. Triángulo de textura de suelos

2.6.1.3 Estructura

Hace referencia a la agregación de las partículas en grupos denominados agregados. Un suelo bien estructurado con grandes huecos entre los agregados puede transmitir el agua más rápidamente que un suelo mal estructurado con la misma textura.

La estructura se estudia mejor en la práctica en condiciones naturales y se describe en tres partes:

- a. *Tipo de estructura*: Aspecto o forma y patrón de disposición de los granos, la Figura 2.5, muestra las cuatro formas geométricas principales de estructura del suelo.

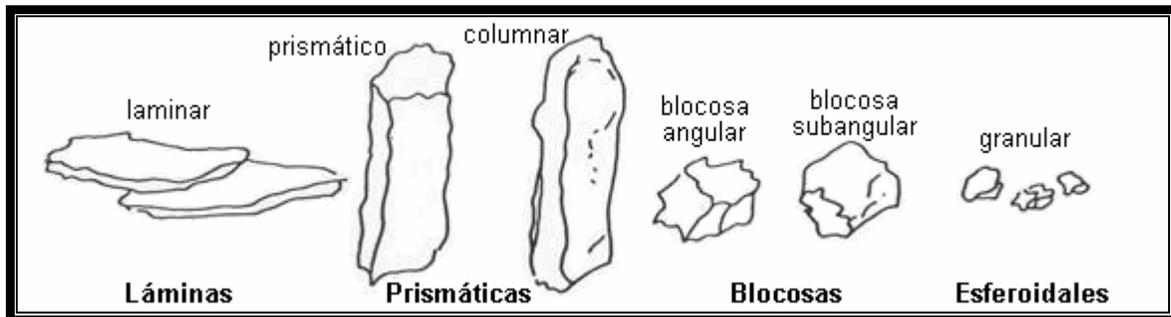


Figura 2.5. Tipos principales de estructuras de suelo

- b. *Clase de estructura*: Es el tamaño de los granos, cada tipo estructural primario de suelo se divide en cinco clases de tamaño, de acuerdo al tamaño del agregado individual: muy fino o muy delgado, fino o delgado, mediano, grueso o áspero, muy grueso o muy áspero.
- c. *Categoría de estructura*: Indica el grado de distensión de los agregados individuales, y esta influida por el contenido de humedad, para describir la categoría de la estructura del suelo, se emplean los cuatro términos siguientes: carente de estructura, no existe agregados notorios, con las condiciones expuestas por la arena suelta o una condición como cemento de algunos suelos de arcilla; débil, formación imprecisa de agregados que apenas son duraderas; moderada, agregado bien desarrollado, forma moderada, duraderos y fáciles de distinguir y fuerte, agregados muy bien formados que son duraderos y fáciles de distinguir.

La formación de agregados es responsable de la permeabilidad de los suelos bien desarrollados, sin embargo, se deben hacer pruebas para verificar que los agentes contaminantes que entran en contacto con el suelo no están provocando la destrucción de la estructura, por dispersión, sobre todo si presentan contenidos altos en sodio.

2.6.1.4 Color

En el perfil del suelo, es un buen indicador de las características de drenaje del mismo (Brady, 1974). Los suelos con colores rojizos, amarillos y marrones amarillentos indican la existencia de buenas condiciones de oxidación, aireación y ausencia de saturación de agua.

Por el contrario los suelos que se encuentran en zonas umbrías suelen mostrar colores grises o azulados, si están poco oxigenados o cuando se encuentran en condiciones permanentes de saturación.

Los suelos mal drenados o estacionalmente saturados suelen alternar vetas o filones de elementos oxidados o reducidos, conocidos como suelos moteados.

2.6.1.5 Consistencia

Es la resistencia de un material a la deformación o ruptura, o bien, al grado de cohesión o adherencia de la masa del suelo. Se puede describir bajo tres condiciones de humedad del suelo:

- a. *Consistencia del suelo mojado*: Se refiere a contenidos de agua en el suelo mayores a la capacidad de campo. En estas condiciones el suelo se caracteriza por sus propiedades de: *adherencia*, que consiste en pegarse a otros objetos y se puede observar al presionar el material del suelo entre los dedos índice y pulgar; y *plasticidad*, se refiere a la posibilidad de cambiar de forma en su masa al someterse a una presión determinada y la de retener esta forma adquirida al eliminar la presión.
- b. *Consistencia del suelo húmedo*: Se caracteriza por la facilidad de desmenuzamiento del suelo.
- c. *Consistencia en suelo seco*: Se caracteriza por la rigidez y la dureza.

2.6.1.6 Profundidad

Condiciona el tiempo de contacto entre el agua residual y las partículas responsables de la eliminación de los componentes no deseables, cuando la escasa profundidad del suelo se une a un exceso de permeabilidad es muy difícil garantizar la correcta depuración del vertido, haciendo imposible su empleo en sistemas de depuración natural.

Además, se debe conocer la profundidad del agua subterránea y su fluctuación estacional, pues determinan la zona de aireación y del grado de renovación que se produce.

2.6.1.7 Densidad

Representa el peso por volumen unitario de una sustancia y puede ser de dos tipos: a) Densidad aparente: es la suma de una unidad de volumen de suelo que incluye espacio poroso y material sólido, a menor densidad aparente mayor cantidad de espacio poroso; y b) Densidad real: densidad de la masa del suelo, que incluye partículas individuales de arena, limo, arcilla y materia orgánica.

En el suelo se distinguen tres fases constituyentes: sólida, compuesta por las partículas minerales del suelo; líquida, formada por el agua libre aunque, puede existir otros líquidos de menor significación y gaseosa, constituida sobre todo de aire.

El suelo totalmente saturado es cuando todos sus vacíos están ocupados por agua. La representa el esquema de una muestra de suelo, en el que aparecen las fases principales, así como los conceptos de uso más común, con los símbolos que se indican en la Figura 2.6.

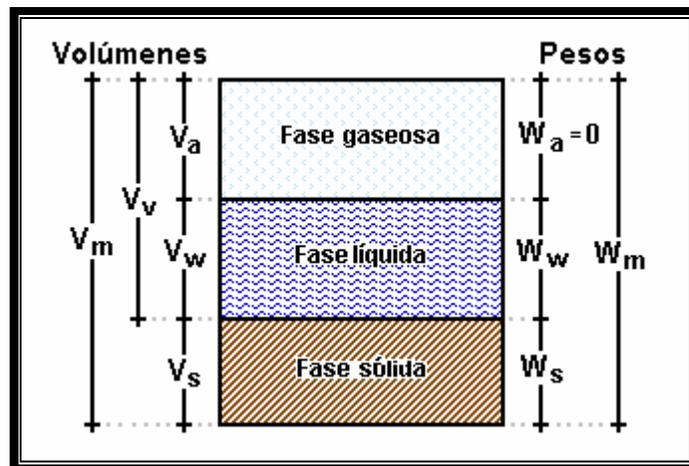


Figura 2.6. Esquema de una muestra de suelo

Donde:

- V_m = Volumen total de la muestra del suelo (volumen total de la masa).
- V_s = Volumen de la fase sólida de la muestra (volumen de sólidos).
- V_v = Volumen de los vacíos de la muestra del suelo (volumen de vacíos).
- V_w = Volumen de la fase líquida contenida en la muestra (volumen de agua).
- V_a = Volumen de la fase gaseosa de la muestra. (volumen de aire).
- W_m = Peso total de la muestra del suelo (peso de la masa).
- W_s = Peso de la fase sólida de la muestra de suelo (peso de los sólidos).
- W_w = Peso de la fase líquida de la muestra (peso de agua).
- W_a = Peso de la fase gaseosa de la muestra, considerada como nulo.

2.6.1.8 Pesos

El peso específico de la masa del suelo es:

$$\gamma_m = \frac{W_M}{V_m} = \frac{W_S + W_W}{V_m}$$

El peso específico de la fase sólida del suelo es:

$$\gamma_s = \frac{W_S}{V_S}$$

2.6.1.9 Relación de vacíos

Se conoce también como razón de vacíos o índice de poros. Es la relación entre el volumen de los vacíos y de los sólidos de un suelo:

$$e = \frac{V_V}{V_S}$$

2.6.1.10 Porosidad

Se refiere a la relación entre su volumen de vacíos y el volumen de su masa y se expresa como porcentaje:

$$n (\%) = \frac{V_V}{V_m} \times 100$$

Los valores reales suelen oscilar entre 20 y 95 %. Varía conforme a la textura, la forma de las partículas individuales, la estructura, la cantidad de materia orgánica y la solidez, los suelos arcillosos muestran variaciones más grandes de espacio poroso que los suelos arenosos.

El valor de la porosidad, entre otras propiedades, de un suelo o de una formación acuífera determina su capacidad de transmitir y almacenar agua. Es necesario distinguir la porosidad total del suelo (efectiva) de aquella que realmente contribuye al flujo del agua (porosidad eficaz).

2.6.1.11 Grado de saturación

Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos, se expresa también como porcentaje:

$$G_w (\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

Los valores varían de 0 en un suelo seco a 100 % en suelos totalmente saturados.

2.6.1.12 Contenido de agua

Es la relación entre el peso del agua contenida en el suelo y el peso de su fase sólida, expresada en porcentaje:

$$W (\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

En la naturaleza la humedad de los suelos varía entre límites muy amplios, en México existen valores de 1000% en arcillas procedentes de la región sureste del país (Juárez y Rico, 2003).

2.6.1.13 Propiedades químicas

Los constituyentes químicos en los suelos son importantes en la depuración del agua residual, así como los mecanismos de retención de ciertos constituyentes. Los análisis químicos permiten conocer: *a)* porcentaje de materia orgánica, interviene en el intercambio iónico de los suelos; *b)* fósforo, hierro, magnesio, potasio y manganeso, calcio y sodio intercambiables; *c)* pH, los contaminantes acidifican el suelo, por vertidos o por oxidación de sulfuros y óxidos nitrosos, con lo que aumenta la vulnerabilidad del suelo; *d)* capacidad de intercambio catiónico, aumenta la capacidad de autodepuración; *e)* conductividad eléctrica y *f)* niveles de nutrientes y capacidad de adsorción y filtración para iones inorgánicos.

2.6.1.14 Propiedades hidráulicas

Las propiedades hidráulicas facilitan la circulación de los contaminantes de un suelo y se refieren a la función almacenadora y transmisora del suelo: *a)* La función almacenadora; es la capacidad de retener el líquido y depende de, la porosidad (n), la relación de vacíos (e), el grado de saturación (G_w) y el coeficiente de almacenamiento (S) el cual depende del rendimiento específico (S_y). Los suelos con alto porcentaje de materiales contenidos, materia orgánica y arcillas, tienen alta capacidad de retención de agua. *b)* La función transmisora se refiere a la facilidad con la que el agua es transferida de la frontera suelo-aire al suelo y de una capa a otra dentro del suelo, un rango de propiedades del suelo son usadas para caracterizar la transmisión del agua en el suelo como la conductividad hidráulica y la capacidad de infiltración. Los suelos arenosos tienen una capacidad de transmisividad alto, y los suelos con alto porcentaje de materiales contenidos, materia orgánica y arcillas, tienen una capacidad de transmisividad muy bajo.

Capacidad de infiltración: Es la velocidad a la que el agua es capaz de penetrar en los suelos desde la superficie. Cuando el perfil de suelo está saturado la capacidad de infiltración coincide con la conductividad hidráulica. Si el perfil no está saturado la capacidad de infiltración será mayor debido a que el agua tiende a rellenar rápidamente los poros grandes y las grietas debidas a la porosidad secundaria, además, las fuerzas de succión pueden hacer que el agua sea retirada de la superficie rápidamente.

La capacidad de infiltración depende básicamente de la textura y la estructura del suelo. Otros factores, como la composición del agua, la vegetación o el arado de suelos durante las labores agrícolas influyen también en esta variable y varía con el tiempo por lo que es necesario tomar los valores medidos como valores máximos.

Permeabilidad: Es la capacidad del suelo para dejarse penetrar por los fluidos y transmitirlos, e influyen factores como: la textura, la estructura y el contenido de materia orgánica.

Generalmente se define como impermeable, poco permeable, permeable, y muy permeable, los límites están dados por el valor de la conductividad hidráulica (K) por ejemplo: valores de K inferiores a 0.04 cm/h indican suelos u horizontes fuertemente impermeables; si K no alcanza el valor de 0.2 cm/h hablamos de horizontes o suelos poco permeables; los consideramos permeables cuando se supera el valor anterior pero no se rebasa el de 2 cm/h ; superado 2 cm/h , los consideramos como muy permeables y valores por encima de 5 cm/h deben considerarse como excesivamente permeables.

Los suelos arenosos son de permeabilidad alta (entre 10^{-2} y 10^{-4} cm/s) y los arcillosos, de baja permeabilidad (10^{-5} y 10^{-8} cm/s).

Conductividad hidráulica: Este es un parámetro esencial en la determinación cuantitativa del movimiento del agua en el suelo y, consecuentemente para solucionar problemas que envuelven irrigación, drenaje, recarga y conservación del suelo. La conductividad hidráulica es afectada por la textura y estructura del suelo, siendo mayor en suelos altamente porosos, fracturados o agregados y menor en suelos densos y compactados. También puede ser afectada por el exceso de sodio (Na^+) presente o adicionado. Debemos distinguir las diferencias entre las dos conductividades: a) *conductividad hidráulica no saturada*: parámetro que depende del contenido de agua del material; la presencia de aire en el medio cambia radicalmente la estructura y continuidad del espacio poral conectado hidráulicamente y la sección eficaz de flujo. Todas estas razones hacen necesario conocer las características del flujo en condiciones de no saturación y b) *conductividad hidráulica saturada de la zona no saturada y saturada*: Propiedad que determina la relación, llamada ley de Darcy (dice que la velocidad del flujo del agua a través de una columna de suelo saturado, es directamente proporcional a la diferencia en carga hidráulica e inversamente proporcional a la longitud de la columna), entre el caudal específico la disminución de la altura piezométrica por unidad de distancia en la dirección del flujo conocida como el gradiente hidráulico que lo origina. Su determinación es importante ya que se requiere conocer los patrones de flujo del agua subterránea y estimar la capacidad de infiltración del suelo.

Pueden diferenciarse dos grandes grupos de técnicas; las de campo, prueba de trazadores, prueba de bombeo y prueba de pozos de gran diámetro o en laboratorio, método de carga constante y el método de carga variable aplicadas a muestras inalteradas.

2.6.2 Diseño preliminar

Consiste en la selección de algunos parámetros, que varían de acuerdo al tipo de sistema y se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Etapas del diseño preliminar de sistemas de tratamiento natural con suelo

<p>Sistemas de baja carga (BC)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluación y selección del emplazamiento • Nivel de pretratamiento • Selección del cultivo • Sistemas de distribución • Cargas de aplicación • Superficie necesaria • Volúmenes de almacenamiento necesarios
<p>Sistemas de infiltración rápida (IR)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluación y selección del emplazamiento • Nivel de pretratamiento • Sistemas de distribución • Cargas de aplicación • Ciclo operativo de proyecto • Superficie necesaria • Distribución espacial de la zona de infiltración • Distribución espacial y dimensionamiento del sistema de recuperación del efluente • Necesidades de almacenamiento
<p>Sistema de riego superficial (RS)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluación y selección del emplazamiento • Nivel de pretratamiento • Sistemas de distribución • Parámetros de diseño • Necesidades de almacenamiento • Superficie necesaria • Distribución espacial de los elementos del sistema • Cubierta vegetal

A continuación se describen cada una de las etapas:

2.6.2.1 Evaluación y elección del emplazamiento

Incluyen las características del suelo, como permeabilidad, altura de la columna de suelo, presencia de un estrato impermeable o de roca, así como, la topografía, la pendiente, el clima, entre otras.

2.6.2.2 Parámetros de diseño

Es necesario determinar la carga aplicada (volumen de agua residual aplicada por unidad de tiempo y por metro lineal de zona de aplicación, $m^3/h \cdot m$), la longitud de la zona de aplicación es directamente proporcional a la eficacia del tratamiento de los sistemas de riego e inversamente proporcional a la carga aplicada, la pendiente y el ciclo operativo, que consta de un periodo de aplicación seguido de una fase de secado.

2.6.2.3 Carga hidráulica del proyecto

También llamado dotación de riego, es el volumen de agua aplicado por unidad de superficie del terreno en un determinado período de tiempo, las unidades de expresión son mm/sem , mm/mes , $mm/año$. En donde a la lámina de agua en mm se conoce como demanda total de agua para el riego.

El diseño depende del tipo de sistema, de cultivo, de suelo, contacto con acuíferos, y suele basarse en parámetros como la permeabilidad del terreno o límites relativos a la carga de constituyentes, ajustable para aguas municipales; o carga orgánica, carga de sales y carga de metales aplicable para aguas residuales industriales, demanda total del agua de cultivo, carga hidráulica media anual, carga media de aplicación.

2.6.2.4 Nivel de pretratamiento

Importante para la protección de la salud pública, el control de condiciones desagradables, la limitación de los sistemas de aplicación, la reducción de la presencia de constituyentes limitantes del agua residual, y aspectos relacionados con el terreno y los cultivos.

El grado de tratamiento previo se basará normalmente en las normas de protección a la salud pública vigentes y depende del tipo de sistema que se este usando, tipo de cultivo, uso previsto para el mismo, grado de contacto de las personas con el agua residual aplicada y del método de aplicación.

2.6.2.5 Elección de los cultivos

Incluye la capacidad de asimilación de nutrientes, que depende de la productividad del cultivo y del contenido de nutrientes de la época de cosecha; el consumo de agua, también conocido como evapotranspiración y varía con las características físicas, etapa de crecimiento del cultivo, nivel de humedad y el clima local y la tolerancia a la salinidad, esta se debe controlar por medio de un drenaje y lixiviados adecuados, o seleccionando cultivos que toleren una alto nivel de salinidad.

2.6.2.6 Selección del sistema de distribución

El agua residual se puede aplicar tanto a cultivos como a vegetación mediante diferentes métodos, los sistemas de distribución se clasifican en tres grandes categorías (Figura 2.7), se elige entre los tipos de sistemas de distribución de acuerdo al tipo de sistema, de suelo, de cultivo y presupuesto.

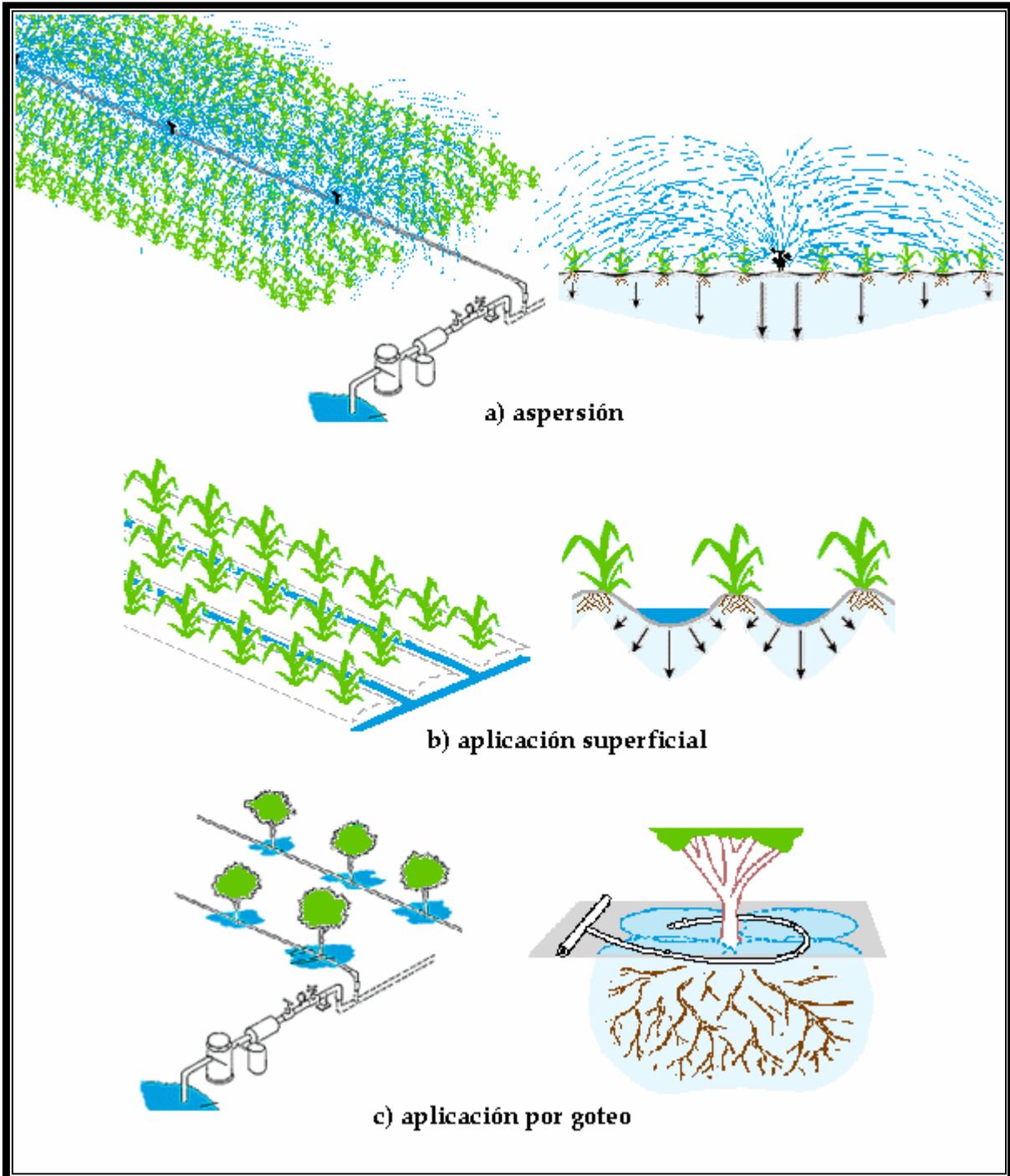


Figura 2.7 Técnicas de irrigación y patrones de distribución

Sistemas de aspersión: Los aspersores se adaptan a una amplia gama de suelos y condiciones topográficas y se emplean para diversos tipos de cultivos. Los sistemas de aspersión fijos se instalan sobre la superficie del terreno o enterrados bajo el mismo; ambos tipos suelen consistir en aspersores de impacto montados sobre unos tubos dispuestos espaciados a lo largo de las tuberías de distribución conectadas a las tuberías principales, presenta las ventajas de un costo relativamente bajo, son los sistemas más fiables y los más adecuados para el control automático, pero se daña fácilmente, tiene una vida útil corta y se debe extraer durante las operaciones de siembra y cosecha (Figura 2.8). También existen varios sistemas de aspersión móviles como el sistema de pivote central, el de rueda móvil y el de la tubería móvil. En este tipo de sistema de irrigación se debe considerar que el agua tenga las características adecuadas para evitar daños en los aspersores.



a)



b)

Figura 2.8 Sistemas de aspersión a y b

Sistemas de aplicación superficial: Los dos principales tipos de sistema de aplicación superficial son (Figura 2.9): el riego por surcos que se presenta cuando el agua se aplica a los surcos utilizando una tubería de aluminio provista de una serie de orificios o mediante sifones, fluye por gravedad a través de los surcos, desde los cuales se infiltra en el terreno; y el riego por melga que se prepara realizando en el suelo ondulaciones paralelas a la dirección de la pendiente.; también existe el método de balsas de infiltración en donde la superficie se divide en una serie de balsas de infiltración de poca profundidad, donde se descarga el agua mediante una red de tuberías que funcionan por gravedad o a baja presión, la geometría y dimensiones de las balsas pueden venir dictadas por las condiciones de las aguas subterráneas.

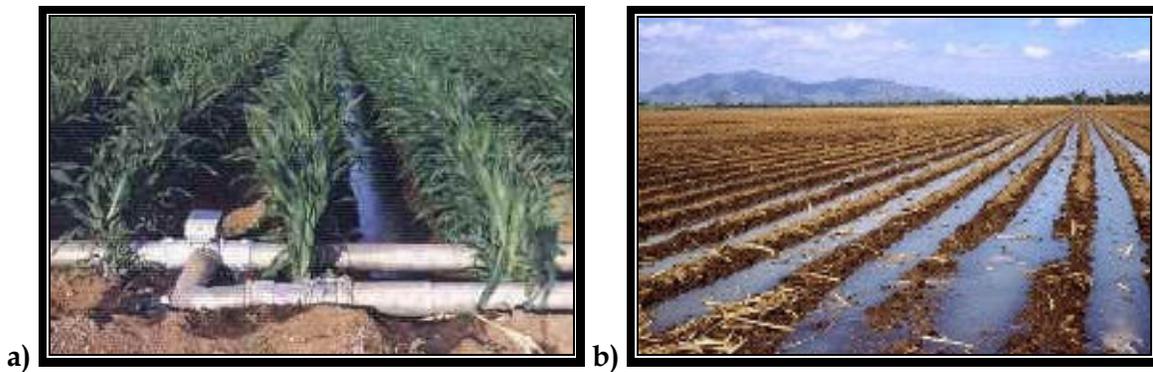


Figura 2.9 Sistema de aplicación superficial a y b

Sistemas de aplicación por goteo: Consiste en una red de tuberías de distribución en las que el agua se suministra por unos pequeños emisores situados cerca de la base de las plantas que pretende regar, también debe cumplir con un pre-tratamiento específico para evitar la obstrucción del sistema. (Figura 2.10).



Figura 2.10 Sistema de aplicación por goteo

2.6.2.7 Superficie necesaria y distribución espacial

Incluye superficie cultivada o superficie de campo y la requerida para las instalaciones de tratamiento previo a la aplicación, zonas de amortiguación, accesos y depósitos de almacenamiento. Se calcula a partir de la carga hidráulica de proyecto, ciclos operativos, periodo de aplicación y datos de almacenamiento.

La distribución de la superficie de infiltración de sistemas dotados de distribución por aspersores o por balsas de infiltración dependen de la geometría del emplazamiento o del ciclo operativo, para asegurar el cambio entre la fase húmeda y la fase de secado, y la distribución de los elementos del sistema, se refiere a la superficie de aplicación de la longitud establecida.

2.6.2.8 Sistemas de recuperación de efluente

Cuando se requiera controlar el agua percolada o, no se desee que entre en contacto con las aguas subterráneas, se pueden emplear drenes o pozos para recuperar el efluente.

2.6.2.9 Necesidades de almacenamiento y consideraciones climáticas

En los casos en que la carga residual disponible excede la carga hidráulica de proyecto, es necesario disponer de instalaciones para el almacenamiento del agua residual. Para estimar el volumen de almacenamiento necesario, se emplea un procedimiento de cálculo de balance mensual de agua.

2.6.2.10 Drenaje

Se refiere a cualquier tipo de conducción enterrada bajo la superficie del terreno que dispone de juntas abiertas u orificios y que se emplean para recoger y transportar el agua regenerada que ha percolado en el terreno. Para el diseño y disposición de los sistemas de drenaje en un determinado emplazamiento es necesario tener en cuenta factores como la topografía del terreno a drenar, la permeabilidad del suelo y la posición, el nivel y fluctuaciones anuales del nivel freático.

2.6.2.11 Control de la escorrentía superficial

Para su diseño es importante tener en cuenta el retorno de sobrantes de riego, la escorrentía de aguas pluviales (lluvias de gran intensidad) y la protección del sistema.

2.6.2.12 Selección y control de los recubrimientos vegetales

Cuya finalidad es evitar la erosión y facilitar procesos de eliminación en sistemas de riego superficial.

2.6.3 Proyecto constructivo

Comprende el dimensionamiento, selección y distribución espacial de los componentes individuales del sistema, entre los que se encuentran las conducciones o canales de distribución, válvulas y estaciones de bombeo, sistemas de aspersión y sistemas de drenaje superficial y subsuperficial, para los tres tipos de sistema natural por suelo.

El proceso constructivo, se lleva a cabo siguiendo las normas de práctica habitual de la ingeniería civil y agrónoma; empleando procedimientos de diseño de los sistemas de riego convencionales.

Con base en lo expuesto anteriormente se establece que el SAT presenta una solución atrayente para los problemas de aguas residuales de la ZMCM, ya que se demuestra un importante porcentaje de remoción aunado a todas las ventajas que ofrece, como su bajo costo por lo que es primordial conocerlo y estudiarlo.

Por sus características, el valle de Tula se comporta como un sistema de tratamiento natural de agua residual, sin embargo, por definición, no podría ser considerado en el sentido estricto como un SAT (*Soil Aquifer Treatment*), ya que en otros países en estos sistemas se diseñan las condiciones de operación y se utiliza agua residual tratada. Por lo que la primera etapa a desarrollar en este trabajo fue cotejar en la literatura las características que definen a un SAT como tal, contra las características que presenta el Valle de Tula que lo hacen comportarse como un SAT espontáneo muy eficiente.

No obstante, por muy favorables que sean las características del suelo, es evidente que la capacidad natural de depuración no es ilimitada. El suelo no puede asimilar, inmovilizar, inactivar y degradar todos los contaminantes que recibe y por ello, puede transferir los contaminantes por volatilización, bioasimilación, disueltos en el agua y erosión a otros medios. Se produce entonces una situación no prevista que ha sido definida recientemente por algunos autores como "Bomba Química del Tiempo" (BQT) y depende de tres grandes factores: vulnerabilidad del suelo, entrada de compuestos químicos y uso del suelo (García y Dorronsor, 2004).

