

**U N I V E R S I D A D D E L M A R**

**C A M P U S P U E R T O Á N G E L**



**“LAVADO DE SALES EN SUELOS AGRÍCOLAS  
DE LA BARRA DE COLOTEPEC, OAXACA,  
CON AGUA RESIDUAL MUNICIPAL TRATADA”**

**T E S I S**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES  
CON ÁREA DE CONCENTRACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Presenta:

**Ricardo Antonio Hernández Viruel**

Director de Tesis:

**Dr. Carlos Estrada Vázquez**

Puerto Ángel, Pochutla, Oaxaca. Mayo de 2011

Agradezco el apoyo económico brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través de la beca No. 204875, para realizar los estudios de Maestría en Ciencias Ambientales con Área de Concentración en Ingeniería Ambiental, en la Universidad del Mar, *campus* Puerto Ángel.

## DEDICATORIAS

A mis padres:

**Ángel Sixto y Angelina,**

Por su ejemplo de superación y ese valioso apoyo que siempre me han dado, a sus sabios consejos y enseñanzas; y por ser esa piedra angular sobre la cual están cimentados los principios que nos han inculcado a todos sus hijos, el respeto, el trabajo, la responsabilidad, el amor, gracias Dios Mío, por haberme permitido crecer al lado de seres tan maravillosos como lo son ellos, no tengo palabras para agradecerles todo su apoyo incondicional que me impulso para culminar este proyecto emprendido.

¡Madrecita de mi vida, te agradezco de todo corazón esa fortaleza y ganas de vivir que nos inyectas en todo momento, te quiero mucho!

A mis hermanos:

**Verónica, Ángel César y Georgina**

Por esa unión que nos mantiene como una familia sólida, siempre estando al pendiente de mis pasos, teniendo el corazón en la mano para brindarlo cuando fuese necesario, agradezco de todo corazón sus buenos deseos y palabras de alientos que me brindaron para la finalizar mis metas.

Este trabajo lo dedico de manera muy especial a tres seres queridos que representan todo en mi vida, con los cuales aprendo todos los días el verdadero significado de la vida, y que me brindan a diario todo su apoyo, cariño y afecto sincero:

### ***Mi familia***

Primeramente a la fuente de inspiración que tengo en la vida, a mi compañera fiel e incondicional que ha caminado a mi lado desde el inicio de este trabajo, dándome la fuerza que necesite para no claudicar en los momentos difíciles de este largo pero reconfortante proceso, a ti querida y amada esposa ***Denise***, dedico este trabajo con todo mi cariño, porque solo tú sabes todas las que pasamos para sacar adelante este trabajo y sobre todo por darme esos dos grandes tesoros de mi vida: mis hijos.

¡Gracias gordita! Te Amo.

y

A mis adorados hijos ***Montserrat*** y ***Ricardo***, por prestarme todo ese tiempo que les pertenecía, dándome en todo momento sus tiernas sonrisas y muestras de cariño sincero, lo cual fue un elixir fortalecedor que me impulsó siempre a seguir adelante y no bajar los brazos jamás.

¡Gracias, mi nena hermosa y a ti Ricardito por ser un torbellino inspirador!

Un sincero agradecimiento a la Universidad del Mar, Institución de enorme calidad, la cual me brindo todo el apoyo durante mi estancia en el posgrado.

A mis profesores del posgrado de la Universidad del Mar, los cuales compartieron sus conocimientos y experiencias profesionales, siendo fuente inspiradora para realizar este trabajo con el mayor grado de profesionalismo y responsabilidad, y que espero represente un granito de arena al conocimiento científico de las nuevas generaciones.

A mi director de Tesis, el Dr. Carlos Estrada Vázquez, por depositar la confianza en mí para llevar a cabo el proyecto, brindándome todo su apoyo y sobre todo por la paciencia que tuvo para esperar que la investigación llegara a su fin.

A mi Co-director de Tesis, el Dr. Edgar Iván Sánchez Bernal, por la oportunidad que me brindo al trabajar de manera profesional a su lado, brindándome todo su apoyo incondicional y experiencia profesional, además del conocimiento invaluable aportado al trabajo de investigación.

Al Dr. Eustacio Ramírez Fuentes, por su valiosa contribución en la revisión del documento final, por su tiempo que dedico a pesar de las actividades que lo ocupan.

A la Profra. Geol. Gelia Sandoval Orozco, persona sincera y de grande valores, por sus enseñanzas, sugerencias y apoyo brindados para seguir adelante en los momentos difíciles del trabajo.

A los Drs. Mario Poggi Varaldo y Manuel Ortega Escobar, por el tiempo que brindaron para la revisión del trabajo, aportando los conocimientos de su vasta experiencia, a pesar de sus múltiples actividades.

A mis amigos y compañeros de la generación, por todos esos momentos buenos y malos que compartimos juntos, recuerdos imborrables que quedaran en nuestra memoria.

A todas las personas que en algún momento del proceso experimental me brindaron su apoyo trabajando conjuntamente para realizar los objetivos de la tesis que presento.

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>I. ANTECEDENTES</b> .....	<b>6</b>
<i>I.1 Los Suelos Salinos en el Planeta Tierra</i> .....	7
<i>I.2 Origen y causa de la salinidad en los suelos</i> .....	8
<i>I.3 Los Suelos Salinos en México</i> .....	9
<i>I.4 Clasificación de los Suelos Salinos, Sódicos y Salinos-Sódicos</i> .....	11
<i>I.4 Las Aguas Residuales Municipales y su Tratamiento</i> .....	13
<i>I.5 Área de estudio</i> .....	16
<b>II. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>20</b>
<b>III.- HIPÓTESIS</b> .....	<b>21</b>
<b>IV. OBJETIVOS</b> .....	<b>22</b>
<b>V. METODOLOGÍA</b> .....	<b>23</b>
<i>V.1 Plan de Trabajo</i> .....	23
<i>V.2 Diseños Experimentales</i> .....	23
V.2.1 Diseño experimental Fase 1 .....	23
V.2.2 Diseño experimental Fase 2 .....	27
V.2.3 Diseño experimental Fase 3 .....	29
<b>VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>37</b>
<i>VI.1 Seguimiento del reactor biológico operando en lote secuencial</i> .....	37
<i>VI.2 Caracterización de los efluentes para los ensayos de lavado</i> .....	41
<i>VI.3 Caracterización físico-química de los suelos de estudio</i> .....	45
VI.3.1 Propiedades físicas .....	45
VI.3.2 Propiedades químicas .....	46
<i>VI.4 Ensayos del proceso de lixiviación, en condiciones controladas</i> .....	47
VI.4.1 Condiciones de operación de las columnas .....	47
VI.4.1.1 Temperatura .....	47
VI.4.1.2 Pérdidas por evaporación .....	48
VI.4.2 Análisis físico-químicos de los efluentes de lavado .....	49
VI.4.2.1 Composición química de los efluentes obtenidos en el curso de lixiviación con agua residual tratada .....	49
VI.4.2.2 Composición química de los efluentes obtenidos en el curso de lixiviación con agua de pozo .....	52

VI.4.2.3 Composición química de los efluentes obtenidos en el curso de lixiviación con mezcla 1:1, agua residual tratada - agua de pozo.....	54
VI.4.2.4 Composición química de los efluentes obtenidos en el curso de lixiviación con agua destilada (Control).....	56
VI.4.3 Salinidad residual de los suelos lixiviados.....	58
VI.4.3.1 Contenido de Sales.....	58
VI.4.3.1.1 Salinidad residual promedio de las columnas de suelo, sometidas a lavado con agua residual tratada.....	58
VI.4.3.1.2 Salinidad residual promedio de las columnas de suelo, sometidas a lavado con agua de pozo.....	59
VI.4.3.1.3 Salinidad residual promedio de las columnas de suelo, sometidas a lavado con Mezcla 1:1, agua residual tratada - agua de pozo.....	60
VI.4.3.1.4 Salinidad residual promedio de las columnas de suelo, sometidas a lavado con agua destilada (control).....	60
VI.4.3.2 Cationes y Aniones de la solución del suelo después del proceso de lavado....	62
VI.4.3.2.1 Tratamiento con agua residual tratada.....	62
VI.4.3.2.2 Tratamiento con agua de pozo.....	63
VI.4.3.2.3 Tratamiento con mezcla 1:1, de agua residual tratada y agua de pozo. ...	64
VI.4.3.2.4 Agua destilada (control).....	64
VI.4.3.3 Gráficos de la dinámica del proceso de lixiviación.....	66
<b>VII. CONCLUSIONES.....</b>	<b>72</b>
<i>VII.1 Conclusiones Generales.....</i>	<i>72</i>
<b>VIII. PERSPECTIVAS.....</b>	<b>73</b>
<b>IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>74</b>
<b>X. ANEXOS.....</b>	<b>78</b>
<i>X.1 Metodologías para caracterizar las Aguas Residuales Tratadas y Agua de Pozo.....</i>	<i>78</i>
X.1.1. Aguas residuales.....	78
X.1.2 Agua de Pozo.....	81
<i>X.2 Metodología para caracterizar los suelos.....</i>	<i>83</i>
<i>X.3 Cálculos Estadísticos.....</i>	<i>89</i>

# **AGRADECIMIENTOS**

## **APOYOS INTERNOS**

### ***LABORATORIO DE AGUAS***

Dr. Rosario Enríquez Rosado

### ***LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN***

Dr. Marco Vinicio Ramírez Mares

### ***LABORATORIO DE MICROBIOLOGIA***

Q.B. Concepción Martínez Lievana

## **APOYOS EXTERNOS**

***AL PROMEP (No. OFICIO: PROMEP/103.5/07/2597)***

***COLEGIO DE POSGRADUADOS DE CHAPINGO, MÉXICO***

LABORATORIOS DE SUELOS DEL INSTITUTO DE EDAFOLOGÍA E HIDROCIENCIAS

Dr. Manuel Ortega Escobar

***EMPRESA HERBAL GARDEN DE MÉXICO, S.A. DE C.V.***

# COMITÉ TUTORIAL

## **DIRECTOR**

**Dr. Carlos Estrada Vázquez**

Profesor-Investigador

Instituto de Ecología, Universidad del Mar

Ciudad Universitaria, Km 1.5 carretera a Zipolite, Puerto Ángel, San Pedro Pochutla, Oaxaca, México. C.P. 70902

## **CO-DIRECTOR**

**Dr. Edgar Iván Sánchez Bernal**

Profesor-Investigador

Instituto de Ecología, Universidad del Mar

Cd. Universitaria, Carr. Vía Sola de Vega, Puerto Escondido, San Pedro Mixtepec, Juquila, Oax., México. C.P. 71980

## **ASESOR**

**Dr. Eustacio Ramírez Fuentes**

Profesor-Investigador

Instituto de Recursos (Biotecnología Ambiental), Universidad del Mar

Ciudad Universitaria, Km 1.5 carretera a Zipolite, Puerto Ángel, San Pedro Pochutla, Oaxaca, México. C.P. 70902

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Distribución Mundial de Áreas Afectadas por Sales.....	7
Tabla 2. Clasificación de los Suelos Salinos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.....	12
Tabla 3. Solubilidades en agua de algunas Sales a 20°C.....	13
Tabla 4. Metodología para la caracterización de las aguas residuales tratadas y de pozo.....	24
Tabla 5. Metodologías para la caracterización de los suelos de estudio.....	27
Tabla 6. Programa de análisis físico-químicos para el Reactor Biológico de Lodos Activados. ....	29
Tabla 7. Diseño experimental del proceso de lavado de sales en columnas de suelo de La Barra de Colotepec, Oaxaca.....	32
Tabla 8. Metodologías para la caracterización de los efluentes lixiviados. ....	35
Tabla 9. Metodologías para la caracterización de los suelos post lavados. ....	36
Tabla 10. Caracterización físico – química de las aguas para los tratamientos de lavado.....	41
Tabla 11. Contenido de la salinidad inicial ( $S_i$ ) del suelo muestreado, en la relación suelo-agua 1≈0.2-0.6 .....	46
Tabla 12. Cationes y Aniones Solubles en relación Suelo-Agua 1≈0.2-0.6. ....	46
Tabla 13. Contenido de sales extraídas ( $S_{ext}$ ) en la columna de lavado empleando agua residual tratada.....	50
Tabla 14. Cationes y aniones solubles, columna de lavado empleando agua residual tratada. ....	51
Tabla 15. Contenido de sales extraídas ( $S_{ext}$ ) en la columna de lavado empleando agua de pozo. ....	52
Tabla 16. Cationes y aniones solubles, columna de lavado empleando agua de pozo. ....	53
Tabla 17. Contenido de sales extraídas ( $S_{ext}$ ) en la columna de lavado empleando mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1. ....	54
Tabla 18. Cationes y aniones solubles, columna de lavado empleando mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1.....	55
Tabla 19. Contenido de sales extraídas ( $S_{ext}$ ) en la columna de lavado empleando agua destilada (control).....	56
Tabla 20. Cationes y aniones solubles, columna de lavado empleando agua destilada (control). ....	57
Tabla 21. Contenido de sales residuales ( $S_o$ ) en la columna de lavado empleando agua residual tratada.....	58
Tabla 22. Contenido de sales residuales ( $S_o$ ) en la columna de lavado tratada empleando agua de pozo.....	59
Tabla 23. Contenido de sales residuales ( $S_o$ ) en la columna de lavado empleando mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1. ....	60
Tabla 24. Contenido de sales residuales ( $S_o$ ) en la columna de lavado empleando agua destilada (control).....	61
Tabla 25. Cationes y aniones solubles, presentes en el suelo posterior al proceso de lavado con agua residual tratada.....	62
Tabla 26. Cationes y aniones solubles, presentes en el suelo posterior al proceso de lavado con agua de pozo.....	63
Tabla 27. Cationes y aniones solubles, presentes en el suelo posterior al proceso de lavado con mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1. ....	64
Tabla 28. Cationes y aniones solubles, presentes en el suelo posterior al proceso de lavado con agua destilada (control).....	65
Tabla 29. Parámetros estadísticos. ....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Distribución de Suelos Afectados por Sales en México.....	10
Figura 2. Zona de influencia del sitio de estudio con problemas de salinidad.....	11
Figura 3. Variación de la disponibilidad natural media per cápita del agua, de 1950 a 2005 (m <sup>3</sup> /hab/año).....	15
Figura 4. Panorámica satelital del Sitio de Estudio.....	17
Figura 5. Panorámica del predio muestreado.....	25
Figura 6. Monolito muestreado en el espesor 0-80 cm, hasta el nivel freático.....	25
Figura 7. Colecta de muestras.....	26
Figura 8. Secado de las muestras.....	26
Figura 9. Reactor biológico de lodos activados operado en lote secuencial.....	28
Figura 10. Proceso de sedimentación del reactor después de un tiempo de retención hidráulico de 45.6 h.....	28
Figura 11. Mesas de Lavado para el proceso de lixiviación de sales.....	29
Figura 12. Colocación de columnas sobre las mesas.....	30
Figura 13. Probetas tipo Mariotte instaladas sobre las columnas.....	31
Figura 14. Termómetro de Max-Min y Plato de evaporación.....	32
Figura 15. Colecta de muestras durante el proceso de lavado a cada 100 ml.....	34
Figura 16. Secado y almacenado de muestras de suelo posterior al proceso de lavado.....	34
Figura 17. Análisis a los extractos acuosos provenientes del lavado de suelos en columnas.....	35
Figura 18. Determinación de la salinidad a muestras de lavado por columnas.....	35
Figura 19. Determinación de la salinidad residual a las columnas posterior al proceso de lavado. .....	36
Figura 20. Demanda Química de Oxígeno, de los influentes (ARS_cruda) y efluentes (agua tratada) del reactor.....	37
Figura 21. Sólidos Suspendidos Totales y Volátiles en el licor mezclado del reactor.....	38
Figura 22. Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno en el reactor.....	39
Figura 23. Resultados del Índice Volumétrico de Lodos del reactor.....	40
Figura 24. Diagrama para la clasificación de las aguas de riego (Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1994).....	44
Figura 25. Curva de Lixiviación de la columna con agua residual tratada.....	68
Figura 26. Curva de Lixiviación de la columna con agua de pozo.....	68
Figura 27. Curva de Lixiviación de la columna con mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1.....	69
Figura 28. Curva de Lixiviación de la columna con agua destilada (control).....	69
Figura 29. Distribución de Sales solubles (S <sub>o</sub> ) en perfil, posterior al proceso de lavado en un volumen poroso $Q_a/Q_r=1$ .....	70
Figura 30. Determinación de DQO en muestras de agua del reactor.....	78
Figura 31. Determinación de Sólidos Suspendidos Totales y Volátiles.....	79
Figura 32. Determinación del Índice Volumétrico de Lodos (IVL).....	79
Figura 33. Análisis microbiológico al efluente tratado del reactor.....	80
Figura 34. Determinación de huevos de Helminto por el Método modificado de Bailenger.....	80
Figura 35. Vista de la cámara de Neubauer en el microscopio, examinado bajo lentes de 10x y 40x para el conteo de los huevos de helminto.....	80
Figura 36. Determinación de la clase textural del suelo por el Método del Hidrómetro de Bouyoucos.....	83

<i>Figura 37. Triangulo de Clases Texturales. (Honorato, 2000).</i> .....	83
<i>Figura 38. Determinación del Contenido de Humedad y porcentaje de saturación.</i> .....	84
<i>Figura 39. Determinación de la densidad aparente in situ.</i> .....	84
<i>Figura 40. Pasta de saturación para obtención de extractos acuosos.</i> .....	85
<i>Figura 41. Determinación de RSE y RSC.</i> .....	85
<i>Figura 42. Determinación de <math>Ca^{2+}</math> y <math>Mg^{2+}</math>.</i> .....	86
<i>Figura 43. Determinación de <math>Na^+</math> y <math>K^+</math>.</i> .....	86
<i>Figura 44. Determinación de <math>CO_3^{2-}</math> y <math>HCO_3^-</math>.</i> .....	87
<i>Figura 45. Determinación de <math>Cl^-</math>.</i> .....	87
<i>Figura 46. Determinación de <math>SO_4^{2-}</math>.</i> .....	87
<i>Figura 47. Medición de la C.E.</i> .....	88
<i>Figura 48. Medición del pH.</i> .....	88

## RESUMEN

La mayoría de los suelos afectados por sales en México están representados por suelos salinos, los efectos que producen las sales en los suelos dependen del tipo y la concentración, causando efectos tóxicos en cultivos y disponibilidad limitada del agua por el exceso de electrolitos disueltos en la solución del suelo, adicionalmente el efecto de ión Sodio causa deterioro en las propiedades físicas, pérdida de la estructura, pérdida de la permeabilidad y condiciones anaeróbicas edáficas.

Específicamente, los suelos de La Barra de Colotepec presentan procesos de acumulación primaria de sales y los derivados de la irrigación agrícola, originando altas concentraciones salinas, lo cual limita su producción agrícola en la zona comprendida por La Barra de Colotepec, estas concentraciones se presentan regularmente en el espesor 0-20 cm, produciendo efectos osmóticos que disminuyen la disponibilidad de agua para las plantas e inducen sequía fisiológica, pero además al interior del vegetal, producen alteraciones metabólicas, fisiológicas y necrosis de tejidos meristemáticos que conllevan la disminución del crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos.

Por lo tanto, el objetivo principal de la presente investigación fue determinar posibles cambios en la concentración salina de suelos de La Barra de Colotepec, Oaxaca, al lavarlos con aguas residuales municipales tratadas en un sistema de tratamiento biológico, como una opción para reutilizar este tipo de aguas que habitualmente no se emplean en la región, ya que en actualmente las fuentes principales de aguas de riego en la zona son los pozos noria o profundos, lo que ha originado sobre explotación de los acuíferos en la zona, con su consiguiente abatimiento, mineralización y acumulación de sales en los horizontes superiores del suelo, que limita el establecimiento de agro ecosistemas.

El trabajo experimental se dividió en 3 fases. La fase 1 consistió en caracterizar química y microbiológicamente las aguas que se emplearon en el proceso de lavado, también se determinaron las características físico-químicas del suelo materia de estudio y su contenido de salinidad inicial ( $S_i$ ). En la fase 2 se instaló y operó una planta piloto con un sistema biológico de lodos activados de la cual se obtuvo el efluente tratado. En la fase 3 se montaron las columnas de los perfiles de suelo, para los tres tratamientos de acuerdo al tipo de agua empleada (Tratamiento 1: Agua residual tratada, Tratamiento 2: agua de pozo y Tratamiento 3: mezcla de agua tratada/agua de pozo proporción 1:1), todos los tratamientos se realizaron con dos volúmenes porosos de lavado  $Q_a/Q_\pi = 0, 1$ ; se cuantificaron las sales removidas ( $S_{ext}$ ) de cada tratamiento, y la salinidad residual del suelo ( $S_o$ ).

La caracterización físico-química de las aguas empleadas en los tratamientos, indica que se trata de aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas, de pH alcalino; el agua tratada y la mezcla son salinas dada su conductividad eléctrica y concentración, por lo que son de uso restringido en la agricultura, en tanto que el agua de pozo es ligeramente salina considerándola aceptable para el riego.

Los suelos estudiados presentaron textura franco-limosa y tipogénesis salino-sódica ya que la concentración salina inicial ( $S_i$ ) en la solución del suelo del estrato superior (capa arable) fue de  $8.73 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , equivalentes a  $13.64 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  de Conductividad Eléctrica (C.E.), el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) fue  $> 15\%$  y el pH varió de 8.5 a 10, por lo que su reacción fue alcalina. Su densidad aparente ( $\delta$ ) fue en promedio  $1.67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Su contenido de humedad promedio de los perfiles fue de  $1.76 \%$  y su porcentaje de saturación de  $37.89\%$ .

Los resultados promedio de la planta piloto de lodos activados en un periodo de operación de 12 meses fueron:  $DQO_{\text{Influyente}} = 237.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $DQO_{\text{Efluente}} = 98.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , Porcentaje de Remoción ( $\eta_{DQO}$ )= 68.58%, Sólidos Suspendedos Totales (SST)=  $4,733 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV)=  $3,405 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , el Índice Volumétrico de Lodos (IVL) cuando el reactor operó de manera estable, fluctuó en el intervalo de 73.65 y 87.58  $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$  promediando un valor de operación de  $81.19 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ , en cuanto al análisis microbiológico el NMP/100  $\text{cm}^3$  fue de 100, este valor fue menor al límite permisible señalado en la NOM-003-SEMARNAT-1997; la temperatura del licor mezclado osciló de 28 a 32° C y el pH estuvo en el intervalo 6.5 a 7.5. El análisis para determinar huevos de helminto dio como resultado nula existencia de parásitos u organismos de este tipo en las aguas tratadas por el reactor biológico de lodos activados.

El proceso de lavado de los suelos salinos-sódicos de La Barra de Colotepec, presentó resultados favorables, ya que en los tres tratamientos de lavado ocurrió un desplazamiento de electrolitos a través del perfil del suelo, del espesor superior 0-30, cm obteniéndose un 60% de sales removidas respecto de su concentración inicial (91.828 ton por hectárea), lo que produjo una disminución de la concentración iónica en los estratos superiores y su acumulación en los inferiores, con base en el análisis estadístico se determinó que el tratamiento experimental con agua de pozo con un volumen activo de lavado  $Q_a/Q_\pi = 1$  fue significativamente superior al resto de los tratamientos. No obstante, sin soslayar los demás resultados, el tratamiento donde se utilizó agua residual tratada, también presentó un efecto evacuador de sales importante en el perfil de suelo.

Por lo tanto, se concluye que es factible someter estos suelos afectados por sales y por sodio, a tratamientos de lavado aplicándoles láminas de una mezcla de agua de pozo y agua residual tratada con un volumen de lavado de  $Q_a = 54.82 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ , ya que aunque el efecto lixivador de este último es relativamente menor que utilizando agua de pozo, su efecto es aceptable, además se debe considerar que con esta mezcla hay un aporte de materia orgánica al suelo, que proporciona nutrientes. En síntesis, este método hídrico se constituye en una alternativa para mejorar los suelos salinos e incorporarlos a la agricultura.

## INTRODUCCIÓN

La salinidad de los suelos agrícolas es el principal factor que limita la producción agrícola en los valles irrigados del planeta, pero también en las cuencas endorreicas y exorreicas con disponibilidad de agua para riego. En general, los suelos afectados por sales ocupan un 10% de la superficie terrestre, se distribuyen en todos los continentes y se presentan con más frecuencia en zonas áridas y semiáridas donde la evaporación excede a la precipitación pluvial, pero también pueden tener lugar en climas cálidos sub-húmedos.

En México la mayoría de los suelos afectados por sales están representados por suelos salinos, que según *Szabolcs, I. 1986*, ocupan una superficie del 10%, los efectos que llegan a producir las sales en los suelos dependen del tipo de iones constitutivos que son resultado de procesos intempéricos, de su comportamiento químico (coeficiente de solubilidad, coeficiente energético iónico, valencia, radio de hidratación) que a su vez determinan su capacidad de migración en el suelo y de movilidad dentro de la planta, de su concentración y de la tolerancia de las plantas al estrés salino. En el suelo las sales producen efectos osmóticos que disminuyen la disponibilidad de agua para las plantas e inducen sequía fisiológica, pero además al interior del vegetal, inducen alteraciones metabólicas, fisiológicas y necrosis de tejidos meristemáticos que conllevan la disminución del crecimiento y desarrollo de los cultivos.

El correcto uso y manejo de los suelos afectados por sales y su recuperación, son de gran importancia para la producción agrícola, el entendimiento de los procesos de acumulación de sales, debe considerar aspectos tales como su origen, propiedades físicas como la textura, estructura, permeabilidad, conductividad hidráulica y drenaje interno, manejo y utilización, así como las fuentes y calidad del agua de riego, factores que en conjunto determinan el comportamiento físico-químico de los suelos (*Richards, L.A., et-al. 1982*).

La salinización secundaria de los suelos, entendida como procesos de acumulación de sales no imputables a fenómenos naturales, sino a las actividades antrópicas en el sector productivo primario, tales como el riego con aguas de excesiva concentración salina, el riego con aguas residuales urbanas, el aprovechamiento intensivo de pastizales y la deforestación, es susceptible de revertirse en el mediano plazo mediante métodos hidroquímicos, tales como el lavado de sales y la aplicación de mejoradores inorgánicos y orgánicos del suelo.

Diversas investigaciones en la materia, como las realizadas por *Sánchez-Bernal, E.I. 1994*, indican que dichos métodos son adecuados para desplazar sales del suelo y acondicionarlos para el establecimiento de agro ecosistemas.

Con el desarrollo de la Ciencia del Suelo, han surgido métodos y técnicas para desplazar sales del suelo y generar condiciones adecuadas para su mejoramiento y rehabilitación, por ejemplo, el empleo de agua dulce para lavar las sales de los suelos salinos a manera de riego, ha sido una opción para su recuperación, sin embargo, en la actualidad la escasez de agua es una limitante, dada la creciente demanda que provoca la sobreexplotación de las fuentes de aprovisionamiento hídrico, impidiendo la recuperación en los periodos de recarga y, con ello el agotamiento del recurso agua.

En los últimos años, se han presentado alternativas para evitar el uso indiscriminado de aguas de pozo en procesos de lavado, una de ellas es la utilización de aguas residuales urbanas, con lo cual se garantiza el uso de adecuados volúmenes activos de lixiviación; en

México este procedimiento es común en el Distrito de Riego del Valle de Mezquital, Hidalgo, donde se riegan más de 180,000 hectáreas con aguas residuales para producir cereales y hortalizas destinadas al consumo de los habitantes de la Ciudad de México y áreas conurbadas.

Como una alternativa más para la recuperación, el mejoramiento y rehabilitación de los suelos salinos de que se trata, la investigación de mérito, propone utilizar el método de lavado de sales empleando agua residual tratada para el lavado de los suelos, con el objeto de evitar una contaminación mayor de los mismos al lavarlos con agua con mayores concentraciones de detritos, optimizar el recurso hídrico a través de su reutilización y evitar en gran medida la sobreexplotación de acuíferos existentes en la zona de estudio, que también son causa principal del problema de la salinización de los suelos. En consecuencia, los objetivos del presente trabajo de investigación son: a) Evaluar el curso de lixiviación de sales en suelos salinos de La Barra de Colotepec, Oaxaca, utilizando aguas de diversa concentración electrolítica y composición cualitativa. b) Determinar los niveles de salinidad inicial y salinidad residual de los suelos, en función de los distintos tipos de agua de lavado utilizados, y c) Inferir mediante análisis estadístico que tratamiento de los utilizados fue más significativo, en la evacuación de sales.

Por lo anterior, se evaluaron las variaciones en la concentración salina de los suelos salinos-sódicos de La Barra de Colotepec, Oaxaca, al someterlos a un proceso de lavado en columnas de suelos con concentraciones de sales promedio de  $13.64 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , equivalentes a  $8.73 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , mediante tratamientos con cuatro tipos de agua, como son: agua de un pozo noria el cual se utiliza para riego agrícola, agua residual tratada a través de un reactor biológico de lodos activados, una mezcla de las dos primeras en proporción 1:1 y agua destilada, esta última se designó como el control de la prueba; el propósito del trabajo fue comparar los resultados para conocer la eficiencia de remoción de sales de cada uno de los efluentes de lavado empleado. Así también, los cambios que presentaron con base en sus propiedades físico-químicas, midiéndose parámetros como: pH, temperatura, conductividad eléctrica, cationes y aniones solubles.