Por ello es importante sujetarlo a ciertos parámetros de diseño y realizar estudios para conocer los procesos de eliminación que se están presentando y predecir el funcionamiento a largo plazo para que sea eficaz, no llegue a saturarse y se convierta en una fuente de contaminación ambiental.

En la Tabla 2.5 se resumen las características de criterios de diseño antes mencionados, así como, las propiedades de los sitios requeridos para los tres tipos de sistemas de tratamiento con suelo y se compara con las características que se presentan en el Valle de Tula.

Tabla 2.5 Comparación entre los diferentes parámetros para los sistemas del SAT y el Valle de Tula.

Parámetros	Baja carga (BC)	Infiltración rápida (IR)	Riego superficial (RS)	Valle de Tula
Método de aplicación	aspersión o superficial ^a	generalmente superficial	aspersión o superficial	Riego por inundación
Carga hidráulica anual (m ³ /año)	0.6 - 2.0 y 1.7 - 6.0	6.0 - 90	7.3 - 56.7	Variable (depende de la época del año y del cultivo ²) Ejemplos: Maíz(primavera):2.8 a 3.5 Maíz(verano): 2.9 a 3.6 Alfalfa: 4.3 a 5.4
Requerimiento del área (ha) ^b	6.0 - 21.74 y 18.2 - 58.8	0.4 - 6.0	0.65 - 4.8	³ Se usan 90,00 ha
Pretratamiento mín. necesario	Sedimentación primaria ^c	Sedimentación primaria	Cribado	No existe pre-tratamiento*
Disposición del agua tratada	Evapotranspiración y percolación	Principalmente percolación	Escurrimiento	Percolación (Manantiales y hacia los pozos)
Vegetación	Necesaria	Opcional	Necesaria	Usa Vegetación

Criterios de diseño

Parámetros	Baja carga (BC)	Infiltración rápida (IR)	Riego superficial (RS)	Valle de Tula
Pendiente	< 15% en terrenos cultivados < 40% en terrenos no cultivados	No es factor crítico, pendientes muy prolongadas requieren mucha labor de la tierra	del 1 al 8%	¹ Por lo general las zonas de uso agrícola presentan bajas pendientes (2%)
Permeabilidad	De moderadamente baja a moderadamente alta	Alta (arenas, arenas margosas)	Baja (arcillas, limos y suelo con barreras impermeables)	Variable 1 *Tobas: 0.03 a 0.19m/d *Arena fina con arcilla: 0.23m/d *Arena fina con toba: 0.14 a 1.67 m/d *Toba con arena: 0.7 a 2.1 m/d
Profundidad del acuífero	0.6 – 1 m (mínimo)	3.0 m (si existe drenaje se pueden aceptar profundidades menores)	No es factor crítico	¹ de 3 a 40 m Aunque ha disminuido en los últimos años
Limitaciones climáticas	Almacenamiento en época de frío y durante precipitaciones fuertes	Ninguna (probablemente en época de frío requiera modificar la peración)	Almacenamiento durante las lluvias y en tiempo frío	En época de lluvia se almacena agua residual en las presas y canales principales
Sitios requeridos				

* Aunque la serie de presas, sobretodo Requena y Endho, cumplen en cierta forma la función de sistemas de sedimentación (pretratamiento)

¹ Jiménez *et al.*, 1999

² BGS, *et al.*, 1998

³ Área de riego con aguas residuales más grande del mundo (Mara y Cairncross, 1989)

^a Incluye riego por canales, surcos y melgas

^b La superficie necesaria no incluye la zona de amortiguación, ni los accesos y zanjas

^c Depende del uso del efluente y del tipo de cultivo.

Fuente: Metcalf y Eddy, 1995

ESTADO DEL ARTE

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 Proyecto en el Valle de Tula

En el capítulo 1 se estableció como una forma económica, rápida y efectiva de resolver el problema del desalojo del agua residual de la ZMCM convirtió al Valle de Tula en una zona agrícola no planificada obteniendo así, un sistema atípico de tratamiento natural de suelo.

El dilema actual que enfrenta es que en un principio se aplicó este tratamiento sólo considerando los grandes beneficios que se obtienen, sin preocuparse por las consecuencias, pues los productos químicos de síntesis y sus productos de degradación, según su estructura química tienen tres tipos de comportamiento cuando están en el suelo: la lixiviación (se infiltran junto al agua y pasan a los acuíferos), se degradan y no afectan ni al terreno ni al agua, o se adsorben en suelo atraídos por las cargas eléctricas de las partículas del suelo y temporalmente pasan a formar parte del mismo con el riesgo de contaminarlo.

Jiménez, *et. al.* (1997 y 1999) a pesar de que reportan la presencia de algunos compuestos orgánicos en el agua residual de la Ciudad de México señalan su ausencia en el agua del acuífero del DR 003 Tula; lo que parecería indicar que estos fueron removidos o retenidos por los suelos.

Los mismos autores resaltan el hecho de los pocos compuestos orgánicos encontrados en el agua residual a pesar de su naturaleza. Estos resultados, pueden deberse a las técnicas analíticas de extracción y concentración usadas para cuantificar dichos compuestos en su momento y cuyos límites de detección de los equipos utilizados eran relativamente altos (>5 µg/L). Por ello, se consideró necesario mejorar las técnicas de extracción y detección para obtener muestras más concentradas y por lo tanto, resultados más precisos.

En estudios más recientes sobre evaluación de la calidad de agua de las fuentes de abastecimiento en manantiales del Valle de Tula se ha detectado la presencia de compuestos orgánicos no identificados que pueden ser productos de la acumulación o subproducto de la descomposición (Jiménez, *et al.*, 2003) y muy probablemente de alto riesgo. No se sabe con exactitud en qué medida el contenido de materia orgánica presente en el agua residual es la causante del problema.

Si el transporte de los contaminantes depende de tres procesos: hidrodinámicos, abióticos y bióticos; estos procesos se estudian en campo inyectando el compuesto y monitoreando a través de pozos o en laboratorio usando materiales porosos (Chávez, 1996).

En la actualidad, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, realiza un estudio, enfocado a determinar la transformación y destino de los contaminantes, particularmente de algunos compuestos orgánicos, en suelos del Valle de Tula, así como los mecanismos principales que intervienen en su remoción, con lo cual se podrán prever efectos posibles en la salud y en el medio ambiente por la infiltración del agua residual.

El Laboratorio del Instituto cuenta con un Cromatógrafo de Gases acoplado a un detector Selectivo de Masas, el cual contiene una biblioteca NIST (National Institute of Standards and Technology) más actualizada y con una gama más amplia de compuestos identificables, lo que junto con la mejora en las técnicas de extracción y concentración permitirá realizar un estudio más detallado.

De acuerdo con Rüetsch (2000) la adsorción es el principal proceso de remoción en un sistema de tratamiento natural. Mansell *et al.* (2004), señalan que los ensayos en las pruebas batch proporcionan el potencial de sorción entre el adsorbente (suelo) y el adsorbato (compuesto orgánico) y que los estudios en columnas determinan la cinética de adsorción, por ello, el tema de adsorción será abordado a continuación.

3.2 Adsorción

Es el proceso en el que el soluto (contaminante) se une a las partículas del suelo. El transporte y comportamiento de los compuestos orgánicos en la zona saturada se considera que está controlada por parámetros físicos y químicos del adsorbente y por las características químicas del adsorbato. La interacción entre el adsorbato y el adsorbente es conocida como sorción.

Existen distintos métodos para medir la influencia de la sorción; el más usado en el laboratorio es el de las isotermas de adsorción/desorción en suelos en que se relaciona la concentración del compuesto en solución con su concentración en la fase sólida.

El coeficiente de distribución, K_d , es una isoterma lineal expresa la relación de equilibrio entre la fase sólida y la líquida y corresponde a la pendiente de la isoterma, y se expresa de la siguiente manera:

$$K_d = \frac{C_s}{C_w}$$

Donde:

K_d	coeficiente de distribución cuyas unidades corresponden al volumen de agua/masa del sólido (m^3/g)
C_s	concentración del compuesto en la fase sólida
C_w	concentración del compuesto disuelto

El grado de adsorción depende de las propiedades físicas y químicas de las sustancias disueltas y de las características químicas y físicas del suelo. En suelos arenosos, la adsorción es relativamente baja con respecto a la de suelos arcillosos y limosos o bien, suelos ricos en materiales orgánicos. (Chávez, 1996).

Los datos adsorción-desorción son necesarios para la evaluación de la tendencia migratoria de los químicos en el aire, agua y suelo o compartimentos sedimentables de nuestro ambiente.

En función del tipo de molécula, la adsorción puede durar desde unos días a muchos meses, e incluso ser tan fuerte que los microorganismos no puedan acceder a la sustancia para degradarla, por lo que el proceso de adsorción-desorción de químicos tiene un efecto en el proceso de transporte de contaminantes y en su biodisponibilidad.

3.3 Simulación del SAT en el laboratorio

Los modelos que se utilizan para explicar el transporte de los contaminantes en suelo tuvieron su origen en química o en ingeniería química, sin embargo, la gran cantidad de variables que intervienen en la migración de los contaminantes ha hecho que el problema se estudie en forma multidisciplinaria pues requiere el conocimiento de aspectos microbiológicos, químicos, físicos y de ingeniería para entender los mecanismos de migración de los contaminantes (Chávez, 1996).

Los ensayos o simulación en laboratorio en columnas rellenas de suelo son una forma eficiente de estudiar los procesos de transporte o eliminación de los compuestos orgánicos que se realizan en los suelos a través de un SAT, pues, pretenden reproducir lo más posible el entorno en donde se encuentra el lugar que se estudia.

Los ensayos en laboratorio de columnas empacadas de suelo han sido probados en otros países por diferentes autores, y las experiencias realizadas se presentan a continuación en orden cronológico:

Rice (1974), Estudio el efecto de los valores de infiltración obtenidos usando efluentes secundarios, para ello, utilizó columnas de 62 cm de longitud y 10 cm de diámetro interno empacadas con dos tipos de suelo de textura franco arenosa y arenosa. Determinó una saturación física debida a la alta concentración de sólidos en suspensión. La saturación biológica durante los largos periodos de inundación trajo como consecuencia una reducción importante de los valores de infiltración (Estados Unidos).

Lance, *et. al.* (1980), Realizaron estudios comparativos sobre la renovación de efluentes primarios y secundarios en tubos de Cloruro de Polivinilo (PVC) de 2.75 m de longitud y 15 cm de diámetro empacadas con suelo de textura franco arenosa. Demostraron que la concentración de sólidos suspendidos no afectaba a los valores de infiltración. También estudió las remociones de nitrógeno, fosfato y coliformes fecales (Estados Unidos).

Rice y Bouwer (1984), Ensayaron en el laboratorio, en columnas de suelo usando efluentes primarios y secundarios y compararon la diferencia en la depuración de los distintos contaminantes. Determinaron reducciones significativas en nitrógeno, fosfato, bacterias y virus (Estados Unidos).

Powelson y Gerba (1994), Usando columnas de Acrílico (clear plexiglas) de 5 cm de diámetro interno empacadas con arena gruesa, estudiaron la remoción de virus y concluyeron que el tipo de efluente no tenía ningún efecto significativo en el transporte del virus; en la zona no saturada la remoción de virus fue tres veces más rápido que en la zona saturada y el transporte real de virus constituyó tan sólo una pequeña fracción de los valores esperados basados en estudios discontinuos (Estados Unidos).

Yamaguchi, *et. al.* (1996), En tubos de Cloruro de Polivinilo (PVC) de 50 cm de longitud y 20 cm de diámetro empacadas con suelo areno limoso, los autores estudiaron los valores de nitrificación durante periodos no saturados en el sistema de infiltración rápida, inyectando a las columnas un flujo constante de muestras de agua residual sintética, concluyeron que la combinación de bajas temperaturas con alta carga de nitrógeno disminuye la nitrificación. El sistema de infiltración rápida puede conseguir la completa eliminación de nitrógeno si funciona a una velocidad de flujo y carga de nitrógeno correctas para favorecer la transferencia del oxígeno.

Kopchynski, *et. al.* (1996), En columnas de acero inoxidable, de 2.44 m longitud y 30.5 cm de diámetro interno, que fueron empacadas con 4 diferentes tipos de suelo (arena, areno-limosa, limo y arcilla), estudiaron los efectos del suelo y los diferentes niveles de pretratamiento del agua residual (diferentes niveles de DBO₅, carbón orgánico, amonio y nitrato) del SAT. Concluyeron que el nivel de pretratamiento del agua residual no tiene el impacto en la eficiencia de reacciones biológico-aerobias, pero sí tiene el tipo de suelo y la tasa de infiltración (Estados Unidos).

Quanrud, *et. al.* (1996), Realizaron ensayos en el laboratorio con muestras de agua residual provenientes de tratamientos secundario y terciario empleando columnas de acero inoxidable de 1 m de longitud y 8.62 cm de diámetro interno, empacadas con suelo franco arenoso. Se simuló el transporte de compuestos orgánicos a través del SAT y se estudiaron los mecanismos de remoción que se presentan en la zona saturada y la zona no saturada. Y llegaron a las siguientes conclusiones: la degradación biológica es el principal mecanismo de remoción del carbono orgánico disuelto, la adsorción es el principal mecanismo de remoción de los compuestos orgánicos pero el destino a largo plazo de éstos no es aún conocido. La mayor parte de la remoción de compuestos orgánicos, a través de las columnas del suelo ocurre a pocos centímetros debajo de la capa de suelo. Al comparar las aguas resultado del SAT de los dos tratamientos; la del tratamiento terciario no ofrece ninguna ventaja significativa sobre la del tratamiento secundario en términos de características orgánicas finales (Estados Unidos).

Quanrud, *et. al.* (1996a), Realizaron ensayos en el laboratorio con columnas de acrílico, de 1.30 m de longitud y 8.62 cm de diámetro interno, que fueron empacadas con 1 m de distintos tipos de suelos (arenosos a limo arenosos). Con ello, determinaron el efecto del tipo de suelo y de los valores de infiltración sobre la eliminación de los compuestos orgánicos del agua residual durante un SAT. Concluyeron que no existía una correlación significativa entre los valores de infiltración y la eficacia en la eliminación de los compuestos orgánicos de los suelos estudiados (Israel).

Chávez (1996), Examinó el transporte y degradación de compuestos orgánicos en el suelo. Los ensayos se realizaron en columnas de acero inoxidable de 60 cm longitud y 30 cm de diámetro, y se empacaron con dos suelos (arena y arcilla). Resalta la importancia de normar la disposición de este tipo de compuestos que representan una fuente importante de contaminación de los acuíferos (México). Aclara que la dimensión de la columna fue mayor a las que se utilizan en este tipo de experimentos y recomendó columnas de 30 cm de longitud y 5 cm de diámetro para futuros estudios.

Iniestra y Velásquez (1998), Investigaron el comportamiento de hidrocarburos (gasolina Magna-Sin y Nova-Plus) en suelos. Las pruebas se realizaron en 12 columnas de vidrio de 20 cm de longitud y 5 cm de diámetro, empacadas con suelo (agrícola) y con condiciones diferentes (esterilización y sin ella). Recomiendan que una vez montada la metodología se continúe con los experimentos en otros sitios (México).

Wild y Reinhard (1999), En columnas de laboratorio de cristal, de diferentes longitudes (7.9, 15.6, 27.6, 16.9, 29.9 y 15 cm) y diámetros internos de (1.0, 2.4, 4.8 y 10 cm), estudió la biodegradación residual del ácido 4-oxifenoxiacético durante la recarga o el transporte de agua subterránea. Concluyeron que la tasa de infiltración es el factor más influyente para la variación en la remoción de este ácido (Estados Unidos).

Mabrouki, *et. al.* (1999), Efectuaron ensayos de laboratorio en columnas para estudiar la movilidad del fosfato a través del suelo. El estudio se realizó sobre muestra de suelo franco limoso. Concluyen que la capacidad de retención para el fosfato, se atribuye fundamentalmente a la textura arcillosa y la capacidad de intercambio del suelo estudiado (España).

Drewes y Fox (1999), Establecen la degradación del carbono orgánico. Realizaron ensayos en columnas en el laboratorio, combinados con análisis de ultra filtración y adsorción. Utilizaron columnas de 1 m de longitud y 14 cm de diámetro, empacadas con diferentes suelos. Concluyeron que la biodegradación era el proceso dominante en la eliminación del carbono orgánico disuelto (COD) durante el SAT (Estados Unidos).

Castillo, *et. al.* (2000), Emplean columnas de PVC de 18.5 cm de diámetro interior y 6 mm de espesor de diferentes longitudes (1, 2 y 2.5 m) para evaluar la infiltración intermitente en el suelo para la reutilización del agua depurada en el norte de Chile. Dispusieron de un efluente procedente de una laguna aerobia para realizar ensayos usando como material de relleno suelos de la zona de estudio. La eficiencia del sistema se determinó a través del nivel de indicadores microbiológicos y la caracterización físico-química entre el influente y efluente, mostrando una eficiente reducción en el contenido microbiológico, eliminación estable de materia orgánica (80%-90% del COT, DQO y DBO₅) y una reducción parcial del amonio a través de la adsorción y nitrificación con desnitrificación especialmente en los suelos arenosos. Concluyen que el agua recuperada por el SAT es apta para uso en riego sin restricción por presentar concentraciones de coliformes fecales dentro de la norma, con la ventaja de obviar desinfección y formación de agentes mutágenos/carcinógenos (Chile).

Jin, *et. al.* (2000), En columnas de un termoplástico (vidrio), de 7.6 cm de diámetro interno y 10 cm de largo, experimentaron la remoción y transporte de los virus en las zonas saturada y no saturada de suelos arenosos. Demostraron lo importante que es alternar los ciclos de agua aire para adsorción (Estados Unidos).

Rüetschi (2000), Estudió la remoción del carbono orgánico disuelto en un SAT. Utilizó columnas de acero inoxidable en el laboratorio. Concluyó que las dos terceras partes de la remoción ocurren en la zona no saturada (absorción) y el resto en la superficie del suelo (degradación microbiana) (Suiza).

Vallejos, *et. al.* (2001), En columnas de PVC de 18.5 cm diámetro interno y 50 cm de longitud unidos con bridas para formar columnas de 1 y 2 m, empacadas con suelo de Copiapó, resaltando que las tasas de infiltración presentan un decaimiento de tipo exponencial hasta llegar a una tasas de equilibrio. Concluyen que en el diseño de un SAT la capa más restrictiva es la que define las tasas de infiltración y tiempos de retención alcanzados por el sistema. La comparación de resultados de carácter hidráulico entre columnas de infiltración a un escenario real (planta piloto), aún cuando muestra comportamientos similares con respecto a las tasas de infiltración, no es directa ya que no todas las condiciones del suelo pueden ser representadas adecuadamente en columnas de infiltración (Chile).

Clothier y Scotter (2002), Realizaron estudios sobre el avance de la humedad en un tubo horizontal, conteniendo suelo homogéneo. El objetivo fue obtener la relación entre la difusividad, propiedad física del suelo que relaciona la conductividad hidráulica, la componente matricial del potencial y el contenido de humedad volumétrica y la humedad, que determina que el agua penetrará en el suelo tan rápido como éste pueda absorberla.

Lee, *et. al.* (2002), Estudiaron el comportamiento de adsorción y transporte de la Naftalina en suelo, usando columnas de acero inoxidable de 12.4 cm de longitud y 2.2 cm de diámetro, empacadas con arena de textura franco. El estudio demostró que la fuerza iónica y la velocidad del agua tienen un efecto en la adsorción y el transporte de la naftalina en suelo.

Al-Subu, *et. al.* (2003), En columnas de PVC de 10 cm de diámetro y 2 m de longitud, realizaron en el laboratorio simulaciones de irrigación en suelo. Concluyendo que la arcilla natural influye en las propiedades de los suelos. Mencionan la importancia del monitoreo de la calidad de agua residual, suelo y agua subterránea esencial para un reuso adecuado de agua residual (Palestina).

Guo, *et. al.* (2003), Estudiaron la adsorción y movilidad de un herbicida (Fomesafen) en suelos de China, montando columnas de laboratorio de PVC de 55 cm de longitud y 7.5 cm de diámetro interno, sus resultados indicaron que el pH del suelo fue más importante que la materia orgánica para la adsorción de este compuesto (China)

Dudal, *et. al.* (2003), En el laboratorio investigaron el comportamiento del pentaclorofenol durante el SAT por medio de ensayos en columnas hechas con cristal de borosilicato (KIMAX) y politetrafluoroetileno, de 15 cm de longitud y con un diámetro interno de 4.8 cm, empacadas con muestra de arena de Ottawa, con diferentes condiciones (bióticas y abióticas) (Canadá).

Castillo, *et. al.* (2003), Determinaron la movilidad de compuestos orgánicos (carbofuran) usando columnas de PVC de 20 cm de longitud y 4.6 cm de diámetro interno, empacadas con suelo sin alterar. El movimiento de los compuestos orgánicos a través del perfil del suelo es generalmente retardado por las propiedades de adsorción de los constituyentes del mismo, concluyen que la cantidad de materia orgánica influye en la movilidad de este compuesto (Argentina).

Rovirosa (2004), En columnas plásticas 70 cm (longitud) y 15 cm (diámetro interno), empacadas con arena sílice y arena de playa. Realizó un estudio en laboratorio para verificar la potencialidad en la remoción de materia orgánica, nutrientes y organismos coliformes presentes en efluentes (fosa séptica). Obtuvo remociones de hasta 60 % de DQO y DBO₅, entre 60% y 90% en nitrógeno y hasta 97 % en fósforo total. Recomienda, profundizar el estudio a escala de laboratorio, piloto e industrial para definir parámetros de diseño y operación para la proyección del SAT en suelos (Cuba).

Rauch y Drewes (2004), Determinar el potencial de remoción de materia orgánica en el SAT fue el objetivo del estudio. Simularon la infiltración en el suelo en el laboratorio con columnas activadas biológicamente, usando columnas de plexiglas de 30 cm de longitud y 6.5 cm de diámetro interno, las cuales empacaron con arena sílice. Concluyeron que la mayoría de la remoción biológica se produce en los primeros 30 cm de la infiltración del flujo a través del suelo (Estados Unidos).

Cha, *et. al.* (2004), Evaluaron efluentes de agua residual de 7 plantas de tratamiento de Corea del Sur para evaluar una posible aplicación como SAT, usando columnas de acrílico de 1 m longitud y 11 cm de diámetro interno, empacadas con suelo tamizado de un río (arena). Determinaron que la eficiencia varía dependiendo de las características del sitio y del efluente de agua residual y que deben de considerarse a ambos cuando se requiera evaluar la viabilidad del uso del SAT (Corea).

Lee, *et. al.* (2004), Para estudiar el comportamiento de adsorción de los metales pesados durante el SAT realizaron estudios en laboratorio con columnas de 1.5 m de longitud y 10 cm de diámetro, empacadas con suelo colectado de un río de la República de Corea. Concluyen que el factor que más influye en la adsorción de metales fue la concentración en solución del metal (Corea).

Mansell, *et. al.* (2004), Realizaron estudios en columnas experimentales de laboratorio para conocer el mecanismo de remoción de esteroides durante el SAT. Para ello emplearon columnas de 30 cm de longitud y 6.5 de diámetro interno, empacadas con distintos suelos. Demostraron que la adsorción es el principal mecanismo de remoción de las hormonas estudiadas, y es más eficiente en suelos cuyo contenido de limo, arcilla y materia orgánica es mayor (Estados Unidos).

Karaca, *et. al.* (2005), Investigaron la aplicación de varios modelos de adsorción para la adsorción del azul de metileno realizando pruebas en recipientes cilíndricos de acero inoxidable de 14 cm de longitud y 3 cm de diámetro interno, de donde sólo es importante resaltar el material en el que fueron diseñados los aparatos que se utilizaron (Turquía).

Ahmad, *et. al.* (2005), Para estudiar la adsorción de componentes orgánicos en suelo realizaron ensayos en columnas de acrílico de 20 cm de longitud y 1.91 cm de diámetro interno, empacadas con suelo (Australia) y concluyeron que las dimensiones de las columnas que se utilizaron son más representativas de condiciones de campo y particularmente conveniente para débil adsorción de compuestos orgánicos en suelos (Australia).

Logan y Kim (2005), En columnas de vidrio de 14.2 cm longitud y 2.54 cm de diámetro, empacadas con suelo arenoso, estudiaron la remoción de clorato y perclorato por microorganismos. Los resultados indican que el agua potable contaminada con perclorato puede tratarse en columnas de arena o con una sub-capa de bioremediación. Recomiendan que los filtros de arena convencionales del agua potable, que funcionan en tasas hidráulicas altas (mayor altura) puedan ser convenientes para el tratamiento de agua residual debido a sus longitudes largas (Estados Unidos).

A partir de lo antes mencionado, en la Tabla 3.1 se presenta en resumen los aspectos más importantes que fueron considerados en los diversos estudios del SAT en columnas de suelo en el laboratorio.

Tabla 3.1 Resumen de los estudios de suelo en columnas de laboratorio.