### **Evaluación de las reservas de sales en los suelos salinos materia de estudio, sometidos a lixiviación.**

En un proceso de lavado de sales en suelos salinos, es de primera importancia determinar la reserva de sales iniciales ( $S_i$ ), así como la reserva de sales residuales ( $S_o$ ), estas últimas se refieren a la cantidad de sales que quedan en el perfil de suelo después de la lixiviación; ambos parámetros determinan la magnitud de la norma de lavado en metros cúbicos ( $\text{m}^3$ ) por hectárea (ha) o lámina de lavado en metros (m) requerida para desplazar una cierta cantidad de sales de un espesor de suelo analizado.

La evaluación de la reserva de sales en suelos, requiere la obtención previa de extractos acuosos a partir de una serie de relaciones extractoras suelo-agua, entre las más utilizadas están las siguientes:  $1\approx 0.2-0.6$ , 1:1, 1:5, 1:10... 1:n; la elección de una determina extracción depende en lo fundamental del tipo de experimentación e investigación que se desee realizar. En relación con lo anterior investigadores como *Richards, L.A., et-al. 1982* y *Panin, P. S. 1968*, señalan que las relaciones suelo-agua más apropiadas para analizar un proceso de lavado son la relación  $1\approx 0.2-0.6$  y la relación 1:5; en el caso de esta última, *Gedroitz, K. K. 1955*, indica que si la pasta de saturación se somete a un tiempo de agitación de 3 minutos, se logra que pasen al extracto todas las sales fácilmente solubles, por lo que se

considera una relación ideal en experimentos de lavado de suelos salinos. Así mismo mediante dichos extractos es posible determinar no sólo las sales de fácil solubilidad, sino también las de mediana y poca solubilidad; de esta manera en condiciones experimentales se han logrado determinar las concentraciones de un conjunto de iones constitutivos de la solución del suelo como son los cationes solubles:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y los aniones  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HSiO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ , en extractos acuosos con pH de 8 a 10 y cationes como el  $\text{Fe}^{++3}$ ,  $\text{Al}^{+3}$ , y  $\text{NH}_4^+$ , así como aniones  $\text{NO}_3^-$  y nitrato sustancias orgánicas e iones solubles de micro elementos en extractos acuosos con pH de 5 a 10.

En general las sales solubles que se obtienen en los extractos acuosos se expresan en porcentaje de sólidos extraídos por 100 gramos de suelo (P/P).

En síntesis, la obtención de extractos acuosos es un método fundamental de la investigación de los suelos salinos, que permite determinar cuantitativa y cualitativamente los contenidos y tipos de sales de la solución edáfica; así mismo el análisis de dichos extractos permite monitorear la dinámica de los procesos salinos, estudiar el nivel de fertilidad del suelo, determinar la presencia de compuestos tóxicos para las plantas y la solución de otros problemas prácticos que inciden en el crecimiento y desarrollo de los organismos vegetales cultivados por el hombre.

Así mismo, es importante indicar el comportamiento de la extracción de sales en función de la relación suelo-agua empleada y evaluada por *Gedroitz, K. K. 1955*, para los residuos secos evaporado y calcinado, quien llegó a conocer que a medida que se incrementa la relación de extracción, mayores son los contenidos de salinidad obtenidos.

En relación con el tema que nos ocupa, investigadores como *González, 1982*, indican que el uso de relaciones suelo-agua en un proceso de lixiviación en el que se determinan sales iniciales, sales extraídas y salinidad residual, han demostrado que la cantidad de sales extraídas ( $S_{\text{ext}}$ ) se refiere a la reserva de sales iniciales determinadas en la relación suelo-agua  $1 \approx 0.2-0.6$  equivalente al extracto de saturación, la relación  $S_{\text{ext}}/S_i$  en el tiempo llega a adquirir valores negativos, lo que indica una sub evaluación de la reserva de sales iniciales ya que aparentemente se están extrayendo sales que en la realidad no existen en el suelo, por ello esta relación de extracción impone una limitante a la evaluación de sales en el proceso de lavado.

Por otra parte las relaciones suelo-agua 1:10, 1:20, etcétera pueden llegar a sobre-evaluar la cantidad de sales presentes en un perfil de suelo, lo que representa una limitante para la evaluación real de salinidad en los suelos, de tal manera que resulta pertinente señalar algunas desventajas del uso o de la utilización de extractos acuosos:

- a) La sobre saturación de agua de una muestra de suelo, origina que considerables cantidades de sales poco solubles, como el sulfato de calcio y el carbonato de calcio sean disueltas.
- b) Cuando se ha diluido la solución del suelo y se cambia la relación de extracción de sales solubles, la relación de iones intercambiables se modifica.
- c) En función de lo anterior, la cantidad de sales presentes en una muestra de suelos pueden ser substancialmente diferentes de las obtenidas en un extracto acuoso.

- d) En consecuencia durante el uso de la relación suelo-agua  $1 \approx 0.2-0.6$ , sobre la base peso de suelo seco  $P/P$ , se determina menor cantidad de sulfatos y carbonatos de calcio.

En el marco referencial de lo descrito, en la presente investigación se determinó la reserva de sales iniciales ( $S_i$ ) con base en el parámetro peso de suelo seco ( $P/P$ ), para lo cual se obtuvo el residuo seco evaporado RSE y residuo seco calcinado (RSC), además se midió la conductividad eléctrica (C.E.) de los diversos extractos acuosos, y se utilizó la relación de extracción de suelo-agua  $1 \approx 0.2-0.6$ , con el objeto de vincular las cantidades de sales extraídas ( $S_{ext}$ ) de manera sucesiva, mediante la aplicación de diferentes volúmenes porosos de lavado ( $Q_a/Q_\pi$ ) a un valor inicial unitario de contenido de sales, representado por la salinidad inicial ( $S_i$ ).

El experimento de que se trata se diseñó con el objeto de cuantificar las sales extraídas de suelos aluviales de uso agrícola, localizados en la Barra de Colotepec en un proceso de lavado, utilizando la relación suelo-agua  $1 \approx 0.2-0.6$  (pasta de saturación) a la que se aplicaron tres tratamientos cualitativos de agua de forma tal que se emplearon agua de pozo, agua tratada y la combinación de ambas en proporción 1:1, utilizando dos volúmenes porosos de lixiviación  $Q_a/Q_\pi = 0, 1$ .

En función de lo anterior, en la tabla 11 se presentan los valores promedio de la reserva de sales iniciales obtenidas para el residuo seco evaporado y el residuo seco calcinado del suelo experimental, observándose la salinidad inicial por estratos del perfil de suelo analizado, destacando que la mayor concentración de sales se presenta en el espesor 0-20 cm, misma que disminuye en forma descendente hasta el espesor 40-60 cm después de lo cual incrementa, lo que obedece a un proceso de iluviación o acumulación. (*Palacios y Gama, 1994*)

La mayor concentración de sales en el espesor 0-20 cm es común en los procesos de acumulación de suelos afectados por sales y tiene explicación en el ascenso capilar de la solución del suelo a partir de un manto freático poco profundo, ascenso que es inducido por el fenómeno de excesiva evaporación de agua y escasa precipitación pluvial que se presenta en el período de estiaje de la región estudiada (*Szabolcs, I. 1994*).

El análisis estadístico reveló que entre perfiles de suelos si hay diferencia significativa del tratamiento con agua de pozo con respecto a los demás tratamientos en la concentración de sales residuales, así mismo se presenta diferencia significativa entre espesores de suelos, lo que obedece a la desalinización de los espesores superiores y a la salinización de los inferiores por efecto del proceso de lavado de sales. Ejemplo: la concentración salina del espesor 0 a 20 cm es significativamente menor al espesor 20 a 40 cm, de cada columna.

En lo que respecta al comportamiento de los valores de la conductividad eléctrica de los extractos acuosos obtenidos en la relación de extracción suelo-agua de que se trata, se detectan valores que no están vinculados con las concentraciones salinas iniciales de cada perfil y espesor de suelo analizado, esto obedece a que la solución salina está más concentrada en una baja relación suelo-agua por lo que el valor de la conductividad eléctrica se eleva, presentando discrepancia entre los valores de conductividad eléctrica y concentración de sales, situación que no se presenta en relaciones de extracción suelo-agua mayores a  $1 \approx 0.2-0.6$ , donde la solución salina se encuentra más diluida y los valores de conductividad eléctrica coinciden con los de concentración de sales que se determinan.

De esta manera se llega a conocer que para una correcta evaluación de la reserva de sales iniciales en los suelos el parámetro conductividad eléctrica no debe utilizarse para evaluar salinidad inicial en la relación de extracción suelo-agua  $1 \approx 0.2-0.6$ , ya que lo más adecuado es realizar esta evaluación con base en la determinación del % Peso/Peso en lo que coinciden *Teterin, U. P.-1968* y *Díaz, E. F. 1986*.

Es importante señalar que en cualquier relación suelo-agua se presenta una dinámica en el contenido de sales tanto al calcular sobre la base de volumen de solución p/v, como al calcular con base en el parámetro peso de suelo seco.

## I. ANTECEDENTES

Los suelos afectados por sales se encuentran en todos los continentes y en casi todas las condiciones climáticas. Su distribución, sin embargo, es relativamente más extensa en las regiones áridas y semiáridas comparadas a las regiones húmedas. La naturaleza y las propiedades de estos suelos son también diversos, ya que requieren propuestas específicas para su remediación y así mantener su productividad a largo plazo. Para su mejoramiento, es por lo tanto, necesario entender el origen de la salinización de los suelos y clasificarlos, de acuerdo a sus características físico-químicas, procesos que llevan a su formación y los acercamientos probables para su acondicionamiento y gestión acertada (FAO, 1988).

En casos extremos donde la concentración de las sales en la zona radicular de un cultivo es mayor de  $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , el crecimiento, desarrollo y rendimiento disminuye. Para mejorar el crecimiento de los cultivos en tales suelos, debe removerse el exceso de sales. Para llevar a cabo la recuperación o mejoramiento de estos suelos salinos, algunos investigadores como *Sánchez-Bernal, E. I. 1994 y 2008*, han probado con mucha eficiencia métodos para remoción de sales solubles de la zona de raíces. El método de Lixiviación de sales, es el procedimiento más sencillo y eficaz para remoción de sales de la zona radicular, esta lixiviación a menudo se lleva a cabo haciendo pasar a través del suelo grandes volúmenes de agua superficial o subterránea.

La lixiviación puede reducir niveles considerables de salinidad cuando hay suficientes desagües naturales; preferentemente debe realizarse cuando el contenido de humedad del suelo es bajo y el nivel freático se encuentra profundo. La lixiviación durante los meses de verano es, por regla general, menos eficaz porque las cantidades grandes del agua se pierden por la evaporación. La opción actual dependerá sin embargo de la disponibilidad del agua y otras consideraciones.

En la época actual, realizar un proceso de lavado de sales, implica necesariamente disponer de grandes volúmenes de agua, para lo cual se atiende en principio las necesidades de agua de la población y en segundo se consideran los requerimientos de las actividades productivas (agrícolas e industriales); hoy día el aprovechamiento de nuevas fuentes hídricas resulta muy costoso e implica impactos ambientales de riesgo por la escasez de agua a nivel mundial, sin embargo existe una opción posible para optimizar en gran escala este recurso y es a través del reuso de las aguas residuales tratadas.

Invariablemente este tipo de agua debe cumplir con ciertos estándares de calidad para su reuso, de acuerdo a lo señalado por la legislación ambiental vigente en la materia, para utilizarse en diversos fines como es el riego de jardines públicos, procesos de enfriamiento, en el campo, etc.

En cierta forma el objetivo del tratamiento de las aguas fue inicialmente la reducción del impacto del vertido a las aguas receptoras (ríos, arroyos, mares) y la consideración sanitaria del riesgo asociado al contacto del agua residual con las personas. Actualmente, con los problemas de escases, sequías y sobreexplotación del recurso hídrico, prevalecieron otras consideraciones, más de tipo hídrico, y en este sentido, el objetivo de los planes de saneamiento pasó a ser el mantenimiento de la calidad de los cauces de agua, optimización del recurso a través de su reutilización y evitar en gran medida la sobreexplotación de los acuíferos, que también son causa principal del problema de la salinización de los suelos.

### I.1 Los Suelos Salinos en el Planeta Tierra.

El suelo es un sistema dinámico formado por un continuum disperso y trifásico (sólido, líquido y gaseoso) que da origen a material no consolidado sobre la superficie de la tierra, el cual es influenciado por factores como el material parental, el clima, la vegetación, los macro y microorganismos y la topografía, todo ello actuando en el espacio tiempo, precisamente las acciones intempéricas derivadas de estos factores, son la resultante de la diversidad de suelos en el planeta, con variaciones en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas (Porta, C. J., et-al. 2003).

El hombre, al perturbar los suelos vírgenes a través de la actividad agro productiva, produce una serie de cambios físicos, químicos y biológicos que modifican la estructura primaria de los suelos y conducen, en la mayoría de los casos, a la ruptura de su equilibrio dinámico y, finalmente, a su degradación en diferentes modalidades (De la Cruz-Reyna, S. 1994).

En todos los continentes hay amplias áreas de suelos afectados por sales, sin embargo su magnitud y distribución no han sido estudiadas a detalle. El primer intento por compilar información sobre la extensión de suelos afectados por sales en una base mundial fue hecho por Massoud, F. I. 1977, basado en los mapas de suelos del mundo de la FAO/UNESCO. En la tabla 1, se muestra la información de estos estudios correspondiente al continente americano.

**Tabla 1.** Distribución Mundial de Áreas Afectadas por Sales.

Continente	País	Área, 1000 ha		Total	
		Salino/Solonchaks	Sódico/Solonetz		
América del Norte	Canadá	264	6 974	7,238	
	USA	5,927	2,590	8,517	
	Cuba	316	-	316	
América Central y México	<b>México</b>	<b>1,649</b>	-	<b>1,649</b>	
	Argentina	32,473	53,139	85,612	
	Bolivia	5,233	716	5,949	
	Brasil	4,141	362	4,503	
	Chile	5,000	3,642	8,642	
	América del Sur	Colombia	907	-	907
		Ecuador	387	-	387
Paraguay		20,008	1,894	21,902	
Perú		21	-	21	
Venezuela		1,240	-	1,240	

Fuente: Massoud, 1977

Estudios más recientes hechos por Szabolcs, I., et-al. 1982, presentan la distribución de suelos salinos a nivel mundial que indica que los suelos predominantes son los salinos y sódicos que abarcan a nivel mundial superficies de 324'921,000 has y 558'697,000 has respectivamente, existiendo también pero en menor proporción los magnésicos, gypsíferos o sulfáticos y ácido-sulfáticos.

En general, los suelos afectados por sales ocupan un 10% de la superficie terrestre, aproximadamente distribuidos en todos los continentes, con diferencias en sus propiedades morfológicas, químicas y biológicas, pero con similitud en cuanto a su baja fertilidad y en las dificultades que presentan para su uso y manejo racional; estos se encuentran principalmente en zonas áridas y semiáridas donde la evaporación excede a la precipitación pluvial, pero también pueden tener lugar en climas húmedos.

## **I.2 Origen y causa de la salinidad en los suelos.**

El origen de las sales en los suelos tiene explicación en eventos geomorfológicos ocurridos en distintas épocas geológicas, tales como las transgresiones marinas que sedimentaron y formaron grandes depósitos salinos en los continentes tanto en suelos como en acuíferos subterráneos y los fenómenos volcánicos; en ambos eventos una vez conformadas las rocas ígneas y sedimentarias, los procesos intempéricos físicos (hídrico y eólico) y químico (hidrólisis, solución, carbonatación, reacciones de óxido reducción), se encargaron de favorecer la síntesis de minerales de arcilla, así como también la formación de compuestos salinos debido a la extracción de iones base ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y otros cationes metálicos) y a su reacción con los grupos carbonato, bicarbonato, cloruro, sulfato, humato y aluminato de los metales alcalinos y finalmente su migración y acumulación en los suelos (Kovda, V. A., et-al. 1967). Por ello la formación de sales minerales resultado de la intemperización de minerales primarios y de las rocas expuestas de la corteza terrestre, se considera la salinización primaria.

Aunque la intemperización de los minerales primarios es la fuente directa de casi todas las sales solubles, existen otras causas por las cuales un suelo puede llegar a acumular una gran concentración de sales, siendo en muchos casos el agua el principal factor de acarreo.

Las aguas actúan como fuentes de migración y acumulación de sales, cuando se usan para riego y pueden también agregar sales al suelo bajo condiciones naturales, cuando inundan las tierras bajas (pobre drenaje) o cuando el agua subterránea sube hasta muy cerca de la superficie.

A manera de síntesis, se plantean distintos ciclos de acumulación de sales (Porta, C. J., et-al. 2003):

### *1.- Ciclos Continentales*

Forman suelos salinos en las tierras del interior de los continentes por ciclos de movilización, redistribución y acumulación de cloruros, sulfatos, bicarbonatos y carbonato sódico en cuencas endorreicas sin drenaje de zonas áridas y semiáridas por: *a) Clima* (Aridez o semiaridez), *b) Régimen de Humedad del suelo* (No percolante, Arídico, xérico o ústico), posición geomorfológica (Fondo o parte basal de laderas) y *c) Clase de drenaje* (Deficiente).

### *2.- Ciclos Marítimos*

Los suelos de las llanuras a lo largo de las costas, bahías y marismas pueden presentar acumulación de sales marinas, principalmente cloruro de sodio. Las sales proceden de capas freáticas salinas poco profundas, del agua de inundación por efectos de las mareas o

por los aportes de sales transportadas por el viento, ya sea en forma de aerosoles con cristales en suspensión o como gotas altamente salinas, denominándosele sal cíclica.

El océano puede ser la fuente de sales en aquellos suelos en los que el material original está constituido por depósitos marinos que se asentaron durante períodos geológicos antiguos y que a partir de entonces han emergido. También, es la fuente de sales en los suelos bajos que se encuentran a lo largo de las costas.

### *3.- Ciclos Deltáicos*

Los deltas de los ríos desde la antigüedad han sido áreas de gran importancia para la humanidad, ya que la fertilidad natural de los suelos de aluvión ha sido clave para el desarrollo de la agricultura. Se trata de áreas de abundancia de agua para una agricultura de regadío, sin embargo las deficientes técnicas de drenaje han provocado la salinización de los deltas.

### *4.- Ciclos Artesianos*

En determinadas áreas geográficas podría resultar difícil explicar la presencia de suelos salinos atendiendo a las condiciones climáticas o a la distancia al mar. El surgimiento de aguas freáticas profundas, que ascienden a favor de microfallas y fracturas. En su movimiento pueden atravesar materiales que den origen a su salinización.

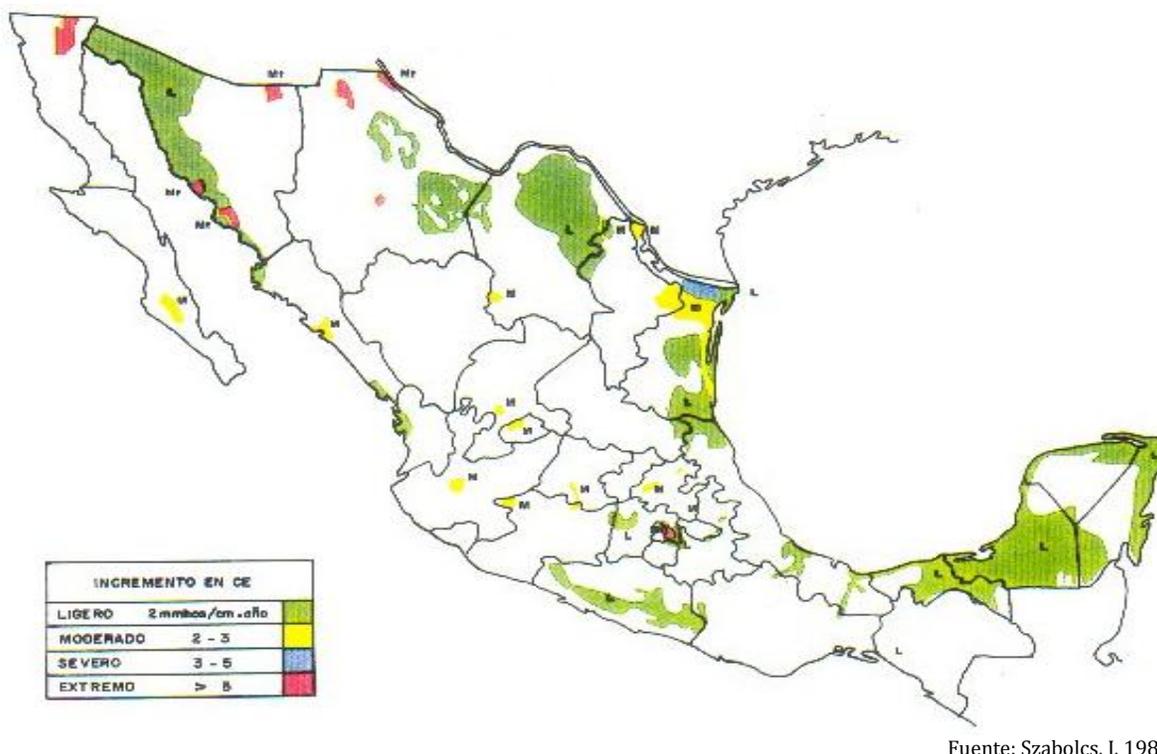
### *5.- Ciclos Antropogénicos*

Se refieren a la salinización secundaria en suelos destinados a actividades agro-productivas como son:

- 1) El riego con aguas de excesiva concentración salina, sin tomar en cuenta las concentraciones óptimas que deba tener un agua de riego.
- 2) La falta de establecimientos de sistemas de drenaje.
- 3) La deforestación y la sobreexplotación de pastizales.
- 4) El uso excesivo de sales fertilizantes.
- 5) El riego de campos con aguas residuales urbanas y de desechos industriales con alto contenido de sodio.

## **I.3 Los Suelos Salinos en México.**

Para Szabolcs, I. 1986, la mayoría de los suelos afectados por sales en México están representados por suelos salinos, Figura 1, ello debido a las condiciones medioambientales que se presentan en el país; se distribuyen ampliamente en valles cercanos a las costas, estuarios ribereños y en zonas áridas y semiáridas.

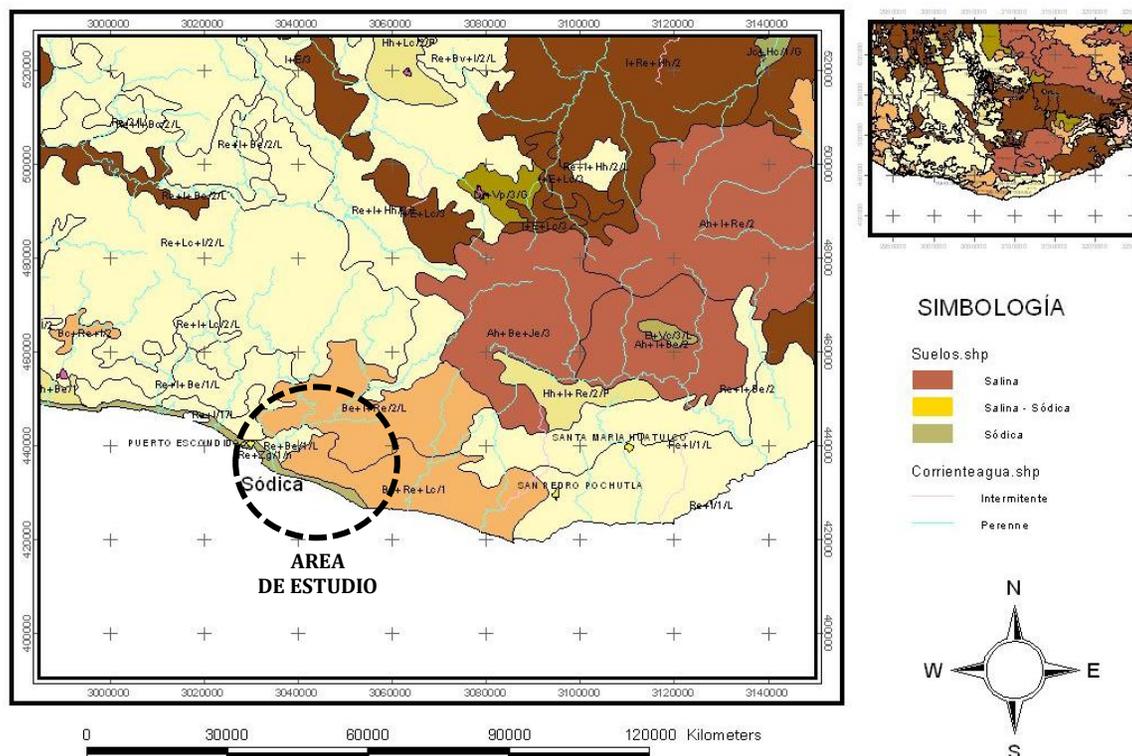


Fuente: Szabolcs, I. 1986

**Figura 1.** Distribución de Suelos Afectados por Sales en México.

Los suelos afectados por sales, dependiendo del tipo y concentración de estas, producen efectos tóxicos en cultivos, inhibición de la germinación de semillas, crecimiento vegetal limitado e indisponibilidad de agua por efectos osmóticos de los iones, disueltos en la solución del suelo (Sánchez-Bernal, E. I. 2008); de hecho son los iones constitutivos de las sales los encargados de producir estos efectos adversos en los organismos vegetales. Por ejemplo el ión  $\text{Na}^+$  en el suelo a porcentajes de sodio intercambiable superiores a 15% ( $\text{PSI} > 15$ ) afecta de forma negativa las propiedades físicas del suelo, tales como: destrucción de la estructura, pérdida de la permeabilidad y condiciones de anaerobiosis en los suelos (Sánchez-Bernal, E. I., et-al. 2003; Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1994).

En los Valles Centrales de Oaxaca se han localizado suelos salinos y suelos sódicos, estos últimos derivados de procesos artesianos, tal es el caso de los suelos sódicos de Herve el Agua. Estudios realizados por Sánchez-Bernal, E. I., et-al. 2010 en suelos de la Costa Oaxaqueña indican la presencia de suelos salinos afectados por salinidad clorhídrica, en algunos de ellos la concentración de sales fundamentalmente cloruro de sodio se ha incrementado como consecuencia de irrigación deficiente por aplicación de excesivas láminas de riego, tal es el caso de los suelos del Distrito de Riego 110 "Río Verde", Tututepec, Oaxaca. Asimismo también el fenómeno de intrusión salina en las zonas limítrofes con el mar, que ocurre por la sobreexplotación de mantos acuíferos subterráneos, y la migración de sodio del alto relieve al bajo relieve, por acción de descargas de aguas residuales provenientes de actividades tecnológicas, origina la presencia en manchones de suelos salino-sódicos y sódicos de muy difícil manejo en la actividad agropecuaria. (Figura 2)



Fuente: INEGI-Datos Vectoriales, (Esc. 1:1000 000),2000

**Figura 2.** Zona de influencia del sitio de estudio con problemas de salinidad.

#### I.4 Clasificación de los Suelos Salinos, Sódicos y Salinos-Sódicos.

La literatura en la materia reporta varias clasificaciones de suelos salinos, en general se debe precisar que por los aspectos teóricos y de parámetros que consideran para efectos de investigación científica, las más notables son la rusa y la americana.

La clasificación rusa de los suelos salinos tiene sustento en la pedogénesis, formación edáfica y geoquímica de sales en los suelos, estableciendo además que los suelos salinos se han formado en distintas condiciones físico geográficas y por tanto difieren en su composición cualitativa, así existen suelos clorhídricos, suelos sulfático-clorhídricos, suelos clorhídrico-sulfáticos, suelos sulfáticos, suelos sulfático-sódicos, suelos sódicos (Sánchez-Bernal, E. I. 1994).

La clasificación americana de los suelos salinos de acuerdo a lo que señala el Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (1985) en su manual 60, se basa en dos parámetros fundamentales, la Conductividad Eléctrica (C.E.) del extracto de saturación de muestras de suelo como medida de concentración de sales y su efecto en los cultivos, y el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) del complejo de intercambio catiónico, para determinar los efectos del sodio en las propiedades físicas del suelo, igualmente considera intervalos de pH; por ejemplo para suelos Salinos  $pH < 8.5$ , Sódicos  $pH = 8.5$  a  $10$ , Salino-Sódicos  $pH > 8.5$ , suelos sin problemas de sales y de sodio intercambiable  $pH = 6.5$  a  $8.4$  (tabla 2).

- **Los suelos salinos**, se caracterizan por contener iones de calcio, magnesio, sodio potasio, cloro, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, boro y yodo, y en algunos casos cobre, zinc y bromo, la CE de los suelos salinos reporta valores superiores a los 4  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  en el extracto de saturación, PSI menor de 15 y un pH menor a 8.5. Estos suelos corresponden al tipo “alcali blanco” y a los “Solonchaks” de los autores rusos (Richards, L. A., et-al. 1982).
- **Los suelos alcalinos o sódicos**, se forman por la influencia de los iones sodio, carbonatos y bicarbonatos que producen hidrólisis alcalina; sus propiedades químicas son peculiares, la suma total de las sales solubles que se obtienen mediante extracto no es alta (0.3 a 0.5%), en ocasiones es de 0.7 a 1.0% y raras veces de 2 a 3%, lo que motiva que su CE sea menor de 4, 8 o 12  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , PSI mayor de 15, la reacción alcalina registra un pH mayor de 8.5 y varía en un intervalo de 8.5 a 10. Estos suelos corresponden a los llamados “alcali negro” y a los “Solonetz” de los autores rusos (Richards, L. A., et-al. 1982).
- **Los suelos salinos-sódicos**, se forman como resultado de los procesos combinados de salinización y acumulación de sodio, presentan una CE mayor de 4  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  y un PSI mayor de 15. Cuando hay exceso de sales el pH raramente es mayor de 8.5 y las partículas permanecen floculadas.

**Tabla 2.** Clasificación de los Suelos Salinos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

<b>PSI= 15</b>	<b>SUELOS SÓDICOS</b> <i>pH= 8.5 a 10</i>	<b>SUELOS SALINOS-SÓDICOS</b> <i>pH&gt; 8.5</i>
	<b>SUELOS SIN PROBLEMAS DE SALES Y SODIO INTERCAMBIABLE</b> <i>pH= 6.5 a 8.4</i>	<b>SUELOS SALINOS</b> <i>pH&lt; 8.5</i>
<b>CE= 4 <math>\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}</math></b>		

La solubilidad de las sales influye directamente sobre su movilidad y precipitación, regulando su máxima concentración en la solución del suelo, de forma que cuanto mayor sea ésta mayor será el efecto perjudicial para los cultivos. Según esto, las sales más tóxicas son las que presentan elevadas solubilidades, que darán soluciones muy concentradas. Por el contrario las sales con baja solubilidad no presentan ningún problema para los cultivos, ya que precipitan antes de alcanzar niveles tóxicos.

Como puede verse en la tabla 3, los cloruros y nitratos son las sales más solubles, después siguen los bicarbonatos junto a los sulfatos y finalmente los menos solubles son los carbonatos. Por tanto serán estos últimos los primeros en precipitar, seguidos del sulfato cálcico y no serán considerados dentro del concepto de sales solubles, concepto que se refiere a sales muy solubles, como es el caso del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

**Tabla 3.** Solubilidades en agua de algunas Sales a 20°C.

Sales	g·L <sup>-1</sup>
$\text{CaCO}_3$	0.01
$\text{MgCO}_3$	0.10
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.40
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	71.00
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	195.00
$\text{MgSO}_4$	262.00
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	262.00
$\text{KNO}_3$	316.00
$\text{NaCl}$	360.00
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	710.00
$\text{NaNO}_3$	921.00
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1,670.00
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2,790.00

Normalmente, la solubilidad de las sales aumenta con la temperatura, influyendo además otros factores como la presencia de sales con iones comunes en soluciones complejas, que disminuyen la solubilidad de estas sales.

Los suelos con altas salinidades y en particular con altas concentraciones de sodio (suelos salinos-sódicos), usados en actividades agrícolas pierden productividad por la presencia de estos componentes, por lo que una manera de recuperarlos es mediante lavados con agua de calidad para riego, realizando operaciones de irrigación.

#### **I.4 Las Aguas Residuales Municipales y su Tratamiento.**

El tratamiento de las aguas residuales ha tenido básicamente el objetivo de proteger los cuerpos de agua evitando la descarga de aguas residuales contaminadas, actualmente se ha sumado uno más a este fin, el de obtener un agua de calidad adecuada para su reutilización en actividades de riego de jardines y de grandes extensiones de tierra cultivable en cultivos para el consumo humano.

En el año 2008, en México existían 1,833 plantas municipales de tratamiento en operación, con una capacidad total instalada de 113,024.0 lps, las que daban tratamiento a un 40.2 % del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado del país (CONAGUA. 2008).

En lo concerniente al Estado de Oaxaca, para finales del año 2008, se tenían un registro de 66 plantas de tratamiento en operación, con una capacidad de 1,510.30 lps, y caudal tratado de 986.1 lps, lo cual no representa ni la mitad de toda el agua que se genera en la entidad, siendo este uno de los principales problemas a combatir.

La situación actual que presentan los municipios y comunidades de la entidad oaxaqueña consiste en que las aguas residuales que se generan, no reciben ningún tipo de tratamiento previo a su descarga final. La práctica usual que se sigue para la disposición final de los efluentes, es el vertido en ríos o directamente al suelo; particularmente aquellas comunidades localizadas en la Costa Oaxaqueña, donde sus aguas van directamente hacia el mar, lo cual tampoco es una práctica adecuada.

En algunos casos, en las viviendas se construyen una fosa séptica, sin embargo a menudo, la operación y mantenimiento de estos sistemas no es el adecuado, representando al final focos de contaminación con implicaciones graves sobre el suelo y los mantos acuíferos y sobre la salud de la población, con especial incidencia en las enfermedades intestinales.

Las aguas residuales domésticas se componen fundamentalmente, de materia orgánica en forma soluble o coloidal y de sólidos en suspensión.

El tipo de tecnología utilizada en el tratamiento de aguas residuales municipales depende no sólo del destino del agua residual, sino de la disponibilidad de recursos materiales y humanos para construir y operar las plantas de tratamiento. Estas y otras condicionantes han determinado el desarrollo de la industria del tratamiento de aguas residuales municipales en México.

Existen en el mercado, distintos tipos de procesos para el tratamiento de aguas residuales municipales, lo cual hace muchas veces difícil su selección, no obstante se pueden seguir ciertos criterios generales para realizar una selección adecuada de la tecnología a emplear para el tratamiento de las aguas residuales, uno de estos criterios es la viabilidad económica y técnica de la construcción y operación de la planta, el cual en algunos casos es este el criterio de mayor peso para la selección; otro criterio que debe considerarse es la calidad de efluente que es posible obtener con cada tecnología de tratamiento, de acuerdo a la calidad exigida por norma en la descarga o reutilización del agua.

Uno de los procesos de tratamiento más utilizados es el de lodos activados, cuya tecnología se empleó por primera vez en Inglaterra en el año 1914 y actualmente es el método estándar de tratamiento de aguas residuales con mayor recurrencia en los países desarrollados. Una planta de lodos activados es un sistema de mezcla completa. Normalmente, consta de un reactor donde se mantiene en suspensión un cultivo microbiano capaz de asimilar la materia orgánica presente en el agua residual a depurar. El proceso requiere un sistema de aireación y de agitación que suministre el oxígeno requerido por las bacterias encargadas de la depuración, evite la sedimentación de los flóculos en el reactor y permita la homogeneización de los lodos activados.

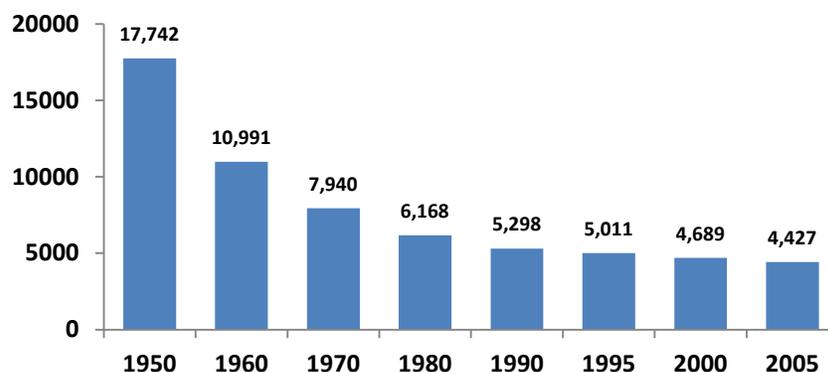
Los Lodos Activados, están constituidos por microorganismos que requieren de oxígeno como aceptor final de electrones, se mantienen en suspensión en los reactores biológicos, ya sea por medio de los sistemas de aireación o bien mediante agitadores mecánicos (*Metcalfe-Eddy Inc. 2003; Grady, C.P. L., et-al. 1999; Martin, R. W., et-al. 2005*). Usualmente de estas plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales, se obtiene un

efluente con calidad para usarse en actividades de riego de áreas verdes en parques o jardines.

Por lo tanto, el proceso de lodos activados, es un proceso apto en México para cumplir con los límites más estrictos de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997, pero con considerables costos de inversión y operación.

La escasez del agua en nuestro país se ha acrecentado en las últimas dos décadas, las erráticas lluvias han mantenido a gran parte del país, especialmente a los estados del norte, en una sequía constante, resultando en pérdidas de cultivos de temporal y muerte de ganado (CONAGUA, 2008). En las regiones áridas y semiáridas de México se ha aplicado durante décadas el riego agrícola con aguas residuales crudas. Ésta ha sido una respuesta a la escasez de agua, así también, históricamente, la reutilización de las aguas tratadas en los sistemas de tratamiento se ha establecido de manera pionera en las regiones con escasez de agua.

Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2008), anualmente México recibe del orden de 1,488 miles de millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, el 72.5% se pierde por evapotranspiración a la atmósfera, el 22.1% escurre por los ríos o arroyos y el 5.4% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, de tal forma que anualmente el país cuenta con 458 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable, a lo que se denomina disponibilidad natural media (Figura 3).



**Figura 3.** Variación de la disponibilidad natural media per cápita del agua, de 1950 a 2005 (m³/hab/año).

NOTA: el dato de disponibilidad natural total, en millones de metros cúbicos por año es de 458,100.

Para los años de 1950, 1960, 1970, 1980, 1990 y 2000 los datos de población fueron interpolados al 31 de diciembre de cada año con base en datos censales del INEGI. Para los años 1995 y 2005 también se realizó la interpolación al 31 de diciembre de cada año, pero con base en datos del conteo del INEGI.

Fuente: CONAGUA Subdirección General Técnica. México, 2008.

De acuerdo a los datos mostrados en la figura 2, se observa que la disminución del recurso es cada vez más alarmante, no obstante, el principal uso del recurso hídrico es el agrícola, ya que, el 63% del agua utilizada en el país para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37% restante proviene de fuentes subterráneas (acuíferos).

El porcentaje que representa el agua utilizada para usos consuntivos respecto a la disponibilidad total es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país, cuenca o región. Se considera que si el porcentaje es mayor al 40%, se ejerce una fuerte presión sobre el recurso.

En el Estado de Oaxaca la crisis por la falta del recurso hídrico se agrava cada día más, debido a la sobreexplotación de que son objeto los acuíferos que abastecen a las poblaciones, además de los riesgos que corren estas fuentes por la contaminación generada de las actividades antropogénicas. La mayor demanda de agua la tiene el campo, seguido del abasto público, no obstante existen en el estado aun fuentes donde se logra satisfacer tal demanda por parte de ambos sectores (CONAGUA. 2008).

La opción más viable para disminuir el grado de presión que presenta el agua no solo a nivel local sino del país entero, es la reutilización del agua residual tratada de las plantas de tratamiento, a través del riego de parques y jardines, como de cultivos y otras actividades que requieren grandes volúmenes de agua, siempre y cuando las características físico-químicas de este efluente cumpla de manera eficiente con la normatividad ambiental correspondiente.

Por lo tanto, la presente investigación pretende abordar uno de los problemas que se presenta en nuestra entidad desde hace algunos años y que repercute en las actividades agrícolas, como es la problemática de acumulación de sales en los suelos por actividades antrópicas que presentan terrenos de cultivo localizados en los litorales y Costa Oaxaqueña, cuya alta concentración trae como consecuencia inhibición del crecimiento y desarrollo, bajos rendimientos y efectos tóxicos en cultivos poco tolerantes a este tipo de condiciones; en ese sentido se propone en estos suelos un proceso de lavado con agua residual tratada, para remover el exceso de sales de la zona radicular de los cultivos, a través de su lixiviación hacia estratos inferiores que permitirán su evacuación mediante un sistema de drenaje natural del suelo o drenajes con salida al mar.

## **I.5 Área de estudio.**

### ***Localización del sitio de muestreo del suelo.***

El presente proyecto se desarrolló en la región de la Costa de Oaxaca, en el Municipio de Santa María Colotepec, Distrito de Pochutla, Estado de Oaxaca, específicamente en terrenos de la Agencia de Policía La Barra de Colotepec, la cual se encuentra ubicada en la Región Hidrológica 21 Costa de Oaxaca (RH-21), en la Cuenca Río Colotepec (C), que se extiende desde el parteaguas de la Sierra Madre del Sur hasta la línea de Costa.

La selección del sitio para los muestreos de suelos, estuvo a cargo del grupo de Profesores-Investigadores responsables del proyecto, el cual corresponde a un terreno destinado a la agricultura de riego, localizado en las coordenadas geográficas 15°49.005' de Latitud Norte y 97°1.774' de Longitud Oeste, propiedad de la empresa "Herbal Garden de México, S.A. de C.V.", donde se siembran cultivos orgánicos (hierbas culinarias) para la exportación como son: Albahaca (*Ocimum basilicum*), tomatillos (*Physalis Philadelphica*), menta (*Mentha Spicata*), chives (*Allium Schoenoprasum*), tomillo (*Thymus Vulgaris*), salvia (*Salvia Officinalis L*), eneldo (*Anethum Graveolens*), entre otras.

El sitio colinda con terrenos de cultivo del mismo dueño, al SW aproximadamente a 200 m se encuentra el Océano Pacífico, al Este se encuentra el río Colotepec y al Oeste con

terrenos comunales de Santa María Colotepec, afluente importante de la cuenca del mismo nombre. La figura 4 muestra una panorámica del sitio de estudio, y sus colindancias.



Fuente: Google Earth 2009

**Figura 4.** Panorámica satelital del Sitio de Estudio.

## CLIMA

*Temperatura Media Anual.*- El clima que prevalece en la zona del proyecto es cálido sub-húmedo con lluvias en verano de menor humedad  $Aw_0$  (w); la temperatura media anual es de 27.4°C, la temporada de máximas temperaturas se presentan de mayo a octubre, mientras que las mínimas ocurren en los meses de enero y diciembre. El mes más frío, enero, llega a 25.5°C y el más caliente, mayo, a 29.4°C de temperatura media, por tanto, la oscilación media anual de la temperatura es de 3.9°C, (INEG. 2004).

*Precipitación Total Anual.*- En general el régimen de lluvias es en verano, en promedio se registran láminas de precipitación total anual del orden de 1,300 mm, que significan un volumen de 4,868.5 Mm<sup>3</sup>, de los cuales escurren 1,139.3 Mm<sup>3</sup> que equivalen al 23.4% del volumen total.

La precipitación total anual para el sitio de proyecto es de 1,057.8 mm, el mes más seco es marzo con 1.4 mm de lluvia que contrasta con septiembre que alcanza una precipitación promedio anual de 255.2 mm, el mes más lluvioso.

## HIDROLOGÍA

El principal afluente cercano a la zona del proyecto, es el río Colotepec, el cual nace en la Sierra Madre del Sur a 2,300 msnm, baja con rumbo suroeste en trayectoria sinuosa y de fuerte pendiente hasta desembocar al Océano Pacífico, su longitud es de aproximadamente 100 Km, medidos desde su nacimiento hasta el municipio de Santa María Colotepec; de acuerdo a datos reportados de la Estación Hidrométrica La Ceiba, este río transporta

volúmenes anuales del orden de  $905.05 \text{ Mm}^3$ , que se traducen en un gasto medio anual de  $48.67 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (período 1971-1989); los usos principales a que se destina el agua de este río son de tipo agrícola y recreativo.

## FISIOGRAFÍA

El territorio municipal forma parte de la Provincia Sierra Madre del Sur, subprovincia Costas del Sur, la planicie costera del pacífico, limita al Norte con la Sierra Madre del Sur, y al Sur, con el Océano Pacífico, es de carácter alargado y estrecho, ocupa  $9,262 \text{ km}^2$  del Estado, esta planicie se puede subdividir en dos áreas: la Occidental, de relieve más suave, en donde se distinguen llanuras, lagunas y lomeríos que finalizan en Puerto Ángel, y por el lado Oriental, consiste en un relieve premontañoso y de elevaciones medias y bajas que descienden hasta el mar con una línea de costa mixta, de promontorios rocosos en los que se intercalan playas arenosas. En la distribución superficial las pendientes son del orden de  $0^\circ$  a  $3^\circ$ , presentándose en 55.4% del territorio.

## GEOLOGÍA

Los depósitos recientes Q(s), ocupan el tercer lugar en superficie dentro del territorio Oaxaqueño, se distribuyen sobre todo al suroeste y este del Estado; los suelos aluviales son los que dominan ampliamente aunque también los hay litorales, eólicos, lacustres y residuales. El cuaternario aluvial está localizado en las desembocaduras de los ríos Verde, Copalita y otros. El relieve es acumulativo en la porción occidental, mientras que en la oriental es de erosión y de denudación areal o laminar, modelando las terrazas estructurales y niveles pre-montañosos ya disecionados por la red fluvial.

## SUELOS

La mayor parte de los suelos de esta cuenca hidrológica, presentan fase lítica, algunos con fase química sódica y salino-sódica, los suelos salinos – sódico están distribuidos en el extremo Oeste de la cuenca e incluyen zonas lacustres; una de las consecuencias del exceso de sales en el suelo es la reducción de su potencial para ser utilizado en la agricultura. El 65% de población del municipio de Santa María Colotepec se dedica a las labores del campo.

El tipo de suelo predominante en el área de estudio es el Regosol eutrítico en fase lítica, el horizonte A1 a una profundidad de 0-14 cm, presenta color pardo amarillento oscuro en húmedo, textura de migajón arenoso, estructura de forma migajosa de tamaño muy fino y desarrollo débil, drenaje interno moderado.

Cuenta con 15,646.71 hectáreas de unidades de producción rurales, los cultivos más importantes de la región son el cacahuate (*Arachis Hypogaea*), melón (*Cucumis Melo*), papaya (*Carica papaya*), sandía (*Citrullus Lanatus*) y algunas hortalizas principalmente hierbas aromáticas. Uno de los principales problemas de la empresa es que parte de los terrenos que emplean para cultivar están afectados por sales.

## FLORA

La distribución general de la vegetación en el bajo relieve de la cuenca del río Colotepec, forma parte de la Selva Mediana Sub-caducifolia, distribuidas en el territorio

oaxaqueño hacia la porción occidental y central de la costa del Pacífico, ocupa las llanuras y lomeríos de las estribaciones de la sierra, estos lugares pertenecen a la subprovincia de las Costas del Sur; se asientan desde el nivel del mar y llega hasta cerca de los 1,000 m al norte de Santiago Jamiltepec. Flora característica del área de estudio: *Melocactus delessertianus*; agrupaciones de halófitos donde destacan estratos arbustivos como *Ziziphus amole* y herbáceas como *Heliotropium curassavicum* por mencionar algunos ejemplos.

## FAUNA

De moluscos *Calyptraea spirata* (zona rocosa expuesta), *Chiton articulatus* (zonas expuestas), *Entodesma lucasanum* (zona litoral), *Fissurella (Cremides) decemcostata* (zonas rocosas), *Fissurella (Cremides) gemmata* (zona rocosa), *Lucina (Callucina) lampra*, *Pilsbryspira garciacubasi* (fondos rocosos de litoral), *Tripsysha (Eualetes) centiquadra* (litoral rocoso). Endemismo de la planta *Melocactus delessertianus*; de crustáceos *Epithelphusa mixtepenis*, *Macrobrachium villalobosi* y *Tehuara guerreroensis*; de aves *Aimophila sumichrasti*, colibrí corona-verde *Amazilia viridifrons*, *Amazona finschi*, *Deltarhynchus flammulatus*, *Passerina leclancherii*, *Thryothorus felix*, *T. sinaloa*, *Turdus rufopalliatu*, *Vireo hypochryseus*. Especies amenazadas: de peces *Notropis imeldae*; de aves *Accipiter cooperii*, *A. striatus*, *Aimophila sumichrasti*, *Amazona finschi*, *Anas acuta*, *A. discors*, *Cairina moschata*, *Cathartes burrovianus*, *Egretta rufescens*, *Falco columbarius*, *F. peregrinus*, *Geranospiza caerulescens*, *Glaucidium brasilianum*, el bolsero cuculado *Icterus cucullatus*, *Ixobrychus exilis*, *Mycteria americana*, *Oxyura dominica*, *Puffinus auricularis*, *Sterna antillarum*, *S. elegans*, *Sula sula*. Especies indicadoras: *Typha domingensis* y *Cerithium* sp., indicadoras de eutroficación; la ausencia de *Toxopneustes roseus* indicadora de deterioro y la presencia de *Salicornia bigelovii* indicadora de hipersalinidad. Zona de anidación de aves y tortugas (CONABIO, 2006).

## II. JUSTIFICACIÓN

Los problemas de salinidad del suelo están más extendidos en las regiones áridas y semiáridas, pero también los suelos afectados por sales se encuentran en climas húmedos y sub húmedos, particularmente en las regiones costeras donde el ingreso de agua del mar a través de los estuarios y ríos o a través de agua de pozo con contenido alto de sales causa gran salinización.

La incorporación de una considerable superficie de tierras a la producción agrícola y pecuaria, ha ocasionado en muchos casos la disminución de la capacidad productiva de los suelos, debido a un manejo ineficiente de este recurso. Los beneficios derivados de la agricultura de riego frecuente no han sido sostenibles, debido a la salinización o desarrollo de suelos afectados por sales, las aguas utilizadas en la irrigación agrícola provienen de pozos semi profundos que varían en concentración ( $250$  a  $3,000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) y cuya composición química es bicarbonatada sódica, de tal manera que en los suelos costeros la presencia de sales limita la actividad agro productiva.

El efecto causado por el contenido de sales solubles en los suelos es muy negativa, dependiendo del tipo y concentración, puede ir desde un efecto osmótico toxico en los cultivos, hasta el deterioro en las propiedades físicas (p.e. pérdida de la estructura, pérdida de la permeabilidad, generación de condiciones de anaerobiosis, entre otras), traduciéndose en baja productividad de los mismos.

El presente trabajo tiene como objetivo obtener resultados que permitan evaluar la factibilidad de recuperación de suelos salinos, que en las condiciones actuales son de baja calidad para uso agrícola, implementándose un proceso de lixiviación de sales (a nivel laboratorio) aplicando tratamientos con agua residual municipal tratada (cumple los estándares de calidad de la NOM-003-SEMARNAT-1997), agua de pozo, una mezcla de ambas en una proporción 1:1 para cada agua y agua destilada (control); determinándose la cantidad de sales extraídas y estimando los volúmenes de agua a emplear en campo para evacuar las sales en una determinada parcela agrícola, evaluando los cambios en su estructura, densidad y salinidad residual del suelo para cada tratamiento utilizado.

La propuesta de emplear agua tratada en los experimentos, es conocer el efecto lixivador de este influente, el cual representaría una alternativa viable para la recuperación de suelos afectados por sales y aminoraría la presión que existe actualmente en las aguas subterráneas y de ríos, y que cada vez es más escasa su disponibilidad para usos consuntivos, que en consecuencia también es un factor del problema de salinización por la sobreexplotación de los acuíferos.

Se contempla la opción de generar nuevas opciones para que los agricultores que trabajan este tipo de suelos puedan recuperar y darle un mejor uso y manejo de los mismos.

### **III.- HIPÓTESIS**

- Los suelos salino-sódicos del Valle Costero de La Barra de Colotepec, se verán beneficiados con la disminución de su salinidad (Conductividad Eléctrica  $\leq 4$  dS·m<sup>-1</sup>) y una mejora en su condición estructural al ser lavados con aguas residuales tratadas.
- Un tren de tratamiento de lodos activados a nivel laboratorio, proporcionará un efluente con estándares de calidad establecidos por la Normatividad, representando una opción técnica para reusarse en el tratamiento de suelos con alto contenido de sales (Conductividad Eléctrica  $> 4$  dS·m<sup>-1</sup>).

#### IV. OBJETIVOS

##### ***Objetivos Generales:***

Implementar un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales municipales que permita obtener agua residual tratada que cumpla con los estándares de calidad establecidos por la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Determinar posibles cambios en la concentración salina y parámetros físico-químicos de suelos salinos-sódicos de La Barra de Colotepec, Oaxaca (Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica, densidad aparente, textura, cationes y aniones solubles tales como:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ;  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ; Relación de Adsorción de Sodio y Porcentaje de Sodio Intercambiable), al lavarlos con agua residual municipal tratada.

##### ***Objetivos Particulares:***

- Montar y arrancar un sistema de tratamiento biológico en lote secuencial que opere de forma estable, con base a las condiciones ambientales y de alimentación a que estará sujeto.
- Determinar el efecto lixiviador de los tratamientos con aguas de diversa calidad (residual municipal tratada, agua de pozo para uso agrícola, mezcla de las dos primeras en proporción 1:1 y agua destilada), sobre la relación de adsorción de sodio y porcentaje de sodio intercambiable de suelos salino-sódicos.
- Evaluar la concentración de sales iniciales ( $S_i$ ) y residuales ( $S_o$ ) del suelo, en función del tratamiento utilizado, y su influencia en cambios de la estructura de los mismos.
- Determinar el grado de restricción de uso de estas aguas, en función de su relación de adsorción de sodio, conductividad eléctrica, pH, cationes y aniones solubles, entre otros.

## V. METODOLOGÍA

### V.1 Plan de Trabajo.

El trabajo experimental se dividió en 3 fases, que incluyeron las siguientes actividades:

I. Caracterización química y microbiológica de las aguas residuales y caracterización físico-química de suelos.

- Caracterización del influente a tratar (aguas residuales provenientes del sedimentador de la UMAR), agua de pozo de uso agrícola y agua tratada.
- Caracterización físico-química de los suelos muestreados para el desarrollo del presente estudio.

II. Tratamiento de aguas residuales

- Implementación del sistema de tratamiento de aguas residuales a nivel laboratorio.
- Arranque y estabilización del sistema de tratamiento de aguas residuales.
- Operación, mantenimiento y seguimiento del sistema de tratamiento para obtener el efluente tratado.

III. Ensayos en condiciones de invernadero y laboratorio para determinar la lixiviación de sales.

- Experimento para determinar el efecto del lavado del suelo con cuatro tratamientos de agua sobre el desplazamiento de sales y algunos parámetros fisicoquímicos de los suelos materia de estudio.

### V.2 Diseños Experimentales.

#### V.2.1 Diseño experimental Fase 1.

***Caracterización físico-química de las aguas residuales tratadas y agua de pozo de uso agrícola.***

Se realizaron los primeros análisis al efluente tratado proveniente del reactor al inicio de su operación, siguiendo el calendario señalado en la tabla 6, y de acuerdo a técnicas de laboratorio estándar (*APHA AWWA WPCF, 1998*), así también se llevó a cabo la caracterización físico-química a las muestras de aguas tomadas del pozo noria, del cual se abastecen de agua para el riego de los terrenos de cultivo del sitio del proyecto.

La caracterización de estas aguas, tuvo como fin el conocer sus condiciones iniciales para su uso en el tratamiento de lavado de suelos. Las técnicas empleadas para la caracterización de las aguas residuales tratadas y las aguas de pozo para el riego, se mencionan en la tabla 4.

**Tabla 4.** Metodología para la caracterización de las aguas residuales tratadas y de pozo.

PARÁMETRO	METODOLOGÍA
<b>Agua residual tratada</b>	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método Semi-micro (APHA AWWA WPCF, 1998)
pH	Richards, L.A., et-al. 1982
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	Método 2540 D (APHA AWWA WPCF, 1998).
Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV)	Método 2540 E (APHA AWWA WPCF, 1998)
Índice Volumétrico de Lodos (IVL)	Ramallo, R.S. 1996
Coliformes Fecales	NMX-AA-42-1987
Huevos de Helminto	Ayres, R.M., et-al. 1996
<b>Agua de Pozo</b>	
Cationes y aniones solubles	Richards, L.A., et-al. 1982
pH	Richards, L.A., et-al. 1982
Conductividad Eléctrica (C.E.)	Richards, L.A., et-al. 1982 NOM-021-RECNAT-2000
Relación de Adsorción de Sodio (RAS)	
$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{++}] + [Mg^{++}]}{2}}}$	Richards, L.A., et-al. 1982
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)	
$PSI = \frac{100(-0.0126 + 0.01475 RAS)}{1 + (-0.0126 + 0.01475 RAS)}$	Richards, L.A., et-al. 1982

### **Caracterización físico-química de los suelos de estudio.**

#### *1) Muestreo y colecta de suelos:*

El sitio localizado en las coordenadas geográficas 15°49.005' de Latitud Norte y 97°1.774' de Longitud Oeste, fue el seleccionado para llevar a cabo el muestreo y colecta de los monolitos de suelo, por lo tanto se procedió al muestreo en cuatro distintos puntos del predio, por el método de zigzag (*NOM-021-RECNAT-2000*). Dada la homogeneidad del suelo y la escasa vegetación en el lugar, se establecieron los monolitos a una distancia de 10 m entre cada punto de muestreo. (Figura 5)



**Figura 5.** Panorámica del predio muestreado.

Las muestras de suelo se colectaron por capas de 20 centímetros de espesor, y la profundidad del muestreo se determinó con base al nivel freático del lugar, es decir se obtuvieron muestras hasta encontrar el manto freático, la profundidad de muestreo de los cuatro sitios fue de 0.80 m de profundidad, cota a la que se presentaron las primeras emanaciones de agua freática. (Figura 6)



**Figura 6.** Monolito muestreado en el espesor 0-80 cm, hasta el nivel freático.

Las muestras de suelo se colocaron en bolsas de polietileno de 4 kg, etiquetadas con los respectivos datos de identificación, para iniciar con los trabajos de secado y tamizado del material para los análisis respectivos. (Figura 7)



**Figura 7.** Colecta de muestras.

La clase textural del suelo fue determinada mediante la técnica del Hidrómetro de Bouyoucos, en capítulos posteriores se presentaran los resultados correspondientes.