Material	Columnas			Tipo de suelo	Efluente	Tipo de flujo aplicado	Constituyente estudiado	Porcentaje de Remoción	Observaciones	Referencia
	L (cm)	Ø (cm)	L/Ø							
NE	62	10*	6.2	franco arenoso y arenoso	secundario	intermitente	Tasas de infiltración	NE	Saturación física por SS y biológica por largos periodos de inundación.	Rice, 1974
PVC	275	15*	18	franco arenoso	primario y secundario	intermitente	Nitrogeno, fosfato y coliformes fecales	45.6 - 28.5 % de nitrógeno	SS no afectan a los valores de infiltración	Lance, <i>et. al.</i> , 1980
NE	NE	NE	-	NE	primario y secundario	NE	Nitrógeno, fosfato, bacterias y virus	NE	-	Rice and Bower, 1984
Acrílico	NE	5*	-	arena gruesa	secundario y terciario	intermitente	Virus	0.8 - 8.0 %	En la zona no saturada la remoción del virus es tres veces más rápido que en la zona saturada	Powelson and Gerba, 1994
PVC	50	20	2.5	areno limoso	agua residual sintética	continuo	Nitrógeno	NE	El sistema de infiltración rápida consigue una completa eliminación del contaminante si funciona a una velocidad de flujo y carga de contaminante correcta	Yamaguchi, <i>et. al.</i> , 1996

Material	Columnas			Tipo de suelo	Efluente	Tipo de flujo aplicado	Constituyente estudiado	Porcentaje de Remoción	Observaciones	Referencia
	L (cm)	Ø (cm)	L/Ø							
Acero inoxidable	100	8.62*	11.6	franco arenoso	secundario y terciario	continuo	Carbon orgánico disuelto	NE	El principal mecanismo de remoción de los compuestos orgánicos es la adsorción	Quanrud, <i>et. al.</i> , 1996
Acrílico	130	8.62*	15	arenoso a limo arenoso	secundario	continuo	Carbon orgánico disuelto	20 a 56 % de COD	No existe una relación significativa entre los valores de infiltración y la eficacia de eliminación de compuestos orgánicos	Quanrud, <i>et. al.</i> , 1996a
Acero inoxidable	244	30.5*	8	arenoso a arcilloso	secundario y terciario de diferente origen	intermitente	DBO ₅ , carbón orgánico, amonio y nitrato	90 % de nitrato	El nivel de pretratamiento del agua residual no tiene impacto en la eficiencia del SAT.	Kopchynski, <i>et. al.</i> , 1996
Acero inoxidable	60	30	2	arenoso y arcilloso	sintético	intermitente	Compuesto orgánico	NE	Recomienda columnas de 30 cm de longitud y 5 cm de diámetro.	Chávez, 1996
Vidrio	20	5*	4	agrícola	sintético	intermitente	Hidrocarburos	NE	Investiga la contaminación de suelos en México	Iniestra y Velazquez, 1998
Vidrio	7.9 - 15	1 - 10*	2.8	arenoso y arcilloso	sintético	continuo	Ácido	NE	Tasa de infiltración es el factor más influyente.	Wild and Reinhard, 1999

Material	Columnas			Tipo de suelo	Efluente	Tipo de flujo aplicado	Constituyente estudiado	Porcentaje de Remoción	Observaciones	Referencia
	L (cm)	Ø (cm)	L/Ø							
NE	NE	NE	-	franco limoso	sintético	continuo	Fosfato	NE	Capacidad de retención para el fosfato se le atribuye a la textura arcillosa.	Mabrouki, et. al., 1999
NE	100	14	7.2	arenoso	primario	intermitente	Carbón orgánico disuelto	NE	La biodegradación es el proceso dominante en la eliminación de COD	Drewes and Fox, 1999
plexiglas	10	7.6*	1.4	arenoso	primario	intermitente	Virus	NE	Es muy importante alternar los ciclos de agua-aire para la adsorción	Jin, et. al., 2000
Acero inoxidable	NE	NE	-	NE	primario	continuo	Carbon orgánico disuelto	85 % de COD	2/3 de la remoción ocurren en la zona no saturada (adsorción)	Rüetschi, 2000
PVC	100, 200 y 250	18.5*	5.2, 10 y 16	areno limoso y limo arenoso	secundario	intermitente	Materia orgánica, DQO, DBO y coliformes	80-90 % de DQO y DBO	Agua recuperada por SAT es apta para uso en riego	Castillo, et. al., 2000
PVC	100 y 200	18.5*	5 y 11	areno limoso	secundario	continuo	Tasas de infiltración	NE	Es necesario realizar ensayos de infiltración en escenarios reales (plantas piloto)	Vallejos, et. al., 2001
Acero inoxidable	12.4	2.2	6.2	franco arenoso	primario	continuo	Naftalina	NE	La fuerza iónica y la velocidad del agua tienen efecto en la adsorción.	Lee, et. al., 2002

Material	Columnas			Tipo de suelo	Efluente	Tipo de flujo aplicado	Constituyente estudiado	Porcentaje de Remoción	Observaciones	Referencia
	L (cm)	Ø (cm)	L/Ø							
PVC	200	10	20	arcilloso	sintético	intermitente	metales	NE	La arcilla natural influye en la propiedades de los suelos.	Al -Subu, et. al., 2003
PVC	55	7.5*	8	varios	sintético	intermitente	Compuestos orgánicos	NE	El pH del suelo fué más importante que la materia orgánica para la adsorción del compuesto estudiado.	Guo, et. al., 2003
Vidrio	15	4.8*	1.76	arena de Ottawa	sintético	continuo	Pentaclorofenol	NE	Las columnas fueron empacadas con condiciones bióticas y abióticas.	Dudal, et. al., 2003
PVC	20	4.6*	4.3	NE	NE	intermitente	Compuestos orgánicos	NE	Movimiento de compuestos orgánicos es retardado por las propiedades de adsorción del suelo.	Castillo, et. al., 2003
Plástico	70	15*	4.6	arena sílice y arena de playa	primario	intermitente	Materia orgánica, nutrientes y organismos coliformes	60 % DBO, 60-90 % de nitrógeno y 97 % de fosfato	Importancia de los estudios a escala de laboratorio y plantas piloto.	Rovirosa, 1999
NE	150	10	15	NE	sintético	continuo	Metales pesados	NE	Factor más influyente en la adsorción de metales es la concentración en la solución.	Lee, et. al., 2004

Material	Columnas		Tipo de suelo	Efluente	Tipo de flujo aplicado	Constituyente estudiado	Porcentaje de Remoción	Observaciones	Referencia
	L (cm)	Ø (cm)							
plexiglas	30	6.5*	4.6	secundario	intermitente	Materia orgánica	NE	La mayor parte de remoción biológica se produce en los primeros 30 cm de infiltración.	Rauch and Drewes, 2004
plexiglas	30	6.5*	4.6	secundario	intermitente	Esteroides	80	Adsorción es el principal mecanismo de remoción de las hormonas estudiadas.	Mansell, et. al., 2004
Acrílico	100	11*	9	agua residual	intermitente	Varios	60 % de DOC	La eficiencia de remoción varia dependiendo de las características del suelo y del efluente de agua residual	Cha, et. al., 2004
Acero inoxidable	14	3*	4.6	sintético	NE	Azul de metileno	NE	-	Karaca, et. al., 2005
Acrílico	20	1.91*	1.0	sintético	continuo	Compuestos orgánicos	NE	Método conveniente para adsorción de compuestos orgánicos en suelos.	Ahmad, et. al., 2005
Vidrio	14.2	2.54	5.5	secundaria	continuo	Clorato y perclorato	99 %	Utilizan cargas hidráulicas altas	Logan and Kim, 2005

L Longitud Ø Diámetro * Diámetro interno BDOC Carbón orgánico disuelto biodegradable
 plexiglas (termoplástico de acrílico) NE (No Especificado) AI (Acero Inoxidable) PVC (Cloruro de Polivinilo)

3.4 Parámetros a considerar para el diseño de las columnas que simularán en laboratorio el SAT del Valle de Tula

Con base en los estudios en columnas que se han desarrollado se concluyó que para el proceso experimental de los suelos del Valle de Tula se debe considerar lo siguiente.

3.4.1 Características de las columnas

En lo referente a las columnas, las dos características importantes que se deben seleccionar son el material del que estarán fabricadas y sus dimensiones.

3.4.1.1 Material

Se elige de acuerdo a diferentes criterios: restricciones por las características del compuesto o calidad del agua a analizar, presupuesto disponible, duración del proyecto, entorno del lugar donde se realizará la experimentación, accesibilidad y manejo del material o finalmente se debe considerar aquel material que satisfaga todas las condiciones del experimento. Los materiales que normalmente se usan para este tipo de columnas son: PVC, plexiglas, (un termoplástico de acrílico), acrílico, acero inoxidable y vidrio.

3.4.1.2 Dimensiones

La capacidad de la columna varía de acuerdo a cada autor, las dimensiones se eligen por las condiciones del proyecto, los cálculos realizados, tamaños utilizadas en estudios previos o que se utilicen las dimensiones ya existentes en el mercado, como los diámetros comerciales de tubos de PVC. En general, se tiene que especificar el diámetro de la base y altura de la columna.

3.4.2 Material de empaque

La capacidad depuradora del suelo como ya se explicó, esta determinada por las propiedades del suelo como: textura, estructuración, porosidad permeabilidad, capacidad de cambio iónico, salinidad, pH, color, consistencia, permeabilidad, reserva de nutrientes, densidad, % de materia orgánica, etc. Por lo que es importante conocer las propiedades que tiene el material de empaque que vamos a utilizar para relleno de las columnas.

3.4.2.1 Volumen de muestra

Ya sea con muestras alteradas o inalteradas, el volumen de la muestra para rellenar las columnas se calcula multiplicando el área obtenida de acuerdo a la forma y dimensiones de la columna por la altura establecida por condiciones del proyecto como la profundidad del estrato del suelo de los sitios de muestreo.

3.4.3 Compuesto o variable que se estudiará

Es uno de los datos que se definen desde el comienzo del proyecto, porque seguramente es el objetivo de la experimentación en el laboratorio; es una de las especificaciones más importantes, ya que influye directamente en la elección de muchos de los otros parámetros.

3.4.4 Número de columnas

El número de columnas se define según los diferentes tipos de suelos que se quiere estudiar, los compuestos que se evaluarán, el número de repeticiones que se realizarán y variables específicas como presencia de columnas testigo, esterilización de las columnas y también, se toma en cuenta la relación costo-tiempo de la fase experimental en el laboratorio; de tal manera que se cumpla con los objetivos que plantea el proyecto.

3.4.5 Montaje

El montaje de las columnas también varía de un trabajo a otro de acuerdo a las diferentes variables que se manejen; restricciones del proyecto, tamaño del espacio donde se montarán, tiempo que estarán ensambladas, material, dimensiones y número de columnas, presencia de accesorios, entre otras.

Para ello, se debe especificar: dispositivos de entrada para determinar como se inyectará la solución, dispositivos de salida para fijar los puntos donde se obtendrá la muestra y accesorios: bombas, aparatos de medición, termómetros, cromatógrafo de gases.

3.4.6 Modo de operación

Se debe tener muy bien especificado el modo de operación, el cual puede variar de acuerdo a si está definido por fundamentos establecidos (ciclos de cultivo y riego, datos climatológicos, volumen y tiempo fijos) para observar y conocer la función depuradora que ya se efectúa o si se quiere obtener el comportamiento que tendrá si se plantea el tiempo de operación y volumen de inyección. Se deben hacer pruebas preliminares con ayuda de algún trazador para comprobar que el mecanismo tiene buen funcionamiento.

3.4.6.1 Trazador

El trazador es un elemento que tiene alguna peculiaridad (masa o radiactividad), el cual se introduce en un sistema con el fin de estudiar la evolución temporal o espacial de determinado proceso químico, biológico, físico o industrial, a través de su detección o medición. De esta forma, estas sustancias brindan información a un observador externo.

Como trazadores, se utilizan polvos o líquidos fosforescentes e isótopos estables y radiactivos, los cuales deben ser inalterables durante el periodo de medidas, no ser tóxicos ni contaminantes para las personas y el medio ambiente, ser solubles o miscibles en agua, fáciles de medir en cuanto a su concentración y ser baratos. Debido a la necesidad de no perturbar al sistema en estudio, es necesario que la masa que actúa como trazador sea muy pequeña.

Dentro de los trazadores químicos más utilizados se encuentran el Cloruro Sódico, el Dicromato Sódico y la Rodamina B. Dentro de los trazadores radiactivos destacan el Sodio 24, el Fósforo 32, el Cromo 51 y el Bromo 82; que son sustancias comerciales.

3.4.7 Recolección del lixiviado

Varía de un trabajo a otro, y está ligado al modo de operación, se puede establecer anticipadamente o se va disponiendo según se verifique la respuesta del dispositivo.

Aunque, es importante tener un dato preliminar en cuanto al lapso de tiempo entre una recolección y otra para incluir un dispositivo con capacidad adecuada para el acopio del lixiviado.

3.5 Justificación

Es inevitable notar el amplio número de opciones que existen para realizar los ensayos en el laboratorio que se han planteado en los estudios sobre el SAT en otros países y aunque en México se han hecho pruebas en columnas de suelo con diferentes propósitos, es primordial hacer mención que ninguna de ellas está enfocada hacia el estudio del SAT, por lo que no existe experiencia al respecto.

Cada proyecto tiene características diferentes, hay infinidad de variables, se requirió de procedimientos adecuados para ejecutarse y cada autor propuso las medidas que juzgó más favorables considerando diferentes factores.

Estos factores varían desde las características y propiedades del suelo y el agua, naturaleza de los elementos que se estudiaron, trabajos previos afines, costo, duración, objetivo, propósito y alcance del proyecto.

Por lo que fue preciso recabar y comparar los datos y usarlos como antecedentes para plantear el diseño de las columnas que se van a utilizar y este sea el más apropiado para las circunstancias concretas que se presentan en el Valle de Tula, que cumpla los requerimientos específicos que exige el proyecto y se logre la simulación del SAT en el laboratorio.

3.6 Objetivos metas y alcances

Es a partir de lo antes mencionado donde radica la importancia de esta tesis, puesto que dará herramientas para realizar una serie de estudios en pruebas piloto con la finalidad de determinar la capacidad que presenta el suelo para adsorber compuestos orgánicos.

Por ello es necesario encontrar el diseño de las columnas más conveniente de acuerdo a las particularidades específicas del proyecto, por lo que se plantean como objetivos particulares:

Hacer una revisión de trabajos sobre ensayos de laboratorio en columnas que se han realizado, para enumerar las especificaciones que rigen el diseño de las columnas.

Determinar los compuestos orgánicos presentes en agua residual, suelo y aguas para abastecimiento urbano que por su afinidad, sus propiedades de bioacumulación, persistencia y toxicidad al suelo limiten el buen funcionamiento del SAT.

Precisar los puntos de muestreo en el Valle de Tula de acuerdo a la antigüedad del riego, realizar los muestreos convenientes y caracterizar los suelos que servirán de relleno de las columnas, montar las técnicas adecuadas en el laboratorio.

Plantear las características de las columnas, los dispositivos necesarios y establecer la distribución para su buen funcionamiento. Fijar el modo de operación, especificar el volumen de efluente y los periodos para agregarlo y los períodos para recolectar los lixiviados.

La meta es que las columnas sean capaces de lograr resultados confiables que puedan integrarse a un análisis estadístico a fin de que los valores obtenidos sean considerados científicamente válidos y conformen una base de datos para validar un modelo matemático de simulación del proceso de adsorción en la zona no saturada de suelos del DR 003 y definir los máximos niveles admisibles, analizar posibles factores que puedan influir en la respuesta del suelo a los agentes contaminantes, evaluar la remoción de los contaminantes, estimar los impactos potenciales y planificar las actividades permitidas y prohibidas en cada tipo de medio.

En el proyecto que actualmente se realiza en el Instituto de Ingeniería de la UNAM los aspectos tiempo y costo fueron obviamente decisivos en el desarrollo y avance del trabajo, por lo que el alcance de esta Tesis fue sólo plantear el diseño apropiado que asegure cumplir con los objetivos planteados. El ensamble y manejo de las columnas, así como la recolección del lixiviado e interpretación de los resultados será tema de trabajos posteriores.

METODOLOGÍA

4 METODOLOGÍA

Los estudios previos del diseño del SAT es fundamental ya que permitirá reducir costos y con ello conocer al menos tres aspectos del funcionamiento del sistema depurador: a) la capacidad de admitir la carga contaminante vertida, b) la capacidad de depurarla hasta los niveles exigidos por la legislación y c) el impacto sobre el ambiente sea mínimo o al menos no sobrepase los límites establecidos. De acuerdo con Moreno *et. al.*, 2003a, tanto los estudios de campo como las pruebas de laboratorio suelen ser caros. La ausencia de resultados fiables, cuya relación costo efectividad sea aceptable, sólo puede asegurarse si el programa de investigación se planifica y lleva a cabo por técnicos familiarizados con el estudio de suelos y aguas subterráneas que tengan suficientes conocimientos del concepto del SAT y de las expectativas de diseño.

Por lo antes mencionado, y con el objeto de establecer el diseño adecuado de columnas de suelo en el laboratorio para el proyecto del Valle de Tula se procedió a evaluar, elegir y detallar los siguientes parámetros:

- Material de empaque: propiedades y volumen del suelo
- Constituyentes que se van a estudiar: en este caso los ftalatos
- Especificaciones de las columnas: material, dimensiones y número de columnas que se usarán de acuerdo con los tipos de suelos, los compuestos orgánicos y el número de repeticiones
- Modo de operación, tiempo y volumen de la aplicación del compuesto, elección del trazador para pruebas preliminares de infiltración, recolección del lixiviado e interpretación de resultados
- Montaje: dispositivos para la aplicación del compuesto, para la recuperación de lixiviados y los accesorios necesarios y dibujo en AUTO CAD

Durante el desarrollo de este estudio se trabajaron de manera individual algunos conceptos para después adecuarlo a las condiciones del proyecto en conjunto y crear el escenario que coincida mejor para su adecuado desempeño,

Por ello, a continuación se describen los fundamentos y la justificación en los que se ha basado dicha selección y las consideraciones que se estipularon para elegir cada parámetro.

4.1 Material de empaque

La selección del material de empaque depende del tipo de suelo, en este aspecto, los suelos del Valle de Tula poseen diferentes capacidades filtro y amortiguadoras y con ello diferente tiempo de vida útil (Palacio and Siebe, 1994). El estudio cartográfico y morfológico del Valle de Tula, concluye que los suelos en el Valle son: Leptosol, Feozem, Vertisol, Fluvisol y Regosol (Muñoz, 1999), sin embargo, en cuanto al uso agrícola por riego destacan los tres primeros. Por razones que se explican a continuación para el relleno de las columnas se utilizarán únicamente los suelos vertisol y leptosol, descritos por Jiménez, *et. al.*, 2004.

- a. **Vertisol:** mostrados en la Figura 4.1, son los suelos más productivos de la zona del Valle de Tula, son suelos profundos pero, son vulnerables a ensalitrarse.



Figura 4.1. Suelo vertisol

- b. **Leptosol:** uno de los suelos con más amplia distribución en México, son poco profundos, lo que limita el desarrollo de las raíces, la capacidad de retener agua y el contenido de nutrientes; capacidad productiva baja, puede llegar a moderada, siempre y cuando cuente con riego y se fertilicen adecuadamente, las características varían con la profundidad (Figura 4.2).



Figura 4.2. Suelo leptosol

4.1.1 Caracterización de los suelos

Para conocer las propiedades de los dos tipos de suelo que se utilizarán como material de empaque, se recopilaron datos de algunos estudios previos realizados a suelos del Valle de Tula y aunque no todos los rasgos del suelo fueron vitales para el diseño hidráulico de las columnas, se implementaron las técnicas de laboratorio necesarias para caracterizarlos e intentar predecir el comportamiento hidráulico que presentarán los suelos una vez empacados, por ello, a continuación se describen los procedimientos que se realizaron.

La toma de muestras y análisis de parámetros se realizaron siguiendo la metodología establecida en la NOM-021-RECNAT-2000 y es la siguiente:

4.1.1.1 Muestreo

Las muestras se recolectaron en el rancho "Chelita" en el municipio de Atitalaquia, Figura 4.3, por que en estudios previos realizados por la Dra. Siebe (Investigadora del Instituto de Geología, UNAM) se detectó que este lugar tiene la particularidad de presentar en un predio los tipos de suelo que se estudiaron, es decir leptosol y vertisol.

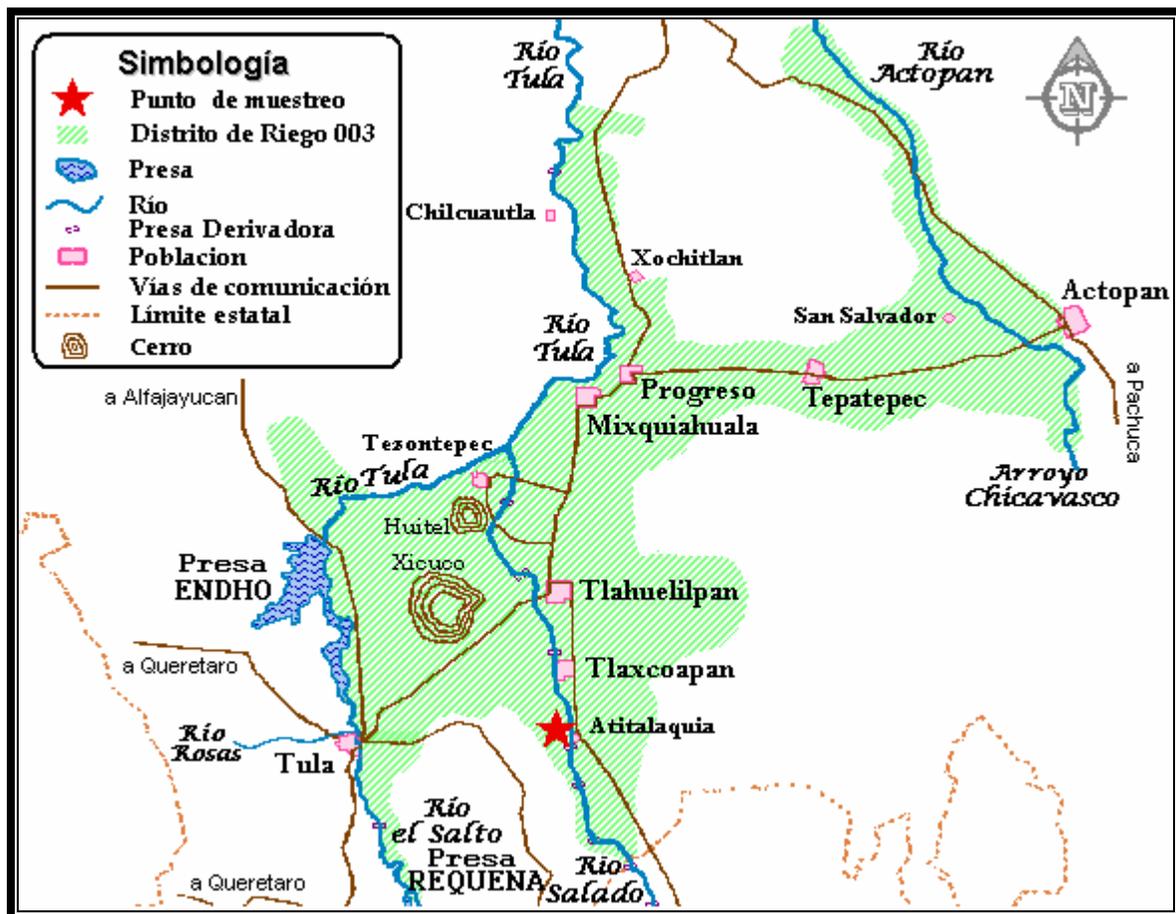


Figura 4.3. Punto de muestreo

Primeramente se identificó y se localizó cada punto de muestreo con un GPS (Figura 4.4).



Figura 4.4. Localización de puntos de muestreo usando el geoposicionador (GPS)

Posteriormente, para asegurar que la muestra no manifieste alteraciones, se retiró una pequeña capa superficial con ayuda de una pala (Figura 4.5).



Figura 4.5. Retiro de la capa superficial

Por último, se utilizó otra pala para recolectar las muestras de suelo que fueron transportadas en bolsas de plástico debidamente etiquetadas (Figura 4.6).



Figura 4.6. Muestreo en campo

4.1.1.2 Tamizado

Una vez en el laboratorio y para separar las partículas más gruesas se tamizaron las muestras de suelo con la malla No. 10, que tiene una apertura de 2 mm, (Figura 4.7).



Figura 4.7. Suelo tamizado

4.1.1.3 Conductividad Eléctrica (CEs)

La conductividad eléctrica es el parámetro que se utiliza para la estimación de la salinidad. Su principio se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución. Hasta hace unos años se expresaba en mmhos/cm , hoy día las medidas se expresan en deciSiemens por metro (dS/m), siendo ambas medidas equivalentes pues $1 \text{ mmhos}/\text{cm} = 1 \text{ dS}/\text{m}$, la Tabla 4.1 muestra la escala para establecer los grados de salinidad en base a la CEs.

Tabla 4.1. Grados de salinidad en suelos

CE a 25° dS/m	Clase de salinidad	Efectos
0-2	No Salino	Efectos despreciables de salinidad
2-4	Ligeramente salino	Rendimientos de cultivos muy sensibles pueden ser restringidos
4-8	Medianamente Salino	Rendimientos de muchos cultivos son restringidos
8-16	Fuertemente Salinos	Solo cultivos tolerantes rinden satisfactoriamente
> 16	Extremadamente Salino	Muy pocos cultivos tolerantes con rendimiento satisfactorio

Se preparó primero la pasta de saturación del suelo, se utilizaron los siguientes materiales y reactivos:

- ✓ Recipientes de 250 g
- ✓ Agua destilada
- ✓ Bureta de 100 mL y matraz Kitasato
- ✓ Báscula y espátula
- ✓ Papel filtro Whatman # 2

A continuación se detallan los pasos utilizados:

1. Se pesó 250 g de suelo (Figura 4.8) y se colocó en un recipiente
2. Se agregó agua destilada con una bureta y se mezclaron con la espátula
3. Fue necesario consolidar de vez en cuando la pasta, golpeando el recipiente con cuidado sobre la mesa de trabajo, al saturarse la pasta brilla por la reflexión de la luz, fluye ligeramente si se inclina el recipiente y la pasta se desliza fácilmente por la espátula excepto en el caso de suelos con alto contenido de arcilla
4. Después de mezclarse se dejó reposar durante una hora y se comprobó la saturación (no debe haber acumulado agua en la superficie, perder su brillo, o endurecerse durante el reposo, de lo contrario es necesario mezclar nuevamente agregando agua)
5. Se anotó el gasto
6. Se tapó el recipiente y se dejó reposar durante 12 horas
7. Después del reposo se mezcló la pasta y fue colocada en el embudo Buchner con papel filtro Whatman # 2 y aplicó al vacío
8. El extracto se recibió en un tubo de ensaye que se colocó dentro del matraz Kitasato que sostiene al embudo



Figura 4.8. Báscula

9. Una vez elaborada la pasta de saturación se procedió a determinar la CEs del suelo utilizando termómetro, tubo de ensaye, puente y celda de conductividad de la siguiente manera:
10. Se midió la temperatura del extracto para ello fue necesario mover el botón de temperatura a la indicada en el extracto
11. Se lavó la celda con la solución que será analizada, y se llenó con el extracto, para esto se colocó el extracto en un tubo de ensaye donde cupo la celda y el filtrado de manera que la celda quedó cubierta por el extracto
12. Se colocó la aguja de la escala en el punto de balance, (como el interruptor no encendió indica que la conductividad es mayor de 100 milimhos, en este caso se hizo una dilución midiendo 1 ml del extracto y aforándolo a 25, 50 ó 100 ml según se haya hecho la dilución)
13. Se hicieron las correcciones por temperatura con la Tabla 4.2 (como el aparato registra la lectura en micromhos, se hizo la conversión a milimhos dividiendo entre 100 la lectura)

Tabla 4.2. Factor de corrección (F) para medición de conductividad eléctrica

T ° C	(F)	T ° C	(F)	T ° C	(F)
8	1.499	19	1.142	25	1.000
10	1.421	20	1.118	26	0.979
12	1.350	21	1.092	28	0.941
14	1.284	22	1.067	30	0.906
16	1.224	23	1.044	32	0.873
18	1.168	24	1.021	34	0.843

$$\text{Conductividad corregida en } \frac{\text{mmhos}}{\text{cm}} = \text{CEs} \times F$$

4.1.1.4 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH es la forma de medición que se utiliza para saber el grado de alcalinidad o acidez del suelo, y que es función de la concentración de iones de hidrógeno que posea. Para saber la acidez del suelo existe una escala de medición con unos niveles del 0 al 14, donde el "0" representa la mayor acidez y el "14" el mayor nivel de alcalinidad. El nivel medio, en el que el sustrato es neutro, es el que correspondería al 7 donde los grados de alcalinidad y acidez están completamente igualados. Hay cuatro tipos de suelo en función del grado de pH que contengan: alcalinos, neutros, ácidos o muy ácidos.

Para medir el pH de las muestras de suelo se necesitaron los siguientes materiales y reactivos:

- ✓ Potenciómetro y balanza granataria
- ✓ Matraces, probeta y piceta
- ✓ Agua destilada hervida
- ✓ KCl 1 N pH 7
- ✓ Sol. Buffer pH 7

Y se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se pesó 10 g de suelo y se colocaron en los matraces
2. Se agregó 25 ml de agua destilada hervida
3. Se pusieron en el agitador metálico y se activó durante 30 minutos (Figura 4.9)
4. Con el potenciómetro calibrado con solución buffer pH 7, se leyó pH de las muestras



Figura 4.9. Muestras de suelo en agitador

4.1.1.5 Densidad Aparente

La densidad aparente varía de acuerdo al estado de agregación del suelo, al contenido de agua y la proporción del volumen ocupado por los espacios intersticiales, que existen incluso en suelos compactos. La densidad aparente es afectada por la porosidad e influye en la elasticidad, conductividad eléctrica, conductividad térmica, en la capacidad calorífica a volumen constante y en la dureza. Refleja la compactación y facilidad de circulación de agua y aire. También es un dato necesario para transformar muchos de los resultados de los análisis de los suelos en el laboratorio que son expresados en % en peso a valores de % en volumen en el campo.

Para determinar la densidad aparente se usó: una probeta de 10 ml, una balanza granataria y una franela. El procedimiento se describe a continuación:

1. Se pesó una probeta de 10 ml vacía, se le agregó suelo hasta los 10 ml y golpeó ligeramente diez veces sobre la franela
2. Se agregó el suelo que faltaba hasta los 10 ml (Figura 4.10)
3. Se pesó la probeta con el suelo y se restó el peso de la probeta para hacer los cálculos

donde:
$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{Peso del suelo}}{\text{Volumen}} = \frac{g}{(10) \text{ ml}} = \rho$$

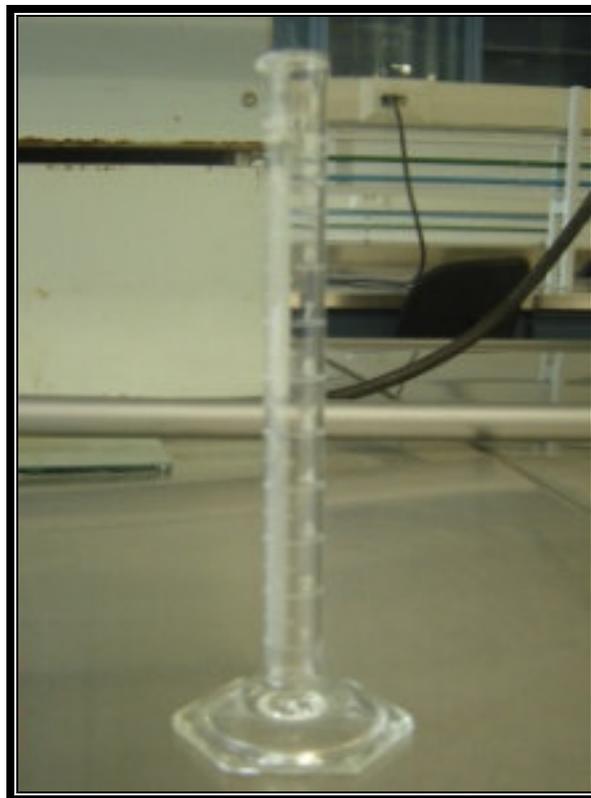


Figura 4.10. Probeta 10 ml

4.1.1.6 Textura de suelos por el método de Bouyoucos

El esqueleto y la arena, representan la parte inerte del suelo y tienen por lo tanto solamente funciones mecánicas, constituyen el armazón interno sobre las cuales se apoyan las otras fracciones finas del suelo, facilitando la circulación del agua y del aire.

El limo participa sólo en forma limitada en la actividad química del suelo, con las partículas de diámetro inferior, mientras que su influencia en la relación agua - suelo no es insignificante, y se incrementa con el aumento de los diámetros menores de éste.

La arcilla comprende toda la parte coloidal mineral del suelo y representa la fracción más activa, tanto desde el punto de vista físico como del químico, participando en el intercambio iónico, y reaccionando en forma más o menos evidente a la presencia del agua, según su naturaleza. Por ejemplo, las arcillas del grupo de las caolinitas tienen una capacidad de intercambio iónico bastante reducida, y se hinchan poco en presencia del agua, mientras que las arcillas pertenecientes a otros grupos tienen una elevada capacidad de intercambio iónico y elevada capacidad hidratante.

La textura es importante porque determina en gran parte la retención o circulación del agua y las propiedades de transmisión del suelo. La arena puede drenar demasiado rápidamente, en un suelo arcilloso los poros son demasiado pequeños para permitir un drenaje adecuado.

Para realizar esta técnica se utilizaron los siguientes materiales y reactivos:

Material

- ✓ Balanza Granataria
- ✓ Batidora Oster para textura
- ✓ Probeta de 1000 ml
- ✓ Hidrómetro de Bouyoucos
- ✓ Termómetro
- ✓ Vasos de Precipitado de 400 ó 500 ml
- ✓ Baño maría o platina caliente
- ✓ Pipetas graduadas (2 de 10 ml)

Reactivos

- ✓ H₂O₂ al 8%
- ✓ Oxalato de sodio al 5 %
- ✓ Metasilicato de sodio

El procedimiento fue el siguiente:

1. Se pesó 60 g de suelo y colocó en un Vaso de Precipitado de 500 ml

2. Se agregó 20 ml de H_2O_2 al 8% con una probeta y se mezcló con un agitador de vidrio hasta que dejó de reaccionar.
3. Se repitió la operación para asegurar que la materia orgánica sea eliminada completamente.
4. Se secó a baño maría (Figura 4.11).



Figura 4.11. Eliminación de materia orgánica

5. Una vez que la muestra se secó, se pesó 50 g de cada una y se colocó en vasos de precipitado.
6. Se agregó 5 ml de oxalato de sodio y se agregó 5 ml de Metasilicato de sodio.
7. Se dejó reposar 15 minutos (Figura 4.12)



Figura 4.12. Adición de reactivos y reposo

8. Se colocó en el vaso de la batidora y se agregó agua de la llave hasta la segunda ranura del vaso.
9. Se agitó durante 10 minutos en el agitador mecánico (Figura 4.13)

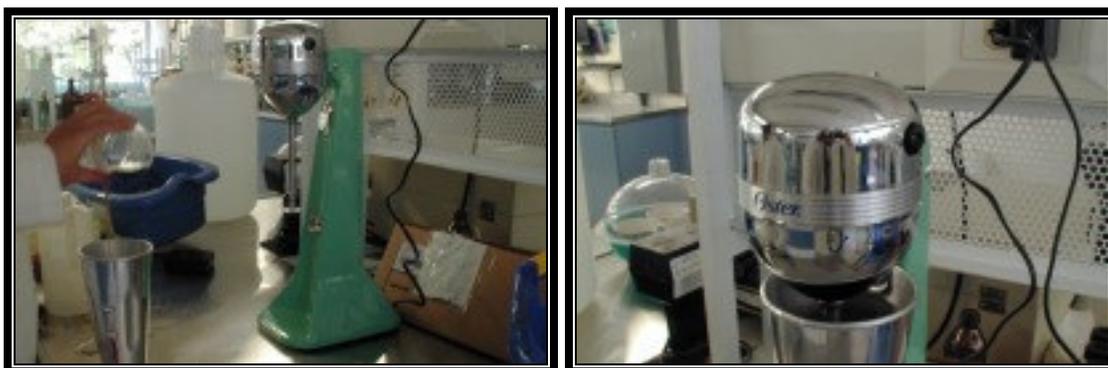


Figura 4.13. Vaciado en el agitador mecánico (batidora)

10. Se colocó el Hidrómetro y el termómetro en un vaso de precipitado con agua (Figura 4.14)

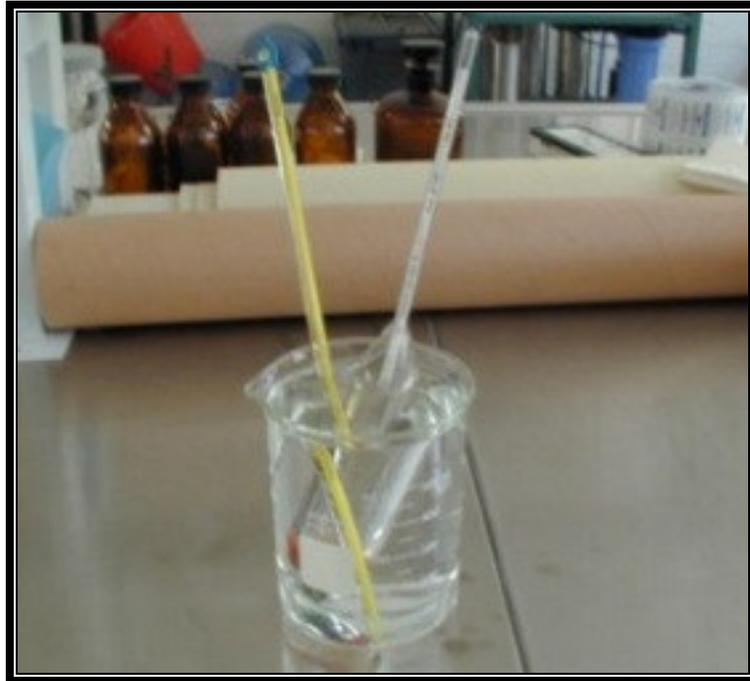


Figura 4.14. Hidrómetro de Bouyoucos y Termómetro

11. Se llenó una probeta sólo con agua y se agitó con una manguera conectada al aire
12. Se verificó la calibración del Hidrómetro y tomó la temperatura (Figura 4.15)
13. Para hacer una lectura, se colocó el hidrómetro dentro de la probeta 20 segundos antes del momento de la lectura, cuidando de alterar lo menos posible la suspensión

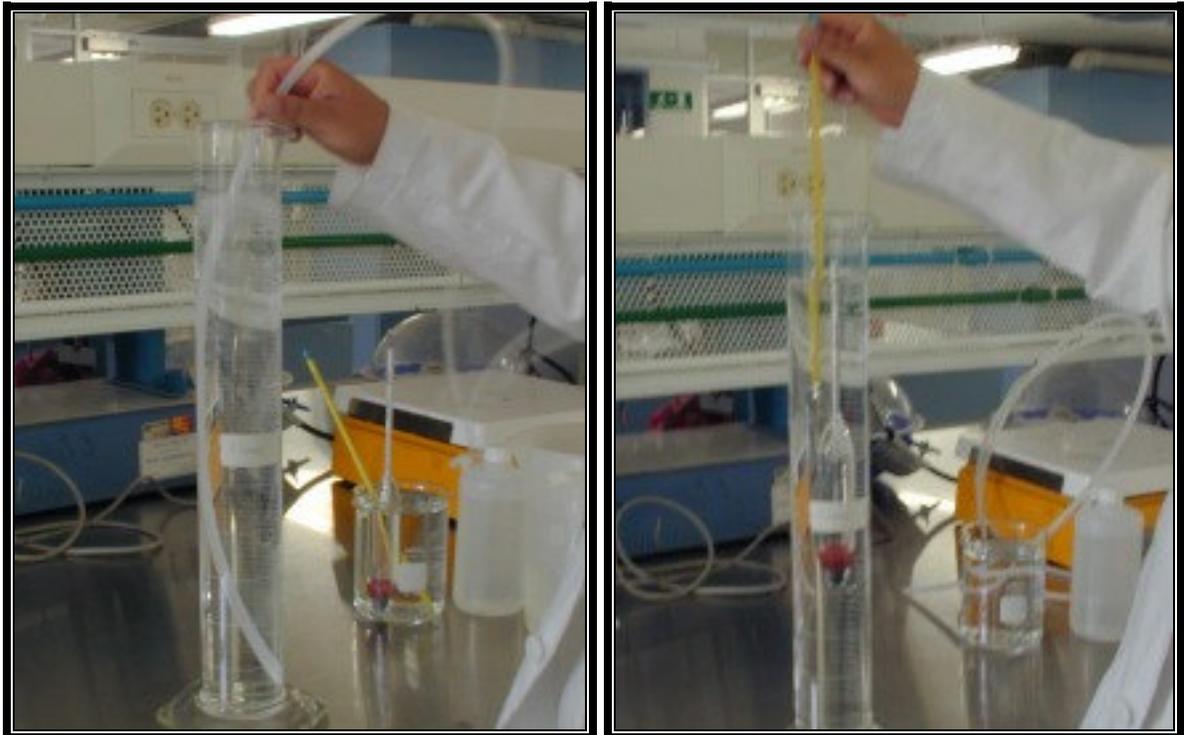


Figura 4.15. Calibración del hidrómetro

14. Una vez que se agitó el suelo en la batidora, se pasó a una probeta de 1000 mℓ
15. Aforando a 1000 mℓ con agua destilada (Figura 4.16)

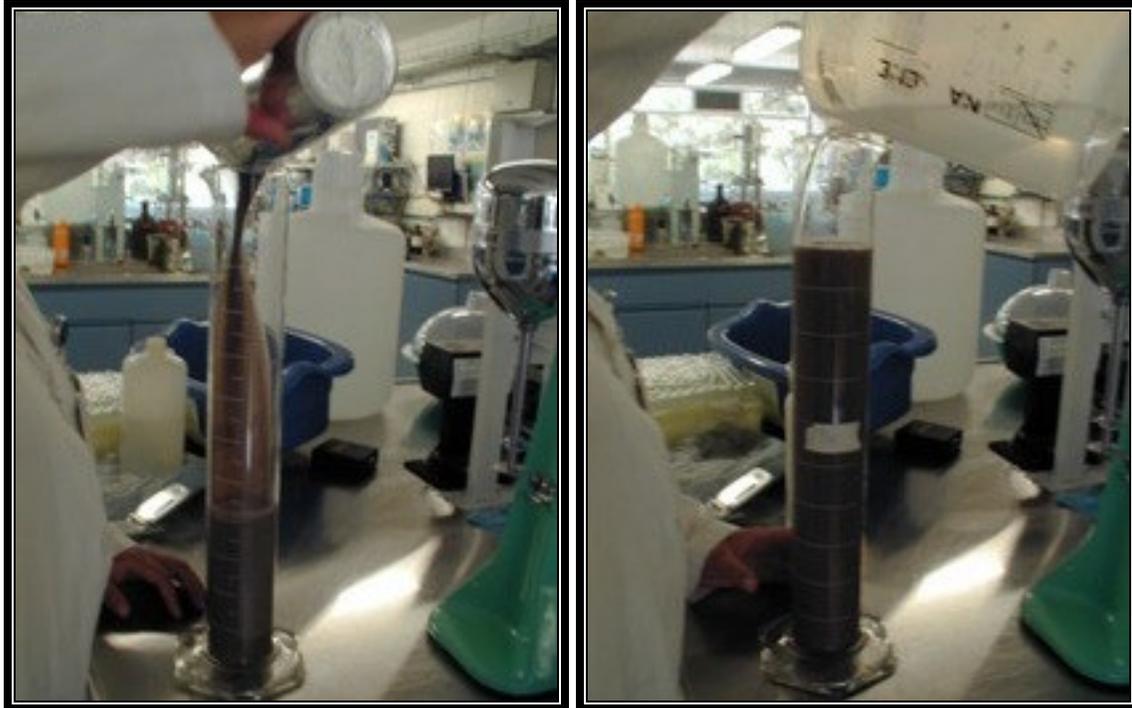


Figura 4.16. Aforo

16. Se mezcló un minuto con aire para que la muestra estuviera homogénea
17. Se tomó la lectura del hidrómetro a los 40 segundos, y se midió y anotó la temperatura (Figura 4.17)

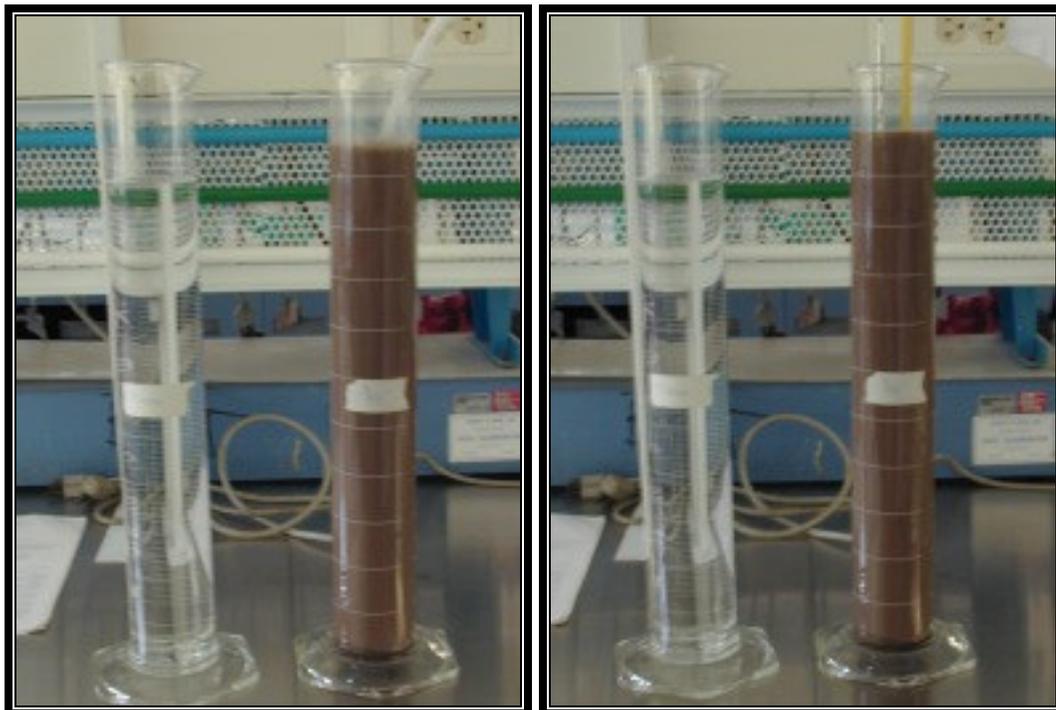


Figura 4.17. Agitación con aire y primera lectura

18. Se colocaron las probetas en una base firme para que no se movieran y se dejó reposar dos horas
19. Se realizó la segunda lectura, se midió y anotó la temperatura (Figura 4.18)
20. Finalmente, se corrigió la lectura del hidrómetro de acuerdo a la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Factor de corrección por temperatura

T ° C	Factor						
15.0	- 1.62	18.0	- 0.54	21.0	+ 0.54	24.0	+ 1.62
15.5	- 1.44	18.5	- 0.36	21.5	+ 0.72	24.5	+ 1.80
16.0	- 1.26	19.0	- 0.18	22.0	+ 0.90	25.0	+ 1.98
16.5	- 1.08	19.5	0.00	22.5	+ 1.08	25.5	+ 2.15
17.0	- 0.90	20.0	+ 0.18	23.0	+ 1.26	26.0	+ 2.34
17.5	- 0.72	20.5	+ 0.36	23.5	+ 1.44	26.5	+ 2.52



Figura 4.18. Segunda lectura después de dos horas

21. Para encontrar los porcentajes de arena, limo y arcilla de cada una de las muestras de suelo se usaron las siguientes fórmulas:

$$[(\% \text{ de limos}) + (\% \text{ de arcillas})] = \frac{(\text{primera lectura} \times 100)}{\text{gramos de suelo}}$$

$$\% \text{ de arena} = 100 - [(\% \text{ de limos}) + (\% \text{ de arcillas})]$$

$$\% \text{ de arcillas} = \frac{\text{segunda lectura} \times 100}{\text{gramos de suelo}}$$

$$\% \text{ de limo} = [(\% \text{ de limos}) + (\% \text{ de arcillas})] - \% \text{ de arcillas}$$

22. Una vez que se tuvieron los porcentajes correspondientes se clasificó el suelo con ayuda del triángulo de textura.

4.1.1.7 Materia Orgánica

El contenido en materia orgánica afecta al complejo de cambio, a la capacidad tampón y a la actividad biológica del suelo, sin olvidar su influencia sobre la estructura que afecta a la aireación del suelo. Un descenso en el contenido de materia orgánica, reduce las capacidades: de cambio de cationes, de amortiguación del pH del suelo, de adsorción de compuestos tóxicos, de almacenamiento de agua; altera la estructura y decrece la actividad microbiana.

Para obtener la materia orgánica en las muestras de suelos se emplearon los siguientes materiales y reactivos:

- ✓ Matraces Erlenmeyer de 500 ml
- ✓ Balanza Analítica
- ✓ Buretas
- ✓ Probeta graduada de 10 ml
- ✓ Probeta graduada de 100 ml
- ✓ Dicromato de Potasio 1 N
- ✓ Ácido Sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
- ✓ Ácido Fosfórico
- ✓ Sulfato Ferroso 0.5 N
- ✓ Bariosulfonato de Difenilamina

El procedimiento para obtener el porcentaje de materia orgánica se presenta a continuación:

1. Se pesó 1 g de suelo y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 500 ml
2. Se agregó con la probeta 10 ml de Dicromato de Potasio 1 N
3. Dentro de la campana de extracción, se midió 20 ml de ácido sulfúrico concentrado con una probeta y se añadió lentamente resbalando por las paredes (Figura 4.19)

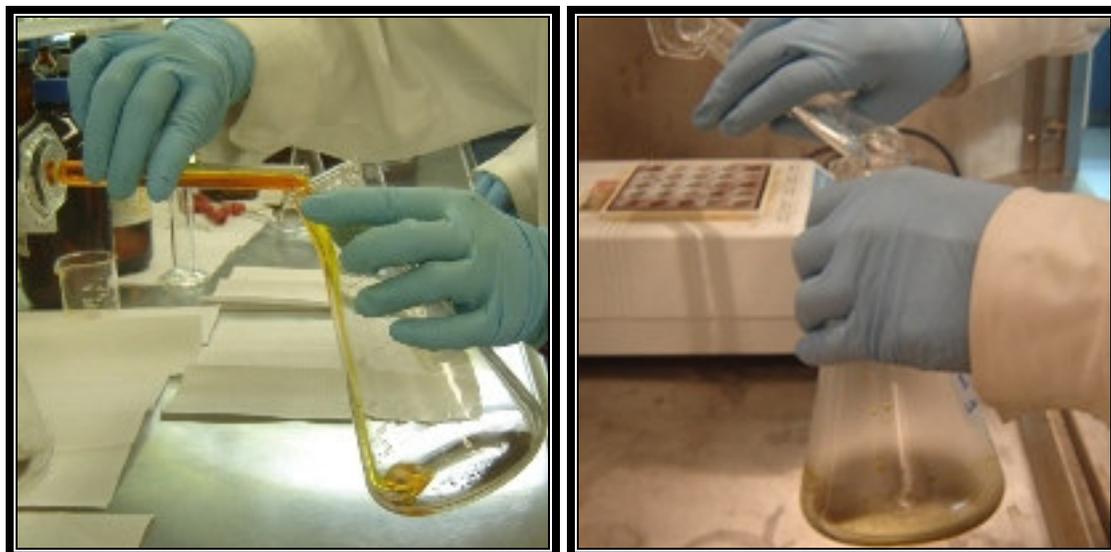


Figura 4.19. Dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado

4. Se agitó de forma manual durante 1 minuto
5. Reposó 30 minutos

6. Pasando los 30 minutos se adicionó 200 ml de agua destilada
7. Se agregó 16 ml de Ácido Fosfórico (Figura 4.20)



Figura 4.20. Agua destilada y ácido fosfórico

8. Por último se agregaron 8 gotas de indicador Bariosulfonato de Difenilamina
9. Para titularlo inmediatamente con Sulfato Ferroso 0.5 N (Figura 4.21)

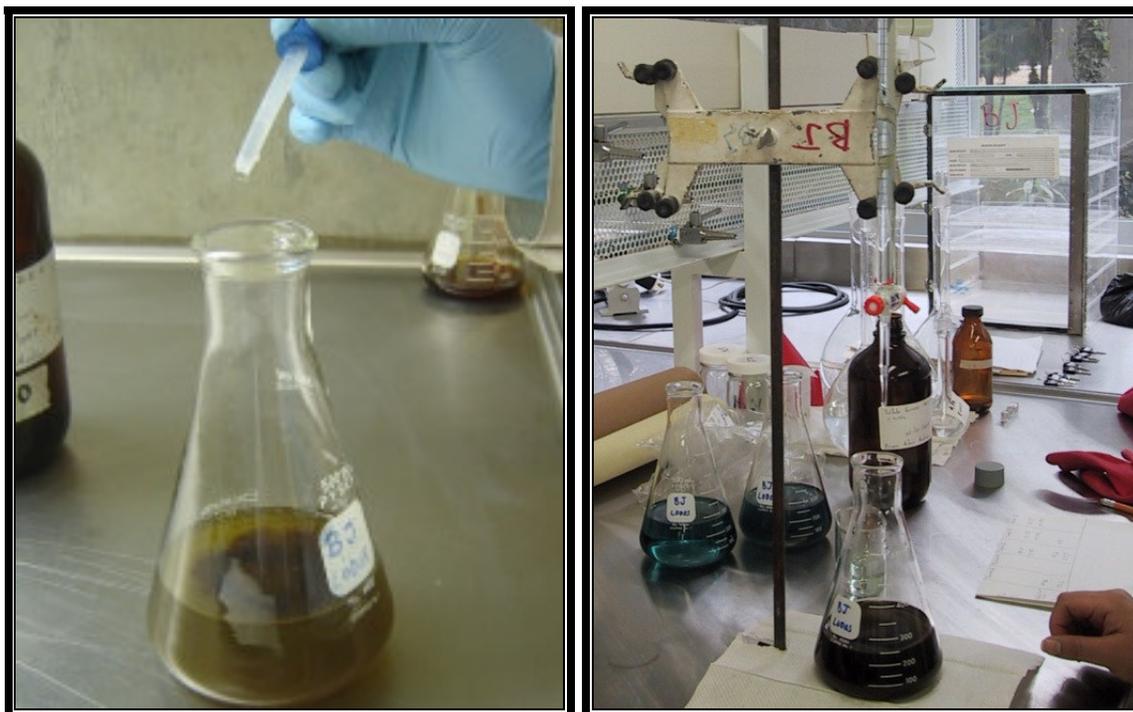


Figura 4.21. Titulación

10. Se tituló hasta observar el vire (Figura 4.22)

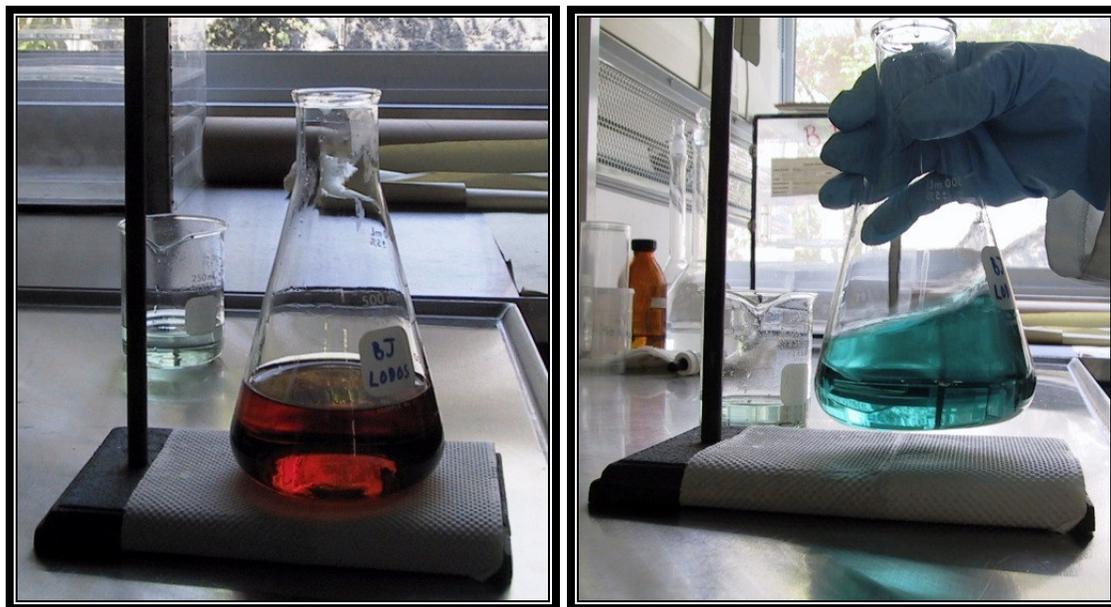


Figura 4.22. Vire de la técnica de materia orgánica

11. Se hicieron dos blancos con agua destilada para revisar la normalidad del Sulfato Ferroso, siguiendo los pasos del 3 al 9, sin dejar reposar

12. Se hicieron los cálculos para obtener el porcentaje de materia orgánica de cada una de las muestras de suelo con las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ de Carbono orgánico} = \left(\frac{B-T}{g} \right) (N)(0.39)$$

donde:

- B Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos en ml
- T Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra en ml
- g Peso de la muestra empleada en g
- N Normalidad real del sulfato ferroso, se valoró por separado
- 0.39 Factor de corrección de humedad

$$N \text{ real} = \frac{D \times 0.5}{\text{mL de FeSO}_4 \text{ (gastados en el blanco)}}$$

donde:

- D Volumen del Dicromato de potasio en 10 ml
- 0.5 normalidad teórica

Para encontrar el % de materia orgánica se usó la forma siguiente:

$$\% \text{ de M. O.} = \% \text{ de Carbono orgánico} \times 1.724$$

donde:

- 1.724 Constante (Jackson, 1964)
- M. O. Materia orgánica

4.1.1.8 Capacidad de Intercambio Catiónico Total (CICT)

Es la capacidad del suelo para retener e intercambiar diferentes cationes. La fuerza de la carga positiva varía dependiendo del catión, permitiendo que un catión reemplace a otro en una partícula de suelo cargada negativamente. Depende del contenido y tipo de minerales de la arcilla, contenido en materia orgánica y pH del suelo. Podría decirse que es la base de lo que llamamos fertilidad del suelo.

Varía según los suelos de 1 a 50 $\text{meq}/100\text{g}$ (miliequivalentes químicos por 100 g de suelo). La Tabla 4.4 indica algunas aplicaciones prácticas.

Tabla 4.4. Características del suelo por la CICT

Suelos con CIC de 11 a 50	Suelos con CIC de 1 a 10
Alto contenido de arcilla	Alto contenido de arena
Alta capacidad de retener agua	Baja capacidad de retener agua
Requieren más cal para corregir acidez	Requieren menos cal para corregir acidez
Mayor capacidad de retener nutrientes	Mayor probabilidad de pérdidas de nitrógeno y potasio por lixiviación
Conducta física asociada a contenidos altos de arcilla	Conducta física asociada a contenidos altos de arena.