*2) Preparación de las Muestras en Laboratorio:*

Las muestras de suelo fueron secadas al ambiente, (Figura 8), evitando su contaminación, y tamizadas a través de la malla número 10 (2 mm de apertura), finalmente se realizaron las determinaciones fisicoquímicas, que se presentan en anexos.



**Figura 8.** Secado de las muestras.

### 3) Caracterización físico-química:

La caracterización de los suelos de La Barra de Colotepec, se realizó con base a sus propiedades físico-químicas, haciendo énfasis en los más útiles para la presente investigación como son: textura, densidad aparente, cationes y aniones básicos, pH, C.E. y las relacionadas con la capacidad de retención de agua en el suelo.

**Tabla 5.** Metodologías para la caracterización de los suelos de estudio.

PARÁMETRO	METODOLOGÍA
Textura	NOM-021-RECNAT-2000
Densidad aparente	Richards, L.A., et-al. 1982
Contenido de humedad y por ciento de saturación	Richards, L.A., et-al. 1982
Cationes y Aniones solubles	Richards, L.A., et-al. 1982
pH	Richards, L.A., et-al. 1982
Conductividad Eléctrica (C.E.)	Richards, L.A., et-al. 1982
Residuo seco evaporado y calcinado (RSE-RSC)	Richards, L.A., et-al. 1982
Relación de Adsorción de Sodio (RAS)	Richards, L.A., et-al. 1982
$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{++}] + [Mg^{++}]}{2}}}$	
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)	Richards, L.A., et-al. 1982
$PSI = \frac{100(-0.0126 + 0.01475 RAS)}{1 + (-0.0126 + 0.01475 RAS)}$	

## V.2.2 Diseño experimental Fase 2.

### *Tratamiento de las aguas residuales municipales.*

En el presente trabajo, se llevó a cabo la instalación de un sistema de tratamiento de aguas residuales municipales de lodos activados operado en lote secuencial (SBR por sus siglas en ingles), para obtener un efluente tratado que cumpliera con la normatividad para su uso en los experimentos de lavado de suelos en columnas, para remover las sales solubles en suelos, objeto de estudio.

Se seleccionó un sistema biológico de lodos activados operado en lote secuencial, para dar tratamiento a un gasto promedio de 216 L·d<sup>-1</sup>, instalado en una estructura rectangular de plexiglás, la operación fue del tipo “llenar y vaciar”, con un sólo sistema de reactor de mezcla completa donde todos los pasos del proceso de lodos activados ocurren en el mismo sitio, es decir, las funciones de aireación, sedimentación y decantación se llevaron a cabo en el mismo reactor. (Figura 9)



**Figura 9.** Reactor biológico de lodos activados operado en lote secuencial.

Para su arranque, se inoculó con lodos provenientes de un reactor biológico en operación, y se alimentó durante su periodo de operación con aguas residuales provenientes de los servicios sanitarios de la cafetería de la Universidad del Mar. (Figura 10)

Los parámetros determinados al lodo biológico del reactor fueron: DQO, SST y SSV con base a técnicas gravimétricas especificadas en Standard Methods (1998) y de acuerdo al programa mostrado en la Tabla 6.



**Figura 10.** Proceso de sedimentación del reactor después de un tiempo de retención hidráulico de 45.6 h.

**Tabla 6.** Programa de análisis físico-químicos para el Reactor Biológico de Lodos Activados.

PARÁMETRO	INFLUENTE	EFLUENTE
Demanda Química de oxígeno (DQO)	3 / Semana	3 / Semana
pH	Diario	Diario
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	3 / Semana	3 / Semana
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	3 / Semana	3 / Semana
Conductividad Eléctrica (CE)	Diario	Diario
Coliformes Fecales	2 / Mes	1 / Mes
Huevos de Helminto	-	-

Las técnicas empleadas para la caracterización de las aguas residuales, lodos del reactor y efluente tratado, se mencionan en la Tabla 4.

### V.2.3 Diseño experimental Fase 3.

#### *Proceso de lixiviación de sales de los suelos en estudio.*

El proceso de lavado de suelos en columnas se realizó para remover las sales solubles presentes en los espesores del perfil natural de un suelo con problemas de salinidad, inicialmente se aplicó un volumen activo de lavado el cual desplazo las sales solubles removiéndolas de horizontes superiores a horizontes inferiores, a fin de disminuir la concentración de sales del espesor de suelo donde se desarrollan las raíces de las plantas.

#### *Montaje experimental*

El montaje experimental consistió en el establecimiento de dos mesas de madera con estructuras de acero, para operar seis columnas cada mesa de lavado correspondiente a los tratamientos del diseño experimental. (Figura 11)



**Figura 11.** Mesas de Lavado para el proceso de lixiviación de sales.

Las columnas se construyeron con tubería de PVC hidráulico de 6" de diámetro, a las cuales se les empacó un espesor total de suelo de 50 cm. Previamente cada tubo fue cubierto con una película de 2 mm de espesor de parafina, con el objeto de evitar que por las paredes lisas del tubo se presentará un desplazamiento mayor del volumen activo de lavado, formando con el recubrimiento con parafina una superficie de contacto más rugosa entre la pared del tubo y el suelo.

Se consideró un espesor total de 50 cm en el llenado de las columnas, debido a que con base a los análisis físico-químicos del suelo, no hubo diferencia significativa entre los espesores 40-60cm y 60-80 cm, asumiendo además que la capa de 50 cm, representa la zona de interacción entre las sales con las raíces de las plantas cultivadas.

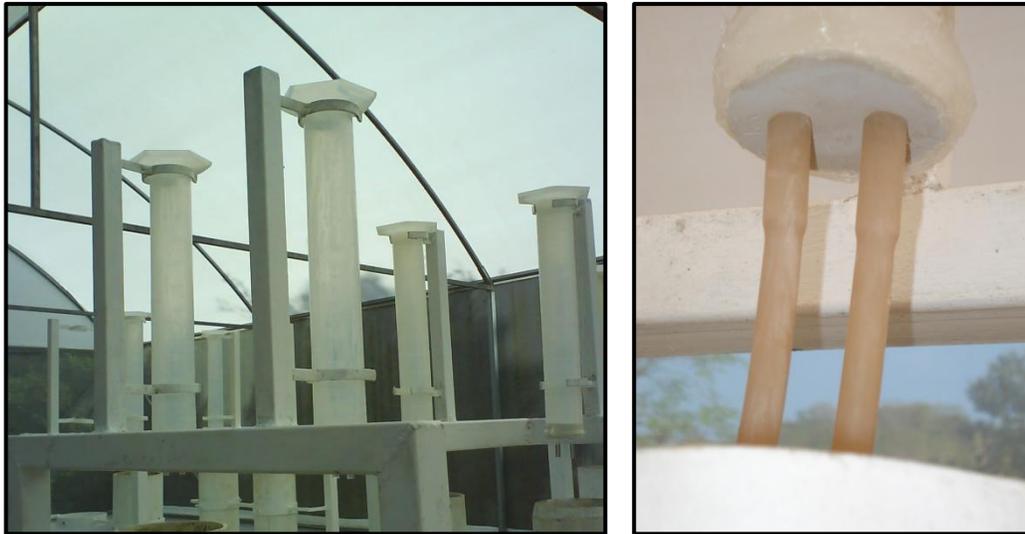
Se llenaron las columnas, por capas de 5 cm de espesor, compactándose con un pisón metálico cada capa de suelo hasta formar una columna de suelo de 50 cm.

Empacadas todas las columnas con el suelo experimental, se instalaron en las mesas, montándose cada columna sobre embudos de plástico (figura 12), que sirvieron de base y a su vez facilitaron la colecta de los efluentes del lavado en botes de plástico.



**Figura 12.** Colocación de columnas sobre las mesas.

Las columnas se sujetaron a las estructuras metálicas para mantenerlas de forma vertical; en la parte superior de las columnas se colocaron probetas tipo Mariotte de 1000 mL de capacidad, que contenían las diferentes aguas para los tratamientos de lavado. (Figura 13)



**Figura 13.** Probetas tipo Mariotte instaladas sobre las columnas.

Las probetas tipo Mariotte de 1000 mL de capacidad, se sellaron con un tapón de hule, colocándoles a cada tapón dos tubos de vidrio de 1.0 cm. de diámetro y 6.0 cm de longitud, para conectarles mangueras de hule de 1.0 cm de diámetro y 30 cm de longitud, uno de los tubos permitió mantener la carga hidráulica de agua de 10 cm mientras el otro hizo el efecto de vacío, para que la probeta liberará agua conforme se infiltraba en la columna de suelo.

#### ***Volúmenes activos de lavado establecidos.***

Los volúmenes activos de lavado se calcularon con la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_a}{Q_\pi} = 0, 1, 2, \dots, n$$

Dónde:

$Q_a$  = es el volumen de agua con que un suelo llega a su capacidad de saturación más otro volumen igual, y así sucesivamente.

$Q_\pi$  = es la cantidad de agua necesaria para llevar el suelo a capacidad de saturación.

En el presente trabajo se emplearon los volúmenes activos de lavado 0 y 1, expresados de la siguiente manera:

$$\frac{Q_a}{Q_\pi} = 0, 1$$

Al efecto es importante señalar que un volumen poroso= 0 es la cantidad de agua necesaria para llevar el suelo a capacidad de saturación; un volumen poroso= 1, es el volumen de agua con que un suelo llega a su capacidad de saturación más otro volumen igual y así sucesivamente.

**Lavado de suelos.**

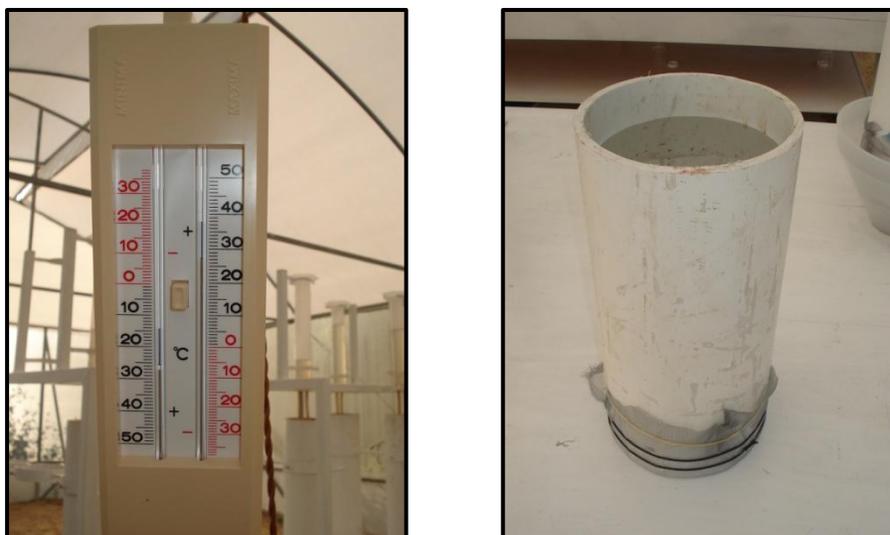
Se propuso un diseño experimental completamente aleatorizado (*Montgomery, D.C. 1991*), con tres tratamientos empleando diferentes calidades de efluentes (por triplicado) y un control (con agua destilada), lo que arroja un lote experimental de nueve unidades experimentales (nueve columnas de suelo) más la columna de control o testigo. En la tabla 7 se describen los tratamientos realizados.

**Tabla 7.** Diseño experimental del proceso de lavado de sales en columnas de suelo de La Barra de Colotepec, Oaxaca.

TRATAMIENTOS	TRATAMIENTO/CALIDAD DE AGUA	REPLICAS
T-1	Agua residual tratada	3
T-2	Agua de pozo	3
T-3	Mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción (1:1)	3
T-4	Agua destilada (control).	1

Las probetas tipo Mariotte, se llenaron hasta su capacidad nominal para cada tratamiento, aplicándose al inicio del proceso de lavado en columnas una lámina de agua de 10 cm, manteniéndose constante dicha lámina durante todo el proceso de lavado.

La carga hidráulica de cada columna se mantuvo hasta obtener los volúmenes porosos de lavado  $Q_a/Q_\pi$  determinados para el experimento. Se llevó a cabo un control de la temperatura y evaporación al interior del invernadero, para lo cual se instaló un termómetro de máximas y mínimas con el objeto de registrar diariamente la temperatura del invernadero y un tubo con empaque de suelo sellado con una capa de parafina de 5 cm, el cual tuvo la función de plato de evaporación, empleado para medir la evapotranspiración del agua experimental durante el proceso de lavado. (Figura 14)



**Figura 14.** Termómetro de Max-Min y Plato de evaporación.

Para efectos de cuantificar los volúmenes evaporados diarios, se empleó el siguiente procedimiento:

$$\text{Lámina evaporada (mm)} = \frac{V_e}{A} \times 10$$

Dónde:

$V_e$  = volumen evaporado diario

$A$  = área de la sección transversal de la columna = 182.42 cm<sup>2</sup>  
considerando un diámetro de columna de 15.24 cm.

10 = factor de conversión de cm a mm.

*Determinación de la lámina activa de lavado:*

$$\text{Lámina activa de lavado} = \left[ \begin{array}{c} \text{Lámina bruta} \\ \text{en cm} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Carga hidráulica} \\ \text{en cm} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Evaporación} \\ \text{en mm/10} \end{array} \right] + \pi cs$$

Dónde:

Carga: 10 cm.

10 = factor de conversión de mm a cm.

$\pi cs$  = volumen poroso de saturación del suelo expresado en cm.

### ***Obtención de los volúmenes porosos de lavado y colecta de muestras.***

El primer volumen poroso  $Q_a/Q_\pi = 0$ , se obtuvo en el momento en que cayó la primera gota del efluente lixiviado, cuando el suelo en la columna alcanzó su capacidad de saturación, iniciándose así la colecta de extractos acuosos o lixiviados del proceso de lavado en volúmenes de 100 ml. (Figura 15)

El proceso continuó hasta obtener el segundo volumen poroso de lavado ( $Q_a/Q_\pi = 1$ ), que fue el volumen de agua con que cada columna de suelo llegó a su capacidad de saturación más otro volumen igual.

Al infiltrar todo el segundo volumen de agua a través de la columna, finalizó el experimento y se procedió con el desmonte de las columnas. El tiempo de filtrado fue variable dependiendo de los diferentes tratamientos con los efluentes empleados y las condiciones particulares de cada columna empacada.



**Figura 15.** Colecta de muestras durante el proceso de lavado a cada 100 ml.

### ***Desmontado de las columnas y extracción del suelo.***

El proceso de lavado tuvo una duración de 103 días, contabilizados desde la instalación de las 10 columnas de lavado hasta la desinstalación de la última.

Finalizado el experimento de lavado, se extrajeron los suelos de las columnas en capas de 5 cm colocándose sobre plásticos para su secado al ambiente, cuidando de no contaminarse; una vez secos se almacenaron en bolsas de plástico para su traslado al laboratorio y correspondiente análisis. (Figura 16)



**Figura 16.** Secado y almacenado de muestras de suelo posterior al proceso de lavado.

### ***Análisis físico - químico de las muestras colectadas durante el proceso de lavado.***

Las muestras colectadas durante el experimento de lavado de sales fueron analizadas, determinándose los parámetros señalados en la tabla 8, para cuantificar la cantidad de sales removidas por cada tratamiento efectuado (Figuras 17 y 18), construyéndose posteriormente las curvas de lixiviación en forma cuantitativa.



**Figura 17.** Análisis de los extractos acuosos provenientes del lavado de suelos en columnas.



**Figura 18.** Determinación de la salinidad a muestras de lavado por columnas.

**Tabla 8.** Metodologías para la caracterización de los efluentes lixiviados.

PARÁMETRO	METODOLOGÍA
Cationes y aniones solubles	Richards, L.A., et-al. 1982
pH	Richards, L.A., et-al. 1982
Conductividad Eléctrica (C.E.)	Richards, L.A., et-al. 1982 NOM-021-RECNAT-2000
Residuo Seco evaporado y calcinado (RSE-RSC)	Richards, L.A., et-al. 1982
Relación de Adsorción de Sodio (RAS)	Richards, L.A., et-al. 1982
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)	Richards, L.A., et-al. 1982

**Análisis físico – químico de los espesores de suelo, posterior al proceso de lavado.**

Los suelos de las columnas experimentales, posterior al proceso de lavado y secados al ambiente, se les determinó los siguientes parámetros:

**Tabla 9.** Metodologías para la caracterización de los suelos post lavados.

PARÁMETRO	METODOLOGÍA
Cationes y Aniones	Richards, L.A., et-al. 1982
pH	Richards, L.A., et-al. 1982
Conductividad Eléctrica (C.E.)	Richards, L.A., et-al. 1982
Residuo seco evaporado y calcinado (RSE-RSC)	Richards, L.A., et-al. 1982
Relación de Adsorción de Sodio (RAS)	Richards, L.A., et-al. 1982
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)	Richards, L.A., et-al. 1982

Cabe señalar que con los resultados obtenidos del proceso de evaluación de la salinidad residual, los datos fueron sometidos a proceso de análisis estadístico con el objeto de determinar diferencias significativas entre los tratamientos experimentados. (Figura 19)



**Figura 19.** Determinación de la salinidad residual a las columnas posterior al proceso de lavado.

**Análisis estadístico de los resultados experimentales**

El diseño del presente experimento se realizó con base en un modelo completamente al azar, con tres tratamientos y tres repeticiones más un control, lo que dio un total de 10 unidades experimentales. Los resultados de las concentraciones salinas residuales de cada tratamiento se promediaron y se determinó su desviación estándar y coeficiente de variación. El análisis de varianza para determinar diferencias significativas con probabilidad de  $p < 0.5$  se realizó mediante el paquete computacional SAS (1996).

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

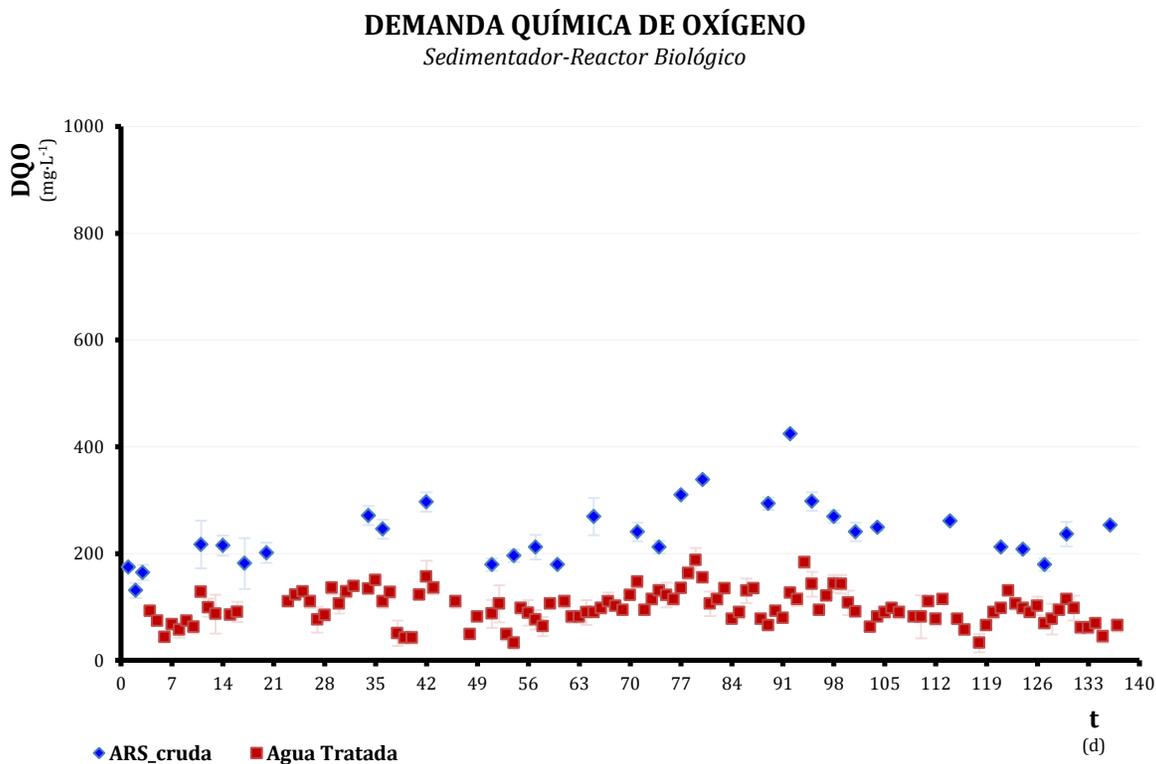
### VI.1 Seguimiento del reactor biológico operando en lote secuencial.

Se inoculó el reactor con lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales de Bahías de Huatulco, operándose en la primera semana como lote alimentado, para permitir la aclimatación de la biomasa a las nuevas condiciones de operación.

El período de estabilización del reactor fue la etapa fundamental del proceso, debido a que determinó las condiciones de operación y de buen funcionamiento.

La aclimatación de los microorganismos se consiguió alimentando al reactor con aguas residuales provenientes de servicios sanitarios (aguas negras y grises) y de la cafetería de la Universidad del Mar, se midieron los siguientes parámetros a los lodos usados como inóculo del reactor, SST= 10,100 mg·L<sup>-1</sup> y SSV= 7,500 mg·L<sup>-1</sup>. El sistema se estabilizó aproximadamente en 30 días, para lo cual se tomó como referencia el mantener valores de biomasa estable alrededor de 3,000 mg·L<sup>-1</sup>.

El reactor se mantuvo en operación por aproximadamente 12 meses, obteniéndose los siguientes resultados.



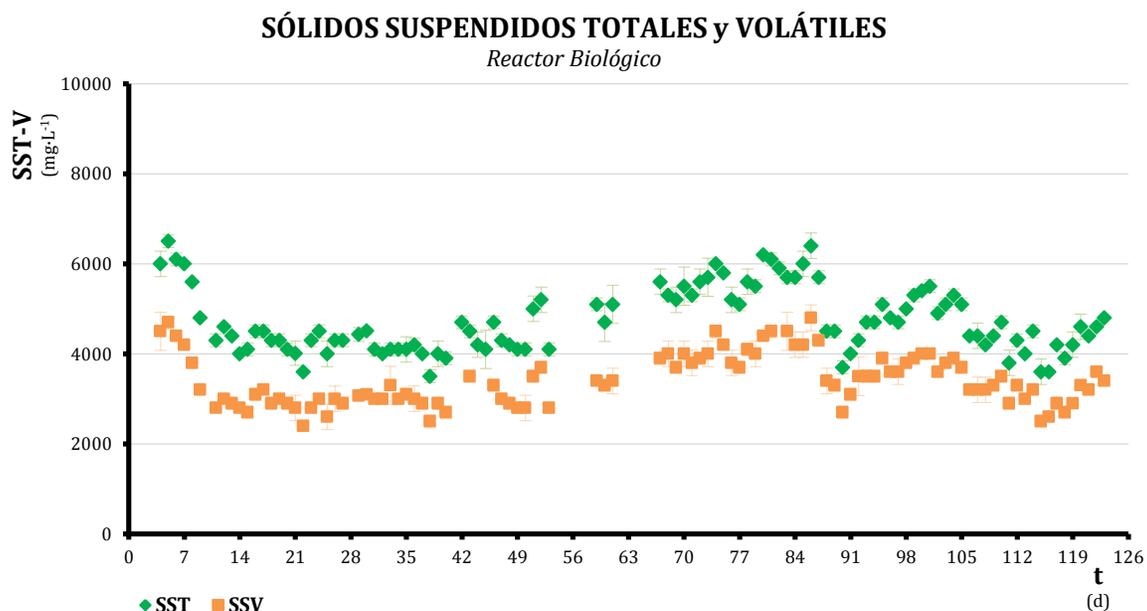
**Figura 20.** Demanda Química de Oxígeno, de los influentes (ARS\_cruda) y efluentes (agua tratada) del reactor.

El reactor operó a un flujo de  $216 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ , lo cual implica un tiempo de retención hidráulico de 1.9 días (45.6 h). Se determinaron los parámetros de seguimiento y operación de acuerdo a lo especificado en la Tabla 6.

Conforme el reactor se adaptó a las condiciones de alimentación y ambiente, el tiempo de retención hidráulica fue de 45.6 horas. Durante su estabilización se presentó crecimiento de organismos filamentosos en las primeras dos semanas de operación, estas condiciones se debieron a que los parámetros de operación del reactor biológico de tratamiento, tales como: pH, Temperatura (t), Demanda Química de Oxígeno del agua residual sin tratamiento ( $\text{DQO}_{\text{influyente}}$ ), Demanda Química de Oxígeno del agua tratada ( $\text{DQO}_{\text{efluente}}$ ), Sólidos Suspendidos Totales del lodo biológico (SST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) e Índice Volumétrico de Lodos (IVL) se encontraban en fase de estabilización para llegar a sus valores de óptimos operación.

Durante el proceso de respiración endógena, se metaboliza un material citoplasmático rico en proteínas y ácido ribonucleico (ARN); el residuo está constituido principalmente por cápsulas celulares muy ligeras que se resisten a la sedimentación. Esta es la razón por la cual, las relaciones bajas de F/M ( $< 0.3 \text{ d}^{-1}$ ) hacen que el lodo tenga unas características muy pobres de decantación (flóculos dispersos); mientras que a relaciones de F/M elevadas ( $> 0.6 \text{ d}^{-1}$ ) predominan un tipo de microorganismos de naturaleza filamentososa, provocando un lodo inflado, que impide la sedimentación al permanecer en suspensión casi continuamente, los valores óptimos para la relación F/M en la mayoría de las aguas se encuentra entre 0.3-0.6 expresada en  $\text{kg DBO}_5 \text{ influyente}/(\text{d})(\text{kg SSTLM})$ , (Ramalho, R.S., 1996).

La caracterización del influente como del efluente, durante la operación del reactor, se hizo con base a la medición de los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), el cual promedió un valor de  $\text{DQO}_{\text{influyente}} = 237.51 \text{ mg}\cdot\text{O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{DQO}_{\text{efluente}} = 98.49 \text{ mg}\cdot\text{O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ , el pH del licor mezclado estuvo en el intervalo 6.5 a 7.5.

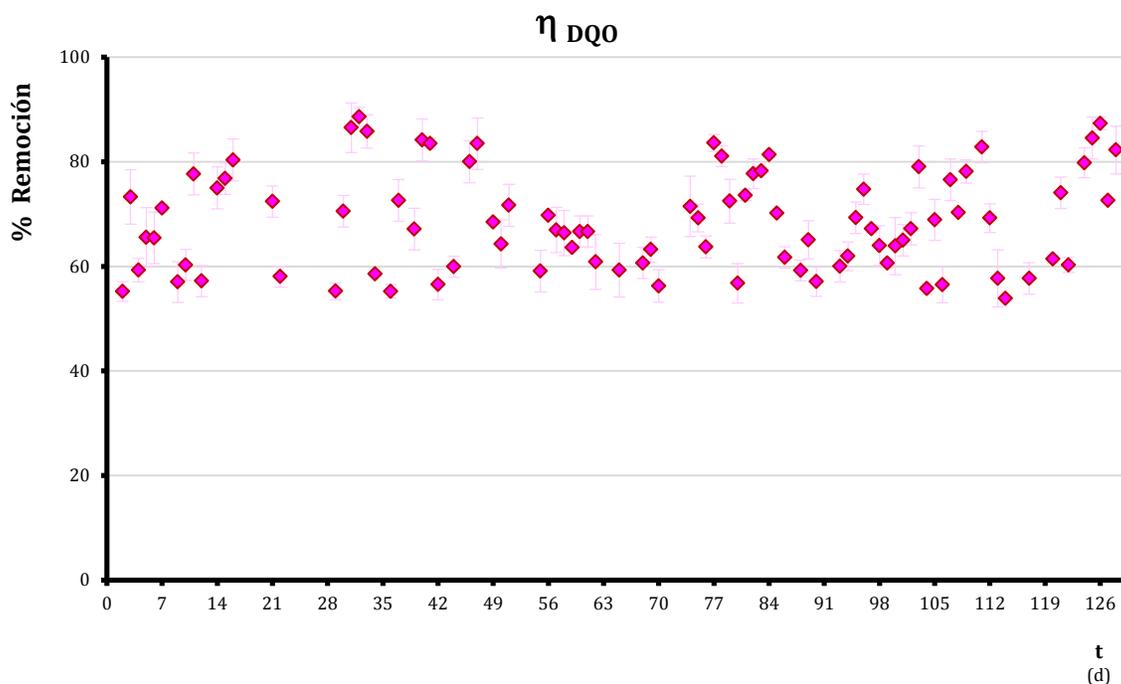


**Figura 21.** Sólidos Suspendidos Totales y Volátiles en el licor mezclado del reactor.

Los resultados de las pruebas realizadas al licor mezclado del reactor biológico en su etapa de operación, determinado por los parámetros SST y SSV, se grafican en la figura 19, los valores promedio para cada parámetro son: SST= 4,733 mg·L<sup>-1</sup> y SSV= 3,405 mg·L<sup>-1</sup>. En un proceso convencional de lodos la concentración de SSV está comprendida entre los valores de 2000–3000 mg·L<sup>-1</sup>, trabajando bajo condiciones de mezcla completa (Ramalho, R.S., 1996). Por lo tanto se puede concluir que el proceso de tratamiento se mantuvo en un intervalo aceptable de operación, con base a los parámetros estudiados.

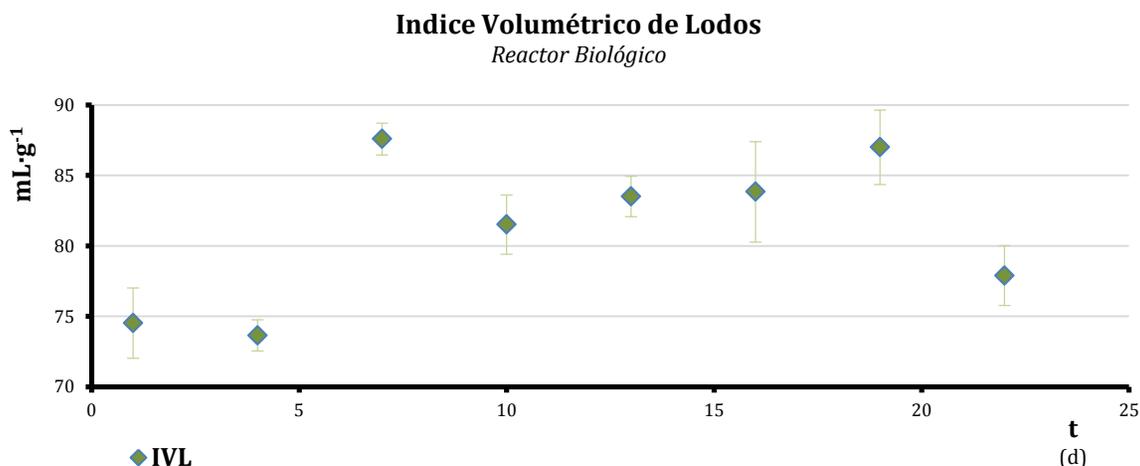
No obstante que los resultados se mantuvieron estables, hubo algunos periodos de desestabilización durante la etapa de operación, como se aprecia en la figura 19, en el periodo de los días 70 al 84, los valores de SST y SSV incrementaron su concentración, la causa fue básicamente por la escasez de influente para alimentar el reactor, debido a que la fuente principal de generación de A.R. (población estudiantil) disminuyó drásticamente en los periodos vacacionales de la Universidad, y al realizar la alimentación del reactor desde el cárcamo de sedimentación, solo se bombeaban lodos sedimentados en el cárcamo, en consecuencia aumentaba la concentración de lodos en el reactor.

La relación de sólidos volátiles a sólidos totales (SSV/SST) en las plantas de lodos activados está comprendido normalmente dentro del intervalo 80 a 90%. Para el reactor biológico, el valor promedio de esta relación fue 71% de sólidos en suspensión volátiles.



**Figura 22.** Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno en el reactor.

Las determinaciones de materia orgánica, tuvieron valores promedio de:  $DQO_{\text{influyente}} = 237.51 \text{ mg}\cdot\text{O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $DQO_{\text{efluente}} = 98.49 \text{ mg}\cdot\text{O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ , la figura 22 muestra los porcentajes de remoción que alcanzó el reactor durante su etapa de operación, cuyo valor promedio fue de  $\eta_{DQO} \text{ remoción} = 68.58 \%$ , siendo este un valor aceptable para plantas de este tipo, que fluctúan en el intervalo de 60 a 80% (Metcalf-Eddy Inc. 2003).



**Figura 23.** Resultados del Índice Volumétrico de Lodos del reactor.

El parámetro de índice volumétrico de lodos (IVL), muestra el funcionamiento adecuado de los lodos activos, toda vez que los SST del efluente tratado del reactor deben separarse rápidamente durante el proceso de clarificado y decantación. Se determinó el IVL posterior al periodo de aclimatación de los lodos del reactor, cuyos resultados fluctuaron entre el intervalo 73.65 y 87.58 mL·g<sup>-1</sup> promediando un valor durante la operación del reactor de 81.19 mL·g<sup>-1</sup> considerado aceptable para este tipo de sistemas de tratamiento, porque los valores típicos de IVL con características apropiadas de sedimentación están comprendidos dentro del intervalo 35 a 150 (*Ramalho, R.S., 1996*). La figura 23 muestra los resultados obtenidos al respecto. Al graficar los valores se representan en el eje de las abscisas la escala del tiempo en días, como una simplificación de representación de dichos análisis.

La caracterización microbiológica de las aguas residuales tratadas para determinar coliformes fecales (termotolerantes) en el efluente del reactor biológico se realizó con base al método propuesto en la norma mexicana NMX-AA-42-1987, que es mediante el cultivo en un medio líquido en tubos múltiples de fermentación y el cálculo de sus números más probables (NPM) en la muestra; los resultados de la prueba fue de 100 número más probable (NMP); se comparó el resultado obtenido en la prueba anterior, con los límites máximos permisibles de contaminantes patógenos y parásitos presentes en aguas residuales tratadas que vayan a ser reutilizadas en servicios al público con contacto directo, establecidos en la norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, cuyo valor es de 240 como NMP/100 ml, por lo tanto se constató que el efluente obtenido en el reactor biológico se pudo emplear para los trabajos experimentales siguientes.

El análisis del agua residual tratada para determinar huevos de helminto medidos como h·l<sup>-1</sup> (huevos por litro), se determinó con base al método modificado de Bailenger (*Ayres, R.M., et-al. 1996*), el resultado fue nula existencia de parásitos u organismo de este tipo en el efluente del reactor biológico de lodos activados, comparando el resultado con los límites máximos permisibles que establece la norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, la cual es de  $\leq 1$  huevo de helminto por litro (promedio mensual) para aguas residuales tratadas y con reuso al público con contacto directo, por lo tanto fue procedente su uso en los experimentos donde se empleó el efluente.

La temperatura de operación del reactor osciló entre 28 a 32° C, y el pH del líquido mezclado se registró en el intervalo de 6.5 a 7.5, lo cual también resultó favorable para el proceso porque a pH neutros la concurrencia de microorganismos en los procesos biológicos de tratamiento degradan mejor la materia orgánica. Además, se presentaron problemas al momento de la separación de los sólidos, ya que la presencia de organismos filamentosos generados formaban una nata o espuma de lodos, a lo que comúnmente se le llama lodo inflado o “Bulking” presentando una pobre sedimentación.

Los problemas de sedimentación en la fase de decantación del agua tratada, se presentaron al inicio de la etapa de operación del reactor, durante su proceso de estabilización, debido a una baja relación F/M (alimento – microorganismos), cuyo valor óptimo de dicha relación está comprendido entre 0.3 a 0.6 (*Ramalho, R.S., 1996*). Estos problemas se presentaron con mayor frecuencia cuando disminuía el volumen del influente, también cuando los conductos de oxigenación del sistema de aireación se taponaban y no mantenía una mezcla homogénea del licor mezclado. El mantenimiento a los difusores fue permanente realizándose además adecuaciones a la red de tuberías, consistiendo estas en disminuir los orificios de salida de los difusores ya que en un principio estos diámetros eran de 2 a 3 mm aproximadamente, generando caídas de presión en el sistema. Se cambiaron las líneas de alimentación con orificio de 1 mm de diámetro, lo cual mantuvo una proporción de oxígeno disuelto de no menos 0.5 mg·L<sup>-1</sup>, cuyo valor óptimo debió fluctuar entre 1.5 a 4 mg·L<sup>-1</sup> en todo el tanque.

## VI.2 Caracterización de los efluentes para los ensayos de lavado.

Los resultados promedio del análisis físico-químico a las aguas empleadas para los experimentos de lixiviación (agua residual tratada, agua de pozo, mezcla de agua residual tratada - agua de pozo proporción 1:1 y agua destilada), se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla 10.** Caracterización físico – química de las aguas para los tratamientos de lavado.

Tipo de Agua Muestreada	pH	t °C	C.E. $\mu S \cdot cm^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	RAS	PSI
									<i>meq·L<sup>-1</sup></i>						
Agua tratada	7.90	24.70	1558	3.00	4.90	10.60	0.79	<b>19.29</b>	0.00	2.32	13.00	3.18	<b>18.50</b>	5.33	6.20
Agua de Pozo	7.96	24.60	680	1.40	0.80	1.10	0.03	<b>3.33</b>	0.00	1.84	2.30	1.13	<b>5.27</b>	1.05	0.29
Mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, prop. 1:1	7.92	24.67	1150	2.20	2.80	5.90	0.40	<b>11.30</b>	0.00	2.10	7.65	2.17	<b>11.92</b>	3.73	4.07
Agua destilada	7.00	21.8	29.8	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>0.0</b>	0.0	0.0

Se realizó la comparación de los resultados obtenidos, primeramente del agua residual tratada, para constatar la calidad química de un agua empleada para uso consuntivo; en relación a los parámetros de RAS y C.E., graficándose en el diagrama que propone el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (1984), figura 24, los valores de C.E.= 1,558  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y RAS= 5.33 del agua residual tratada, corresponden de acuerdo a la clasificación que proponen Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1994, a un tipo de agua **C3-S2**, que significa de alta concentración salina y con porcentaje de sodio medio.

Siguiendo los mismos criterios de comparación, con relación a los resultados promedio de: C.E.= 680  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y RAS= 1.05 del agua de pozo, su clasificación corresponde a un tipo de agua **C2-S1**, que significa de salinidad media lo que permite emplearla en el riego de cultivos con plantas de moderada tolerancia a la salinidad y el porcentaje de sodio es bajo, en general esta fuente hídrica se considera de buena calidad para uso agrícola.

Los resultados promedio de: C.E.= 1,150  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y un RAS= 3.73, correspondiente a la mezcla de agua residual tratada - agua de pozo, en proporción 1:1, su clasificación fue **C3-S1**, que significa de salinidad alta y bajo porcentaje de sodio, haciéndola apta para el uso en el riego de cultivos muy tolerantes a sales sin riesgo a alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable.

La interpretación de las distintas clasificaciones obtenidas para cada tipo de agua se detalla a continuación:

<b>Agua Altamente Salina (C3)</b>	No puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado se pueden necesitar practicas especiales de control de la salinidad, debiendo, por lo tanto, seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a sales.
<b>Agua media en Sodio (S2)</b>	En suelos de textura fina el sodio representa un peligro considerable, más aun si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas sólo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.
<b>Agua de Salinidad Media (C2)</b>	Puede usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, se pueden producir las plantas moderadamente tolerantes a las sales.
<b>Agua Baja en Sodio (S1)</b>	Puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

<b>Agua Altamente Salina (C3)</b>	No puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado se pueden necesitar practicas especiales de control de la salinidad, debiendo, por lo tanto, seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a sales.
<b>Agua Baja en Sodio (S1)</b>	Puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

***En relación al análisis por el contenido de Sodio (Na):***

Siguiendo los criterios que propone la FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985*), para clasificación de las aguas de riego, se obtuvieron los resultados siguientes:

- El agua de pozo en cuanto a salinidad no se tiene ninguna restricción y su infiltración va de ligero a moderado.
- El agua residual tratada su grado de restricción es de ligero a moderado en su uso por Salinidad y no se tiene ningún problema por infiltración.
- La mezcla de agua residual tratada-agua de pozo, se encuentra en un término medio de acuerdo a sus características químicas, no obstante de acuerdo a los criterios anteriores, por salinidad su grado de restricción es moderado al igual que las afectaciones que pudiera sufrir por infiltración.

De acuerdo a los criterios establecidos por la FAO, el agua residual tratada y la mezcla presentan restricciones de moderadas a altas, con relación a su alto contenido de salinidad y medio en sodio, mientras que el agua de pozo se cataloga como de calidad media a aceptable para ser empleada para uso agrícola, en cuanto al RAS, las tres aguas pueden ser empleadas con las restricciones del caso para riego. En conclusión, las tres aguas que se emplearon en los lavados de suelos, presentaron el riesgo de Comparando las características químicas de las aguas que se emplearon en el lavado de suelos, el agua tratada es la que presenta las mayor restricción para el uso consuntivo, por el contenido alto de sales que presenta en su composición química, por consiguiente el agua de pozo se encuentra dentro de los estándares permisibles para ser empleada, no obstante se utilizaron las tres aguas y se compararon los resultados obtenidos en cada caso.

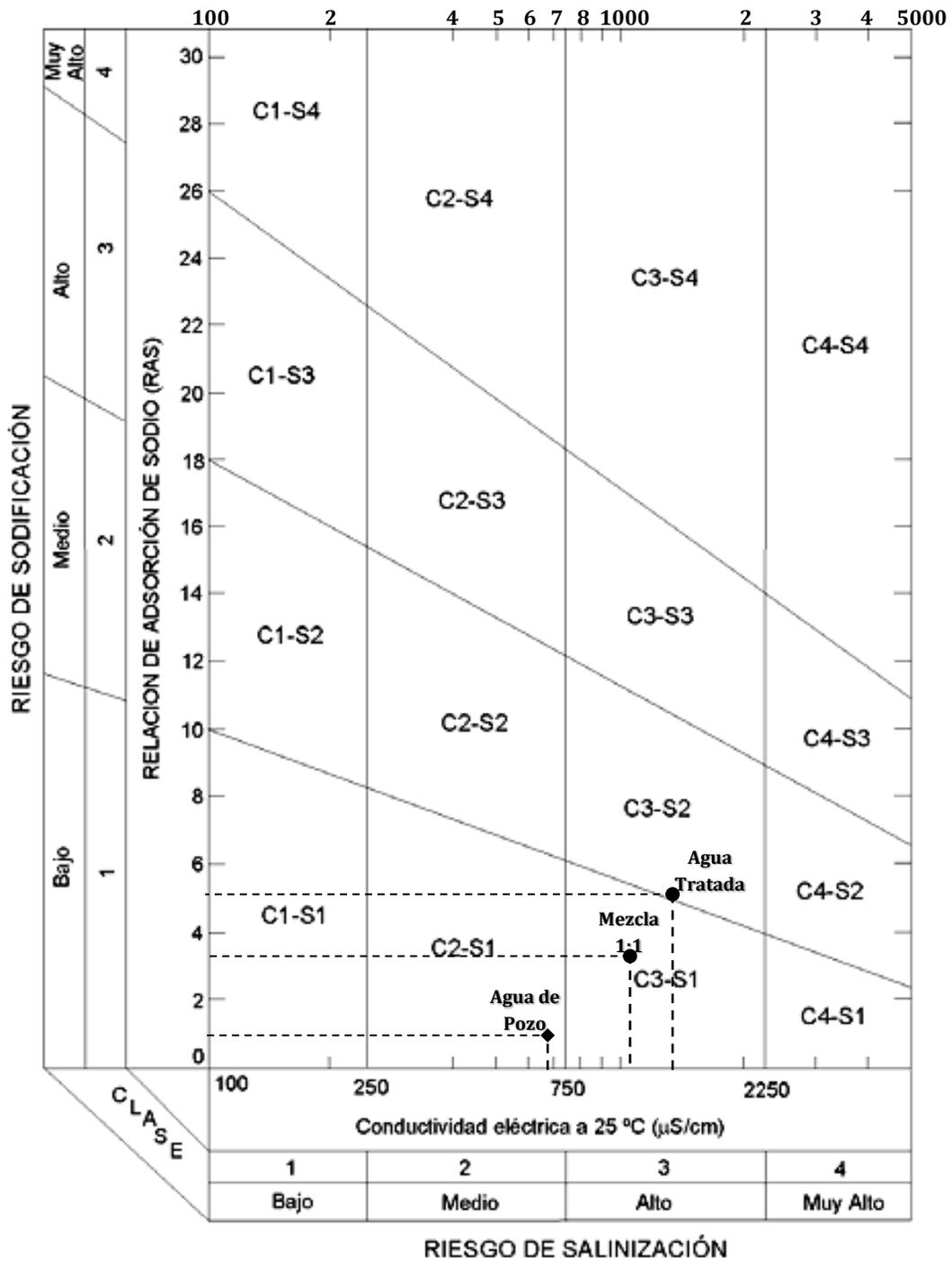


Figura 24. Diagrama para la clasificación de las aguas de riego (Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1994).

### VI.3 Caracterización físico-química de los suelos de estudio.

#### VI.3.1 Propiedades físicas.

**Textura.** Se determinaron los porcentajes de limo, arena y arcilla, y con el apoyo del Triángulo de Clases Texturales (Figura 37), se obtuvo la clase textural ***franco-limosa***, en todos los estratos que componen los 4 perfiles de suelo muestreados.

Las características generales de los suelos con textura franco-limosa son las siguientes (Rucks, L. et-al, 2004):

- Poseen una cantidad moderada de partículas finas de arena, sólo una cantidad reducida de arcilla y más de la mitad de las partículas pertenecen al tamaño denominado limo. Al estado seco tienen apariencia aterronada, pero los terrones pueden destruirse fácilmente.
- Al moler el material se siente cierta suavidad y a la vista se aprecia polvoriento. Ya sea seco o húmedo los moldes formados persistirán al manipularlos libremente, pero al apretarlo entre el pulgar y el resto de los dedos no formarán una “cinta” continua.
- Las características hidráulicas de estos suelos presentan una permeabilidad <0.5 cm/hr y percolación >60 min/2.5 cm;
- Sus propiedades físicas como espacio poroso tienen valores entre 43-49%;
- Densidad aparente de 1.8-2.6 g·cm<sup>-3</sup>,
- Capacidad de campo (CC) de 18-26%,
- Porcentaje de marchitez permanente (PMP) de 8-12% y
- Velocidad de infiltración de 0.8-2.0 cm/hr.

Las características particulares determinadas en el suelo de estudio fueron las siguientes:

**Contenido de humedad y porcentaje de saturación,** se determinaron dichos parámetros para conocer el contenido de agua en los suelos, dando como resultado un contenido de humedad promedio de los perfiles de **1.76%** y porcentaje de saturación de **37.89%**.

La **densidad aparente**, se determinó *in situ* de acuerdo al método 38 del manual 60 (Richards, L.A., et-al. 1982), y arrojó un valor promedio de  **$\delta=1.67 \text{ g cm}^{-3}$** .

### Residuo seco evaporado y residuo seco calcinado.

A los suelos se les determinó la salinidad inicial ( $S_i$ ) promedio en gramos por litro y en porcentaje peso de suelo seco (P/P), los resultados se presentan en la tabla 11.

**Tabla 11.** Contenido de la salinidad inicial ( $S_i$ ) del suelo muestreado, en la relación suelo-agua 1 $\approx$ 0.2-0.6

Espesor	Sales Extraídas		Sales P/P	
	RSE	RSC	RSE	RSC
	$g \cdot L^{-1}$	$g \cdot L^{-1}$	%	%
<b>0-20</b>	7.196	5.396	2.878	2.158
<b>20-40</b>	2.466	1.952	0.986	0.781
<b>40-60</b>	2.297	1.805	0.919	0.722
<b>60-80</b>	2.408	1.870	0.963	0.748

\*El valor de cada estrato es el promedio de los 4 perfiles muestreados, por triplicado.

### VI.3.2 Propiedades químicas.

Los resultados de los parámetros químicos se presentan en la tabla 12:

**Tabla 12.** Cationes y Aniones Solubles en relación Suelo-Agua 1 $\approx$ 0.2-0.6.

ESTRATO	pH	t	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	RAS	PSI
		°C	$dS \cdot m^{-1}$	$meq \cdot 100 g^{-1} de\ suelo$											
0-20	6.74	24.68	13.64	2.28	5.62	22.49	0.71	<b>31.10</b>	0.00	0.03	8.15	1.73	<b>9.91</b>	59.15	46.23
20-40	7.11	24.58	5.90	1.21	2.84	10.56	0.15	<b>14.76</b>	0.00	0.03	2.98	0.91	<b>3.92</b>	38.76	35.86
40-60	6.77	24.58	5.11	0.91	2.64	9.36	0.06	<b>12.98</b>	0.00	0.01	2.41	0.76	<b>3.19</b>	35.90	34.07
60-80	6.43	24.55	5.40	0.89	2.75	9.68	0.07	<b>13.38</b>	0.00	0.01	2.81	0.68	<b>3.50</b>	37.12	34.85

Lo anterior indica que en estos suelos las sales se acumulan en el horizonte superior del suelo, porque en el sitio la evaporación excede a la precipitación pluvial, lo anterior se deriva también a causa del manto freático poco profundo (0.80 m se localizó el nivel freático), lo cual implica que las aguas con concentraciones altas de minerales asciendan por capilaridad hacia la superficie, originando la acumulación salina, debido al drenaje ineficiente de estos suelos aluviales.

## VI.4 Ensayos del proceso de lixiviación, en condiciones controladas.

### VI.4.1 Condiciones de operación de las columnas.

Cálculo de la masa de suelo que ocupó un estrato de 5 cm de espesor, para el llenado de las columnas de suelo.

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h$$

Dónde:

h = altura de suelo, en cm

d = diámetro de la columna, en cm

V=912.076 cm<sup>3</sup> (Volumen que ocupa un estrato de 5 cm de suelo en una columna de 6" de diámetro)

La masa de suelo se determinó a partir de la densidad del suelo (*Richards, L.A., et-al. 1982*):

$$\delta = \frac{m}{V}$$

$\delta = 1.666 \text{ g cm}^{-3}$

Por lo que la masa (m) del suelo es:

$$m = \delta \cdot V = 1,519.73 \text{ g}$$

≈ **m= 1.520 kg de suelo para cada 5 cm de espesor en la columna**

Con el dato de la masa de suelo, se empaclaron las columnas de suelo, cada 5 cm hasta formar un total de 50 cm de espesor.

#### VI.4.1.1 Temperatura.

El proceso de lavado tuvo una duración de 103 días, contabilizados a partir de que se montaron las 10 columnas hasta que se desinstaló la última, llevándose un control diario de la temperatura dentro del invernadero durante el tiempo que duro la actividad; la toma de lecturas de la temperatura se realizó con un termómetro de máximas y mínimas tipo Sixe, cada 24 horas.

La temperatura del sitio así como la evaporación se midió diariamente, durante el tiempo que duró el experimento, los valores promedio de la temperatura máxima y mínima diaria durante el periodo que permaneció el experimento fueron de: tem/max= 35.91°C, tem/min= 16.59°C y el valor promedio de la evaporación diaria fue 2.76 mm.

**VI.4.1.2 Pérdidas por evaporación.**

Cálculo de las láminas activas de lavado para las 10 columnas montadas.

**AGUA RESIDUAL TRATADA***COLUMNA 1.*

Lámina bruta= 5,064.15 ml  $\approx$  5,064.15 cm<sup>3</sup>

Carga hidráulica= 10 cm

Evaporación= 18.85 cm

$\pi_{CS}$ = 3,240 ml  $\approx$  3,240 cm<sup>3</sup>

Convirtiendo la lámina bruta y el volumen poroso de saturación a cm:

$$\text{Lámina bruta} = \frac{5,064.15 \text{ cm}^3}{182.415 \text{ cm}^2} = 27.762 \text{ cm}$$

$$\pi_{CS} = \frac{V}{A} = \frac{3,240 \text{ cm}^3}{182.415 \text{ cm}^2} = 17.762 \text{ cm}$$

*Lámina activa de lavado (cm)* = 27.762 - 10 + 18.85 + 17.762 = **54.373 cm**

*COLUMNA 2.*

*Lámina activa de lavado (cm)* = 27.433 - 10 + 13.25 + 17.433 = **48.116 cm**

*COLUMNA 3.*

*Lámina activa de lavado (cm)* = 27.844 - 10 + 4.60 + 17.844 = **40.288 cm**

**AGUA DE POZO PARA RIEGO***COLUMNA 4.*

*Lámina activa de lavado (cm)* = 30.914 - 10 + 38.80 + 20.914 = **80.628 cm**

COLUMNA 5.

$$\text{Lámina activa de lavado (cm)} = 30.558 - 10 + 21.20 + 20.558 = \mathbf{62.315 \text{ cm}}$$

COLUMNA 6.

$$\text{Lámina activa de lavado (cm)} = 27.844 - 10 + 22.10 + 17.844 = \mathbf{57.788 \text{ cm}}$$

### **MEZCLA DE AGUA TRATADA Y AGUA DE POZO, PROPORCIÓN 1:1**

COLUMNA 7.

$$\text{Lámina activa de lavado (cm)} = 29.790 - 10 + 13.85 + 19.79 = \mathbf{53.430 \text{ cm}}$$

COLUMNA 8.

$$\text{Lámina activa de lavado (cm)} = 27.734 - 10 + 7.0 + 17.734 = \mathbf{42.469 \text{ cm}}$$

COLUMNA 9.

$$\text{Lámina activa de lavado (cm)} = 27.734 - 10 + 13.25 + 17.734 = \mathbf{48.719 \text{ cm}}$$

### **AGUA DESTILADA (CONTROL)**

COLUMNA 10.

$$\text{Lámina activa de lavado (cm)} = 31.928 - 10 + 25.25 + 21.928 = \mathbf{69.106 \text{ cm}}$$

### **Volúmenes Activos de Lavado**

Estos volúmenes activos de lavado, corresponde a  $Q_a/Q_\pi = 0$  y  $1$  y determinan la lámina de agua efectiva necesaria para lavar cada columna de suelo, la cual resulta de sustraer las pérdidas de agua por evaporación calculadas con anterioridad.

#### **VI.4.2 Análisis físico-químicos de los efluentes de lavado.**

##### **VI.4.2.1 Composición química de los efluentes obtenidos en el curso de lixiviación con agua residual tratada.**

En los distintos tratamientos, las sales extraídas ( $S_{ext}$ ) se calcularon en  $g \cdot L^{-1}$  y en porcentaje peso de suelo seco (P/P), los resultados obtenidos de los efluentes captados durante el proceso de lixiviación (cada 100 ml), para el tratamiento con agua residual tratada, se presentan en la tabla 13.

**Tabla 13.** Contenido de sales extraídas ( $S_{ext}$ ) en la columna de lavado empleando agua residual tratada.

MUESTRA	Sales Extraídas		Sales P/P	
	RSE	RSC	RSE	RSC
	$g \cdot L^{-1}$	$g \cdot L^{-1}$	%	%
M1	32.513	23.530	13.005	9.412
M2	30.070	23.923	12.028	9.569
M3	29.317	22.613	11.727	9.045
M4	28.497	20.950	11.399	8.380
M5	27.310	19.607	10.924	7.843
M6	24.980	18.883	9.992	7.553
M7	22.683	18.260	9.073	7.304
M8	20.810	16.275	8.324	6.510
M9	20.875	14.150	8.350	5.660
M10	11.540	10.340	4.616	4.136
M11	7.780	7.340	3.112	2.936
M12	4.605	4.380	1.842	1.752
M13	2.395	2.290	0.958	0.916
M14	1.430	1.325	0.572	0.530
M15	0.875	0.785	0.350	0.314
M16	0.710	0.530	0.284	0.212
M17	0.610	0.560	0.244	0.224
M18	0.540	0.450	0.216	0.180
M19	0.520	0.450	0.208	0.180
M20	0.510	0.410	0.204	0.164
M21	0.520	0.440	0.208	0.176
M22	0.480	0.360	0.192	0.144
M23	0.420	0.320	0.168	0.128
M24	0.410	0.300	0.164	0.120

En la tabla 14, se muestran los resultados promedio de las pruebas físico-químicas realizadas a los 24 efluentes colectados (a cada 100 ml) durante el proceso de lavado, correspondiente al tratamiento con agua residual tratada.