Para obtener la CIC se necesitaron los siguientes materiales y reactivos:

Material

- ✓ Balanza Analítica
- ✓ Tubos de centrífuga
- ✓ Matraces Erlenmeyer de 500 ml
- ✓ Centrífuga
- ✓ Picetas
- ✓ Buretas

Reactivos

- ✓ Cloruro de Sodio 1N pH 7
- ✓ Cloruro de Calcio 1N pH 7
- ✓ Alcohol Etílico 96%
- ✓ EDTA 0.02 N
- ✓ Solución Buffer pH 10
- ✓ Clorhidrato de Hidroxilamina
- ✓ KCN al 2%
- ✓ Negro de Eriocromo

A continuación se presenta el procedimiento que se realizó para obtener la capacidad de intercambio catiónico de las muestras de suelo:

1. Se pesó 1 g de cada muestra de suelo y se colocó en tubos de centrifuga (Figura 4.23)

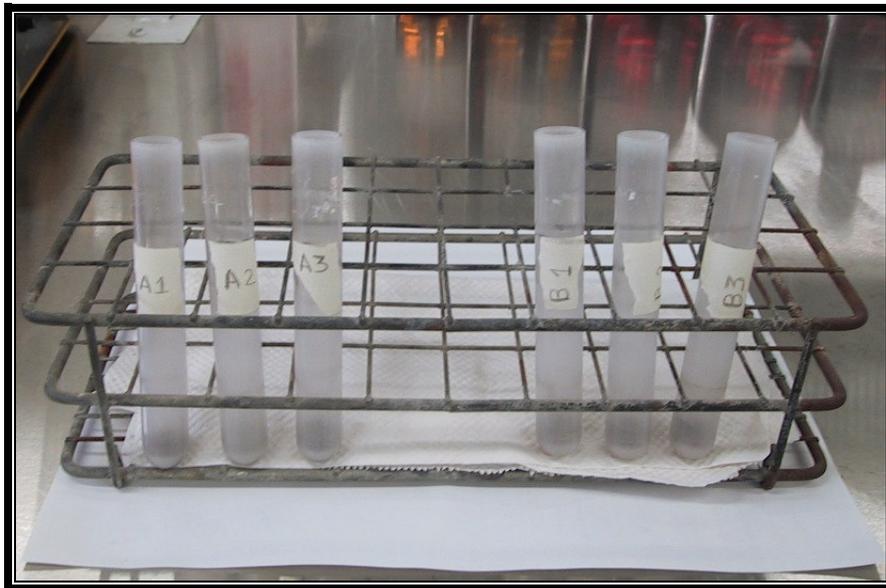


Figura 4.23. Tubos de centrifuga con muestras de suelo

2. Se agregaron 5 ml, aproximadamente $\frac{1}{2}$ tubo de Cloruro de Calcio 1 N pH 7 con una piceta y se mezcló con un agitador de vidrio aproximadamente 1 minuto
3. Después se adicionaron otros 5 ml de Cloruro de Calcio 1 N pH 7 procurando lavar el agitador y cuidando que el tubo no quedara demasiado lleno
4. Se acomodaron los tubos en la centrífuga de forma que quedará repartido el peso, y se centrifugó a 3,000 rpm durante 5 minutos (Figura 4.24)
5. Una vez pasados los 5 minutos, la fase líquida se decantó y se desechó



Figura 4.24. Centrífuga

6. Se efectuó el proceso (incisos 2 al 5) 4 veces más hasta completar un total de 5 ciclos
7. Después se realizaron 5 ciclos con el alcohol etílico
8. Por último se procedió a centrifugar 5 veces con el Cloruro de Sodio 1N pH 7 pero, se diferenció de los anteriores por que el Cloruro de Sodio se recolectó (50 ml) para titularlo por el método del versenato (EDTA)

Método del Versenato (EDTA)

9. En un vaso de precipitado se colocaron 10 ml del Cloruro de Sodio acumulado en el paso anterior
10. Se agregó 2 ml de solución Buffer pH 10, con una probeta
11. Se adicionaron 5 gotas de clorhidrato de hidroxilamina
12. Se agregaron 5 gotas de KCN al 2 %
13. Finalmente se añadieron 5 gotas de negro de Eriocromo y se agitó de forma manual hasta que se observó un color homogéneo
14. Inmediatamente se tituló con EDTA 0.02 N hasta que viró de púrpura a azul (Figura 4.25)

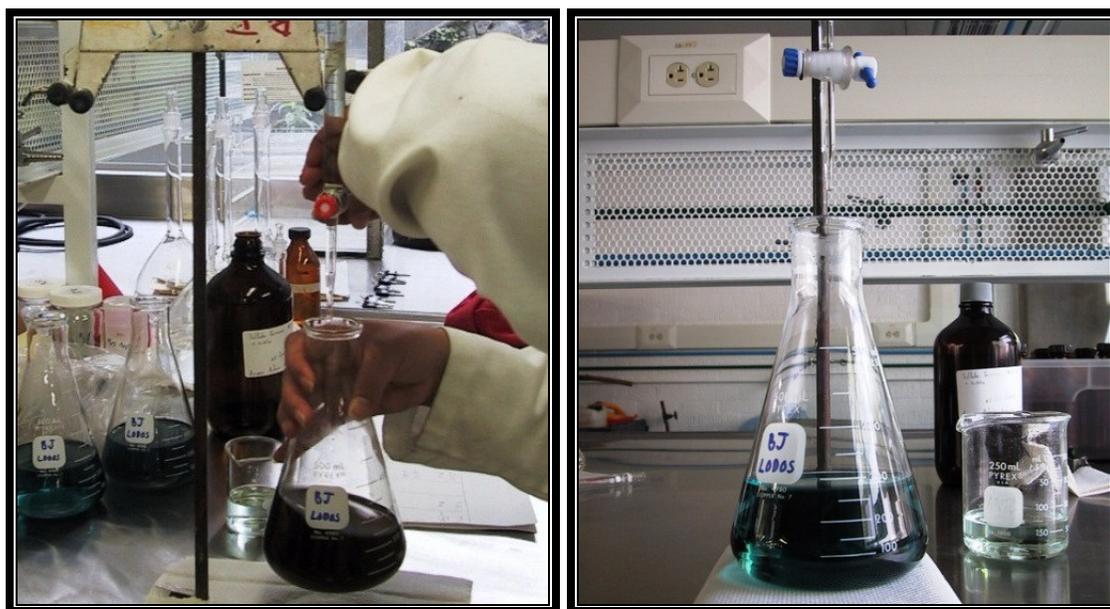


Figura 4.25. Titulación de la técnica de capacidad de intercambio catiónico

15. Se anotó el EDTA que se gastó
16. Con la siguiente fórmula se obtuvo la CICT

$$\text{C.I.C.T en meq/100g} = \left(\frac{\text{mL de EDTA} \times N}{\text{g de muestra}} \times 100 \right) \times 5$$

donde:

- C. I. C. T. Capacidad de intercambio catiónico total
- 5 por que se toman 10 ml de un total de 50 ml
- N Normalidad real del EDTA
- 0.69 Constante (Jackson, 1964)

4.1.2 Volumen de muestra

Los suelos del Valle de Tula tienen profundidades de hasta 30 centímetros así que, para rellenar las columnas se determinó que está fuera la altura de la muestra de suelo, con el diámetro de las columnas se obtuvo el volumen de suelo para cada columna y al multiplicarlo por el número de columnas que se utilizarán se calculó el volumen total.

4.2 Ftalatos

Se realizó una búsqueda exhaustiva en material bibliográfico con el fin de recabar información respecto a las características de los ftalatos y se encontró lo siguiente:

Los ftalatos comprenden una amplia familia de compuestos, entre los más comunes se encuentran: el dimetilftalato (DMF), el dietilftalato (DEF), el dibutilftalato, el butilbencil ftalato (BBF), el di-2-etil hexil ftalato (DEHF) y el dioctil ftalato (DOF). Los ftalatos son ampliamente usados como plastificantes, y repelentes de insectos y como disolventes para el acetato de celulosa en la fabricación de lacas y barnices. Estos compuestos se han convertido en contaminantes presentes en los sedimentos marinos, de estuarios y de aguas superficiales, en los lodos de las aguas negras, en suelos y en alimentos. Los tiempos de degradación varían de 1 a 30 días en aguas limpias. Es fundamental el desarrollo de actividades de investigación con la finalidad de identificar estas sustancias y establecer su importancia para México, determinar sus usos, lugares y formas de acceso al país, así como establecer mecanismos para lograr la disminución de su uso y lograr su control. (Yarto M., *et. al.*, 2003).

A continuación se describen los dos compuestos orgánicos que por su persistencia, riesgo a la salud, toxicidad o acumulación ponen en riesgo la eficiencia del SAT. Fueron seleccionados para su evaluación en los diferentes medios (agua residual, agua de manantiales y pozos y del suelo), ya que el modelo se deberá alimentar con datos muy específicos para cada compuesto y se debe evitar la competencia de adsorción entre compuestos.

4.2.1 Di-2-Etil Hexil Ftalato (DEHF)

El DEFP, por sus siglas en inglés, es el plastificante más importante y utilizado, representa el 50% de todos los plastificantes a base de ésteres de ftalato. La mayor parte del DEHF fabricado se utiliza como aditivo para darle flexibilidad al polímero rígido (PVC) utilizado, en la construcción, en embalajes y componentes de aparatos médicos; en cantidades más pequeñas en pinturas industriales y como fluido dieléctrico en los condensadores. Casi todo el DEHF presente en el medio ambiente procede de fuentes antropogénicas.

El DEHF es un éster del ácido benceno dicarboxílico, a temperatura ambiente es un líquido oleoso entre incoloro y amarillo. Su solubilidad en agua es baja, 0.3 - 0.4 mg/ℓ y aún más baja en agua salada.

Debido a que el DEHF no está unido químicamente a la resina plástica, puede migrar y contaminar el ambiente circundante, el transporte en el aire es la vía más importante de incorporación de los ftalatos al medio ambiente. De la atmósfera, el DEHF precipita o es lavado por la lluvia.

Las partículas orgánicas del suelo lo adsorben fácilmente, la cantidad presente en las aguas de superficie puede ser mayor debido a la adsorción, a las partículas orgánicas y a la interacción con la materia orgánica disuelta. Las pequeñas partículas lo adsorben más fácilmente, la fotodegradación atmosférica del DEHF es rápida; en cambio, su hidrólisis química en el medio ambiente es prácticamente inexistente.

Se ha observado que varios microorganismos del suelo llevan a cabo la degradación aerobia, sin embargo, se ha informado que la degradación microbiana del DEHF en el medio ambiente es lenta. La degradación aerobia depende de la temperatura, a temperaturas más altas se produce biodegradación en la capa más superficial del suelo, pero es prácticamente inexistente en las capas más profundas, donde las condiciones son anaerobias. La degradación anaerobia es mucho más lenta que la aerobia.

El uso indiscriminado del DEHF ha determinado su dispersión en el medio ambiente de modo que se encuentra extendido por todo el medio ambiente, en distintas proporciones en suelo, aire, agua, alimentos (peces, huevos de aves, mamíferos marinos, plantaciones). El grado de bioacumulación depende de la capacidad de los organismos para metabolizarlo

Se ha estimado que la ingesta diaria promedio de DEHF es aproximadamente 0.25 mg/día/persona con un máximo de 2 mg/día/persona, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha propuesto un nivel máximo de contaminante (NMC) de 6 mg/ℓ de DEHF en agua potable. (Yarto M., *et. al.*, 2003).

La información disponible sobre los efectos del DEHF en el ser humano es muy escasa. Fue un sospechoso carcinógeno humano, pero resultados en estudios que se han realizado en animales de experimentación para evaluar los efectos tóxicos del DEHF, aseguran lo contrario.

Se han perfeccionado numerosos métodos de muestreo y análisis para la determinación del DEHF en diferentes medios. Cada vez se utilizan más métodos de gran sensibilidad, como la cromatografía de gases, la cromatografía líquida de alto rendimiento y la espectrometría de masas. El análisis de concentraciones bajas de DEHF se complica por la contaminación debida al material de plástico utilizado en el muestreo y el análisis.

4.2.2 Butilbencil ftalato (BBF)

El Butilbencil ftalato o BBP por sus siglas en inglés, es un líquido oleoso transparente, irrita los ojos, la piel y las vías respiratorias con un porcentaje de posibilidad de efectos irreversibles.

Se utiliza como plastificante sobre todo en el cloruro de polivinilo (PVC) para la fabricación de baldosas de vinilo, espumas de vinilo y entramado para alfombras y en menor medida también en los plásticos de celulosa y el poliuretano. Se aplica en azulejo de piso, conos de tráfico, bandas transportadoras de alimento, cuero artificial y plástico espumoso y es ampliamente utilizado en la envoltura de alimentos y cosméticos.

La mayor parte del que se libera en el medio ambiente va al aire. Una vez en el medio ambiente, el BBP se distribuye entre la atmósfera, el suelo, el agua superficial, los sedimentos y la biota, y se ha detectado en cada uno de estos compartimentos.

Los datos disponibles en el ser humano son insuficientes para poder evaluar los efectos de la exposición prolongada al BBP en poblaciones humanas. La toxicidad aguda del BBP es baja, con valores de la ingestión por vía oral superiores a 2 g/kg de peso corporal en ratas.

Se ha estimado para el BBP una ingesta diaria tolerable (IDT) muestral de 1300 µg/kg de peso corporal al día. Teniendo en cuenta las concentraciones en diversos medios parece, a partir de estimaciones muestrales, que los alimentos son la fuente de toda la ingesta estimada, que se considera que oscila, para la población general, entre 2 y 6 µg/kg de peso corporal al día.

El BBP se elimina de la atmósfera por fotooxidación y por el agua de lluvia, con una semivida que oscila entre algunas horas y varios días, no es persistente en el agua, los sedimentos o el suelo en condiciones aerobias. En condiciones anaerobias, el BBP es más persistente, siendo su semivida de varios meses. Los vertebrados e invertebrados lo metabolizan fácilmente.

No se dispone de información acerca de los efectos del BBP en los organismos de los sedimentos, los invertebrados del suelo, las plantas terrestres o las aves en la que pueda basarse una estimación del riesgo para estos organismos.

4.3 Especificaciones de las columnas

Para plantear el diseño de las columnas se revisaron las características de las columnas de los trabajos previos y se escogió el material y las dimensiones apropiadas de acuerdo a las particularidades del proyecto como a continuación se explica.

4.3.1 Material

De una buena elección del material depende en gran parte el buen funcionamiento del experimento y la obtención de resultados confiables.

Como ya fue abordado, el proyecto del Valle de Tula se enfocará al estudio de la adsorción de compuestos orgánicos, específicamente de ftalatos; por lo que fue la referencia que usamos para la elección del material de las columnas que se presentan en este trabajo.

Se consideró emplear acero inoxidable o algún vidrio de borosilicato para evitar interferencias en los resultados de las concentraciones de ftalatos en el suelo empacado ya que los ftalatos son compuestos químicos resistentes a la biodegradación (Yarto, M., *et. al.*, 2003), son candidatos a pertenecer a la categoría de sustancias denominadas contaminantes orgánicos persistentes (COP) además, son muy susceptibles de adsorberse en los materiales a excepción de acero inoxidable, vidrio y teflón, por esta razón no se recomienda usar algún tipo de plástico.

4.3.2 Dimensiones

Para elegir las dimensiones de las columnas se tomó en cuenta la siguiente información: de acuerdo con la bibliografía en los sistemas SAT el proceso de adsorción ocurre en los primeros 30 centímetros de suelo (Mansell J., *et. al.*, 2004; Rauch T. and Drewes J. E., 2004; Rüetschi D., 2000; Quanrud D. M., *et. al.*, 1996a) y la profundidad que presentan cada uno de los tipos de suelo del Valle de Tula.

También se seleccionó una altura y diámetro, adecuados, para tener un núcleo representativo de suelo, que tenga la capacidad de admitir el paso del contaminante, permita un manejo fácil de las columnas y a la vez que desempeñe la simulación del SAT en los ensayos de laboratorio de manera eficaz y asegure obtener resultados confiables para conocer la remoción de los ftalatos.

Asimismo, se consideró dejar espacio libre en la parte superior del suelo para evitar derrames.

4.3.3 Número de columnas

Se eligió el número de columnas con base a los dos tipos de suelos en estudio, los dos compuestos orgánicos que se decidieron evaluar, número de repeticiones que se pretendió hacer de cada suelo y considerando también las columnas testigo que se operaran en paralelo por cuestiones de calidad en los resultados (reproducibles).

De igual forma, el factor costo-tiempo de la fase experimental en el laboratorio, fue importante en la elección del número de columnas, pues se estableció de forma que se cumpla con los requisitos para evaluar la remoción de cada uno de los contaminantes y así conocer la eficiencia de los diferentes suelos.

4.4 Modo de operación

Se decidió que las columnas trabajarán con un flujo intermitente con objeto de simular el riego que se aplica a la zona y las láminas de riego que los usuarios utilizan en campo en el DR 003 Tula.

Además, se tomará en cuenta las pruebas de adsorción/desorción, por lote (*batch*) realizadas previamente (Murillo, 2006), basadas en el método que sugiere la EPA (*Sediments and Soils Adsorption/Desorption Isotherms*), cuyo objetivo fue determinar el tiempo necesario para que el sistema suelo-agua-soluto llegue al equilibrio o, más precisamente, a un estado de pseudo-equilibrio. Dicho intervalo de tiempo es el mínimo a usar en la determinación de la experimentación en columnas.

Se consideró también, el aporte de lluvia de la zona por el efecto de dilución en la concentración de los contaminantes presentes en las aguas residuales.

4.4.1 Trazador

Se optó por utilizar un trazador no reactivo, pues tiene la ventaja de que no presenta adsorción y por lo tanto sirve para comparar el comportamiento de los compuestos orgánicos, además tiene el mismo avance del agua y sirve como patrón de comparación para los compuestos que presentan retardo con respecto al avance del trazador no reactivo.

Para conocer la dispersión en el material que se va a utilizar se usan los trazadores para hacer una curva de avance que consiste en graficar en las abscisas el volumen de poros y en las ordenadas la concentración relativa C/C_0 .

El volumen poroso es el número de veces que los poros del material empacado han sido llenados con agua o lixiviados, por lo que esta relacionado con el tiempo.

Este volumen poroso se obtiene con la siguiente fórmula:

$$V_{\text{poroso}} = V_{\text{efl}} / (n \times V_T)$$

donde: V_{efl} Volumen acumulado del efluente
 n Porosidad (o contenido de agua, para suelos saturados)
 V_T Volumen total del material empacado

En el trazo de las curvas de compuestos orgánicos el número de volumen de poros que se obtenga para un avance de C/C_0 es el retardo del compuesto con respecto a la velocidad del agua o del trazador no reactivo, de ahí la importancia del análisis de las curvas de avance.

4.4.2 Recolección del lixiviado

Para diseñar el ciclo de recolección de muestras se relacionaron los valores de filtración o tasas de aplicación que se les añada a los suelos que se utilizan como material de empaque, además esta relacionado directamente a los resultados que se logran en las pruebas de filtración que se hacen una vez montadas las columnas en el laboratorio, pues el ciclo del acopio del lixiviado puede variar de acuerdo a la respuesta que se obtiene del mecanismo.

4.5 Diseño Final

Se estableció buscar una medida para esterilizar el suelo de todas las columnas y poder evitar la biodegradación, puesto que se modelará únicamente el proceso de adsorción ya que el proceso de biodegradación al ser muy amplio y complejo se debe estudiar en otro trabajo adicional.

Para conseguir un diseño exitoso se planeó una cuidadosa elección de los componentes y accesorios, se propuso una distribución óptima y se recomendó una adecuada instalación.

Para ello se tomó en cuenta que el tipo de compuesto que se va a analizar se absorbe en el plástico por ello, ningún elemento, dispositivo o accesorios debe contenerlo, por lo tanto sólo se ocuparán componentes de vidrio de borosilicato o de acero inoxidable para evitar alteraciones.

Para los dispositivos de entrada se indicó su posición y se examinaron los valores de infiltración del suelo con el propósito de que al momento de verter el compuesto la rapidez de infiltración del suelo sea mayor que la velocidad con que se agrega el ftalato para prevenir derrames.

Para que el lixiviado llegara a ser representativo se convino inicialmente en designar los dispositivos de salida, número y localización de los puntos de muestreo en las columnas, conjuntamente se decidieron los tipos y tamaños de los recipientes en donde se colectará con el objetivo principal de obtener lixiviados confiables.

Simultáneamente se especificaron conectores para evitar que el agua erosione al suelo y lo desplace ocasionando pérdidas y se indicó la distribución dentro de la columna considerando los 30 centímetros de espesor que tendrá el suelo.

Todos los componentes se examinaron y seleccionaron con la finalidad de que el mecanismo funcionara simulando correctamente el *SAT* en el laboratorio reproduciendo el riego en los cultivos del Valle de Tula, para obtener resultados precisos y confiables que una vez interpretados ayuden a examinar y descifrar el proceso de adsorción de los ftalatos en los suelos.

El esquema de las columnas se estableció en un plano, que se presenta en el siguiente capítulo, efectuado en un programa de diseño por computadora (Autodesk Inventor).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de realizar un análisis profundo de diferentes estudios realizados en columnas experimentales, la Tabla 5.1 presenta las características más sobresalientes de los diseños que se emplearon para suelo.

En ella se establece que hay una disparidad en cada uno de los parámetros que se emplean, presumiblemente, el tipo de material, la relación longitud (L) y diámetro (\emptyset), el tipo de suelo y agua a utilizar, entre otros, depende de los objetivos del estudio y de las metas específicas, así se tiene que para el caso de compuestos orgánicos se utiliza vidrio de borosilicato.

Tabla 5.1 Resumen de características de los diseños de columnas

Columnas				Tipo de suelo	Efluente	Flujo aplicado	Constituyente estudiado
Material	L (cm)	\emptyset (cm)	L/\emptyset				
Acrílico	NE	5*	-	Arenoso	agua residual	intermitente	Virus
Acrílico	130	8.62*	15	Arenoso	secundario	continuo	DOC
Acrílico	100	11*	9	Arenoso	agua residual	intermitente	Varios
Acrílico	20	1.91*	1.0	Arenoso	sintético	continuo	CO
AI	100	8.62*	11.6	Arenoso	agua residual	continuo	DOC
AI	244	30.5*	8	arenoso a arcilloso	agua residual	intermitente	DBO ₅ , COD, amonio y nitrato
AI	60	30	2	Arenoso	sintético	intermitente	CO
AI	NE	NE	-	NE	primario	continuo	DOC
AI	12.4	2.2	6.2	Arenoso	agua residual	continuo	Naftalina
AI	14	3*	4.6	Arenoso	sintético	NE	Azul de metileno
NE	62	10*	6.2	Arenoso	agua residual	intermitente	Tasas de infiltración
NE	150	10	15	NE	sintético	continuo	Metales pesados
plástico	70	15*	4.6	Arenoso	agua residual	intermitente	MO, nutrientes y coliformes fecales
plexiglas	10	7.6*	1.4	Arenoso	agua residual	intermitente	Virus
plexiglas	30	6.5*	4.6	arena sílice	agua residual	intermitente	MO
plexiglas	30	6.5*	4.6	arena sílice	agua residual	intermitente	Esteroides
PVC	275	15*	18	Arenoso	agua residual	intermitente	Nitrogeno, fosfato y coliformes fecales
PVC	50	20	2.5	areno limoso	sintético	continuo	Nitrógeno
PVC	100, 200 y 250	18.5*	5.2, 10, 16	Arenoso	agua residual	intermitente	MO, DQO, DBO y coliformes
PVC	100 y 200	18.5*	5 y 11	areno limoso	agua residual	continuo	Tasas de infiltración
PVC	200	10	20	Arcilloso	sintético	intermitente	metales
PVC	55	7.5*	8	Varios	sintético	intermitente	CO
Vidrio	20	5*	4	Agrícola	sintético	intermitente	Hidrocarburos
Vidrio	7.9 - 15	1-10*	2.8	arena y arcilloso	sintético	continuo	Ácido
Vidrio	15	4.8*	1.76	arena de Ottawa	sintético	continuo	Pentaclorofenol
Vidrio	14.2	2.54	5.5	Arenoso	agua residual	continuo	Clorato y perclorato

L Longitud, \emptyset Diámetro, * Diámetro interno, BDOC Carbón orgánico disuelto biodegradable
 DOC Carbono orgánico disuelto, CO Compuestos orgánicos, MO Materia orgánica, NE no especificado
 plexiglas (termoplástico de acrílico) AI (Acero Inoxidable) PVC (Cloruro de Polivinilo)

Con base en la Tabla se estableció el criterio para diseñar las columnas para los suelos del Valle de Tula considerando los siguientes criterios:

5.1 Características del suelo

Como ya se mencionó los dos tipos de suelos del Valle de Tula que se decidió utilizar como material de empaque son: vertisol y leptosol.

En campo los suelos tipo leptosol, tienen profundidades pequeñas, apenas de 30 centímetros, siendo esta la profundidad que tendrán las columnas de suelo con un diámetro de 3 cm, presentan una porosidad promedio de 60 %, lo que significa que para saturarla se necesita aproximadamente $128 \text{ cm}^3 = 128 \text{ ml}$ de agua sintética, y agregarle entonces los 20 centímetros de lamina de riego sobre la superficie ($142 \text{ cm}^3 = 142 \text{ ml}$) que se utiliza en el DR 003 Tula, dando un total de 270 ml de la solución para cada columna de suelo leptosol.

Si consideramos que su conductividad hidráulica saturada (CHS) se encuentra entre 0.23 - 1.67 m/d (metros por día) lo que significa que en teoría nuestra columna tardará entre 4 y 31 horas para filtrar totalmente el agua sintética.

Los suelos vertisoles son más profundos, pueden tener hasta 150 centímetros, cuentan con una porosidad promedio de 50 % en sus primeros 30 centímetros, por lo que necesitamos un 50 % de su volumen para saturarla; el volumen de la columna de suelo es de 212 cm^3 por lo que el volumen que se utilizará para saturar la muestra es de $106 \text{ cm}^3 = 106 \text{ ml}$ + los 142 ml de lámina de riego nos da un total de 248 ml de agua sintética para cada columna con vertisol.

Como son suelos que cuentan con más presencia de arcillas, la CHS en los primeros 30 centímetros varía desde 0.14 a 0.3 m/d , lo que significa que nuestra columna tardará de 24 a 51 horas para lixiviarse completamente, también indica que la infiltración del agua sintética en las columnas con suelo vertisol será más lenta.

Si la adsorción se presenta en partículas arcillosas y materia orgánica y esta última es eliminada en la esterilización, las columnas del suelo vertisol presentarán un porcentaje de remoción mayor que las columnas de suelo leptosol, ya que la textura indica que el suelo tipo vertisol contiene más porcentaje de arcillas.

Con respecto a evitar interferencias por biodegradación del compuesto de interés en las columnas empacadas, se aplica radiación gamma para esterilizar el suelo una vez empacado, de acuerdo con las experimentaciones de Ericsson, *et. al.*, 2004.

A continuación se presentan los resultados y la caracterización de los dos tipos de suelos del Valle de Tula que se decidió utilizar como material de empaque, la Tabla 5.2 muestra una síntesis de las propiedades físicas de los suelos y en la Tabla 5.3 se resumen las propiedades químicas e hidráulicas.

Tabla 5.2 Propiedades físicas de los suelos

Parámetro	Leptosoles		Vertisoles	
	Profundidad cm.	0 - 13/20	13/20 a 30	0 - 21/34
Textura	franco arenosa a franco arcillosa	franco a franco arcillo arenosa	franco arcillosa y franco arcillo arenosa	arcillosa
Nivel de compactación	ligeramente compacto	media	media	varía de ligera a muy fuerte
Densidad aparente mg/m^3	0.90 - 1.21	1.16 - 1.25	1.08 - 1.31	1.12 - 1.33
Densidad real mg/m^3	2.43 - 2.68	2.45 - 2.70	2.30 - 2.58	2.47 - 2.71
Porosidad %	58 - 64	45 - 59	47 - 56	41 - 61
Color	gris muy oscuro o pardo grisáceo muy oscuro en seco y negro en húmedo	ligeramente más claro con motas blancas y abundantes fragmentos de roca caliza	pardo grisáceo en seco y pardo grisáceo muy oscuro en húmedo	pardo grisáceo muy oscuro, pardo pálido a blanco en seco y pardo grisáceo muy oscuro a gris rojizo oscuro en húmedo

Tabla 5.3 Propiedades químicas e hidráulicas de los suelos

Parámetro	Leptosoles		Vertisoles	
	Profundidad cm.	0 - 13/20	13/20 a 30	0 - 21/34
Materia orgánica %	1.49 - 5.16	1.27 - 2.56	7.8	1.57- 0.26
pH relación 1:2.5 en agua	7.8 - 8.3	8.0 - 8.6	6.71 - 6.3	7.5 - 8.4
C. I. C. T. $\text{cmol} (+) \text{kg}^{-1}$	24.80 - 41.07	20.73 - 33.36	28.70 - 37.56	31.18 - 43.52
Cloruros %	1.8 - 2.1	1.7 - 2.0	0.5 - 1.9	2.3 - 2.6
Permeabilidad	moderada	lenta	moderada	lenta
Conductividad hidráulica m/d	0.23 - 1.67		0.14 - 0.30	

5.2 Atributos del agua sintética (ftalatos)

La Tabla 5.4 presenta las características químicas de los dos compuestos que se evalúan.

En ella se destacan sus propiedades químicas de solubilidad en agua que indican que estos contaminantes tienden a infiltrarse hasta llegar al acuífero y contaminarlo.

Para cada columna de suelo leptosol se usaran 270 ml de agua sintética y para cada columna de suelo vertisol 250 ml, cada 20 días.

Al inicio del ensayo se debe tener cualificado y cuantificado el elemento con que se alimentarán las columnas para realizar un balance de contaminantes al final y comparar resultados, por lo que en esta etapa también se debe definir la dilución del agua sintética.

Tabla 5.4 Principales propiedades de los compuestos seleccionados

Propiedad	Información		Referencia
Nombre químico	Di (2-etilhexil) ftalato	Butilbencil ftalato	RTECS, 2000
Nombre comercial	Bisoflex 81; Eviplast 80; Octoil; Plantinol; DOP; Staflex DOP	Butilmil	RTECS, 2000
Fórmula química	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	C ₁₉ H ₂₀ O ₄	RTECS, 2000
CASRN	117-81-7	85-68-7	Cadogan y Howick, 1996
Peso molecular	390.57	312.39	Howard y Meylan, 1997
Punto de fusión	-47 ° C	-35° C	Staples <i>et al.</i> , 1997
Punto de ebullición	384 ° C	370° C	Howard y Meylan, 1997
Densidad	0.984 g/ml a 20 ° C	1.12 (20/4) g/ml	Cadogan y Howick, 1996
Solubilidad en agua	41 µg/l a 25 ° C	2.7 mg/l (2700 µg/l)	Leyder y Boulanger, 1983
Solubilidad en solventes	Miscible en aceite mineral y hexano	n-hexano, éter etílico	HSDB, 1990
Log _{Kow}	7.50	4.77-4.98	Staples, <i>et al.</i> , 1997
Log _{Koc}	4.9-6	4.51	Staples, <i>et al.</i> , 1997
Presión de vapor	1.0x10 ⁻⁷ mmHg a 25 ° C	6 x 10 ⁻⁷ mmHg a 25° C	Staples, <i>et al.</i> , 1997
Constante de Henry	1.71x10 ⁻⁵ atm·m ³ /mol a 25 ° C	0.133 Pa·m ³ /mol a 25° C 1.3x10 ⁻³ atm·m ³ /mol a 25° C	Staples, <i>et al.</i> , 1997

RTECS = Registro de Efectos Tóxicos de Sustancias Químicas (Registry of Toxic Effects of Chemical Substances), CASRN = Número de registro de servicios de abstractos químicos (Chemical Abstracts Service Registry Number), HSDB = Datos de Sustancias Peligrosas (Hazardous Substances Data Bank), Log_{Kow} = coeficiente de reparto octanol/agua, Log_{Koc} = coeficiente de adsorción carbono orgánico/agua

5.3 Especificaciones de las columnas

En seguida se describirán dos alternativas que se pueden usar para realizar las pruebas en el laboratorio en columnas de suelo del Valle de Tula, se compararon para elegir la que mejor se adaptó a las necesidades del proyecto, que satisfizo todas las exigencias que demanda y que aseguró obtener resultados prácticos.

5.3.1 Opción A

5.3.1.1 Material y dimensiones

Se tomó la decisión de recurrir al vidrio de borosilicato, de 1.5 mm de espesor, como material de construcción de las columnas para el experimento con el fin de evitar que los compuestos orgánicos se adsorban en las paredes de las mismas.

Analizando los resultados de experiencias en este campo de investigación, considerando los objetivos del proyecto y los resultados obtenidos hasta el momento, como las profundidades de los suelos en campo en el DR 003, se estableció que las dimensiones de la columna fueran 3 centímetros de diámetro interior y 45 centímetros de altura (Figura 5.1) para asegurar poseer una muestra representativa, una profundidad de la muestra de 30 centímetros y tener, a partir de la capa superficial del suelo, una extensión libre de 10 cm.

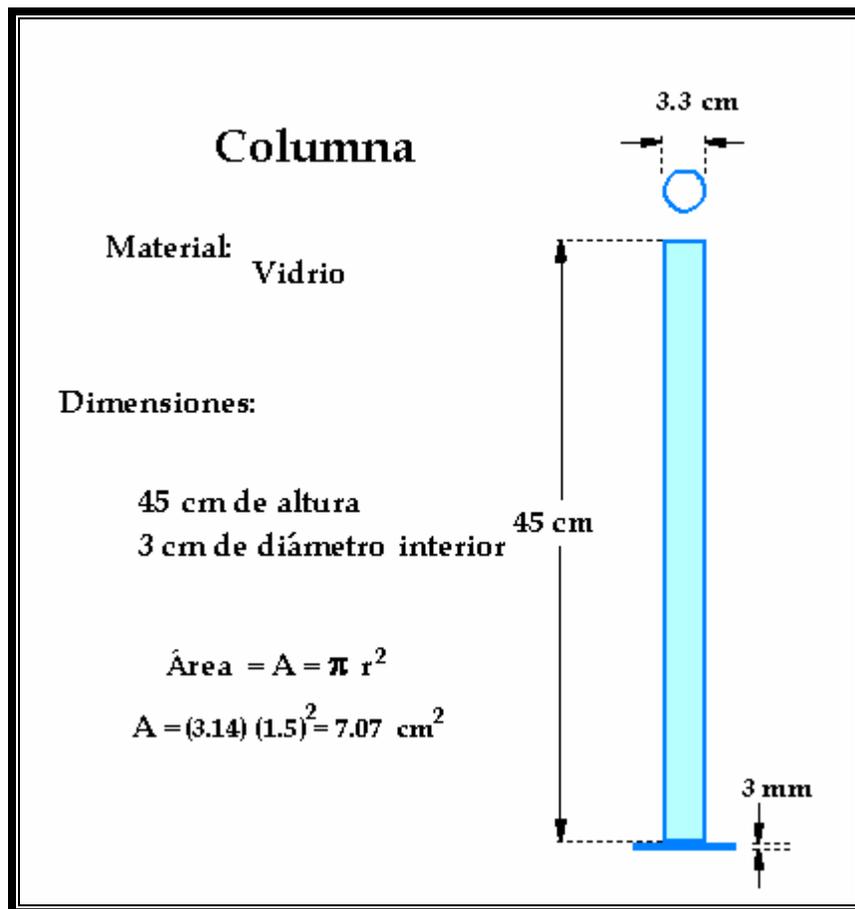


Figura 5.1. Dimensiones de la columna

El volumen de muestra de suelo que se utilizará para cada columna es de 212 cm³ resultado obtenido al considerar el área de la base de la columna por 30 centímetros que es la altura de la muestra de suelo es decir, (7.1 cm²) x (30 cm.).

5.3.1.2 Número de columnas

El objetivo del presente estudio es analizar, para cada compuesto, la correlación de lixiviados obtenidos en dos sistemas de riego: uno con suelo leptosol y otro con vertisol.

Con la finalidad de comparar los resultados obtenidos y determinar la influencia de cualquier otro factor ajeno al sistema de experimentos, para cada dosis ensayada se trabajará por triplicado para cada sistema suelo-compuesto (Tabla 5.5).

Para realizar la comparación y reducir el margen de error, se introducirá un tercer sistema testigo (condición neutra), donde no se aplica ningún compuesto, de esta manera se trabajará con 8 columnas por compuesto (Figura 5.2).

Tabla 5.5 Numero de columnas

Columnas	Di-2-Etil Hexil ftalato (DEHF)		Butilbencil ftalato (BBF)	
	Vertisol	Leptosol	Vertisol	Leptosol
Repeticiones	3	3	3	3
Testigo	1	1	1	1
Total	16			

El total de muestra de suelo que se utilizará se calculó con el volumen por columna, 212 cm³, por el número de columnas por muestra (8), lo que nos resulta un volumen total de 1,696 cm³ para cada suelo.

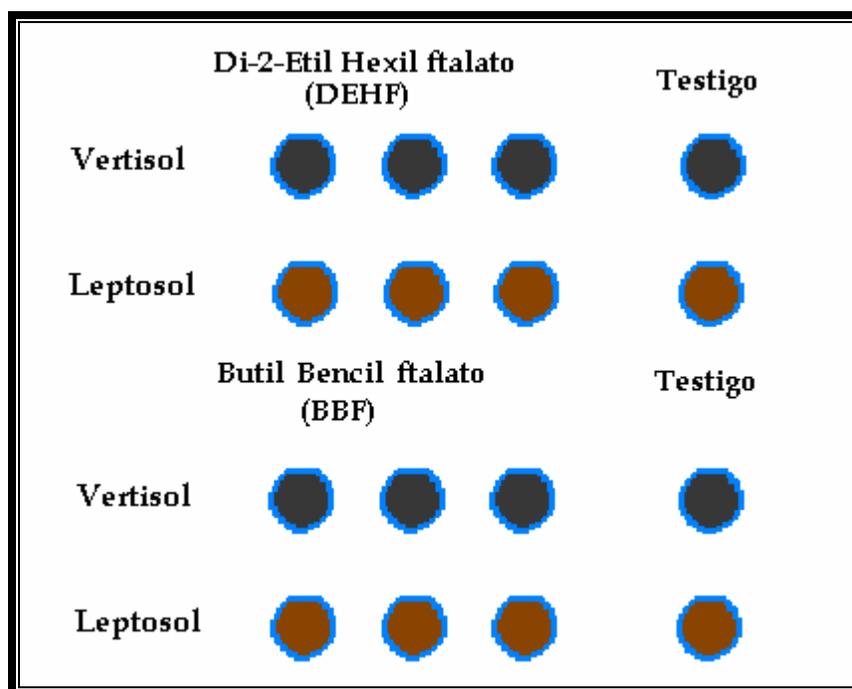


Figura 5.2. Número de columnas

5.3.1.3 Operación de las columnas

La mitad de las columnas se utilizarán para estudiar el Di-2-Etil Hexil Ftalato (DEHF) y la otra mitad para el Butilbencil ftalato (BBF) de forma intermitente simulando el riego para el maíz, porque es el producto que más frecuentemente se siembra en el Valle de Tula.

Se tomó la lámina media de riego por que la irrigación en el DR 003 es variable, depende de la época del año y del cultivo, en primavera esta entre 2.8 a 3.5 m/año y en verano entre 2.9 a 3.6 m/año.

Para este proyecto se alimentarán las columnas cada 20 días con un volumen que incluya 20 centímetros sobre el nivel de superficie del suelo que corresponde a la lámina de riego promedio en el DR 003.

Con base en las dimensiones de las columnas, área = 7.07 cm² y altura de la muestra de suelo = 30 centímetros, se obtuvo un volumen de 248 ml para cada columna con suelo vertisol y 270 ml para las columnas con suelo leptosol.

Una vez montadas las columnas se realizarán las pruebas iniciales de infiltración, se usará cloruro de sodio (NaCl), que es un trazador económico y no reactivo por lo que no presenta adsorción y por lo tanto sirve para comparar el comportamiento de los compuestos orgánicos, se debe iniciar agregando agua a todas las columnas hasta que el flujo de salida coincida con el de entrada y posteriormente realizar las pruebas de infiltración.

Estas pruebas de infiltración son necesarias para verificar la velocidad con que se incorporará la solución para evitar derrames y el período de recolección de lixiviado.

Para desarrollar el modelo, se seleccionará las ecuaciones que incluyan los procesos que se llevan a cabo en la adsorción, seleccionar el método numérico que se programará y que dará solución más exacta a las ecuaciones, realizar métodos experimentales y obtener los parámetros de simulación y finalmente validar el modelo con datos reales (Laplanche, 2003).

Se producirá una base de datos para alimentar un modelo matemático con base en los resultados de las isotermas de adsorción, esta base se debe elaborar con sumo cuidado ya que la adsorción en suelo es mucho menor que la adsorción en otros elementos, como en el carbón activado.

Para este último ya se cuenta con modelos matemáticos de adsorción que se deberán adecuar para suelos.

5.3.1.4 Montaje de columnas

Las columnas se situarán en el laboratorio de Ingeniería Ambiental en el Edificio 5 del Instituto de Ingeniería, UNAM (Figura 5.3) en el área que pertenece al Grupo de Tratamiento y Reuso.



Figura 5.3. Laboratorio de Ingeniería Ambiental

5.3.1.5 Dispositivos y accesorios

En el fondo de la columna se colocará una malla de acero inoxidable de forma circular, por lo menos 3 centímetros de diámetro, con una abertura que permita la filtración del agua sintética y al mismo tiempo retenga el suelo, sobre ésta se agregará una capa de 2.5 centímetros de grava fina preferentemente extraída de la zona de estudio para evitar alteraciones en los resultados (tamaño de 2 a 5 milímetros), para evitar la pérdida de suelo por arrastre y a continuación se colocará la capa de 30 centímetros del material de empaque.

Una vez llenadas las columnas será necesario añadir agua para que las partículas de suelo se acomoden con lo que posiblemente el volumen disminuya y será necesario nuevamente agregar suelo hasta conseguir los 30 centímetros de la muestra de suelo.

Y por último se colocará otra capa de 2.5 centímetros de la grava fina para evitar la formación de orificios al adicionar las soluciones e inducir una acceso lo más homogéneo posible hacia el núcleo del suelo.

Dejando aproximadamente 10 centímetros libres en la parte superior, asegurando que al agregar con las soluciones no se produzcan derrames (Figura 5.4).

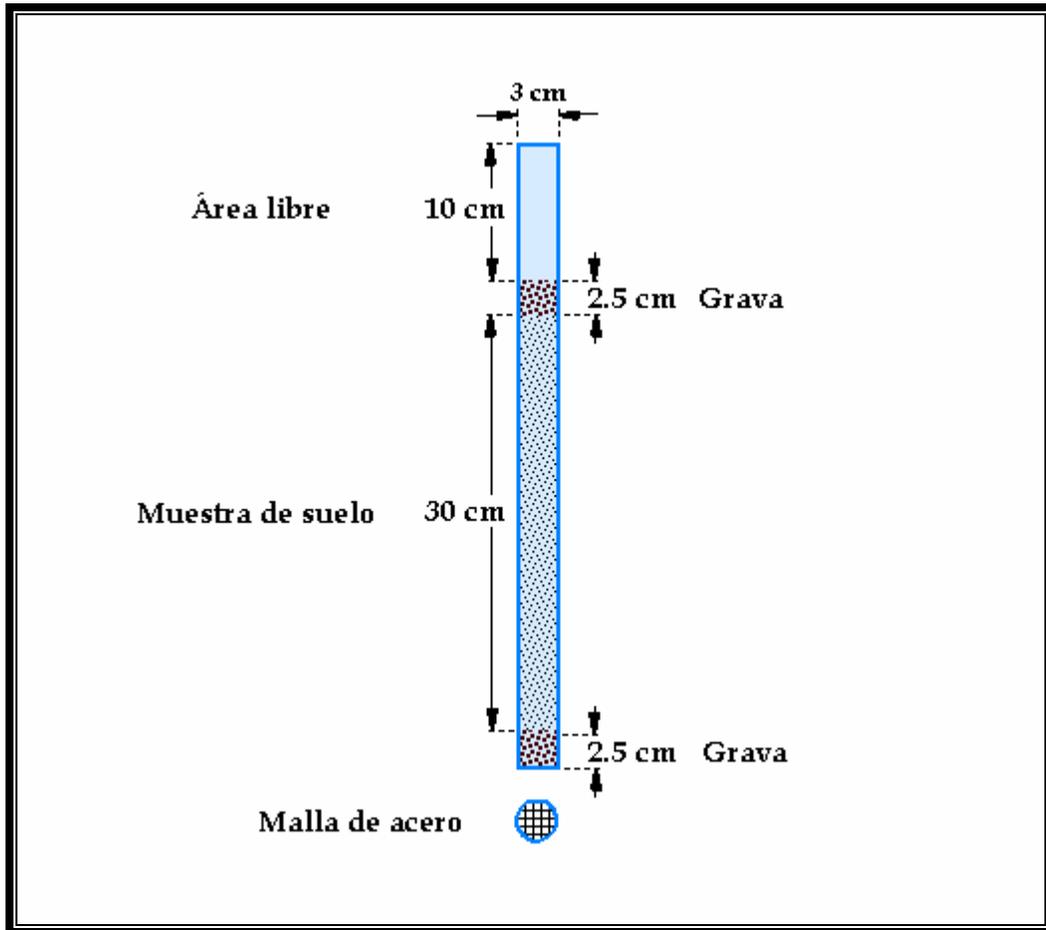


Figura 5.4. Distribución del relleno de la columna

En una estructura de madera se instalarán las columnas y los dispositivos.

En la superficie de arriba están los dispositivos de entrada, constan de un embudo con llave de vidrio para regular la incorporación del agua sintética.

En el área central se distribuyen las columnas de vidrio, en cuatro filas, cada una corresponde a un suelo y reactivo específico, cada fila con tres columnas para repeticiones y una columna testigo, sólo hay un punto de muestreo localizado en la base de la columna que cae a la parte baja de la estructura donde se ubican los recipientes de vidrio de 500 ml de capacidad, para acumular el lixiviado (Figura 5.5).

5.3.1.6 Diseño final

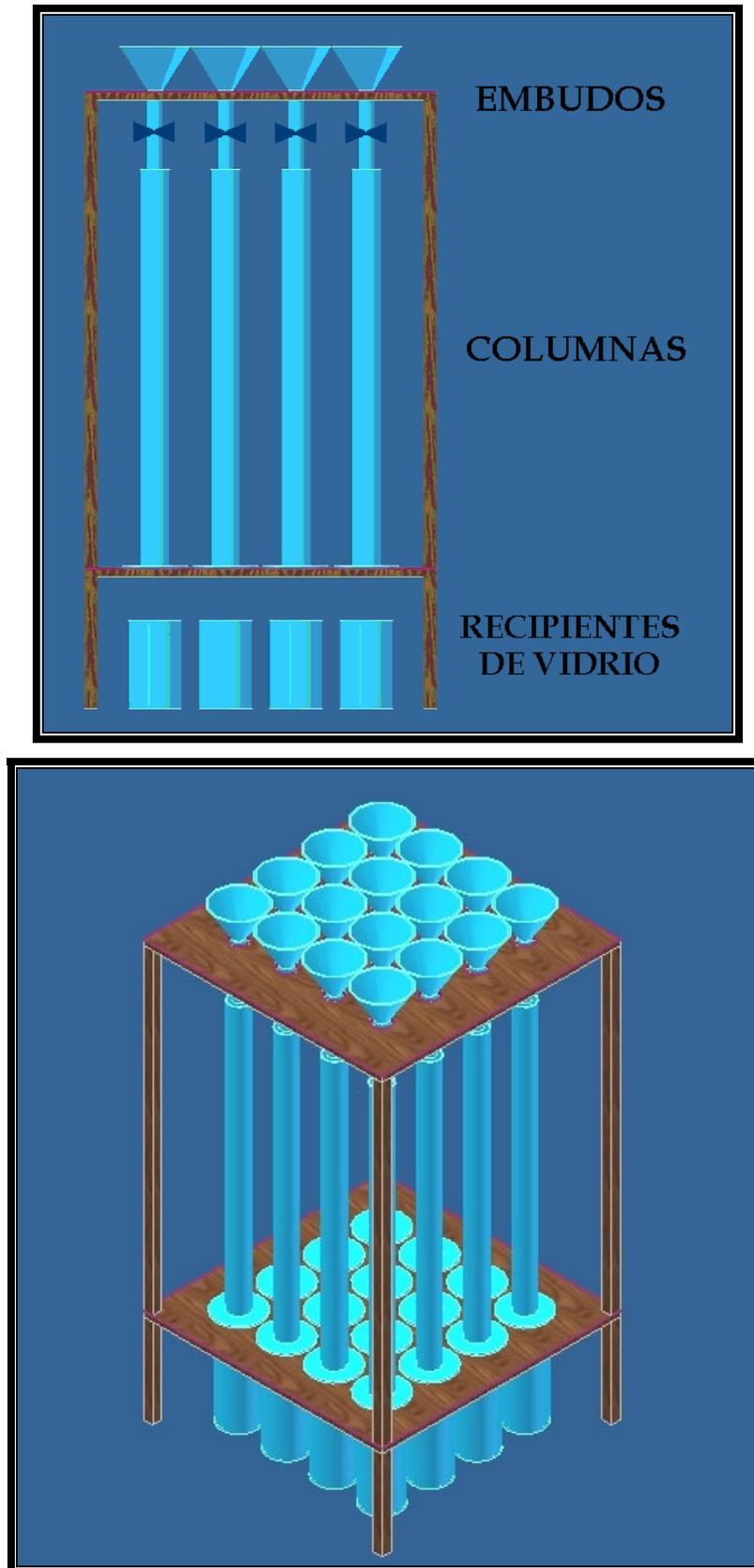


Figura 5.5. Diseño del dispositivo

Resumiendo en la Tabla 5.6 se muestra una síntesis del diseño final, en donde se especifican las características de cada una de las dieciséis columnas.

Tabla 5.6 Características de las columnas

Parámetro	Columnas alimentadas con DEHF								Columnas alimentadas con BBF							
	DL1	DL2	DL3	DLT	DV1	DV2	DV3	DVT	BL1	BL2	BL3	BLT	BV1	BV2	BV3	BVT
Tipo de suelo	Leptosol				Vertisol				leptosol				vertisol			
Altura de muestra (h)	30 centímetros															
Volúmen de suelo %columna	212 cm ³															
Volúmen Total de suelo	848 cm ³															
Tipo de efluente	agua sintética															
Reactivo	Di-2-Etil Hexil ftalato (DEHF)								Butilbencil ftalato (BBF)							
Volumen de efluente	965 ml				989 ml				965 ml				989 ml			
Período de irrigación	Intermitente cada 20 días															
Diámetro columna (Ø)	3 centímetros															
Altura de la columna (H)	45 centímetros															
Material	vidrio															
h/Ø	10															
Periodo de recolección	31 horas después de irrigación				51 horas después de irrigación				31 horas después de irrigación				51 horas después de irrigación			

Columnas empacadas con suelo leptosol y alimentadas con DEHF DL1, DL2 y DL3
 Columna testigo DLT
 Columnas empacadas con suelo vertisol y alimentadas con DEHF DV1, DV2 y DV3
 Columnas testigo DVT
 Columnas empacadas con suelo leptosol y alimentadas con BBF BL1, BL2 y BL3
 Columna testigo BLT
 Columnas empacadas con suelo vertisol y alimentadas con BBF BV1, BV2 y BV3
 Columna testigo BVT

5.3.2 Opción B

Otra alternativa es utilizar columnas existentes en el mercado como la SR 25, que facilitaría el montaje y el flujo tendría mayor control.

5.3.2.1 Material y dimensiones

La SR 25, es una columna de cristal borosilicato con extremos reforzados, diámetro interno de 2.5 cm y 45 cm de altura y presenta los siguientes componentes (Figura 5.6):

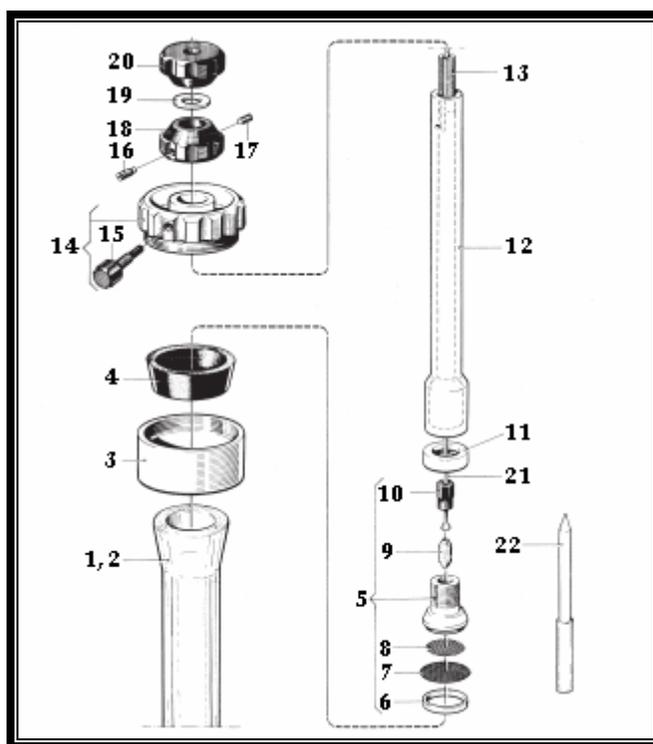


Figura 5.6. Columna SR 25

- | | | | |
|------|--------------------------|----|-------------------------------------|
| 1, 2 | Tubo cromatográfico | 13 | Tubo de ajuste interno |
| 3 | Buje (mueve hacia atrás) | 14 | Pedazos de extremo completos |
| 4 | Collar | 15 | Tornillo de fijación |
| 5 | Kit completo | 16 | Tornillo de guías |
| 6 | Sujetador | 17 | Tornillo de presión |
| 7 | Red | 18 | Perilla |
| 8 | Pantalla de ayuda | 19 | Arandela |
| 9 | Entre-rosca de cristal | 20 | Perilla de ajuste |
| 10 | Tuerca de fijación | 21 | Tubería capilar |
| 11 | Collar que se amplía | 22 | Herramienta que ensancha o avellana |
| 12 | Tubo de ajuste externo | | |

El inconveniente es que estas columnas no se comercializan en México, sólo con proveedores extranjeros, de acuerdo con la siguiente página de INTERNET, http://www4.amershambiosciences.com/aptrix/upp00919.nsf/Content/LabSep_Prod~CoISpar~SR~ColumnSR25.

En el Colegio de Posgraduados Campus Montecillo, en Montecillo, Estado de México; se realiza una investigación referente a pesticidas en suelos y cuentan con una columna SR 25 proveniente de Francia para realizar pruebas en suelo en el laboratorio (Figura 5.7).



Figura 5.7. Columna automatizada

En cuanto al número de columnas conviene que sean las 16 columnas ya descritas no obstante, se tendrá que modificar el volumen de muestra de suelo porque el diámetro de la columna SR 25 es menor (disminuye de 3.0 a 2.5 cm.) y el modo de operación será el mismo que se especifica en la opción A.

5.3.2.2 Montaje de columnas

Se debe considerar el espacio que ocupará cada una de las 16 columnas con todos sus accesorios, pues deberán instalarse en el laboratorio de Ingeniería Ambiental.



Figura 5.8. Montaje de columna automatizada

5.3.2.3 Dispositivos y accesorios

Para el buen funcionamiento de esta columna requiere los siguientes accesorios:

Bomba peristáltica (Figura 5.9): Para hacer circular la solución o cuando se hace necesaria la precisión del flujo.

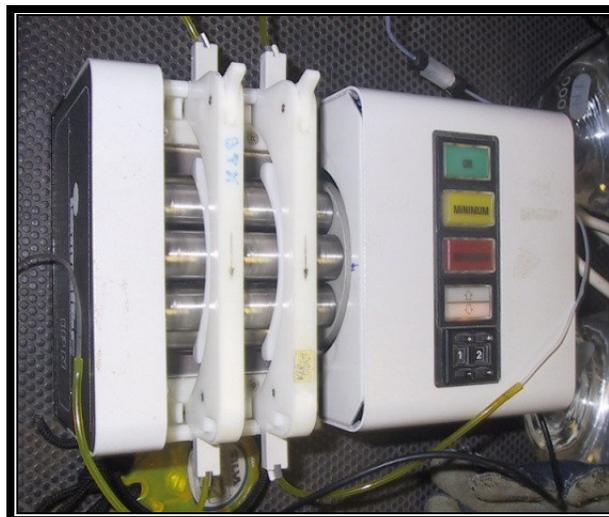


Figura 5.9. Bomba peristáltica

Incluso existe la posibilidad de llegar a un acuerdo con el Colegio de Posgraduados para realizar un préstamo del mecanismo (columna y dispositivos) para llevar a cabo las pruebas para este proyecto, si bien esto obligaría a prolongar el tiempo de las pruebas en laboratorio ya que se haría una columna a la vez, aunque por supuesto es más conveniente que el Instituto de Ingeniería adquiriera e instale un dispositivo propio en el laboratorio para posteriormente realizar más estudios referentes al SAT y continuar la línea de investigación.

Para señalar las diferencias entre las opciones A y B de las columnas exhibidas, se evaluaron diversos aspectos de acuerdo a las condiciones particulares del proyecto.

En México el 0.45 % del Producto Interno Bruto (PBI) que se asigna a la investigación y desarrollo tecnológico es muy pequeño comparado con otros países como Suecia (4%), Japón (3.2 %), Estados Unidos (2.7), China (1.23 %) y Brasil (1.05 %) (Alponte, Juan M. 2007), luego, lógicamente la cuestión económica es un aspecto relevante que debe de analizarse, ya que en la opción B el presupuesto se elevaría considerablemente, además el tiempo de adquisición desde el extranjero es relevante, asimismo el espacio que ocuparían las 16 columnas con todos sus dispositivos sería mayor.

Sin embargo esta segunda opción posee la cualidad de arrojar resultados más precisos, por operarse de manera automatizada. En cuanto a comodidad, beneficio y rendimiento no existe una gran diferencia entre las dos alternativas.

Finalmente la Tabla 5.7 muestra los aspectos importantes estimados en la evaluación cualitativa empleando una escala numérica de 5 a 10.

Tabla 5.7 Balance entre las dos opciones de columnas

Parámetro	Opción A	Opción B
Costo	9	6
Tiempo	9	6
Espacio	10	6
Precisión de resultados	8	10
Comodidad	9	10
Beneficio	10	10
Rendimiento	9	9
Total	64	57

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Los aspectos económicos y el tiempo fueron determinantes en los alcances de la presente tesis, en la cual se abordó la parte teórica del ensayo en columnas experimentales, no obstante el aporte al proyecto es trascendental considerando que el presente trabajo es una primera etapa del estudio del SAT en México.

Después de un amplio análisis de los resultados de experiencias previas en este campo de investigación, se comprobó que cada estudio es diferente y se estableció el diseño más apropiado para el estudio de adsorción de ftalatos y todas las especificaciones se eligieron enfocados a las circunstancias del proyecto para asegurar que los resultados tendrán un grado aceptable de confiabilidad.

Los contaminantes que permitieron establecer las bases del diseño de las columnas para este estudio estaban previamente identificados, sin embargo fue necesario investigar sus propiedades y simultáneamente realizar la caracterización de los suelos del Valle de Tula.

Para el diseño de las columnas y la elección de los dispositivos se restringió el uso de componentes plásticos por el tipo de contaminante a estudiar, eligiendo el vidrio de borosilicato como material de las columnas para evitar fuentes de contaminación que alteren los resultados.

El número de columnas dependió del número de tipos de suelo y contaminantes, considerando que cada combinación suelo-compuesto se va a realizar por triplicado, resultando un total de 16 columnas.

El proceso de operación de las columnas comenzará con el periodo de inyección del agua sintética cada 20 días, que representa el riego en el Valle de Tula, sucesivamente se produce el movimiento del agua a través de la columna de suelo y a continuación viene la etapa de acumulación y recolección del lixiviado, terminando hasta aquí la fase húmeda.