**Tabla 14.** Cationes y aniones solubles, columna de lavado empleando agua residual tratada.

No. de Efluente de Lixiviación	pH	t	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	RAS	PSI
		°C	dS·m <sup>-1</sup>	meq·L <sup>-1</sup>											
M1	6.01	24.00	11.143	322.00	1718.00	2827.00	7.70	4874.70	0.00	8.00	5350.00	13.00	5371.00	88.52	56.39
M2	6.05	23.93	11.083	224.00	1756.00	2830.00	7.60	4817.60	0.00	10.00	4980.00	30.04	5020.04	89.94	56.79
M3	6.21	22.60	11.013	168.00	1372.00	2794.00	7.60	4341.60	0.00	14.00	4760.00	64.27	4838.27	100.69	59.56
M4	6.32	23.37	10.923	116.00	1264.00	2619.00	7.00	4006.00	0.00	15.00	4360.00	77.01	4452.01	99.70	59.32
M5	6.56	24.27	10.657	70.00	1090.00	2442.00	6.10	3608.10	0.00	6.00	3860.00	144.29	4010.29	101.40	59.73
M6	6.95	23.87	10.660	41.00	959.00	2271.00	5.30	3276.30	0.00	10.00	3370.00	275.74	3655.74	101.56	59.77
M7	7.43	23.77	10.517	34.00	766.00	2079.00	4.50	2883.50	0.00	12.00	2800.00	222.19	3034.19	103.95	60.33
M8	7.54	22.65	10.295	24.00	656.00	1822.00	5.20	2507.20	0.00	7.00	2440.00	492.48	2939.48	98.81	59.10
M9	7.78	24.70	9.935	24.00	456.00	1682.00	4.00	2166.00	0.60	11.40	2020.00	571.53	2603.53	108.57	61.37
M10	8.13	24.85	9.335	22.00	458.00	1158.00	2.00	1640.00	2.20	12.80	1240.00	593.87	1848.87	74.75	52.15
M11	7.59	25.10	8.085	20.00	260.00	831.00	7.30	1118.30	0.00	16.00	1000.00	334.62	1350.62	70.23	50.58
M12	7.90	24.55	5.406	13.75	88.25	521.50	4.15	627.65	0.00	19.75	790.00	228.95	1038.70	73.02	51.56
M13	8.50	23.30	2.393	7.05	23.20	274.50	2.41	307.16	6.00	14.50	285.00	100.59	406.09	70.58	50.70
M14	8.74	24.00	1.889	4.35	9.65	161.80	1.66	177.46	6.35	18.15	160.00	60.38	244.88	61.15	47.07
M15	9.19	23.80	1.149	1.33	8.68	95.15	0.99	106.14	6.90	20.85	90.00	23.86	141.61	42.55	38.08
M16	9.37	24.20	0.880	1.25	4.75	79.50	1.67	87.17	14.00	18.00	60.00	0.66	92.66	45.90	39.92
M17	9.43	24.40	0.733	1.25	2.75	69.30	1.48	74.78	10.00	26.00	58.00	0.59	94.59	49.00	41.53
M18	9.45	24.50	0.637	1.00	3.00	56.90	1.33	62.23	9.00	23.00	40.00	0.26	72.26	40.23	36.74
M19	9.37	21.60	0.558	1.00	3.00	52.60	1.23	57.83	10.00	23.00	30.00	0.25	63.25	37.19	34.90
M20	9.41	21.60	0.551	1.00	1.50	52.70	1.25	56.45	10.00	22.50	30.00	0.32	62.82	47.14	40.57
M21	9.48	21.20	0.561	1.00	1.50	53.60	1.29	57.39	9.00	28.00	30.00	0.36	67.36	47.94	40.99
M22	9.43	24.60	0.537	1.00	1.75	48.00	1.15	51.90	9.00	23.00	24.00	0.38	56.38	40.93	37.15
M23	9.44	24.50	0.497	0.75	2.00	43.20	1.02	46.97	10.00	20.00	20.00	0.41	50.41	36.84	34.67
M24	9.38	26.10	0.474	0.75	1.75	40.10	0.96	43.56	8.00	19.00	40.00	0.38	67.38	35.87	34.06

El análisis físico-químico del lixiviado proveniente del curso de lavado de los suelos con agua residual tratada, muestra la remoción paulatina de sales que se presentó en la columna de lavado, es importante indicar que aún y cuando la conductividad eléctrica de la fuente de agua fue de 1,558  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y una relación de adsorción de sodio de 5.33 que la ubica como un agua salina con restricción para riego moderada, la cual no debiera usarse en suelos con drenaje deficiente como lo señalan *Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1994*; lo cierto es que esta agua tuvo un efecto lixivador en el perfil del suelo, ya que comparando la conductividad eléctrica de los primeros efluentes, con la fuente de lavado, aquellos superaron 10 veces más al valor inicial del agua residual tratada, lo que indica que hubo un proceso de recarga de electrolitos en solución y posteriormente un desplazamiento de sales solubles, cabe señalar también, que a medida que se consumió el volumen poroso de lavado, éste ya no fue capaz de seguir removiendo la sales del suelo, lo cual quedó demostrado a partir de las muestra M16 a la M24 de la tabla 14.

Respecto al desplazamiento iónico que se presentó durante el proceso de lavado, el  $\text{Na}^+$  y el  $\text{Cl}^-$  fueron los más removidos, esto es lógico ya que geoquímicamente son los iones más móviles en la naturaleza (Kovda, V. A., et-al. 1967) y que por lo general tienden a formar la sal  $\text{NaCl}$  de gran solubilidad, lo que explica su facilidad de migración en un proceso de lavado. En orden de desplazamiento sucesivo le siguen los cationes el  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  y el anión  $\text{SO}_4^{2-}$ , lo que se atribuye a su menor movilidad, lo cual guarda relación con la formación de sales de menor solubilidad como son  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$  y  $\text{MgSO}_4$ . Por su parte los aniones  $\text{HCO}_3^-$  presentaron la menor remoción que se atribuye a la escasa presencia de estos iones en los suelos materia de estudio, pero también a que tienden a formar sales menos solubles como  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . A partir de las muestras M15 hasta la M24, el volumen activo de lavado ya no fue capaz de remover más sales en el perfil de suelo, lo que implica según Kovda, V. A., et-al. 1967, una sub-evaluación de la cantidad de sales extraídas mediante la relación suelo-agua  $1 \approx 0.2-0.6$ . El pH del suelo pasó de neutro en los primeros efluentes a alcalino, fluctuando en un intervalo de 6.01 a 9.48, lo que indica que los efluentes paulatinamente se cargaron con cationes, en lo fundamental  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en un desplazamiento vertical descendente, propio del fenómeno de lavado de sales.

#### VI.4.2.2 Composición química de los efluentes obtenidos en el curso de lixiviación con agua de pozo.

Los resultados obtenidos de los efluentes captados durante el proceso de lixiviación para el tratamiento con agua de pozo, se presentan en la tabla 15.

**Tabla 15.** Contenido de sales extraídas ( $S_{\text{ext}}$ ) en la columna de lavado empleando agua de pozo.

MUESTRA	Sales Extraídas		Sales P/P	
	RSE	RSC	RSE	RSC
	$g \cdot L^{-1}$	$g \cdot L^{-1}$	%	%
M1	34.807	22.047	13.923	8.819
M2	31.137	21.763	12.455	8.705
M3	29.327	19.703	11.731	7.881
M4	26.360	17.587	10.544	7.035
M5	21.643	17.110	8.657	6.844
M6	18.107	15.867	7.243	6.347
M7	7.750	7.300	3.100	2.920
M8	5.920	5.840	2.368	2.336
M9	4.090	4.050	1.636	1.620
M10	2.710	2.540	1.084	1.016
M11	1.720	1.620	0.688	0.648
M12	1.200	1.090	0.480	0.436
M13	0.900	0.840	0.360	0.336
M14	0.700	0.640	0.280	0.256

En la tabla 16 se muestran los resultados promedio de los análisis físico-químicos realizados a las 14 muestras colectadas del proceso de lavado correspondiente al tratamiento con agua de pozo.

**Tabla 16.** Cationes y aniones solubles, columna de lavado empleando agua de pozo.

No. de Efluente de Lixiviación	pH	t	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	RAS	PSI
		°C	dS·m <sup>-1</sup>	meq·L <sup>-1</sup>											
M1	6.01	16.49	12.073	374.67	1732.00	2902.67	5.63	<b>5014.97</b>	0.00	9.33	5306.67	4.59	<b>5320.59</b>	89.44	56.65
M2	6.27	16.61	11.633	301.33	1552.00	2688.00	5.70	<b>4547.03</b>	0.00	8.07	4750.00	20.97	<b>4779.03</b>	88.30	56.33
M3	6.73	18.13	11.743	216.00	1370.67	2481.33	5.28	<b>4073.28</b>	0.00	7.40	4280.00	69.46	<b>4356.86</b>	88.10	56.27
M4	7.07	19.42	11.587	98.67	1168.00	2421.33	5.63	<b>3693.63</b>	0.00	7.33	3840.00	121.01	<b>3968.35</b>	96.21	58.45
M5	7.28	18.88	11.413	48.00	885.33	2179.33	5.13	<b>3116.08</b>	0.00	9.67	3110.00	330.39	<b>3450.05</b>	100.88	59.60
M6	7.27	17.40	10.960	31.33	736.67	1904.00	3.40	<b>2674.27</b>	0.00	16.67	2526.67	514.25	<b>3057.58</b>	97.16	58.69
M7	7.35	23.90	8.360	34.00	286.00	786.00	1.60	<b>1107.60</b>	0.00	16.00	920.00	432.34	<b>1368.34</b>	62.14	47.48
M8	7.49	23.20	6.400	24.00	216.00	588.00	0.40	<b>828.40</b>	0.00	16.00	680.00	451.24	<b>1147.24</b>	53.68	43.79
M9	7.53	23.70	4.593	13.50	98.50	446.00	1.80	<b>559.80</b>	2.00	13.00	400.00	348.14	<b>763.14</b>	59.60	46.42
M10	8.12	24.30	3.318	6.00	104.00	277.00	0.30	<b>387.30</b>	2.40	12.60	340.00	255.35	<b>610.35</b>	37.35	34.99
M11	8.90	24.30	2.221	3.75	30.25	156.00	1.15	<b>191.15</b>	4.00	17.50	160.00	130.94	<b>312.44</b>	37.84	35.29
M12	9.38	24.00	1.601	1.50	14.50	95.00	0.55	<b>111.55</b>	5.00	26.00	110.00	75.95	<b>216.95</b>	33.59	32.56
M13	9.52	23.70	1.256	0.75	7.25	52.00	0.15	<b>60.15</b>	7.00	27.00	80.00	49.03	<b>163.03</b>	26.00	27.06
M14	9.60	23.60	0.937	0.75	5.45	38.00	0.69	<b>44.89</b>	8.00	27.00	60.00	26.72	<b>121.72</b>	21.58	23.42

El análisis físico-químico del lixiviado proveniente del proceso de lavado de los suelos con agua de pozo, muestra la remoción paulatina de sales que se presentó en la columna de lavado. Con base en los valores obtenidos de la conductividad eléctrica de las muestras, esta agua presentó inicialmente una C.E. de 680  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , que según *Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1994*, se reporta como de buena calidad para uso agrícola, de tal forma que no existe ninguna restricción para su uso en el proceso de lavado.

El efecto lixivador del agua de pozo fue superior al resto de los tratamientos, toda vez que los valores de C.E. medidos a las primeras muestras del proceso de lixiviado de sales fueron 15 veces mayores al valor inicial que presentó el agua de pozo previo al proceso de lavado, lo cual representó mejores resultados en comparación al proceso donde se empleó agua residual tratada. Del total de efluentes colectados en la columna, se observa una disminución en su concentración salina, a partir de la muestra M10 los valores de la C.E. son menores a los 4  $\text{dS}\cdot\text{cm}^{-1}$  lo que indica un efecto de lavado de sales.

El desplazamiento iónico de dicho tratamiento, presenta un efecto similar al verificado para las columnas sometidas a lavado con agua residual tratada, es decir los iones más desplazados en los efluentes fueron  $\text{Na}^+$  y el  $\text{Cl}^-$  los cuales forman sales de  $\text{NaCl}$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  de gran solubilidad y fácil lixiviación, le siguen en este orden los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  que forman sales de menos solubilidad como  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$  y en menor grado  $\text{MgSO}_4$ , sin embargo, estas sales fueron más lixiviadas por el agua de pozo debido a su menor carga electrolítica

inicial comparada con la del agua residual tratada; es decir el agua de pozo al presentar menor concentración salina inicial, tiene más capacidad de cargarse de iones y de solubilizar sales. Por su parte los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  incrementaron su concentración, solo el ion  $\text{SO}_4^{2-}$ , disminuyó hacia el final, los otros dos aniones mantuvieron el aumento en su concentración, una de las causas probables es el desplazamiento de los iones más móviles del suelo en el complejo de intercambio del suelo, dada la acción del volumen activo de lavado aplicado, no obstante que se sub-evaluaron las cantidades extraídas a partir de las muestras M13 y M14. El pH de los efluentes pasó de neutro (en los primeros efluentes) a alcalino (en los efluentes sucesivos), fluctuando en un intervalo de 6.01 a 9.60, una causa probable es que dichos efluentes durante el proceso de lavado se recargan con los cationes calcio y magnesio.

#### VI.4.2.3 Composición química de los efluentes obtenidos en el curso de lixiviación con mezcla 1:1, agua residual tratada - agua de pozo.

Los resultados obtenidos de los efluentes captados durante el proceso de lixiviación para el tratamiento con mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1, se presentan en la tabla 17.

**Tabla 17.** Contenido de sales extraídas ( $S_{\text{ext}}$ ) en la columna de lavado empleando mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1.

MUESTRA	Sales Extraídas		Sales P/P	
	RSE	RSC	RSE	RSC
	$g \cdot L^{-1}$	$g \cdot L^{-1}$	%	%
M1	32.813	22.910	13.125	9.164
M2	28.357	21.230	11.343	8.492
M3	26.707	20.267	10.683	8.107
M4	25.390	19.193	10.156	7.677
M5	24.780	18.263	9.912	7.305
M6	23.267	17.377	9.307	6.951
M7	19.610	15.150	7.844	6.060
M8	17.940	13.787	7.176	5.515
M9	15.030	12.180	6.012	4.872
M10	11.990	10.157	4.796	4.063
M11	7.657	7.097	3.063	2.839
M12	3.840	3.660	1.536	1.464
M13	2.073	2.010	0.829	0.804
M14	1.253	1.190	0.501	0.476
M15	0.670	0.580	0.268	0.232
M16	0.515	0.485	0.206	0.194
M17	0.480	0.420	0.192	0.168
M18	0.430	0.380	0.172	0.152

En la tabla 18 se muestran los resultados promedio de los análisis físico-químicas realizados a las 18 muestras colectadas del proceso de lavado correspondiente al tratamiento con mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1.

**Tabla 18.** Cationes y aniones solubles, columna de lavado empleando mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1.

No. de Efluente de Lixiviación	pH	t	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	RAS	PSI
		°C	dS·m <sup>-1</sup>	meq·L <sup>-1</sup>											
M1	5.99	23.40	11.723	322.67	1397.33	2682.00	10.13	<b>4412.13</b>	0.00	7.00	4963.33	26.18	<b>4996.51</b>	91.46	57.20
M2	6.16	23.43	11.593	203.33	1196.67	2561.33	7.27	<b>3968.60</b>	0.00	5.67	4363.33	73.39	<b>4442.39</b>	96.81	58.60
M3	6.54	23.27	11.590	167.33	1086.00	2552.67	9.53	<b>3815.53</b>	0.00	5.33	4053.33	101.77	<b>4160.44</b>	101.97	59.86
M4	6.99	22.97	11.340	132.67	1014.00	2494.67	9.40	<b>3650.73</b>	0.00	5.60	3906.67	124.11	<b>4036.37</b>	104.19	60.38
M5	6.86	22.87	11.207	91.33	1002.00	2460.00	8.93	<b>3562.27</b>	0.00	5.67	3806.67	138.62	<b>3950.95</b>	105.21	60.62
M6	6.86	23.80	7.550	65.33	894.67	2347.33	8.53	<b>3315.87</b>	0.00	5.80	3537.33	191.50	<b>3734.64</b>	107.14	61.06
M7	7.16	24.43	10.670	62.00	778.00	2076.00	7.80	<b>2923.80</b>	0.00	6.00	3046.67	293.73	<b>3346.40</b>	101.30	59.70
M8	7.53	22.87	105.20	32.67	380.67	1824.67	7.47	<b>2245.47</b>	0.00	8.00	2546.67	369.91	<b>2924.58</b>	126.93	65.03
M9	7.55	23.03	8.733	27.10	448.90	1536.00	6.40	<b>2018.40</b>	0.67	11.50	1973.33	451.24	<b>2436.74</b>	99.56	59.28
M10	7.84	24.20	8.258	23.77	336.23	1281.00	4.73	<b>1645.73</b>	0.33	15.83	1513.33	452.96	<b>1982.46</b>	95.48	58.26
M11	7.56	23.43	7.690	17.13	246.87	914.67	3.10	<b>1181.77</b>	0.33	15.50	920.00	393.97	<b>1329.80</b>	79.61	53.74
M12	7.92	23.43	4.511	8.47	122.87	478.67	1.47	<b>611.47</b>	1.33	17.67	436.67	253.64	<b>709.30</b>	59.07	46.20
M13	8.48	23.00	2.561	6.47	30.87	265.33	0.70	<b>303.37</b>	4.67	20.83	200.00	126.63	<b>352.13</b>	61.41	47.18
M14	8.86	23.97	1.634	2.33	14.67	172.67	0.35	<b>190.01</b>	5.33	24.83	126.67	53.17	<b>210.00</b>	59.22	46.26
M15	8.83	24.60	0.846	1.05	3.55	92.00	0.15	<b>96.75</b>	10.50	29.25	50.00	16.82	<b>106.57</b>	60.66	46.87
M16	8.95	24.00	0.634	1.00	1.85	73.50	0.23	<b>76.58</b>	8.80	31.70	32.50	6.63	<b>79.63</b>	61.57	47.25
M17	8.95	23.90	0.607	0.50	2.50	64.00	0.43	<b>67.43</b>	9.60	27.40	20.00	6.74	<b>63.74</b>	52.26	43.12
M18	9.04	23.70	0.541	0.40	2.20	60.00	0.35	<b>62.95</b>	10.00	27.00	170.00	0.00	<b>207.00</b>	52.62	43.30

El análisis físico-químico del lixiviado proveniente del proceso de lavado de los suelos con una mezcla en proporción 1:1 de agua residual tratada y agua de pozo, muestra la disminución de la concentración salina de los efluentes capturados en columna de lavado, como se observa, con base en los valores de su conductividad eléctrica, la mezcla de agua empleada presentó un valor inicial de 1,150  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , cuya calidad es reportada como baja y con riesgo moderado para ser empleada en el riego (Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1994), existiendo cierta restricción para su uso agrícola.

Como resultado, se observa una disminución de concentración salina de los espesores superiores a los inferiores, lo que guarda relación con el incremento de concentración de los efluentes capturados que fue 10 veces mayor al de la concentración del agua de lavado. Esto guarda relación con lo señalado por Kovda, V. A., et-al. 1967, quien indica que en condiciones naturales la concentración de la solución del suelo es 8 a 10 veces mayor que la del agua de riego, lo que implica que el tratamiento tuvo un efecto lixivador; sin embargo, al igual que en el resto de los tratamientos el efecto disminuyó gradualmente conforme el volumen activo de lavado pasó a través de la columna, pues llega un momento (a

partir del efluente M15) en que el proceso se estabiliza y ya no hay más desplazamiento de sales según se observa en los valores de CE de los efluentes M16 a M18, lo que indica que la relación de extracción está sub-evaluando la cantidad de sales extraídas, ya que el tratamiento no fue capaz de extraer más sales solubles.

De lo anterior se infiere que para llevar a cabo un proceso de lavado es conveniente emplear aguas de baja salinidad, para tener un mejor efecto de desplazamiento de sales solubles y mantener la salinidad del suelo en un nivel que no afecte el crecimiento y desarrollo de cultivos de cierta tolerancia a condiciones salinas.

Respecto al desplazamiento iónico de dicha columna, el  $\text{Na}^+$  y el  $\text{Cl}^-$  tuvieron los mayores desplazamientos, seguidos por los iones  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , sin embargo los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  incrementaron su concentración, solo el ion  $\text{SO}_4^{2-}$ , disminuyó hacia el final, los otros dos iones mantuvieron el aumento en su concentración, una de las causas probables el volumen activo de lavado no fue capaz de extraer sales de difícil solubilidad como  $\text{CaSO}_4$  o  $\text{CaCO}_3$ . En este tratamiento se observa de nueva cuenta la sub-evaluación de las cantidades de sales extraídas a partir de la muestra M15, producida por la relación de extracción suelo-agua  $1 \approx 0.2-0-6$ . El pH del suelo pasó de neutro en los primeros efluentes a alcalino, fluctuando en un intervalo de 5.99 a 9.04, una causa probable la lixiviación de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio.

#### VI.4.2.4 Composición química de los efluentes obtenidos en el curso de lixiviación con agua destilada (Control).

Los resultados obtenidos de los efluentes captados durante el proceso de lixiviación para el tratamiento con agua destilada (control), se presentan en la tabla 19.

**Tabla 19.** Contenido de sales extraídas ( $S_{\text{ext}}$ ) en la columna de lavado empleando agua destilada (control).

MUESTRA	Sales Extraídas		Sales P/P	
	RSE	RSC	RSE	RSC
	$g \cdot L^{-1}$	$g \cdot L^{-1}$	%	%
M1	33.040	25.610	13.216	10.244
M2	28.700	20.830	11.480	8.332
M3	25.070	18.660	10.028	7.464
M4	20.970	17.540	8.388	7.016
M5	17.110	14.480	6.844	5.792
M6	13.850	12.480	5.540	4.992
M7	9.910	8.780	3.964	3.512
M8	6.510	6.030	2.604	2.412
M9	4.860	4.570	1.944	1.828
M10	2.990	2.840	1.196	1.136
M11	1.650	1.570	0.660	0.628
M12	1.330	1.240	0.532	0.496

En la tabla 20 se muestran los resultados promedio de los análisis físico-químicas realizados a las 12 muestras colectadas del proceso de lavado correspondiente al tratamiento con agua destilada.

**Tabla 20.** Cationes y aniones solubles, columna de lavado empleando agua destilada (control).

No. de Efluente de Lixiviación	pH	t	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	RAS	PSI
		°C	dS·m <sup>-1</sup>	meq·L <sup>-1</sup>											
M1	6.07	27.10	12.400	492.00	1308.00	2266.00	13.20	4079.20	0.00	6.00	4420.00	2.20	4428.20	75.53	52.42
M2	6.19	25.70	12.320	468.00	1332.00	2396.00	16.00	4212.00	0.00	8.00	4240.00	22.13	4270.13	79.87	53.82
M3	6.52	24.20	12.320	348.00	1012.00	2134.00	14.80	3508.80	0.00	6.80	3640.00	24.40	3671.20	81.84	54.43
M4	6.95	23.70	11.780	244.00	1036.00	2086.00	15.40	3381.40	0.00	8.00	3240.00	55.91	3303.91	82.46	54.62
M5	7.28	23.10	11.480	136.00	664.00	1898.00	13.80	2711.80	0.00	10.00	2680.00	117.77	2807.77	94.90	58.11
M6	7.61	23.80	11.230	60.00	540.00	1570.00	11.40	2181.40	0.00	12.00	2040.00	308.62	2360.62	90.64	56.98
M7	7.76	23.80	10.180	32.00	328.00	1114.00	8.20	1482.20	0.00	12.00	1240.00	449.53	1701.53	83.03	54.79
M8	8.01	24.20	7.030	29.00	171.00	766.00	5.80	971.80	0.00	15.00	680.00	470.15	1165.15	76.60	52.77
M9	8.03	23.90	5.450	17.50	106.50	589.00	5.10	718.10	2.00	10.50	440.00	408.29	860.79	74.80	52.17
M10	8.41	23.80	3.480	6.30	59.70	366.00	3.20	435.20	2.00	13.00	240.00	298.31	553.31	63.71	48.11
M11	8.20	20.60	2.068	1.90	26.10	219.00	1.90	248.90	5.00	18.00	140.00	132.66	295.66	58.53	45.97
M12	8.68	20.30	1.773	1.10	22.90	171.00	1.30	196.30	8.00	24.00	120.00	66.79	218.79	49.36	41.71

El análisis físico-químico del lixiviado proveniente del curso de lavado de los suelos con agua destilada (control), muestra que al igual que los anteriores efluentes se tuvo una remoción paulatina de sales en la columna de lavado, como se observa, con base en la variable conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica inicial, fue de 30  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , es un agua libre de sales, aunque no muy aptas para el uso agrícola, por la carencia de nutrientes propios de un agua de riego, comparando con los valores obtenidos en las primeras muestras colectadas del proceso experimental, se obtuvieron valores muy superiores a la concentración inicial, lo que indica que al igual que las otras aguas utilizadas en el experimento, también se llevó a cabo lixiviación de sales solubles en la columna correspondiente.

En cuanto a las características físico-químicas de los efluentes de lavado provenientes del agua destilada, se obtuvieron de nueva cuenta diferencias entre las cantidades de cationes y aniones removidos durante el proceso, así los valores más altos los tuvieron los cationes Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>, seguidos de los iones Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup>, los valores de los iones carbonatos y bicarbonatos presentaron un aumento en sus concentraciones como en los anteriores procesos de lavado. Su pH pasó de neutro en los primeros efluentes a alcalino, fluctuando en un intervalo de 6.07 a 8.68. Esto es indicio de que las aguas de lavado se cargaron con cationes, asociado a la precipitación de carbonatos de calcio y magnesio, lo que es efecto del proceso de lixiviación (*Fitz Patrick, 1984*).

En general, los cuatro efluentes empleados en el experimento, causaron un efecto diferencial en la remoción de sales; así por ejemplo, del análisis de datos, se determinó que el

mejor tratamiento de lavado fue el agua de pozo, debido a su menor concentración electrolítica, que la hace un agua de buena calidad, por lo tanto los resultados obtenidos de esta agua fueron aceptables, así también pero en menor escala se tienen resultados favorables con el agua residual tratada. La concentración de la salinidad inicial ( $S_i$ ) del suelo experimental, disminuyó a causa de la aplicación de volúmenes porosos tanto de agua de pozo como de agua destilada, removiendo mayor cantidad de sales solubles que sales de mediana o baja solubilidad, lo que coincide con lo señalado por Kovda, V. A., et-al. 1967.

En mayor medida las aguas de pozo y destiladas cumplieron con su objetivo de desplazamiento de sales solubles, por sus características físico-químicas que las catalogaron como aguas de baja salinidad, no obstante, el agua residual tratada también tuvo lixiviación de sales, por lo que se puede catalogar como una fuente hídrica alternativa para emplearse en procesos de lavados de suelos, disminuyendo la presión que se ejerce respecto de aguas de buena calidad para usos consuntivos agrícolas, haciéndola disponible para otros usos.

### VI.4.3 Salinidad residual de los suelos lixiviados.

#### VI.4.3.1 Contenido de Sales.

##### VI.4.3.1.1 Salinidad residual promedio de las columnas de suelo, sometidas a lavado con agua residual tratada.

La determinación del contenido de sales, denominada salinidad residual ( $S_o$ ), en los extractos acuosos de la relación suelo-agua  $1 \approx 0.2-0.6$  se presentan en la tabla 21.

**Tabla 21.** Contenido de sales residuales ( $S_o$ ) en la columna de lavado empleando agua residual tratada.

ESTRATO	Sales Extraídas		Sales P/P	
	RSE	RSC	RSE	RSC
	$g \cdot L^{-1}$	$g \cdot L^{-1}$	%	%
0-5	0.182	0.136	0.073	0.054
5-10	0.139	0.097	0.055	0.039
10-15	0.101	0.062	0.041	0.025
15-20	0.119	0.061	0.048	0.024
20-25	0.122	0.074	0.049	0.029
25-30	0.148	0.092	0.059	0.037
30-35	0.154	0.102	0.061	0.041
35-40	0.221	0.158	0.088	0.063
40-45	0.411	0.349	0.164	0.140
45-50	1.321	1.186	0.529	0.474

Comparando el contenido de sales residuales ( $S_o$ ) obtenidos del tratamiento con agua residual tratada, respecto a la salinidad inicial ( $S_i$ ) del suelo en estudio (tabla 11), se observa una marcada disminución en el porcentaje de salinidad (%RSC) en un sentido vertical descendente, en los primeros 20 cm de espesor se obtuvo una  $S_i = 2.158$  %, de RSC P/P (Tabla 11) y posterior al tratamiento la  $S_o = 0.04$  %, se observa que la concentración inicial de sales en el perfil de suelo era mayor en las capas superiores y disminuía hacia los estratos inferiores, con valores del orden de 2.158 a 0.748 %, y después de la aplicación del lavado la  $S_o$  en los primeros 50 cm de espesor tuvo un comportamiento inverso con valores de 0.054 a 0.474 % de sales, lo cual indica un efecto lixivador, ya que las sales se desplazaron hacia los estratos inferiores, como resultado de haberse aplicado una lámina de agua que removió una importante concentración de sales de la zona radical del cultivo.

#### VI.4.3.1.2 Salinidad residual promedio de las columnas de suelo, sometidas a lavado con agua de pozo.

La determinación de la salinidad residual ( $S_o$ ), en los extractos acuosos de la relación suelo-agua  $1 \approx 0.2 - 0.6$  se presentan en la tabla 22.

**Tabla 22.** Contenido de sales residuales ( $S_o$ ) en la columna de lavado tratada empleando agua de pozo.

ESTRATO	Sales Extraídas		Sales P/P	
	RSE	RSC	RSE	RSC
	$g \cdot L^{-1}$	$g \cdot L^{-1}$	%	%
0-5	0.098	0.065	0.039	0.026
5-10	0.084	0.043	0.034	0.017
10-15	0.093	0.047	0.037	0.019
15-20	0.084	0.055	0.034	0.022
20-25	0.115	0.078	0.046	0.031
25-30	0.174	0.121	0.070	0.048
30-35	0.319	0.254	0.128	0.102
35-40	0.681	0.608	0.272	0.243
40-45	1.154	1.073	0.462	0.429
45-50	2.868	2.640	1.147	1.056

Los resultados del tratamiento con agua de pozo presentó concentraciones menores en la salinidad residual ( $S_o$ ) en comparación con los valores de salinidad inicial ( $S_i$ ) contenida en la tabla 11, comparando ambas concentraciones, el % de  $S_o$  en los primeros 20 cm de espesor fue de 0.03 % menor al % de  $S_i = 2.158$  %, correspondiente al RSC P/P (Tabla 11), observándose la tendencia inversa en la disminución de sales en un estrato de 50 cm de espesor con valores que fluctuaron entre los 0.026 - 1.056 % de sales, indicando el efecto lixivador que tuvo el tratamiento, desplazando la mayor cantidad de sales hacia los estratos inferiores.