Finalmente la fase seca es el intervalo entre una inyección y otra, estos ciclos de agua-aire son muy importantes para el proceso de remoción que se investiga, la adsorción.

Con las dos opciones puede ensayarse el SAT en el laboratorio, cualquiera de los dispositivos es capaz de producir resultados veraces para estudiar la remoción que alcanza el suelo para los compuestos orgánicos detectados en el agua de los acuíferos, de otros contaminantes que contenga el agua residual o bien de organismos; así como los procesos involucrados que se llevan a cabo en el suelo (adsorción, biodegradación, etcétera) y estimar el tiempo de saturación o vida útil de los mismos.

Por las particularidades de este proyecto y considerando el aspecto económico determinante, por las condiciones que existen en el país, se consideró que la opción "A" es mejor elección.

Porque el costo de los dispositivos, ya montados en el laboratorio es mucho menor comparada con la opción "B" cuya inversión inicial para los 16 dispositivos se eleva notablemente, por otra parte se tardaría más tiempo, en caso de que se decidiera utilizar una sola columna para hacer todas las pruebas.

Además de que la opción "A" reúne las dimensiones, 3.0 cm. de diámetro y 45 cm. de longitud, necesarias y suficientes para contener una muestra representativa del suelo, permitir el paso de contaminantes y evitar derrames.

Para instalar en el laboratorio las columnas de la opción "A", se requiere sólo una base de madera para sostener las columnas y los dispositivos. Tomando en cuenta las dimensiones del mueble de laboratorio donde se ubicarán las columnas, se dispusieron de tal forma que permita un cómodo acceso para inyectar el agua sintética y recoger el lixiviado además de un orden que permita distinguir fácilmente cada una de las columnas lo que no ocurriría en la opción "B" pues las columnas requiere de más espacio, por los componentes que forzosamente se necesita comprar para cada una de las 16 columnas.

No obstante que las columnas de esta opción no son automatizadas, lo que facilitaría el trabajo, el proceso de operación de las columnas no es complicado, además la capacidad de los vasos es adecuada para acumular completamente el lixiviado obtenido de la aplicación de agua sintética cada 20 días, y mientras ocurre la fase seca, entre una inyección y otra, se recolecta el lixiviado y el recipiente limpio será colocado nuevamente en su lugar para el siguiente ciclo.

Uno de los principales beneficios de este tipo de estudios es su utilidad para conocer si los contaminantes son retenidos por el suelo o percolan a los mantos acuíferos convirtiéndose en un riesgo para la población que los utiliza como fuente de abastecimiento pues, luego de minuciosos análisis se ha descubierto que el agua que proviene directamente de manantiales y cuencas, con influencia de aguas residuales, contiene compuestos sintéticos imposibles de degradar mediante el ciclo hidrológico natural.

Entre las limitantes para este tipo de proyectos y estudios que se presentan en México son los escasos fondos asignados a la investigación y desarrollo tecnológico, 0.45 % del producto interno bruto (PIB) del país, por lo tanto en la actualidad no se cuenta con suficiente información y experimentación al respecto con la que se puedan comparar datos.

Sin embargo, presenta la ventaja de que una vez reunida la información, elegidos los parámetros y montadas las columnas en el laboratorio, este mecanismo puede utilizarse posteriormente en proyectos afines, en los cuales el costo inicial disminuye y futuros estudios se realizarían con mayor experiencia y precisión.

En otro orden de ideas, la problemática global del agua es un tema que ocupa, con mayor insistencia, la atención de científicos, técnicos, políticos y en general, de los habitantes del planeta, la disponibilidad de agua para una gran variedad de actividades se vuelve cada vez más compleja ante la demanda creciente y el agotamiento de los acuíferos así como por la contaminación de los cuerpos de agua, México enfrenta, actualmente en algunas de sus cuencas graves conflictos de disponibilidad, desperdicio y contaminación del agua.

Por ejemplo, la ZMCM presenta una crisis con una creciente dificultad para satisfacer la demanda, así como un sistema de gran complejidad para desalojar las aguas negras y las pluviales, además de problemas ocasionados por la sobreexplotación del acuífero y el hundimiento del terreno. La ciudad emplea 65 m³/s para satisfacer las necesidades de 18 millones de habitantes. A partir de esa agua se genera en promedio 45 m³/s de aguas residuales, que sumados a los escurrimientos pluviales salen de la ZMCM sin tratamiento y se emplean para riego en el Valle de Tula.^a

a. Estudio Proyecto integral de saneamiento del Valle de México, CONAGUA, 2000.

El agua negra se usa por los agricultores principalmente por la necesidad del líquido, aunque dicha agua incrementa la productividad pues contiene materia orgánica y nutrimentos para el suelo, sin embargo 40% de esta agua no es aprovechada por la planta y se filtra hacia los cuerpos de agua, pero ya contaminada con plaguicidas, pesticidas y fertilizantes, creando una recarga (25 m³/s) por la infiltración no intencional de agua negra al acuífero y provocando que afloren manantiales, los cuales, por su cercanía (100 Km), diferencia de nivel (150-300 m) y calidad apropiada puede ser, previo tratamiento, una posible nueva fuente de suministro para la ZMCM, pues se estima que hacia el año 2020 habrá 23 millones de habitantes y la demanda de agua se incrementará 11 m³/s.^b

El Sistema de Tratamiento Natural SAT se presenta como una opción atractiva para hacer frente a estas dificultades ya que es un procedimiento eficaz y económico, no obstante, es fundamental legislar su práctica para plantear medidas, manuales y procedimientos para la adecuada operación, enfocadas a preservar y maximizar su eficiencia, transformándolo en un SAT controlado.

El uso de agua reciclada puede tener efectos adversos para la salud pública y el medio ambiente, esto dependerá de la aplicación y uso que se le de a este agua reciclada, características del suelo, condiciones climáticas y prácticas agrícolas. Por lo tanto, es imprescindible que todos estos factores sean tomados en cuenta en investigación y proyectos de reuso de esas aguas para la agricultura.

El problema del agua es un problema multifacético que requiere para su estudio de la participación de expertos de diferentes disciplinas, se deben buscar reformas que contemplen esta problemática y doten al país de un sistema legal acorde a las necesidades del México de hoy, que garantice el uso sustentable de las aguas nacionales.

Además de exigir que los gobiernos fortalezcan los mecanismos y promuevan cada vez mayores espacios para que las instituciones de investigación y de desarrollo tecnológico relacionadas con el agua participen intensamente en el planteamiento de soluciones al problema del agua en México.

b. Jiménez, *et. al.* 1999; Estimaciones propias.

El gobierno debe trabajar en forma coordinada con el sector de la investigación, de manera que ellos conozcan las necesidades del país y a su vez, el gobierno haga uso de sus resultados y desarrollos tecnológicos, y tenga bases para tomar decisiones en cuanto a la administración, la legislación y la participación social y privada en torno al agua.

Ya que para el desarrollo del país es estratégico invertir en investigación y es parte de las responsabilidades de centros como el Instituto de Ingeniería de la UNAM; realizar proyectos propios, desarrollar, adaptar y transferir tecnología, formar recursos humanos calificados y prestar servicios tecnológicos para el manejo, la preservación y la rehabilitación del agua y su entorno y encauzar el diálogo entre los diversos sectores que conduzcan a consensos y permitan emprender las acciones para proponer soluciones fundamentadas, económicas, socialmente aceptadas, ambientalmente sustentables y tecnológicamente factibles.

La calidad del agua es fundamental para el alimento, la energía y la productividad. El manejo juicioso de este recurso es central para la estrategia del desarrollo sustentable, entendido éste como una gestión integral que busque el equilibrio entre crecimiento económico, equidad y sustentabilidad ambiental a través de un mecanismo regulador que es la participación social efectiva, ya que sin su colaboración los esfuerzos técnicos que llevan a cabo algunas organizaciones resultarían insuficientes.

La gestión del recurso deberá tender a evitar situaciones conflictivas debidas a escasez, sobreexplotación y contaminación, mediante medidas preventivas que procuren un uso racional y de conservación, fomente la educación en torno al tema del agua, y promueva la cultura del uso eficiente del agua

6.2 Recomendaciones

Por la naturaleza de los contaminantes (ftalatos) que se van a estudiar es conveniente supervisar que a la hora de montar las columnas y realizar los ensayos no exista contacto alguno con materiales plásticos para evitar fuentes de contaminación que pueda afectar los resultados del experimento.

Antes de comenzar con el experimento y una vez montado el mecanismo en el laboratorio es necesario determinar la velocidad real de infiltración del agua a través de las columnas con ayuda del trazador, para determinar la cantidad necesaria de contaminante sintético con la cual el núcleo de suelo de cada columna se satura.

Se recomienda que al finalizar el estudio se realice un balance de contaminantes para cada columna y para los tres componentes del sistema (agua-suelo-lixiviado).

Se sugiere continuar con la línea de investigación, empleando las columnas de suelo del DR 003; para estudiar otros compuestos peligrosos para el ambiente o la salud que puedan presentarse en el lugar.

Además, se puede hacer uso de la metodología propuesta y del diseño variando el tipo de suelo y aplicarlo a suelos de diferentes lugares del país.

Asimismo, en lugar de agua sintética se pueden abastecer las columnas con una muestra de las aguas residuales que se quieren depurar utilizando el método SAT.

También se pueden realizar estudios en muestras de suelo inalterado y diseñar un mecanismo que simule un flujo constante para estudios de filtración rápida en suelos arenosos.

Es fundamental continuar realizando ensayos de laboratorio relacionados con el SAT, ya que sí se conoce el comportamiento de los contaminantes y se sabe cual es su destino, se tendrán las bases para aplicar en México éste método de tratamiento en forma organizada, estableciendo las normas para regularlo y evitar contaminación de suelos y cuerpos de agua.

Conviene destinar fondos en este tipo de proyectos e involucrar a las autoridades y usuarios, debemos tener conciencia que el recurso agua no tiene que ser privado, pero lo que sí debe ser es eficiente y cobrar lo justo, la participación de todos es esencial para formular y ejecutar programas y acciones para la mejor administración y protección de los recursos hídricos.

GLOSARIO

GLOSARIO

El presente glosario pretende servir de ayuda, aclarando el significado de aquellos términos que por pertenecer al campo especializado de la edafología, la hidrogeología o la hidroquímica pueden causar confusión para quien no los emplea de forma habitual.

No pretende ser exhaustivo en el número de acepciones propuestas para cada uno de los términos recogidos, al contrario, se ha primado la sencillez, claridad y utilidad por lo que únicamente se muestran las definiciones adecuadas al contexto en el que pueden encontrarse en la presente tesis.

Absorción: Retención de una sustancia, generalmente en forma de líquido o gas, entre las moléculas de otra (absorbente). Penetración de un contaminante en un sólido.

Acidez: Contenido en ácidos de una solución. Medida de la concentración de hidrógenos en una solución. Su determinación se suele realizar mediante métodos colorimétricos o potenciométricos, siendo este último el más empleado.

Ácido: Sustancia que tiene tendencia a perder un protón. Sustancia que se disuelve en agua con la consiguiente formación de iones hidrógeno. Sustancia que contiene hidrógeno, que puede ser reemplazado por metales para formar sales.

Acuífero: Formación, grupo de formaciones, o parte de una formación geológica que está formada por materiales permeables y que cuando contienen agua son capaces de cederla en cantidades aprovechables bajo la acción de gradientes hidráulicos normales. Los materiales que comúnmente forman los acuíferos son arenas y gravas no consolidadas, rocas permeables sedimentarias como areniscas y calizas, y rocas cristalinas o volcánicas fuertemente fracturadas.

Adsorción: Adherencia de las moléculas de un gas, iones, o moléculas en solución a la superficie de un sólido. Atracción de un compuesto hacia una superficie sólida.

Aerobio: Que requiere del oxígeno para vivir.

Agua residual: Efluentes líquidos acuosos provenientes como desecho de la actividad urbana, industrial, ganadera o agrícola que se caracterizan por haber perdido en el proceso alguna de sus características de calidad principalmente debido a la adición de sustancias disueltas o en suspensión o de agentes biológicos y que no pueden ser usadas por el proceso que la produjo.

Agua residual doméstica: Son todas las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por las excretas humanas y las actividades domésticas.

Agua residual industrial: Todas las aguas residuales generadas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad industrial o comercial.

Agua residual urbana: Son las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial.

Agua subterránea: Agua situada bajo la superficie del terreno rellenando el espacio vacío entre las rocas, o el material poroso, y que se extiende por toda la zona considerada como saturada.

Anaerobio: Sin oxígeno.

Anóxico: Condición en la cuál no existe oxígeno molecular.

Arcilla: Desde el punto de vista mineral, filosilicato hidratado que se presenta en cristales muy pequeños (del orden de micrómetros) en forma de láminas hexagonales o fibras. Desde el punto de vista del tamaño de partícula se clasifican como arcillas aquellos cuyo tamaño es menor de 0.02 mm.

Arena: Sedimento detrítico no consolidado cuyo tamaño está comprendido entre 2 mm y 0.2 mm.

Arcilloso: Material en cuya composición predominan las arcillas. Ver textura.

Arenoso: Material en cuya composición predominan las arenas. Ver textura.

Bacteria: Microorganismo procariota unicelular, caracterizado por carecer de órganos propios de las células eucariotas. Muchas son saprófitas jugando un importante papel en la descomposición de la materia orgánica.

Biblioteca NIST: es una herramienta del software que controla el Detector Selectivo de Masas acoplado al Cromatógrafo de gases y busca en su base de datos la correspondencia de cada pico cromatográfico vs. la información de la base (175,000) y da sugerencias de la probabilidad de que el pico buscado sea "X" compuesto asignándole un QUAL (% de certidumbre).

Biodegradable: Susceptible de descomponerse a través de procesos biológicos, generalmente mediados por microorganismos (bacterias, hongos, protozoos, etc.). Esta propiedad, que caracteriza a la mayor parte de los compuestos biológicos, permite su transformación en sustancias más sencillas que no necesariamente son menos contaminantes o tóxicas que la sustancia original.

Calidad: Término que cuando se emplea referido a la composición de un agua se refiere a su adecuación a un uso concreto.

Capacidad autodepuradora: Capacidad de un sistema para diluir o transformar los contaminantes en el introducidos en sustancias más simples de forma que recupere su calidad inicial. La autodepuración es un proceso complejo en el que intervienen tanto los componentes inorgánicos del medio, como los organismos vivos y procesos puramente físicos como la filtración o la decantación.

Capacidad de infiltración del suelo: Velocidad a la que el agua penetra en el interior del suelo desde su superficie. En condiciones de saturación, cubierto con una lámina de agua poco espesa. La capacidad de infiltración es equivalente a la conductividad hidráulica saturada.

Capacidad de intercambio iónico: En el suelo existen materiales, fundamentalmente como las arcillas y la materia orgánica, que tienen la propiedad de acumular cationes de forma reversible en su superficie liberando a cambio otros cationes, por lo general calcio o magnesio. Esta propiedad recibe el nombre de Capacidad de Cambio y expresa químicamente el número de moles de iones adsorbidos que pueden ser intercambiados por unidad de masa seca, bajo unas condiciones dadas de temperatura, presión, composición de la fase líquida y una relación masa/solución dada (un mol de carga adsorbida equivale a $6,02 \times 10^{23}$ cargas de iones adsorbidos). En el Sistema Internacional la capacidad de cambio se expresa como centimoles por kilogramo, (cmol / kg). La capacidad de intercambio es una propiedad fundamental del suelo, de ella depende muchas de sus propiedades como agente depurador.

Carga hidráulica aplicada: Volumen aplicado por superficie de terreno en un determinado periodo de tiempo, normalmente semanal, mensual o anual, se expresa en $\text{mm} / \text{semana}$, mm / mes , $\text{mm} / \text{día}$.

Ciclo hidrológico: Sucesión de fases por las que pasa el agua en su dinámica de distribución y circulación en la tierra. Incluye tanto las tres fases fundamentales: atmosférica, superficial y subterránea como los procesos de flujo (precipitación, escorrentía, infiltración, percolación, evaporación y condensación), que permiten el movimiento de la masa de agua entre y a través de las fases. Desde el punto de vista de la calidad de las aguas es preciso considerar que el ciclo hidrológico es un continuo, todas las fases están conectadas y se relacionan, de forma que una acción sobre cualquiera de ellas pueda afectar al resto de manera. El suelo constituye la interfase activa más importante, en el la composición de las aguas sufre profundos cambios, fruto de la interacción con los minerales y seres vivos que lo pueblan.

Coefficiente de almacenamiento: Se define como el volumen de agua que puede drenar, o almacenar un acuífero, por unidad de superficie y unidad de carga en el potencial hidráulico (igual al rendimiento específico en un acuífero no confinado)

Coliforme: Bacterias Gram negativas de morfología bacilar, capaces de fermentar lactosa con producción de gas a la temperatura de 35° o 37° C (coliformes totales). Aquellas que tienen las mismas propiedades a la temperatura de 44° o 44.5° C se denominan coliformes fecales.

Colorimetría: Determinación de la concentración de una sustancia en una solución mediante la medición de la intensidad de color generado al reaccionar con un reactivo adecuado.

Conductividad hidráulica saturada: Un material puede ser considerado permeable si posee poros, grietas, fisuras, etc. a través de los cuales puede circular un fluido (gases, agua). La conductividad hidráulica es una medida de la facilidad con la que el agua puede atravesar esos poros. En general el agua se mueve a través de un material poroso siguiendo la ley de Darcy: Donde q es el flujo de agua (Q) por unidad de área (A), K es la permeabilidad (l/t) y dH/dl es el gradiente hidráulico (l/l).

Conductividad hidráulica no saturada: Cuando el suelo no está saturado de agua la presencia de burbujas de aire hace que la distribución de los canales de flujo se vea modificada variando la conductividad hidráulica. Si el perfil del suelo no está saturado, la tasa de infiltración es mayor a causa del flujo a través de las grietas y fracturas mayores que con la humedad terminan cerrándose debido al hinchamiento de las arcillas. Si el suelo está suficientemente seco, y dependiendo de su textura, la absorción capilar puede hacer que, en las primeras etapas del flujo, la velocidad de infiltración también será mucho mayor que una vez establecido el estado estacionario.

Contaminación: Acción y efecto de contaminar. Ver contaminante.

Contaminante: Cualquier forma de materia o energía ajena a la composición natural del agua.

Contaminante conservativo: Contaminante cuya naturaleza química no varía en su interacción con el medio físico o biológico y que por tanto al atravesar el suelo y el acuífero, mantiene todas sus propiedades.

Contaminante no conservativo: Contaminante cuya naturaleza química varía al interactuar con los componentes bióticos y abióticos del medio.

Cuenca: Área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia escurre y transita o drena a través de una red de corrientes que fluyen hacia una corriente principal y, por esta, hacia un punto común de salida que puede ser un almacenamiento de agua interior o cuando sus descargas llegan hasta el mar.

DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días. Medida de la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación del material carbonoso de una muestra de agua, por la población microbiana, a lo largo de cinco días de incubación. Se trata de una reacción fuertemente dependiente de la temperatura por lo que siempre que el ensayo no se haya hecho a 20° que es el estándar habrá que indicarlo. Parámetro indicador de contaminación orgánica más ampliamente empleado, aunque tiene serias limitaciones que hay que tener en cuenta a la hora de su interpretación, entre estas pueden destacarse: en los cinco días que dura el ensayo no se oxida más del 60 o 70% de la materia orgánica realmente presente en la muestra, los resultados dependen del inóculo bacteriano y la presencia de sustancias tóxicas para los microorganismos puede falsear los resultados.

Demanda de cloro: cantidad de cloro que es necesario añadir a un agua para que después de haber producido su desinfección queden aún vestigios de cloro libre tras un tiempo de estabilización que suele ser de dos horas.

Densidad: Masa de un cuerpo por unidad de volumen; *Densidad aparente:* Masa de suelo seco por unidad de volumen incluyendo los poros; *Densidad real:* Densidad de los constituyentes del suelo sin tener en consideración los poros entre ellos.

Depuración natural: Aquella en la que no interviene el hombre, mediada por procesos naturales como degradación bacteriana, oxidación, dilución o la interacción con la matriz sólida del terreno.

Desnitrificación: Reducción desasimilatoria de nitrato y/o nitrito a nitrógeno molecular. Entre los géneros bacterianos implicados en el proceso pueden destacarse: *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Brevibacoterium*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas* y *Spirillum*. Estas bacterias son heterótrofas, producen el proceso en cuatro pasos enzimáticos diferentes. El primer paso consiste en la conversión de nitrato en nitrito, y a continuación se producen óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno gas.

Dispersión hidrodinámica: es el resultado macroscópico del movimiento del soluto debido a efectos: microscópicos, macroscópicos y megascópicos.

DQO: Demanda química de oxígeno. Se trata de un ensayo empleado para la medida del contenido en materia orgánica de una muestra de agua residual. Como agente oxidante se emplea una sustancia química, como el dicromato, fuertemente oxidante en medio ácido y a elevada temperatura.

Dureza del agua: Suma de las concentraciones de cationes metálicos con la excepción de los metales alcalinos y del hidrógeno, en la mayoría de las ocasiones es debida al calcio y magnesio a los que se añaden con frecuencia el hierro, aluminio, manganeso y estroncio. Se suele expresar en miliequivalentes de CaCO_3 o en grados franceses (1 grado francés = 10 mg/l de CaCO_3).

Desinfección: Destrucción por medio de un agente químico o físico de las bacterias y virus patógenos que se encuentran en el material a desinfectar (sustancia, objeto, etc.). Se diferencia de la esterilización en que esta última destruye todos los microorganismos, patógenos o no, incluidas las formas de resistencia.

Detergente: Sustancia empleada en la limpieza, por sus propiedades emulsionantes de las grasas. Sustancia que posee una porción no polar (hidrofóbica) y una parte polar (hidrofílica) que tiene la capacidad de disolver las grasas y aceites.

Edafología: Ciencia que estudia el suelo, su origen, morfología, génesis, distribución, representación cartográfica y taxonomía prestando especial atención a su uso y función ambiental.

Elementos traza: Generalmente se refiere a ciertos elementos químicos, como: el cobalto, el silicio, el nitrógeno, el fósforo y el hierro que se presentan en muy bajas concentraciones (inferior al 0,01 %), y tienen una gran importancia desde el punto de vista biológico independientemente de que sean esenciales o tengan efectos tóxicos, además de que no influyen en forma significativa en la salinidad de un cuerpo de agua.

Encharcamiento: Acumulación de agua en la superficie del terreno debido generalmente a un drenaje insuficiente.

Ensayo de infiltración: Ensayo destinado a la medida de la capacidad de infiltración de una superficie permeable. Se suele realizar mediante anillos clavados o la excavación de zanjas de forma y profundidad muy variable que se rellenan de agua y en los cuales se mide la velocidad a la que esta se infiltra.

Enturbiamiento: Pérdida de la transparencia del agua debida generalmente a la presencia de materia en suspensión (orgánica o inorgánica), al desarrollo de microorganismos, o a la presencia de geles de hierro o aluminio.

Escorrentía superficial: Parte de la precipitación que fluye por la superficie del suelo.

Escorrentía subsuperficial: Parte de la precipitación que no se ha filtrado hasta el nivel freático, pero que se mueve como flujo hipodérmico, pudiendo descargar en los cursos de agua o terminar infiltrándose.

Estabilización: Proceso físico-químico mediante el cual se produce la transformación de una sustancia en otra más estable y generalmente menos tóxica.

Estiércol: Materia orgánica procedente de los residuos o excretas animales fermentada y que se emplea como abono.

Estructura: Disposición relativa (agrupación) de los elementos formes del suelo. La estructura influye notablemente en algunas propiedades del suelo como es su permeabilidad hidráulica, porosidad, densidad etc.

Eutrofización: Aumento anormal del contenido en nutrientes (especialmente los compuestos de nitrógeno y fósforo) de una masa de agua que provoca un crecimiento explosivo de algas y otros organismos afectando gravemente a su función ecológica.

Evaporación: Paso de las moléculas de un líquido al estado de vapor desde su superficie a la atmósfera. La evaporación se produce a temperaturas inferiores a la de ebullición.

Evapotranspiración: Proceso conjunto de evaporación de agua desde el suelo y de la transpiración de las plantas a través de sus estomas.

Excedente de riego: Agua de riego que no es empleada por la planta para sus procesos vitales y que finalmente es evaporada, incorporada a la escorrentía superficial o se infiltra de forma que no resulta útil para los cultivos. Los excedentes de riego constituyen el principal vehículo de transporte de contaminantes agrícolas hacia las aguas subterráneas.

Excremento: Residuo orgánico procedente del intestino de los animales.

Fermentación: Degradación microbiana anaerobia de la materia orgánica cuyos productos finales incluyen el dióxido de carbono, los ácidos orgánicos simples y otros productos.

Fertilizante: Sustancia natural o de síntesis que contiene alguno de los nutrientes necesarios para el crecimiento vegetal y que se añade a los cultivos con el fin de mejorar el rendimiento de las cosechas.

Fertilizante orgánico: Fertilizante obtenido por fermentación y maduración de materia orgánica de diversa procedencia (estiércol, restos de cosechas, lodos de depuradoras, etc.).

Fertilizante químico: Fertilizante de naturaleza inorgánica, generalmente obtenido por síntesis química.

Filtración: Proceso de separación de un sólido suspendido en un líquido al hacerlo pasar a través de un medio poroso con un tamaño de poro adecuado.

Fluido: sustancia cuyas moléculas cambian con facilidad su posición relativa; como los sólidos o los gases.

Fluido incompresible: Fluido cuyo volumen no varía al modificar la presión ejercida sobre él.

Freatofitas: Especies vegetales características de suelos muy húmedos, generalmente próximos a cursos o masas de agua.

Gases disueltos en el agua: El agua de precipitación contiene disueltos los mismos gases que la atmósfera (nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, gases nobles) aunque en diferente proporción, en función de sus presiones parciales y solubilidad en el agua. La interacción del agua infiltrada con el suelo, la zona no saturada y los materiales del acuífero modifican sustancialmente el equilibrio gaseoso.

Geodepuración: Eliminación de las sustancias contaminantes del agua residual al atravesar el terreno gracias a la interacción del agua y sus solutos con el suelo y la roca que forma el acuífero. Los principales procesos que se ven implicados en la geodepuración son: la precipitación química, el intercambio iónico y los procesos de óxido-reducción.

Granulometría: Ver "Textura".

Hidroquímica: Ciencia que estudia la composición y evolución química de las aguas naturales y su interacción con el medio.

Horizonte del suelo: Capa del suelo que puede diferenciarse de sus limitantes por características tales como el color, composición, textura, actividad biológica, etc. Los horizontes del suelo son importantes tanto desde un punto de vista taxonómico como de estudio de su comportamiento frente al agua que los atraviesa.

Humedad del suelo: Agua de la zona no saturada. Se expresa como una fracción del volumen total de poros que puede ser ocupado por el agua. Su valor es igual o menor que la porosidad.

Infiltración: Flujo del agua o de otro fluido a través de los poros de un cuerpo sólido. Flujo del agua a través del suelo.

Infiltración directa sobre el terreno: Método de depuración de aguas residuales urbanas basado en la capacidad depuradora del suelo y de la zona no saturada y que consiste en el vertido controlado sobre el terreno de los efluentes, sometidos a un tratamiento primario.

Infiltración rápida: Sistema de depuración de aguas residuales urbanas mediante infiltración directa sobre el terreno en el que las cargas hidráulicas aportadas son mayores de 6 metros año.

Infiltrómetro: Instrumento que se emplea para determinar la capacidad de infiltración de un suelo o sedimento.

Intercambio iónico: Sustitución de un ión por otro en la superficie de determinadas sustancias. Es posible tanto el cambio de cationes como de aniones aunque en medios naturales los procesos más comunes son los de cambio catiónico. Las arcillas y la materia orgánica del suelo son cambiadores iónicos naturales que contribuyen significativamente en los procesos de depuración de las aguas que atraviesan el suelo y los acuíferos.

Ión: Átomo o grupo de átomos que ha perdido o adquirido uno o más electrones y por tanto posee una cierta carga positiva o negativa. Los iones con carga positiva reciben el nombre de cationes y los que tienen carga negativa aniones.

Ionización: Proceso en virtud del cual un átomo o grupo de átomos al perder o adquirir un electrón se transforma en un ión.

Isótopo: Especie de un mismo elemento, que teniendo el mismo número atómico se diferencia por la masa atómica debido al diferente número de neutrones presentes en el núcleo.

Laguna aerobia: Laguna que funciona en condiciones oxidantes.

Laguna anaerobia: Laguna que funciona en condiciones reductoras.

Laguna de estabilización: Laguna diseñada para la oxidación biológica de la materia orgánica.

Laguna de maduración: Laguna de estabilización de poca profundidad (para que la luz y el oxígeno puedan penetrar totalmente en ellas) en la que se tratan efluentes secundarios. Originalmente se diseñaron para eliminar la carga bacteriana de las aguas tratadas mediante otras técnicas.

Lavado del suelo: Eliminación de sustancias solubles del suelo debido al paso del agua de infiltración.

Lecho bacteriano: Sistema de depuración consistente en un depósito o estanque relleno de un material de gran superficie específica sobre el cual se desarrolla una población bacteriana activa responsable de la depuración de los efluentes que lo atraviesan.

Ley de Darcy: Ley empírica que define el flujo de un fluido a través de un medio poroso. Se basa en la asunción de que el flujo es laminar y los efectos de la inercia son despreciables, siendo la velocidad del flujo directamente proporcional al gradiente hidráulico. En el caso de las aguas subterráneas esto es equivalente a decir que la velocidad es igual al producto del gradiente hidráulico por la conductividad. La ley de Darcy se puede representar mediante la siguiente expresión: Siendo Q el caudal, A el área del conducto que transporta el agua, K es una constante de proporcionalidad y $\frac{dh}{dl}$ el gradiente hidráulico.

Límite de saturación: Cantidad de agua que es capaz de absorber un material y a partir del cual se considera saturado, de forma que cualquier adición nueva no penetra en el mismo o desplaza una cantidad equivalente de líquido.

Limo: Fracción granulométrica comprendida entre 0.02 y 0.002 mm.

Lisímetro: Instrumento que sirve para medir la cantidad de agua que se infiltra en el suelo, permite realizar otras medidas como son la evapotranspiración, el agua empleada por las plantas, etc.

Lixiviar: Separar una sustancia soluble de la matriz que la contiene por efecto del agua.

Lixiviación: Efecto de lixiviar.

Lixiviado: Solución resultante del lavado de una matriz sólida por el agua que la atraviesa.

Lodo: Sólidos separados de un agua residual mediante procesos físico-químicos generalmente con un elevado contenido en materia orgánica.

Marga: Roca sedimentaria formada por una mezcla de arcilla y caliza (35 al 65 %). Generalmente se trata de materiales de baja permeabilidad.

Materia en suspensión: ver Sólidos en Suspensión.

Medida de la conductividad eléctrica: La conductividad eléctrica del agua se determina mediante un electrodo de conductividad, de platino cuando se necesita mayor precisión, sumergido en la solución a medir e insertado en una de las ramas de un puente de Wheatstone (de corriente alterna para evitar fenómenos de polarización).

Medida de la humedad del suelo: El método de referencia para la medida la humedad del suelo es el gravimétrico aunque existen muchos otros, de campo y laboratorio: sonda de neutrones, sonda gamma, centrifugación, bloque de yeso, tensiómetros, etc.

Medida del contenido microbiológico: El recuento de bacterias presentes en el agua subterránea, se realiza normalmente mediante siembra y recuento directo de las unidades formadoras de colonias (UFC), si el contenido bacteriano es bajo, o siembra en tubos y recuento estadístico (técnica conocida como NMP o del número más probable). En ocasiones, cuando se trata de aguas muy limpias, se recurre al filtrado en membrana y siembra de esta. La identificación de especies o grupos concretos requiere el empleo de medios específicos.

Medida del pH: El método normalmente utilizado en la determinación del pH de aguas naturales es el electrométrico con electrodo de vidrio, se basa en la medida de la diferencia de potencial entre un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia.

Medio abiótico: Sin vida.

Medio oxidante: Medio en el que existen donadores electrónicos que pueden producir la oxidación de las especies reducidas.

Medio reductor: Medio en el que existen aceptores electrónicos que pueden producir la reducción de las especies oxidadas.

Mineralización del agua: Constituyentes inorgánicos del agua obtenidos como resultado de su contacto con las formaciones geológicas que atraviesa (en condiciones naturales) o del aporte humano (cuando se dan procesos de contaminación).

Nitrificación: Proceso por el cual el amoníaco es oxidado a nitrito y luego a nitrato mediante reacciones bacterianas o químicas. Se trata de una importante fase del ciclo del nitrógeno que pone a disposición de las plantas el nitrógeno en forma asimilable por ellas.

Nivel freático: Posición del nivel del agua en un acuífero libre respecto de la superficie del terreno.

Nivel piezométrico: Altura manométrica de la presión del agua en un punto dado de un acuífero. Altura del nivel del agua en un pozo.

Nutriente: Sustancia necesaria para el crecimiento y mantenimiento de la actividad vital de los organismos. Cuando se habla de aguas residuales generalmente se hace referencia al contenido en nitrógeno, fósforo y materia orgánica y en general a cualquier sustancia necesaria para mantener la actividad vital de los organismos pobladores de las aguas.

Óxido-reducción: ver proceso redox.

Permeabilidad: se define como la constante de proporcionalidad K , su valor depende fuertemente de la humedad, e incluso, en condiciones de humedad constante, como cuando el suelo está saturado, K puede variar debido al hinchamiento de las arcillas, clasificación de las partículas o cambios en la naturaleza química del agua del suelo. El valor de K en la dirección vertical suele ser diferente al valor que toma en la dirección horizontal, esto es especialmente notoria en materiales estratificados en capas.

Percolación: Movimiento del agua a través de los intersticios de la roca o del suelo.

Porosidad: Relación entre el volumen de huecos y el volumen total de una fracción definida de material. Generalmente se expresa en porcentaje.

Porosidad eficaz: Volumen de huecos disponible que contribuye en la transmisión de agua a través de un material permeable. Generalmente se expresa como porcentaje del volumen total.

Pozo: Perforación del terreno, generalmente de diámetro relativamente grande, realizada con el fin de extraer agua o eliminar residuos domésticos (pozo negro, actualmente en desuso).

Precipitación: Proceso de separación de un sólido insoluble de una solución.

Procesos redox: Proceso químico de oxidación-reducción en el que una sustancia se oxida perdiendo uno o varios electrones, y otra se reduce ganando los electrones que perdió la sustancia oxidada. La combustión, la respiración o la oxidación de los metales son ejemplos.

Recarga: Porción del agua superficial que atravesando la zona no saturada llega al acuífero y contribuye a aumentar sus reservas.

Recarga artificial: Recarga del acuífero favorecida o provocada por el hombre, generalmente con el fin de aumentar los recursos de agua subterránea o aprovechar el excedente de agua que se produce en ciertas épocas (lluvias) o circunstancias (aguas de tormenta).

Rendimiento específico: (Specific yield). Es la relación entre el volumen de agua que un medio poroso después de haber sido saturado, puede ceder por gravedad, y el volumen del medio poroso.

Sólidos en suspensión: Sólidos insolubles, de naturaleza orgánica o inorgánica, suspendidos en el seno de la solución acuosa que pueden ser separados mediante técnicas físicas como la centrifugación, decantación o filtrado

Sondeo: Perforación de la superficie del terreno realizada con el objeto de extraer agua.

Sorción: Los mecanismos de sorción incluyen la adsorción y la absorción, depende de las propiedades del contaminante y del suelo y tiene gran impacto en la degradación y volatilización.

Suelo: Parte superior de la corteza terrestre que mantiene el desarrollo vegetal y que evoluciona gracias al efecto de los factores determinantes de la edafogénesis (clima, tiempo, actividad biológica, flujo del agua).

Superficie específica: Es el área de las partículas por unidad de masa de material, se mide en m^2/g y está relacionada con varias propiedades físicas y químicas del suelo.

Textura: Las partículas del suelo pueden clasificarse en función de su tamaño. La textura define la distribución de tamaños según alguno de los criterios normalmente aceptados. Los términos granulometría y textura pueden ser considerados como sinónimos. Existen numerosas clasificaciones texturales, cada suelo recibirá una denominación según la clase que mayormente condicione sus propiedades físicas y físico-químicas (y no necesariamente en base a la fracción dominante en porcentaje). Así se puede hablar de suelos limosos, arcillosos, arenosos o francos cuando la distribución textural está equilibrada.

Transferencia de masas: es el movimiento de solutos arrastrados por el flujo de agua.

Tratamiento primario: El tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico y/o químico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión, u otros procesos en los que la DBO5 de las aguas de entrada se reduzca por lo menos en un 20% antes del vertido, y el total de sólidos en suspensión se reduzca al menos en un 50%.

Tratamiento secundario: Proceso que incluye un tratamiento biológico con sedimentación secundaria, en el que se alcanzan determinados parámetros mínimos de calidad: La DBO5 a 20° C (sin nitrificación) debe reducirse, al menos, entre un 70 y un 90 %. La DQO debe aminorarse más del 75%. Los sólidos en suspensión deben reducirse entre el 70 y el 90%.

Tratamiento suelo-acuífero: Aplicación controlada de agua residual sobre la superficie del terreno con el fin de alcanzar un determinado grado de depuración mediante el concurso de procesos físicos, químicos y biológicos al atravesar el agua la matriz del suelo, las raíces y la zona no saturada.

Zona no saturada: Zona situada entre la superficie del agua (zona saturada) y la superficie del terreno, en la cual una parte de la porosidad del terreno se encuentra rellena de agua y otra parte de aire. También se le denomina zona vadosa o zona de aireación.

Zona saturada: Es la parte de la corteza terrestre cuyos poros y cavidades se encuentran llenos de agua con una presión superior a la atmosférica.

Zona vadosa: ver "Zona no saturada".

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

-  Ahmad R., Katou H., and Kookana R.S. (2005) Measuring Sorption of Hydrophilic Organic Compounds in Soils by an Unsaturated Transient Flow Method; *J. Environmental Quality*, 34, 1045-1054.
-  Al -Subu M. M., Haddad M., Mizyed N. and Mizyed I. (2003) Impacts of irrigation with water containing heavy metals on soil and groundwater- a simulation study; *Water, Air and soil Pollution*, 146 (1-4), 141-152.
-  Álvarez B. D. Contreras R. S. M. y Poggi V. H. M. (2002) Sistemas de tratamiento de aguas residuales por aplicación al suelo; *Avance y Perspectiva*, 21, 333-340.
-  Antón D. y Díaz C (2000) Sequía en un Mundo de Agua. Ed. Piriguazu. Ciudad de México, México, 2000
-  Anzaldo Lara J. M. (1995) Evaluación de la Recarga Inducida por Irrigación con Aguas Residuales en el Valle del Mezquital; Hidalgo. Tesis Licenciatura (Ingeniero Civil), FES Acatlán, UNAM. Clasificación 001-21121-AS-1995-1.
-  Bouwer H., Fox P. y Westerhoff P. (1998) Irrigating with treated effluent: How does this practice affect underlying ground water?; *Water Environment and Technology*, 10 (9), 115-118.
-  Bouwer H., Fox P., Westerhoff P. y Drewes J. E. (1999) Integrating Water Management and Reuse: Causes For Concern; *Water Quality Internacional*, 1, 19-22.
-  Buckman H. O. y Brandy N. C. (1994) Naturaleza y Propiedades de los Suelos. Ed. UTEHA. México.
-  Cadogan D. y Howick C. (1996) Plasticizers. In: Kroschwitz J, Howe-Grant M, eds. Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. New York: John Wiley & Sons Inc., 258-290.
-  Castillo A. E., Delfino M., Subovsky M. J., Rodríguez S. C., Fernández N. y Rojas J. (2003) Movilidad de Carbofuran (2,3-dihidro-2,2-dimetilbenzofuran-7-metilcarbamato) en columnas de suelo; XIV Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas, Facultad de Ciencias Agrarias.
-  Castillo Araujo Celia (1997) Estudio de la Calidad del Agua Superficial del Valle del Mezquital, Hidalgo; en el periodo 1980-1995. Tesis Licenciatura (Ingeniero Civil), Facultad de Ingeniería, UNAM. Clasificación 001-01121-CA-1997.
-  Castillo G., Pía M. M., Dibarrart F., Honeyman G., Moreno F. y Vallejos J. (2000) Tratamiento de aguas residuales mediante sistema Suelo-Acuífero, Aspectos Microbiológicos. Presentado en XXVII Congreso de AIDIS-Interamericana, 3 y 8 de Diciembre en Porto Alegre, Brasil.
-  CEPIS (2002) Estudio complementario del caso Mezquital, Estado de Hidalgo, México. Convenio IDRC - OPS/HEP/CEPIS.

-  Cha W., Choi H. and Kim j., Kim I. S. (2004) Evaluation of wastewater effluents for soil aquifer treatment in South Korea, *Water Science and Technology*, 50(2), 315-322.
-  Chávez L. C. (1996) Transporte y degradación de compuestos orgánicos halogenados (PCE y TCE) en columnas empacadas con suelo. Tesis Licenciatura (Biólogo), Facultad de Ciencias, UNAM. Clasificación 001-00322-C4-1996-2.
-  Cifuentes E., H. Blumenthal, G. Ruiz Palacios, S. Bennett, y A. Peasey (1994) Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El Valle del Mezquital, México; *Salud Pública México*, 36 (1), 3-9.
-  Clothier B. E. and Scotter D. R. (2002) Horizontal Absorption--The Bruce and Klute Experiment. pp. 884-888 In. J. H. Dane and G. C. Topp (ed.) *Methods of soil analysis. Part 4 SSSA*, Madison, WI.
-  CNA (2001) Programa Hidráulico 2002-2006; Comisión Nacional del Agua, México; ISBN 9688175021.
-  CNA (2003) Programa Hidráulico 2002-2006, Región XIII, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala; Comisión Nacional del Agua, México.
-  CNA (2004) Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, México, CNA; ISBN 968-817-601-X.
-  CNA (2004a) Información proporcionada por la Gerencia Estatal en Hidalgo de Distritos y Unidades de Riego; Mixquiahuala, Hidalgo.
-  CONAGUA (2004) El agua en el Valle de México, presente y futuro; Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Comisión Nacional del Agua.
-  CONAGUA (2005) Hacia una Estrategia de Manejo Sustentable del Agua en el Valle de México y su Zona Metropolitana. Gerencia Regional XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, CONAGUA ISBN: 968-817-741-5.
-  CONAGUA (2005a) Estadísticas del agua 2005 de la región XIII, Aguas del Valle de México y sistema Cutzamala; Subgerencia de planeación hidráulica, Comisión Nacional del Agua, ISBN 968-817-733-4.
-  Diario Oficial de la Federación (2002) Norma Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
-  Downs T.; Cifuentes E.; Eduard R.; and Suffett M. (2000) Effectiveness of natural treatment in a wastewater irrigation district of the Mexico City region: Asynoptic field survey; *Water Environment Research*, 72 (1), 4-21.
-  Drewes J. and Fox P. (1999) Behavior and Characterization of Residual Organic Compounds in Wastewater Used for Indirect Potable Reuse; *Water Science and Technology*, 40 (4-5), 391-398.
-  Dudal Y., Samson R. and Deschênes L. (2003) Rate of Contaminant Bioavailability in Artificial Soil-Water Column Experiments; *Soil and Sediment Contamination*, 12 (6), 835-850.
-  García I. y Dorronsoro C. (2004) Contaminación del suelo. Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Granada. España.

-  G. E. H. (2002) Ordenamiento Ecológico Territorial, Región Tula - Tepeji; Periódico Oficial del Estado de Hidalgo, No. 24, 10 de junio, Gobierno del Estado de Hidalgo. http://www.semarnat.gob.mx/dgpairs/oe/tula_tepeji.shtml.
-  Guerrero Mothelet Verónica (2006) Agua el Recurso más valioso; *¿Cómo ves?*, 8 (88), 10-15.
-  Guo J., Zhu G., Shi J. and Sun J. (2003) Adsorption, adsorption and mobility of fomesafen in chine soils; *Water, Air and Soil Pollution*, 148 (1-4), 77-85.
-  Howard P.H. y Meylan W.M. (1997) Handbook of physical properties of organic chemicals. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
-  HSDB (1990) Hazardous Substances Data Bank
-  Iniestra G. S. M. y Velásquez. M. A. (1998) Estudio del comportamiento de hidrocarburos en suelos de tipo andosol en columnas empacadas a nivel de laboratorio. Tesis mancomunada Licenciatura (Químico), Facultad de Química, UNAM. Clasificación, 001-00521-I1-1999-3
-  INSP (1995) Evaluación de los riesgos para la Salud en las zonas de influencia del proyecto de Saneamiento Hidráulico del Valle de México.
-  Jackson, M. L. (1964) Análisis químico de suelos; Ediciones Omega S. A. Barcelona. España.
-  Jansons J., Edwonds L. W., Speight B. and Bucens M. R. (1989) Movement of viruses after artificial recharge; *Water Research*, 23 (3), 293-299.
-  Jiménez C. B. E., López N. y Sotomayor C. (1997) Estudio de la calidad y suministro del agua para consumo doméstico en el Valle del Mezquital. Informe final. Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 5322 elaborado para la Comisión Nacional del Agua.
-  Jiménez C. B. E., Cruickshank C., Chávez A., Palma A., Pérez R. y Jiménez R. (1999) Estudio de la factibilidad del empleo del agua del acuífero del Valle del Mezquital para suministro del Valle de México. Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 8384 elaborado para la Comisión Nacional del Agua.
-  Jiménez C. B. E., Chávez A., Barrios E. and Pérez R. (2000) Impact and Potential of Reused Water in the Mezquital Valley. *Water 21 IWA*, 34-36, Reino Unido.
-  Jiménez C. B. E. y Chávez M. A. (2003) Evaluación de la calidad y uso potencial de un acuífero recargado con aguas negras en el "Mezquital". *Treatment and Reuse*, UNAM, Mexico City, D.F.
-  Jiménez C. B. E., Capella S. y Chávez M. A. (2003) Recarga del acuífero del mezquital por el rehúso masivo de aguas residuales en riego agrícola.
-  Jiménez C. B. E. y Chávez M. A. (2003 a) Quality assessment a potential use of an aquifer recharged with wastewater: "El Mezquital case" 4th International Symposium on Wastewater reclamation and reuse. IWA. FEMISCA, II-UNAM, GDF. Nov 12-14, 2003 Mexico City.

-  Jiménez C. B. E., Siebe G. Ch. y Cifuentes G. E. (2004) El reuso intencional y no intencional del agua en el Valle de Tula. en Blanca Jiménez y Luís Marín (Ed.), *El Agua en México Vista desde la Academia*, ISBN 968-7428-22-8, Ciudad de México, México, Academia Mexicana de Ciencias, 33-55.
-  Jin Y., Chu Y. and Li Y. (2000) Virus removal and transport in saturated and unsaturated sand columns; *Journal Contaminant Hydrology*, 43 (2), 111-128.
-  Juárez B. E. y Rico R. A. (2003) *Mecánica de suelos*, Tomo I, Ed. Limusa.
-  Kanarek A., Aharoni A. and Michail M. (1993) Municipal wastewater reuse via soil aquifer treatment for non-potable purposes; *Water Science and Technology*, 27 (7-8), 53-61.
-  Karaca S., Gürses S. and Bayrak R. (2005) Investigation of applicability of the various adsorption models of methylene blue adsorption onto lignite/water interface; *Energy Conversion and Management*, 46, 33-46.
-  Kim J-W., Kim J., Choi H. and Schwartz F.W. (2003) Modeling fate and transport of organic and nitrogen species in soil aquifer treatment process; *Water Science and Technology*, 50 (2), 255-261.
-  Kopchynski T., Fox P., Alsmadi B. and Berner M. (1996) The effects of soil type and effluent pre-treatment on soil aquifer treatment; *Water Science and Technology*, 34 (11), 235-242.
-  Lance J. C., Rice R. C., and Gilbert R. G. (1980) Renovation of wastewater by soil columns flooded with primary effluent; *J. Water Pollution Control Federation*, 52 (2), 381-388.
-  Laplanche Alain (2003) *Ozonation and adsorption processes for the Treatment of Water and Wastewater*, Curso Octubre 2003, Posgrado UNAM
-  Lee J., Hundal L.S., Horton R., y Thompson M.L. (2002) Sorption and Transport Behavior of Naphthalene in an Aggregated Soil; *Vadose Zone Processes and Chemical Transport*; *J. Environmental Quality*, 31, 1716-1721.
-  Lee S. Y., Lee J. L., Choi H. and Kim K. W. (2004) Sorption behaviors of heavy metals in SAT (soil aquifer treatment) system; *Water Science and Technology*, 50 (2), 263-268.
-  Leyder F y Boulanger P. (1983) Ultraviolet absorption, aqueous solubility, and octanol-water partition for several phthalates; *Bull Environmental Contamination Toxicology*, 30, 152-157.
-  Li F., Yuasa A., Ebie K., Azuma Y., Hagishita T. and Matsui Y. (2002) Factors affecting the adsorption capacity of dissolved organic matter onto activated carbon: modified isotherm analysis; *Water Research*, 36 (18), 4592-4604.
-  Lindroos A. J., Kitunen V., Derome J. and Helmisaari H-S. (2002) Changes in dissolved organic carbon during artificial recharge of groundwater in forest esker in Southern Finland; *Water Research*, 36 (20), 4951-4958.

-  Logan B. and Kim K. (2005) Microbial treatment of perchlorate contaminated ground waters; Proceedings of the National Groundwater National Ground Water Association Southwest focused ground water conference, Anaheim, CA. June 3-4, pp.87-90.
-  Mabrouki K. El, Rodríguez Maroto J. M. y Cruz San Julián J. J. (1999) Estudio de la movilidad del fosfato a través del suelo: experiencias en discontinuo (batch) y en columnas. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Eds. R. Muñoz-Carpena, ISBN 84-699-1258-5, 95-100.
-  Mansell J., Drewes J. E. and Rauch T. (2004) Removal mechanisms of endocrine disrupting compounds (steroids) during soil aquifer treatment; *Water Science and Technology*, 50 (2), 229-237.
-  Mendoza M., H. 1981. Land Treatment: A viable solution for management of wastewater in the Metropolitan Area of the Valley of Mexico. In: Municipal Wastewater in Agriculture. Academic Press, NY, editado por Frank M D'Itri; ISBN 0122148800.
-  Metcalf & Eddy (1996) Ingeniería de aguas residuales. Vol. 2. Tratamiento de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw Hill, México; ISBN 9701010043.
-  Montgomery B. J., Drewes J. E., Fox P. and Reinhard M. (2003) Behavior of alkylphenol polythoxylate metabolites during soil aquifer treatment; *Water Research*, 37 (15), 3672-3681.
-  Moreno M. L., Fernández J. M^a A., Rubio C. J. C., Calaforra C. J. M., López G. J. A., Beas T. J., Alcaín M. G., Murillo D. J. M. y Gómez L. J. A. (2003) La Depuración de Aguas Residuales Urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno. Instituto Geológico y Minero de España; Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas N^o 4; ISBN 8478404643.
-  Moreno M. L., Gómez L. J. A., Murillo D. J. M., Rubio C. J. C. (2003) Depuración de aguas residuales urbanas mediante infiltración directa sobre el terreno. Instituto Geológico y Minero de España.
-  Muñoz Iniestra D. J. (1999) Estudio cartográfico y morfológico de los suelos de la porción Sur del Valle de Mezquital. Tesis Maestría (Biólogo), Facultad de Ciencias, UNAM. Clasificación 001-00361-M2-1999-1.
-  Murillo, Torres R. (inédito) Modelación de la capacidad del suelo para adsorber contaminantes orgánicos específicos del agua residual utilizada para riego en el Valle de Tula, Hidalgo. Tesis doctoral en proceso.
-  NCSWS (2001) Investigation on Soil-Aquifer Treatment for Sustainable water reuse, National Center for Sustainable Water Supply.
-  Nema P., Ojha C., Kumar A. and Khanna P. (2001) Techno-economic evaluation of soil- aquifer treatment using primary effluent at Ahmedabad, India; *Water Research*, 35 (9), 2179-2190.

- OMS, Chilton P. J., Morris B. L., Foster S. S. D., GSD y BGS (1996) Los recursos Hídricos subterráneos y la disposición de aguas residuales urbanas - interacciones positivas y negativas. Seminario asociado con el VII Curso Internacional OMS-PNUMA-GEMS/OPS-CEPIS/ODA-BGS; Querétaro - México; 6 de marzo 1996.
- Oron Gideon (1996) Soil as a complementary treatment component for simultaneous wastewater disposal and reuse; *Water Science and Technology*, 34 (11), 243-252.
- Palacio P. J. L. y Siebe G. Ch. (1994) Variabilidad y distribución espaciales de algunos parámetros físicos y químicos del suelo en el distrito de riego 03, estado de Hidalgo, México; parte 2, cartografía; *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11 (1), 68-78.
- PAOT (2004), Informe anual 2003, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento territorial del D. F.
- Powelson D. K. and Gerba C. P. (1994) Virus removal from sewage effluents during saturated and unsaturated flow through soil columns; *Water Research*, 28 (10), 2175-2181.
- Quanrud D. M., Arnold R. G., Wilson L. G. and Conklin M. H. (1996a) Effect of soil type on water quality improvement during soil aquifer treatment; *Water Science and Technology*, 33 (10-11), 419-431.
- Quanrud D. M., Arnold R. G., Wilson L. G., Gordon H., Graham D. and Amy G. L. (1996) Fate of Organics during column studies of soil aquifer treatment; *J. Environmental Engineering*, 122 (4), 314-321.
- Quanrud D. M., Hafer J., Karpiscak M. M., Zhang J., Lansey K. E. and Arnold R. G. (2003) Fate of organics during soil-aquifer Treatment: sustainability of removals the field; *Water Research*, 37 (14), 3401-3411.
- Rauch T. and Drewes J. E. (2004) Assessing the removal potential of soil-aquifer treatment systems for bulk organic matter; *Water Science and Technology*, 50 (2), 245-253.
- Rice R.C. (1974) Soil clogging during infiltration of secondary effluent; *J. Water Pollution Control Federation*, 46 (4), 708-716.
- Rice R.C. and Bouwer H. (1984) Soil-aquifer treatment using primary effluent; *J. Water Pollution Control Federation*, 56 (1), 84-88.
- Romero H. WHO/UNEP (1997) Case study VII - The Mezquital Valley, Mexico. Water Pollution Control; A guide to reuse of water quality management principles; editado por Richard Helmer and Ivanildo Hespagnol; ISBN-0419229108
- Rovirosa M. N. F. (1999) Tratamiento de aguas residuales en zonas costeras mediante infiltración rápida en arenas, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Colombia.
- RTECS (2000) Registry of Toxic Effects of Chemical Substances
- Rüetschi D. (2000). DOC- removal in recharge water by Soil - Aquifer- Treatment. *Groundwater Research*, Rosbjerg et al. (eds.) Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 133 3, 279-280.

-  Ruiz G., Blumenthal U., Peasey A. y Cifuentes E. (1997) Reuso de agua residual para riego agrícola y su impacto en la salud: es tiempo de revisar la norma NOM-001-ECOL-1996.
-  Schmitt D., Saravia F., Frimmel F.H. and Schuessler W. (2003) NOM-Facilities transport of metal ions in aquifer: importance of complex dissociation kinetics and colloid formation; *Water Research*, 37 (15), 3541-3550.
-  Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2002) Estadísticas ambientales.
-  Silva de la R. B. (1996) Hidrogeoquímica del Valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis Licenciatura (Ingeniero Civil), ENEP Acatlán, UNAM. Clasificación 001-21121-52-1996-3.
-  Sommers C. I. y Cram H. S. (2005) Suelos; Universidad Autónoma de México, <http://www.union.org.mx/guia/tesorosdelplaneta/Suelos.htm>
-  Sotomayor G. C. (1998) Estudio de la calidad y suministro del agua para consumo doméstico en el Distrito de Riego 003. IPN- ESIA
-  Staples C. A. Peterson D. y Parkerton T. F. (1997) The environmental fate of phthalate esters: A literature review; *Chemosphere*, 35 (4), 667-749.
-  UNAM (2003) El agua ¿Qué estamos haciendo con ella?, Edición especial; *¿Cómo ves?*, 5 (54).
-  Vallejos J., Espinosa C., Mena, P. M. y Moreno F. (2001) Bases de diseño para un sistema de tratamiento suelo - acuífero (SAT) Aplicación Caso Copiapo. Presentado en XIV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS - Chile.
-  Viswanathan M.N., Al Senafy M.N., Rashid T., Al-Awadi E. and Al-Fahad K. (2001) Improvement of Ternary Wastewater Quality by Soil Aquifer Treatment; *water Science and Technology*, 40 (7), 159-163.
-  Wild D. and Reinhard M. (1999) Biodegradation Residual of 4-Octylphenoxyacetic Acid in Laboratory Columns under Groundwater Recharge Conditions; *Environmental Science and Technology*, 33 (24), 4422-4426.
-  Wilson L., Amy L., Gerba C., Gordon H., Johnson B. and Miller J. (1995) Water Quality Changes during Soil aquifer Treatment of Tertiary effluent; *Water Environment Research*, 67 (3), 371- 376.
-  Yamaguchi T., Moldrup P., Rolston D. E., Ito S. and Teranishi S. (1996) Nitrification in porous media during rapid, unsaturated water flow; *Water Research*, 30 (3), 531-540.
-  Yarto Mario, Gavilán Arturo y Barrera Juan (2003) EL Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes y sus implicaciones para México; *Gaceta del Instituto Nacional de ecología de la SEMARNAT*, 69.
-  Ying G. G., Kookana R. S. and Dillon P. (2003) Sorption and degradation of selected endocrine disrupting chemicals in aquifer material; *Water Research*, 37 (15), 3785-3791.

Cuando te sientas triste

porque algo no salió como esperabas,

no te deprimas,

porque en ese instante Dios esta

pensando en algo mejor que darte.

¡Mantén viva la esperanza!