#### VI.4.3.1.3 Salinidad residual promedio de las columnas de suelo, sometidas a lavado con Mezcla 1:1, agua residual tratada - agua de pozo.

La determinación del contenido de sales, denominada salinidad residual ( $S_o$ ), en los extractos acuosos de la relación suelo-agua  $1 \approx 0.2 - 0.6$  se presentan en la tabla 23.

**Tabla 23.** Contenido de sales residuales ( $S_o$ ) en la columna de lavado empleando mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1.

ESTRATO	Sales Extraídas		Sales P/P	
	RSE	RSC	RSE	RSC
	$g \cdot L^{-1}$	$g \cdot L^{-1}$	%	%
0-5	0.121	0.080	0.049	0.032
5-10	0.101	0.052	0.041	0.021
10-15	0.108	0.051	0.043	0.020
15-20	0.132	0.056	0.053	0.022
20-25	0.137	0.072	0.055	0.029
25-30	0.160	0.087	0.064	0.035
30-35	0.174	0.086	0.069	0.035
35-40	0.189	0.092	0.076	0.037
40-45	0.170	0.087	0.068	0.035
45-50	0.231	0.147	0.092	0.059

La disminución de la concentración de sales aplicando tratamiento con una mezcla de agua residual tratada y agua de pozo en proporción 1:1, se pudo constatar con los valores que presentó la salinidad residual ( $S_o$ ) en los primeros 20 cm de espesor en el perfil de suelo, donde la concentración fue de 0.024 % menor en comparación con el valor de  $S_i = 2.158$  %, correspondiente al RSC P/P (Tabla 11), imperando la tendencia inversa en la disminución de sales en un estrato de 50 cm de espesor con valores que fluctuaron entre los 0.032 a 0.059 % de sales, indicando el efecto lixiviador que tuvo el tratamiento, desplazando la mayor cantidad de sales hacia los estratos inferiores.

#### VI.4.3.1.4 Salinidad residual promedio de las columnas de suelo, sometidas a lavado con agua destilada (control).

La determinación del contenido de sales, denominada salinidad residual ( $S_o$ ), en los extractos acuosos de la relación suelo-agua  $1 \approx 0.2 - 0.6$  se presentan en la tabla 24.

**Tabla 24.** Contenido de sales residuales ( $S_o$ ) en la columna de lavado empleando agua destilada (control).

ESTRATO	g. Sales Extraídas		% Sales P/P	
	RSE	RSC	RSE	RSC
	$g \cdot L^{-1}$	$g \cdot L^{-1}$	%	%
0-5	0.065	0.028	0.026	0.011
5-10	0.113	0.047	0.045	0.019
10-15	0.129	0.055	0.052	0.022
15-20	0.148	0.065	0.059	0.026
20-25	0.183	0.082	0.073	0.033
25-30	0.221	0.101	0.088	0.040
30-35	0.257	0.110	0.103	0.044
35-40	0.265	0.119	0.106	0.047
40-45	0.181	0.079	0.072	0.031
45-50	0.225	0.167	0.090	0.067

Finalmente, con respecto al tratamiento con agua destilada, la tendencia no cambio respecto a los demás tratamientos, se presentó disminución de la concentración de sales en los estratos superiores con acumulación en espesores inferiores, la salinidad residual ( $S_o$ ) obtenida en los primeros 20 cm de espesor, fue de 0.02 % menor en comparación con el valor de  $S_i = 2.158$  %, correspondiente al RSC P/P (Tabla 11), prevaleciendo la tendencia inversa en la disminución de sales en un estrato de 50 cm de espesor con valores que fluctuaron entre los 0.019 a 0.067 % de sales, indicando el efecto lixivador que tuvo el tratamiento, desplazando la mayor cantidad de sales hacia los estratos inferiores.

La salinidad inicial del perfil de suelo, presenta una mayor concentración de sales en los estratos superiores, lo que se debe a que los suelos de planicie costera, presentan de manera natural un drenaje deficiente y un manto freático poco profundo, lo que aunado a la excesiva evaporación y escasa precipitación del lugar, origina el ascenso de sales por capilaridad a la superficie y su acumulación, en lo que también influye la cercanía del sitio experimental al mar, de manera que se trata de un proceso de salinización primaria.

Por tanto los resultados de salinidad residual ( $S_o$ ) en la capa de 50 cm, indican que las columnas que presentaron la mayor remoción de sales fueron las tratadas con agua destilada (control), seguida con el tratamiento de agua de pozo; posteriormente el tratamiento con la mezcla de agua tratada - agua de pozo y finalmente la de agua residual tratada; no obstante las diferencias del porcentaje de sales residuales acumuladas en cada columna son mínimas, toda vez que los cuatro tratamientos aplicados cumplieron uno de los objetivos planteados, que fue el mantener las sales solubles y los iones intercambiables más móviles fuera de los espesores donde se desarrollan las raíces de los cultivos agrícolas, a niveles que no afecten su crecimiento y desarrollo.

### VI.4.3.2 Cationes y Aniones de la solución del suelo después del proceso de lavado.

#### VI.4.3.2.1 Tratamiento con agua residual tratada.

En la tabla 25, se muestran los resultados promedio de los parámetros físico-químicos realizados a los extractos acuosos del suelo lavado con agua residual tratada.

**Tabla 25.** Cationes y aniones solubles, presentes en el suelo posterior al proceso de lavado con agua residual tratada.

Estrato	pH	t	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	RAS	PSI
		°C	dS·m <sup>-1</sup>	meq·100 g <sup>-1</sup> de suelo											
0-5	6.94	21.13	2.86	0.07	0.18	0.34	0.04	<b>0.63</b>	0.00	0.06	0.98	0.04	<b>1.08</b>	5.18	6.00
5-10	6.96	21.17	1.52	0.05	0.04	0.12	0.02	<b>0.23</b>	0.00	0.08	0.31	0.00	<b>0.40</b>	3.19	3.33
10-15	6.97	21.10	1.53	0.04	0.03	0.11	0.01	<b>0.20</b>	0.00	0.09	0.29	0.00	<b>0.39</b>	3.13	3.25
15-20	7.21	21.10	1.58	0.04	0.03	0.17	0.01	<b>0.25</b>	0.00	0.14	0.27	0.01	<b>0.42</b>	4.94	5.68
20-25	7.27	21.27	1.50	0.04	0.02	0.21	-	<b>0.27</b>	0.00	0.16	0.27	0.01	<b>0.44</b>	6.92	8.21
25-30	7.30	21.10	1.75	0.04	0.02	0.32	-	<b>0.38</b>	0.00	0.20	0.33	0.01	<b>0.54</b>	10.73	12.72
30-35	7.31	21.13	2.18	0.04	0.02	0.55	-	<b>0.61</b>	0.00	0.18	0.46	0.02	<b>0.66</b>	19.95	21.98
35-40	7.15	21.07	3.36	0.04	0.04	1.14	0.00	<b>1.22</b>	0.00	0.16	0.89	0.10	<b>1.15</b>	26.09	27.13
40-45	7.13	21.27	6.64	0.06	0.11	2.70	0.00	<b>2.88</b>	0.00	0.15	1.99	0.30	<b>2.44</b>	34.36	33.08
45-50	6.90	21.20	19.49	0.41	1.07	5.47	0.02	<b>6.98</b>	0.00	0.13	6.82	2.22	<b>9.18</b>	25.61	26.75

La caracterización físico-química de los suelos posterior a su proceso de lavado con agua residual tratada, muestra un comportamiento de desplazamiento de los iones básicos del suelo, hacia las capas inferiores por efecto del lavado, en la tabla 25 se aprecia cómo los iones Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> presentaron un aumento en su concentración en forma descendente, similar comportamiento se observa con los aniones HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, que junto con los cationes tienden a formar sales NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, de fácil solubilidad, así como de mediana y difícil solubilidad de como MgSO<sub>4</sub> y CaSO<sub>4</sub>, lo que indica un proceso de desalinización de los estratos superiores a los inferiores.

El suelo puede catalogarse como no salino hasta una profundidad de 0-40 cm ya que en promedio la C. E. registró un valor de 2.54 dS·m<sup>-1</sup> que de acuerdo a *Richards, L.A., et-al. 1982* corresponde a suelos sin problemas de sales.

El estrato inferior de la columna, acumuló la salinidad desplazada de los estratos superiores. El pH varió de 6.94 a 7.30 entre espesores, lo que indica que el agua del efluente se cargó de cationes, como resultado del proceso de lavado.

## VI.4.3.2.2 Tratamiento con agua de pozo.

En la tabla 26, se muestran los resultados promedio de los parámetros físico-químicos realizados a los extractos acuosos del suelo lavado con agua de pozo.

**Tabla 26.** Cationes y aniones solubles, presentes en el suelo posterior al proceso de lavado con agua de pozo.

Estrato	pH	t	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	RAS	PSI
		°C	dS·m <sup>-1</sup>	meq·100 g <sup>-1</sup> de suelo											
0-5	7.16	21.77	1.68	0.05	0.06	-	0.01	<b>0.12</b>	0.00	0.10	0.24	0.04	<b>0.38</b>	-	-
5-10	7.29	21.70	1.13	0.03	0.03	-	0.01	<b>0.07</b>	0.00	0.11	0.18	0.00	<b>0.30</b>	-	-
10-15	7.43	21.67	1.25	0.03	0.03	-	0.00	<b>0.06</b>	0.00	0.13	0.20	0.00	<b>0.34</b>	-	-
15-20	7.46	21.80	1.32	0.02	0.03	-	-	<b>0.05</b>	0.00	0.12	0.25	0.00	<b>0.38</b>	-	-
20-25	7.49	21.80	1.61	0.03	0.02	0.03	-	<b>0.07</b>	0.00	0.13	0.34	0.01	<b>0.48</b>	0.84	-0.03
25-30	7.50	21.53	2.77	0.04	0.03	0.49	-	<b>0.56</b>	0.00	0.19	0.71	0.01	<b>0.91</b>	14.31	16.56
30-35	7.41	21.57	5.11	0.05	0.06	1.71	-	<b>1.81</b>	0.00	0.36	1.81	0.13	<b>2.30</b>	38.37	35.62
35-40	7.29	21.63	10.88	0.08	0.13	4.70	0.00	<b>4.90</b>	0.00	0.27	1.29	0.39	<b>1.94</b>	68.46	49.93
40-45	6.96	21.67	18.99	0.22	0.41	9.18	0.00	<b>9.81</b>	0.00	0.11	2.07	0.84	<b>3.02</b>	72.04	51.22
45-50	6.94	21.73	40.28	0.88	2.48	11.91	0.01	<b>15.29</b>	0.00	0.07	4.58	3.01	<b>7.66</b>	42.31	37.94

La caracterización físico-química de los suelos en su salinidad residual posterior a su proceso de lavado con agua de pozo, denota un comportamiento de desplazamiento de los iones básicos del suelo, hacia las capas inferiores por efecto del lavado, la tabla 26 muestra como el ión Ca<sup>2+</sup> presentó una acumulación de 0.88 meq·100 g<sup>-1</sup> de suelo en el último estrato (45-50 cm) de la columna, en tanto que el ion Mg<sup>2+</sup> acumuló en este estrato 2.48 meq·100 g<sup>-1</sup> de suelo respectivamente; por otra parte el ión Na<sup>+</sup> presentó una disminución en sus primeros 20 cm de espesor superior y acumulación en el último espesor de la columna, así también el desplazamiento iónico se hizo más evidente con el comportamiento del ión K<sup>+</sup>.

El ión HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> se acumuló en concentraciones mayores a la mitad del perfil de suelo y disminuyó hacia los estratos inferiores. El suelo de acuerdo a la variable C.E. se catalogó como no salino hasta una profundidad de 30 cm (Richards, L.A., et-al. 1982), registrando en promedio 1.63 dS·m<sup>-1</sup>.

El pH del suelo varió de neutro a alcalino en el intervalo de 6.94 a 7.50, por lo que se infiere que el suelo hasta la profundidad de 30 cm quedó libre de problemas de sales y sodio intercambiable (Laboratorio de Salinidad de EE.UU, 1985).

#### VI.4.3.2.3 Tratamiento con mezcla 1:1, de agua residual tratada y agua de pozo.

En la tabla 27, se muestran los resultados promedio de los parámetros físico-químicos realizados a los extractos acuosos del suelo lavado con mezcla 1:1 de agua residual tratada y agua de pozo.

**Tabla 27.** Cationes y aniones solubles, presentes en el suelo posterior al proceso de lavado con mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1.

Estrato	pH	t	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	RAS	PSI
		°C	dS·m <sup>-1</sup>	meq·100 g <sup>-1</sup> de suelo											
0-5	7.08	21.87	1.74	0.06	0.10	0.08	0.03	<b>0.26</b>	0.00	0.09	0.36	0.01	<b>0.46</b>	1.61	1.10
5-10	7.20	21.70	1.18	0.04	0.03	0.02	0.02	<b>0.11</b>	0.00	0.11	0.19	0.00	<b>0.31</b>	0.72	-0.20
10-15	7.15	21.57	1.20	0.03	0.04	0.04	0.02	<b>0.13</b>	0.00	0.15	0.17	0.01	<b>0.32</b>	1.24	0.57
15-20	7.25	21.40	1.27	0.05	0.02	0.06	0.01	<b>0.15</b>	0.00	0.23	0.34	0.01	<b>0.58</b>	1.73	1.27
20-25	7.34	21.20	1.26	0.05	0.04	0.15	0.01	<b>0.25</b>	0.00	0.22	0.31	0.01	<b>0.54</b>	4.21	4.72
25-30	7.40	21.23	1.30	0.04	0.03	0.20	0.00	<b>0.28</b>	0.00	0.28	0.42	0.01	<b>0.71</b>	5.97	7.02
30-35	7.49	21.47	1.38	0.04	0.03	0.20	0.01	<b>0.28</b>	0.00	0.31	0.43	0.01	<b>0.74</b>	5.98	7.02
35-40	7.51	21.50	1.53	0.05	0.03	0.23	0.02	<b>0.32</b>	0.00	0.34	0.50	0.02	<b>0.86</b>	6.57	7.77
40-45	7.47	21.60	1.91	0.06	0.02	0.37	0.01	<b>0.47</b>	0.00	0.30	0.56	0.01	<b>0.86</b>	10.00	11.89
45-50	7.40	21.57	3.17	0.05	0.02	0.75	0.01	<b>0.82</b>	0.00	0.29	0.88	0.02	<b>1.20</b>	21.98	23.75

El proceso de lavado con mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, evidencia un comportamiento de desplazamiento de los iones básicos del suelo, hacia las capas inferiores por efecto del lavado, en la tabla 27 se aprecia como los cationes presentaron desplazamiento de capas superiores a inferiores, con acumulación en el estrato último de la columna, por su parte el ión SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> tuvo una concentración promedio en toda la columna de 0.01 meq·100 g<sup>-1</sup> de suelo, así también el ión Cl<sup>-</sup> presentó disminución en su concentración de los espesores superiores a los inferiores.

El ión HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> tuvo acumulaciones mayores a una profundidad de 35 cm con una ligera disminución hacia el estrato más profundo. El suelo de acuerdo a la variable C.E. se catalogó como no salino en todo el perfil de suelo (*Richards, L.A., et-al. 1982*), registrando en promedio 1.59 dS·m<sup>-1</sup>. El pH del suelo fue próximo a la neutralidad, ya que se determinó en el intervalo de 7.08 a 7.51 por lo que se infiere que el suelo quedó libre de problemas de sales y sodio intercambiable (*Laboratorio de Salinidad de EE.UU, 1985*).

#### VI.4.3.2.4 Agua destilada (control).

En la tabla 28, se muestran los resultados promedio de los parámetros físico-químicos realizados a los extractos acuosos del suelo lavado con agua destilada (control).

**Tabla 28.** Cationes y aniones solubles, presentes en el suelo posterior al proceso de lavado con agua destilada (control).

Estrato	pH	t	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma	RAS	PSI
		°C	dS·m <sup>-1</sup>	meq·100 g <sup>-1</sup> de suelo											
0-5	7.16	21.90	0.76	0.04	0.05	-	0.02	<b>0.12</b>	0.00	0.17	0.15	0.00	<b>0.32</b>	-	-
5-10	7.10	21.70	0.80	0.04	0.05	-	0.02	<b>0.10</b>	0.00	0.19	0.10	0.00	<b>0.29</b>	-	-
10-15	7.25	21.70	0.90	0.04	0.05	0.05	0.02	<b>0.16</b>	0.00	0.19	0.10	0.01	<b>0.30</b>	1.33	0.70
15-20	7.39	21.60	1.00	0.05	0.04	0.10	0.02	<b>0.20</b>	0.00	0.28	0.10	0.01	<b>0.39</b>	2.57	2.47
20-25	7.40	21.20	1.05	0.07	0.05	0.14	0.02	<b>0.27</b>	0.00	0.41	0.27	0.01	<b>0.68</b>	3.02	3.10
25-30	7.47	21.30	1.14	0.05	0.07	0.20	0.01	<b>0.32</b>	0.00	0.40	0.24	0.00	<b>0.64</b>	4.25	4.76
30-35	7.68	21.60	1.27	0.07	0.07	0.27	0.01	<b>0.41</b>	0.00	0.43	0.25	0.00	<b>0.68</b>	5.29	6.14
35-40	7.54	21.50	1.38	0.08	0.07	0.35	0.01	<b>0.50</b>	0.00	0.46	0.30	0.00	<b>0.76</b>	6.72	7.96
40-45	7.61	21.60	1.68	0.05	0.03	0.38	0.00	<b>0.46</b>	0.00	0.36	0.57	0.02	<b>0.95</b>	10.00	11.89
45-50	7.80	21.40	3.46	0.05	0.02	0.94	0.00	<b>1.01</b>	0.00	0.24	0.84	0.16	<b>1.24</b>	25.93	27.00

La composición química de extractos de suelo después del proceso de lavado con agua destilada (control), indicó un comportamiento de desplazamiento de los iones básicos del suelo, hacia las capas inferiores por efecto del lavado, en la tabla 28 se observa la similitud de comportamiento entre los iones Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> registrando una concentración promedio de 0.05 meq·100 g<sup>-1</sup> de suelo en toda la columna, por otra parte el ión Na<sup>+</sup> presentó disminución de los espesores superiores a los inferiores, registrando acumulación en el último espesor de la columna de 0.94 meq·100 g<sup>-1</sup> de suelo, los iones K<sup>+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> mantuvieron comportamiento similar con una concentración promedio de 0.01 meq·100 g<sup>-1</sup> de suelo en toda la columna, así también el ión Cl<sup>-</sup> presentó una disminución en sus concentraciones de los espesores superiores a los inferiores.

El anión HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> precipitó y se acumuló más en el intervalo 20 a 40 cm de espesor de la columna de suelo y disminuyó ligeramente hacia el estrato inferior. Por su parte el suelo de acuerdo a la variable C.E. se catalogó como no salino en todo el perfil de suelo (*Richards, L.A., et-al. 1982*), registrando en promedio 1.34 dS·m<sup>-1</sup> y el PSI al final del proceso registró una disminución substancial en los estratos superiores y su nivel se incrementó en los inferiores hasta un 27%, lo que indica que el ion sodio se acumuló en las partes bajas del perfil. Asimismo el pH del suelo varió de neutro a alcalino (7.10 a 7.80) por lo que se puede inferir que el suelo disminuyó el nivel salino original, así como el porcentaje de sodio intercambiable (*Laboratorio de Salinidad de EE.UU, 1985*).

Los resultados del proceso de lavado en los cuatro tratamientos con un volumen activo de lavado Q<sub>a</sub>/Q<sub>π</sub>=1, mostraron que el porcentaje de salinidad residual (S<sub>o</sub>) del suelo analizado, fue menor en los espesores superiores y aumento en los inferiores, lo que indica un desplazamiento iónico vertical descendente y una acumulación de sales en las capas inferiores del perfil, como se aprecia en la columna de lavado tratada con agua de pozo, donde el estrato 0-5 cm registró un valor de 0.026% de sales y su estrato 45-50 cm, el porcentaje de sales fue de 1.056 %.

Por lo tanto se observa que el proceso de desalinización se presentó en los estratos superiores a consecuencia del proceso de lavado al que fue sometido el perfil de suelo mediante un volumen activo de lavado y como consecuencia la salinización resultante en los estratos inferiores, donde se tuvo acumulación de los iones desplazados. Al respecto, (Kovda, V. A., et-al. 1967) señala que la relación de extracción de sales suelo-agua 1:5 tiene una mayor efectividad de remoción de sales, que la relación de extracción de sales  $1 \approx 0.2-0.6$ .

Finalmente, se constata que las características químicas de los suelos experimentales presentaron cambios en sus concentraciones iniciales a causa del tratamiento aplicando un volumen activo de lavado, bajo condiciones ambientales similares, independientemente de la calidad de agua utilizada, el desplazamiento de iones se logró en distintos porcentajes, siendo los tratamientos de mezcla de agua en proporción 1:1 y la de agua destilada, los que presentaron un desplazamiento más homogéneo de iones en el perfil de suelo, no obstante los tratamientos con agua residual tratada y agua de pozo también presentaron disminución de los niveles de salinidad cuyas concentraciones fluctuaron en un intervalo de tolerancia aceptable para los cultivos (Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1994).

Así también, se puede emplear como tratamiento para la reducción de sales el agua residual tratada, en condiciones de permeabilidad buena y estableciendo sistemas de drenaje para evacuar las sales lixiviadas, ya que al emplear solamente este tipo de efluente, se contribuye a disminuir el uso de agua subterránea para estas actividades, que demandan grandes volúmenes dependiendo la superficie de suelo afectado por sales, además que puede promover el reuso del agua residual tratada como una cultura en beneficio del ambiente.

#### VI.4.3.3 Gráficos de la dinámica del proceso de lixiviación.

Las curvas de lixiviación, se graficaron con los datos experimentales obtenidos. En el eje de las abscisas se estableció la relación  $Q_a/Q_\pi$ , donde:

$Q_a$  = volumen de la sumatoria de los efluentes colectados cada 100 mL.  
 $Q_\pi$  = volumen de agua necesario para llevar el suelo a capacidad de saturación (volumen obtenido al caer la primera gota del efluente).

En el eje de las ordenadas se coloca la relación  $(S_i - \Sigma S_{ext}/S_i)*100$ , donde:

$S_i$  = salinidad inicial determinada en una relación de extracción suelo-agua  $1 \approx 0.2-0.6$   
 $\Sigma S_{ext}$  = sumatoria acumulada de sales extraídas por los efluentes (cada 100 mL).  
 100 = factor de conversión a % con relación a  $S_i$ .

Las curvas universales de lixiviación en relación funcional  $(S_i - \Sigma S_{ext}/S_i)*100 = f(Q_a/Q_\pi)$ , se ajustan para fines de predicción, a una función potencial del tipo  $Y = b * M^x$  (Safanov, G.A., et-al. 1976).

La función potencial predice los porcentajes de sales extraídas en función de los diferentes volúmenes activos de lavado:

Y = % Sales extraídas;

b = Ordenada al origen;

M= curva logarítmica o número de unidades que aumenta o disminuye el % de sales extraídas por unidad de incremento del volumen activo de lavado;

x = Volumen activo de lavado.

Como se aprecia en las curvas 25 a la 28, correspondiente a cada proceso de tratamiento experimental, se tienen comportamientos similares, debido a que en los cuatro procesos de lavado se presentó lixiviación de sales en el perfil de suelo; la determinación de la salinidad inicial en la relación  $1 \approx 0.2-0.6$  constituye una evaluación de gran aproximación respecto de la concentración de sales solubles real del suelo pero no de la salinidad total en virtud de que dejan de lavarse sales de mediana y baja solubilidad.

A medida que aumenta el volumen activo de lavado ( $Q_a/Q_\pi$ ) eje de las abscisas, se obtiene una mayor cantidad de sales extraídas acumuladas, sin embargo al considerar la dinámica del proceso en el tiempo, se observa que llega el momento en que aun y cuando aumente el volumen poroso de lavado el porcentaje de sales extraídas acumuladas es mínimo y poco diferenciable en los últimos extractos, este fenómeno se presentó en todas las columnas de tal forma que la mayor cantidad de sales extraídas se obtiene con los primeros volúmenes de lavado. Lo que se atribuye a que conforme pasa el agua por las capas o espesores inferiores del suelo, se van acumulando sales lo cual hace que baje su capacidad de remoción, esto se comprueba en las curvas de lixiviación de las figuras 25, 26, 27 y 28, en las que se observa que aún y cuando se apliquen más volúmenes de agua, nunca llegan a remover la totalidad de sales del suelo ya que siempre quedan reservas salinas por extraer. (Sánchez-Bernal, E.I. 1994).

De lo anterior se deduce que para que el proceso de lavado de sales sea efectivo, se requiere un programa continuo de lavados que desplacen las sales que quedan en el suelo como consecuencia de lavados previos, a esta conclusión han llegado investigadores como Szabolcs, I. 1994 y Sánchez-Bernal, E.I. 1994.

A continuación se presentan las gráficas de porcentajes de sales extraídas en los efluentes (eje de las ordenadas), en función de los diferentes volúmenes activos de lavado, (eje de las abscisas) ajustadas para fines de predicción a una función potencial  $Y=b \cdot M^x$  (Safanov, G.A., et-al. 1976). Figuras 25, 26, 27 y 28.

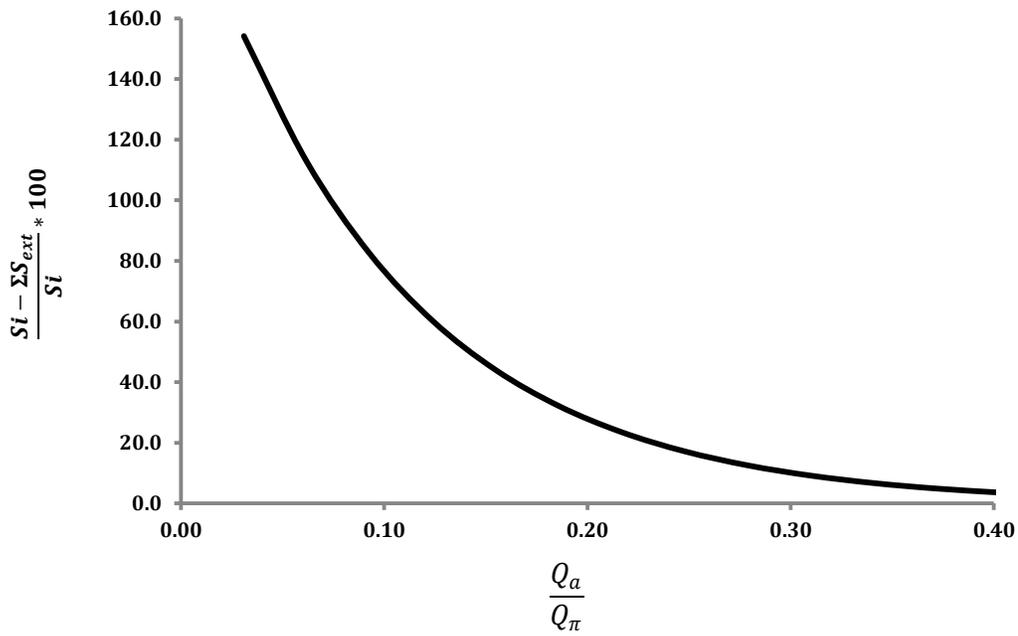


Figura 25. Curva de Lixiviación de la columna con agua residual tratada.

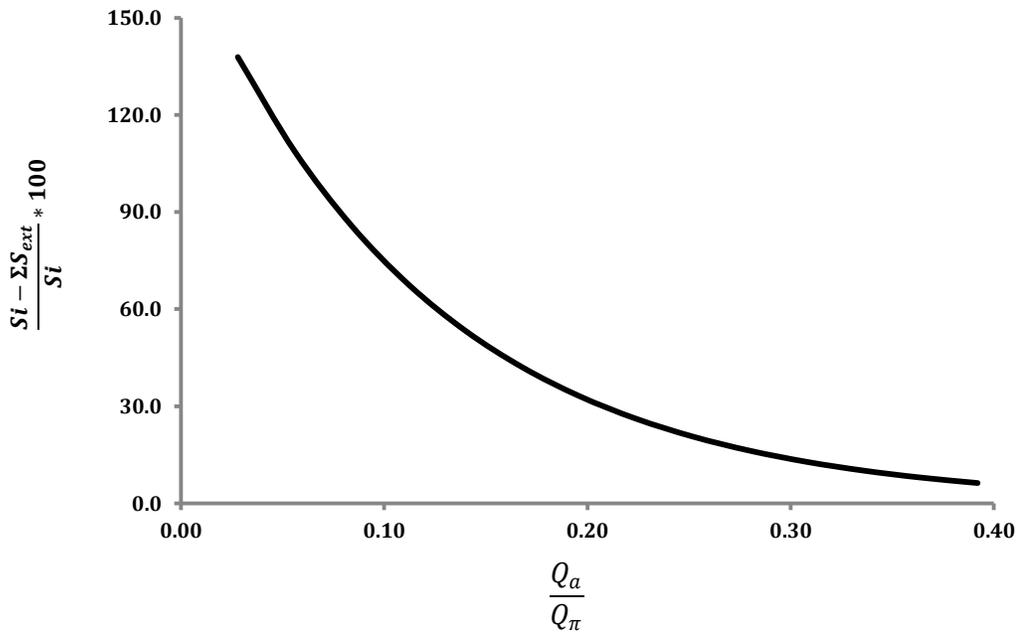
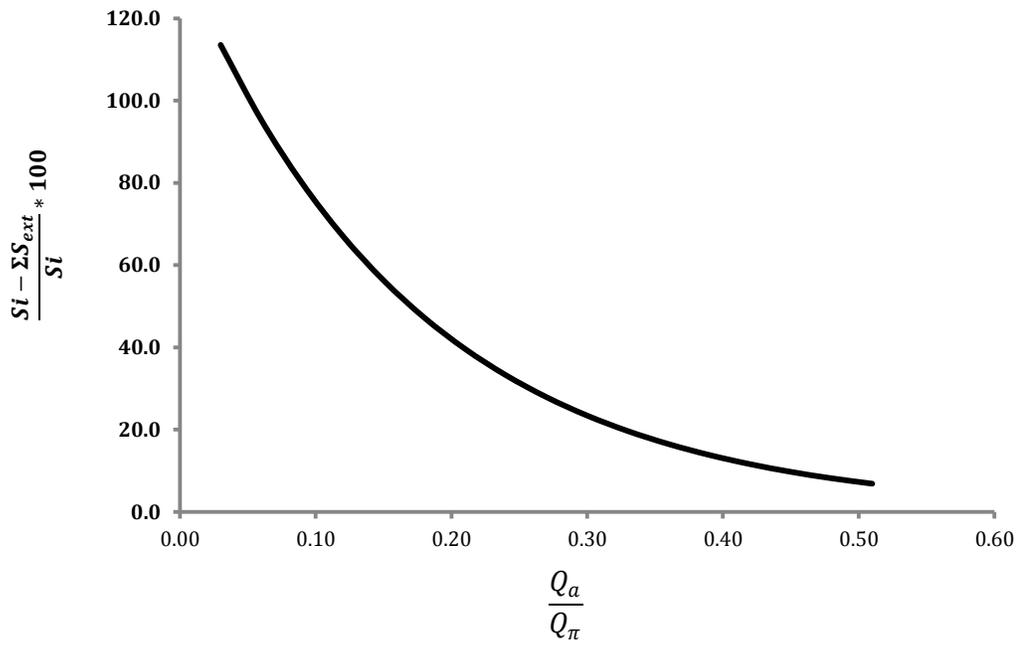
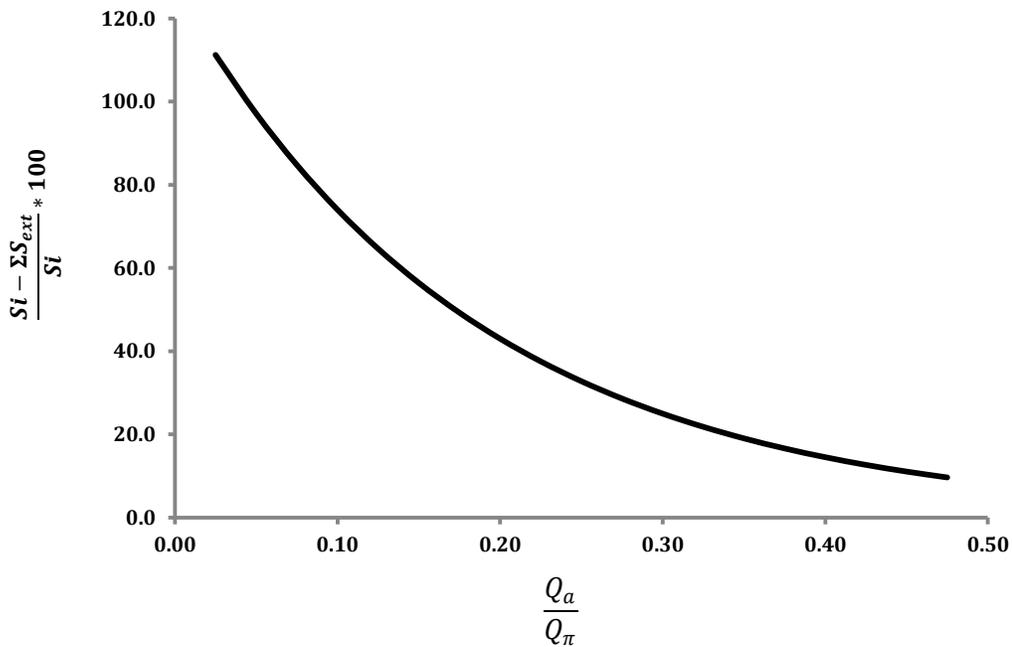


Figura 26. Curva de Lixiviación de la columna con agua de pozo.

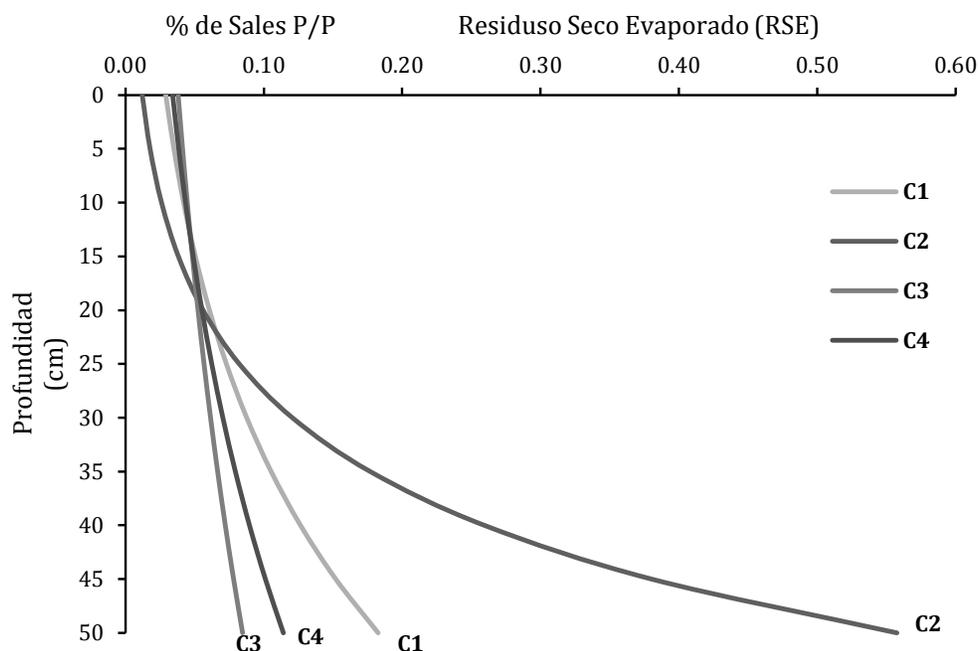


**Figura 27.** Curva de Lixiviación de la columna con mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1.



**Figura 28.** Curva de Lixiviación de la columna con agua destilada (control).

Con el objeto de efectuar una descripción detallada de la distribución de sales solubles después del proceso de lavado, es decir de la salinidad residual ( $S_o$ ), como consecuencia de la aplicación de diferentes volúmenes activos de lavado, se construyeron **perfiles salinos** colocando en el eje horizontal los porcentajes de sales (%) y en el eje vertical las profundidades (cm).



C1: Columna de lavado con agua residual tratada;  $y = 0.0291 * 1.0374^x$

C2: Columna de lavado con agua de pozo;  $y = 0.0121 * 1.0795^x$

C3: Columna de lavado con mezcla de agua residual tratada y agua de pozo, proporción 1:1;  $y = 0.0381 * 1.0161^x$

C4: Columna de lavado con agua destilada (control);  $y = 0.0341 * 1.0244^x$

**Figura 29.** Perfil Salino de la distribución de Sales residuales ( $S_o$ ) de cada columna de lavado, en un volumen poroso  $Q_a/Q_\pi=1$ .

El comportamiento que presentó la  $S_o$  en cada perfil de suelo, denota que las mayores concentraciones se localizaron en los estratos inferiores, como consecuencia del desplazamiento por los lavados aplicados al suelo en cada columna experimental, por ejemplo para la columna tratada con agua de pozo (C2), se observa que es la que tuvo un mayor desplazamiento de sales debido que fue la comuna que tuvo la menor concentración en los estratos superiores (capa 0-20 cm), no obstante fue la que mayor sales acumuló en los estratos inferiores (a partir de los 35 cm de profundidad tuvo un aumento en su concentración de sales), las demás columnas mantuvieron un perfil salino casi similar, manteniendo porcentajes de salinidad en estratos superiores cercanos entre si, manteniendo esta baja concentración hasta la capa 0-20 cm y teniendo una ligera variación de salinidad hacia los estratos inferiores de la columna.

En conclusión se observa que la columna que presentó el mejor perfil de salino fue la tratada con el agua de mezcla C3.

Para posteriores investigaciones se sugiere utilizar una relación de extracción suelo-agua 1:5 ya que es considerada por algunos autores como Panin, Calcaño, López, Aguirre citados por *Sánchez-Bernal, E.I. 1994*, la relación más apropiada para evaluar las reservas de sales iniciales en los suelos, debido a que con dicha relación se extrae una gran cantidad de sales solubles y de mediana y baja solubilidad, lo cual es un objetivo primordial en un proceso de lavado de suelos salinos. Toda vez que el proceso de lavado de sales con la relación suelo-agua 1:0.2-0.6, sub-evalúa la reserva de sales iniciales, lo que significa que tiene un carácter limitativo dicha relación para solubilizar sales de baja y mediana solubilidad.

## VII. CONCLUSIONES

### VII.1 Conclusiones Generales

1. El lavado de sales de los suelos tratados con los diferentes tipos de agua, originan desplazamientos de sales de los horizontes superiores y su acumulación en los inferiores, el tratamiento más efectivo fue el lavado con agua de pozo, con un volumen activo de lavado  $Q_a/Q_\pi = 1$ .
2. Las aguas residuales tratadas que cumplen los estándares de calidad establecidos por las normas oficiales mexicanas en la materia, presentan un efecto lixiviador para el desplazamiento y evacuación de sales en suelos con alta concentración electrolítica (C.E.  $>4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ), por lo tanto pueden emplearse en tratamientos para el lavado de suelos.
3. El tratamiento biológico de las aguas residuales municipales, proveyó un efluente que cumplió con los parámetros establecidos por la NOM-003-SEMARNAT-1996, lo cual hizo posible su empleo en uno de los tratamientos para el lavado de sales.
4. El porcentaje de remoción de sales del tratamiento con aguas residuales tratadas fue de 60%, lo cual indica la efectividad de desplazamiento y evacuación que presenta este efluente.
5. Los suelos salinos de La Barra de Colotepec, Oaxaca son susceptibles de ser recuperados mediante la reducción substancial de las concentraciones salinas de sus espesores superiores a través de procesos de lixiviación de sales.
6. El suelo empacado en las columnas tuvieron comportamientos diferentes, de acuerdo al tipo de agua empleado en cada tratamiento.
7. Se considera factible llevar a cabo tratamientos de lavado de suelos con problemas de salinidad empleando una mezcla de agua de pozo y agua tratada en proporción 1:1, con un volumen activo de lavado  $Q_a/Q_\pi = 1$  en suelos con textura franco-limosa, bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, en los terrenos agrícolas de La Barra de Colotepec, Oaxaca.

## VIII. PERSPECTIVAS

Antes de proceder a lavar un suelo en campo, deberá contarse con información referente a la composición y concentración de las sales, el tipo de suelo de acuerdo a su caracterización físico-química. La nivelación del terreno es necesaria, ya que dependiendo del sistema que vaya emplearse para aplicar el agua, pueden formarse bordos, piletas o cajetes. Para el caso donde exista un nivel freático superficial o somero (menos de 1.5 m), deberán construirse sistemas de drenaje que permitan la evacuación de los excedentes de agua hacia sectores bajos o colectores de drenaje, ya sea de mediante drenes a cielo abierto o entubados.

Con independencia de los resultados que se obtuvieron del proceso de lavado para la remoción de sales en los suelos, se deben considerar tres aspectos que en su conjunto podrían alcanzar una máxima eficiencia de esta actividad que son: irrigación, lavado y drenaje (*Richards, L.A., et-al. 1982*).

El tipo de suelo en el sitio experimental, presenta problemas de drenaje, por lo tanto es conveniente considerar que para resultados óptimos, las sales removidas de la zona radical del suelo deberán eliminarse del sitio, considerando una red de drenaje artificial a base de tuberías que deriven al mar las soluciones salinas lixiviadas.

Los lavados en campo, se deben realizar a manera de inundación, formando diques o bordos, ya que con esto se logra un movimiento del agua hacia abajo, a través del suelo. La efectividad dependerá de la uniformidad de aplicación del agua, y de las cantidades que puedan hacerse pasar por el suelo. Como ya se ha mencionado, para que los lavados arrojen resultados favorables, necesariamente debe haber un buen drenaje en el suelo, de otra forma no se podría eliminar o lavar las sales de la zona radicular de las plantas.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

APHA AWWA WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 1998. 17th ed. Published jointly by American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation. American Public Health Association, 2015 Fifteenth Street, NW Washington, DC 20005, USA.

Ayers, R. S. & Westcot D. W. 1994. Water quality for agriculture. FAO. Rome. ISBN 92-5-102263-1.

Ayres, R. M. & Mara, D. D. 1996. Analysis of Wastewater for Use in Agriculture- A Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques. WHO. Geneva. ISBN 92-4-154484-8. 35 p.

Cervantes, R.M. 1983. La Lixiviación de Sales en Suelos Salinos y Salinos-Sódicos del Valle de Mexicali, durante un Proceso de Lavado. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados, Chapingo México.

Comisión Nacional del Agua. 2008. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2008. 293 p.

Comisión Nacional del Agua. 2008. Estadísticas del Agua en México. Ed 2008. 228 p.

De la Cruz-Reyna, S. 1994. Ciencias de la Tierra Hoy. Ediciones Científicas Universitarias. Fondo de Cultura Económica. México. 205 p.

Díaz, E. F. 1986. Descripción de las regularidades del proceso de lavado de los suelos salinos. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, México. 336 p.

Estrada-Vázquez, C. 2003. Remoción biológica de compuestos tóxicos por tratamiento en reactores de lecho fluidizado de ambiente híbrido (REL FAMHI). Tesis de Doctorado. Depto. de Biotecnología y Bioingeniería, CINVESTAV-IPN. México.

Estrada-Vázquez, C., Macarie H., Kato, M. T., R. Rodríguez-Vázquez y Poggi-Varaldo H. M. 2001. Oxygen exposure resistance in suspended anaerobic sludge. *Interciencia* 26(11):547-553.

FAO Soil Resources Management and Conservation Service. 1988. Salt-Affected Soils and their Management. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 131 p.

Gavande. S. A. 1991. Física de Suelos. Principios y Aplicaciones. Editorial Limusa. 351 p.

Gedroitz, K. K. 1955. Obras selectas Tomo I. (Los suelos sódicos, su origen, propiedades y mejoramiento). Editorial Ciencias Agrícolas del Estado. Moscú, URSS.

Grady, C. P. L., Daigger, G. T. & Lim, H. C. 1999. Biological Wastewater Treatment 2<sup>nd</sup> Ed. Marcel Dekker, New York.

Honorato, P. R. 2000. Manual de Edafología. 4<sup>a</sup> Ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. 267 p.

- INEGI. 1991. VII Censo Agrícola-Ganadero 1991/Unidad de producción rural/Según régimen de tenencia
- INEGI. 2000. Áreas Geoestadísticas Municipales del País correspondiente con el Marco Geoestadístico del XII Censo General de Población y Vivienda, 2000.
- INEGI. 2004. Síntesis de Información Geográfica del Estado de Oaxaca.
- Jenkins, D., Richard, M. G. and Daigger, G. T. 1993. Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming. 2ª. Ed. Lewis Publishers. USA. 193 p.
- Kleerebezem, R. and Macarie, H. 2003. Treating Industrial Wastewater: Anaerobic Digestion comes of Age. Chem Eng Apr 1, 2003: 56-64 p.
- Kovda, V. A., Berg, C. Van Den and Hagan, R. M. 1967. International Source-Book on Irrigation and Drainage of Arid Lands, in Relation to Salinity and Alkalinity. FAO-UNESCO. 663 p.
- Lee, J. M. 2001. Biochemical Engineering. Department of Chemical Engineering. Washington State University, Pullman, WA 99164-2714.
- Litovchenko, A. A. 1988. Leaching of Saline Soil in the Omsk Oblast by deep furrow Irrigation. Omsk Agricultural Institute. Soviet Soil Science. Vol. 21. No. 1, 1989. 59-66 p.
- Macarie, H. 2000. Overview of the Application of Anaerobic Treatment to Chemical and Petrochemical Wastewaters. Water Sci. Technol. 42(5-6):201-213.
- Martin, R. W., C. R. Baillod & J. R. Mihelcic. 2005. Low-Temperature Inhibition of the Activated Sludge Process by an Industrial Discharge Containing the Azo Dye Acid Black 1. Water Res. 39: 17-28.
- Massoud, F. I. 1977. Basic principles for prognosis and monitoring of salinity and sodicity. In: Proc. International Conference on Managing Saline Water for Irrigation. Texas Tech. University, Lubbock, Texas. 16-20 August 1976. 432-454 p.
- Metcalf - Eddy Inc. 2003. Wastewater engineering, treatment and reuse. 4<sup>th</sup> Ed. The Mc Graw-Hill Co. Inc. U. S. A. 1819 p.
- Montgomery, D. C. 1991. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica, S. A. de C. V. México. 589 p.
- Ortega-Clemente, A., C. Estrada-Vázquez, F. Esparza-García, S. Caffarel-Méndez, N. Rinderknecht-Seijas y H. M. Poggi-Varaldo. 2004. Integrated biological treatment of recalcitrant effluents from pulp mills. Water Sci. Technol. 50(3):146-156.
- Panin, P. S. 1968. Los procesos de lixiviación de sales en los suelos sujetos a lavado. Editorial Nauka. Novosibirsk. URSS. 301 p.
- Pilar, A., Ortiz A. y Cerda A. 1994. Implications of calcium nutrition on the response of *phaseolus vulgaris* L. to salinity. Plant and Soil 159:205-212.

Porta, C. J., López-Acevedo, R. M. y Roquero, L. C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª Ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 929 p.

Ramallo, R. S. 1996 Tratamiento de Aguas Residuales. Ed. Reverte, S.A. de C.V. 705 p.

Richards, L. A., y Colaboradores. 1982. Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Editorial Limusa. 4ª Ed. 172 p.

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J. y Hill, M. 2004. Propiedades Físicas del Suelo. Facultad de Agronomía. Universidad de la Republica. Departamento de Suelos y Aguas. Montevideo-Uruguay. 68 p.

Safanov G. A., Galinski S. D. y Mitronkyn Y. E. 1976. Modelo estocástico del lavado de suelos salinos sulfáticos. En: Métodos matemáticos en la Biología y en la Edafología. Editorial Nauka. Moscú, URSS. Dr. Manuel Ortega Escobar (traductor), Colegio de Postgraduados, México. 165-177 p.

Sánchez-Bernal, E. I. 1994. Tesis de Grado. El Proceso de Lixiviación de Sales en Suelos de Salinidad Sulfática de la Cuenca Evaporítica de Río Verde-Matehuala, San Luís Potosí.

Sánchez-Bernal, E. I., M. Ortega-Escobar, V. González-Hernández, G. Ruelas-Angeles, J. Kahash-Shibata y N. García-Calderón. 2003. Tolerancia de tubérculos de papa cv alpha en etapa de brotación a condiciones de salinidad. Terra 21(4):481-491 p.

Sánchez-Bernal, E. I. y Colaboradores. 2006. Diagnóstico Integral de la Infraestructura Hidráulica y Sanitaria de las Cuencas de los Ríos Copalita y Tonameca. Reporte Técnico. Universidad del Mar. 61 p.

Sánchez-Bernal, E. I. 2008. Emergencia de Brotes de Tubérculos y Acumulación de Biomasa de Plantas de Papa (*Solanum Tuberoso* L) cv Alpha, en Condiciones de Stress Inducido por Diversas Soluciones Salinas. Interciencia Vol. 33/09. 643-649 p.

Sánchez-Bernal, E. I. Camacho, E. M., Rodríguez L. A., y Ortega, E. M. 2010. Caracterización de suelos afectados por sales en el Distrito de Riego 110 "Río Verde", Oaxaca, México. Artículo en proceso de revisión. Revista Tropical and Subtropical Agroecosystem.

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Norma Mexicana NMX-AA-42-1987. Calidad del Agua Determinación del Número más Probable (NMP) de Coliformes Totales, Coliformes Fecales (Termotolerantes) y *Escherichia Coli* Presuntiva.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que Establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis.

Szabolcs, I., Darab, K. 1982. Irrigation Water Quality and Problems of Soil Salinity. Acta Agronómica Scientiarium Hungaricae. Tomo 31/1-2/pp. 173-194.

Szabolcs, I. 1986. Agronomical and Ecological Impact of Irrigation on Soil and Water Salinity. Adv. Soil Sci. 4:189-218.

Szabolcs, I. 1994. Soil and Water salinization and desertification. Proceedings of the IV Conference on Desert Development (1993). Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Estado de México. 25 al 30 de julio, 1993.

Teterin, U. P. 1968. Determination of total soil and natural water salinity by electric conductivity method. Soviet Soil Science. 10 (1): 145-155 p.

## X. ANEXOS

### X.1 Metodologías para caracterizar las Aguas Residuales Tratadas y Agua de Pozo.

#### X.1.1. Aguas residuales

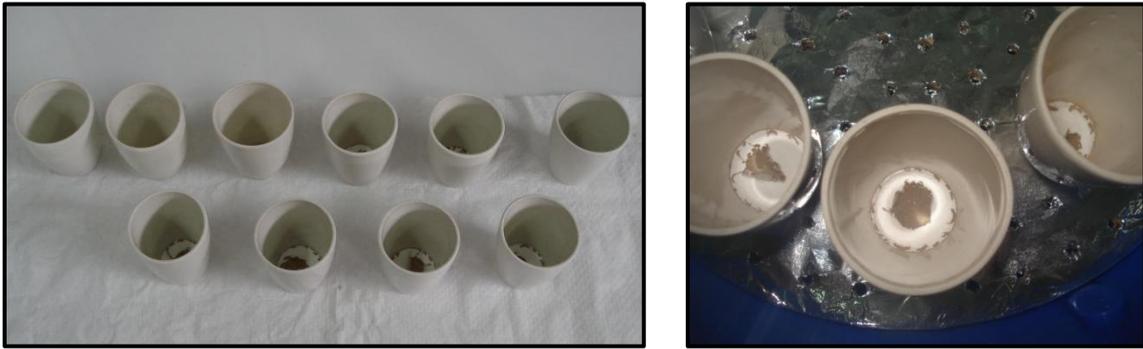
Las técnicas empleadas para la caracterización de las aguas residuales, lodos del reactor y efluente tratado, se mencionan a continuación:

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**, se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación de la materia orgánica total presente en la muestra de agua y como resultado de la acción de oxidación bioquímica aerobia (Ramalho, 1996). Para su determinación se empleará el Método Semi-micro (APHA AWWA WPCF, 1998). (Figura 30)



**Figura 30.** Determinación de DQO en muestras de agua del reactor

- **Sólidos Suspendidos Totales (SST)**, son la porción de sólidos retenidos cuando se pasa un volumen conocido a través de un filtro (suele emplearse un filtro de fibra de vidrio Whatman GF/C con un tamaño nominal de poro de  $0.45\mu\text{m}$ ), los resultados de la prueba de SST son usados rutinariamente para evaluar el funcionamiento de procesos de tratamiento convencional y para la necesidad de filtración del efluente en aplicaciones de reuso (Metcalf y Eddy Inc., 2003; Ramalho, 1996). Se determinará por el método 2540 D (APHA AWWA WPCF, 1998).
- **Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)**, es la cantidad de material que se volatiliza o quema cuando se somete a una temperatura de  $550 \pm 50^\circ \text{C}$ , ya que a esta temperatura la materia orgánica se oxidara y desaparecerá en forma de gas, quedando la fracción inorgánica (minerales) en forma de cenizas (Metcalf y Eddy Inc., 2003; Ramalho, 1996). Se determinará por el método 2540 E (APHA AWWA WPCF, 1998), figura 31.



**Figura 31.** Determinación de Sólidos Suspendedos Totales y Volátiles

- **Índice Volumétrico de Lodos (IVL)**, es el volumen en mililitros ocupado por 1 g de sólidos en suspensión del líquido mezclado (SST), expresado en peso seco, después de sedimentar durante 30 minutos en una probeta graduada de 1000 ml (Ramalho, 1996). (Figura 32)



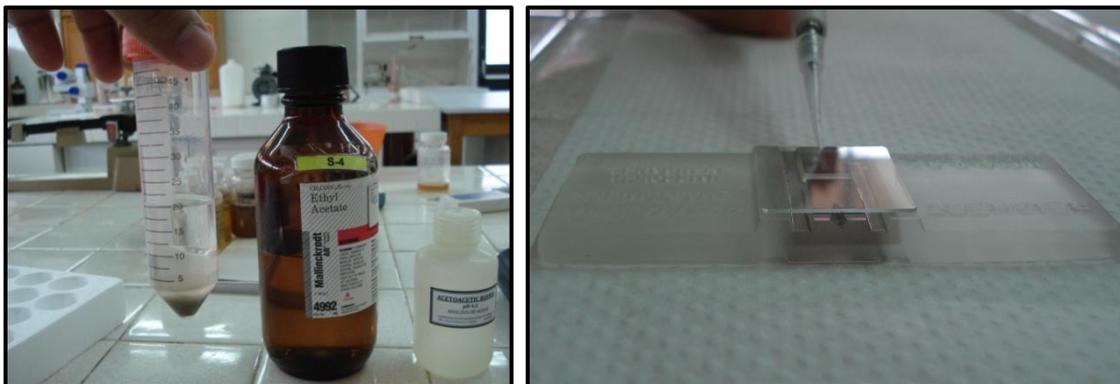
**Figura 32.** Determinación del Índice Volumétrico de Lodos (IVL).

- **Coliformes Fecales**, siendo un parámetro importante para cumplir con la calidad de descarga en suelos (uso en riego agrícola), se determinará mediante el cultivo en un medio líquido en tubos múltiples de fermentación y el cálculo de sus números más probables en la muestra (NMX-AA-42-1987). (Figura 33)

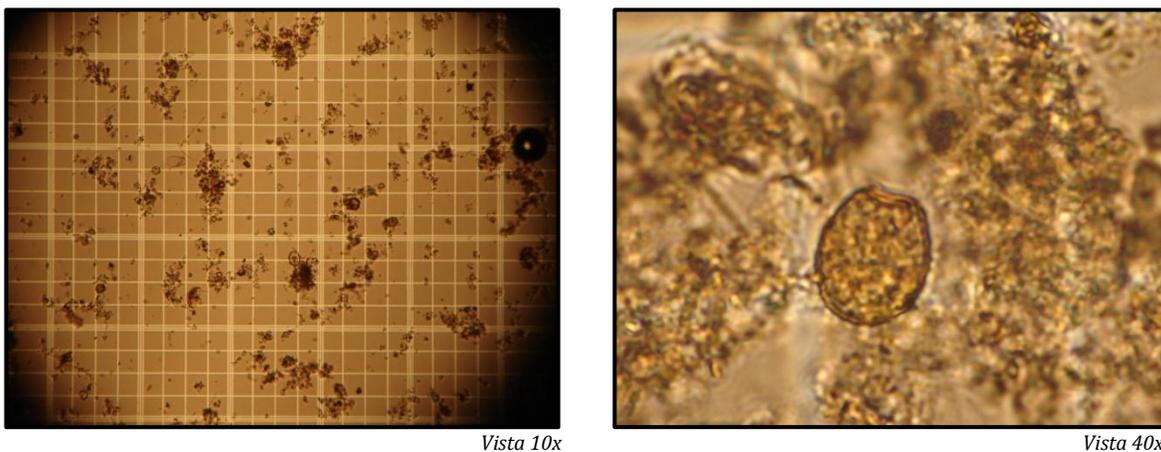


**Figura 33.** Análisis microbiológico al efluente tratado del reactor.

- **Huevos de Helminto**, es uno de los parámetros importantes para el reuso del efluente tratado para uso en riego agrícola (Ayres *et al.*, 1996). (Figuras 34 y 35)



**Figura 34.** Determinación de huevos de Helminto por el Método modificado de Baileger.



**Figura 35.** Vista de la cámara de Neubauer en el microscopio, examinado bajo lentes de 10x y 40x para el conteo de los huevos de helminto.

### X.1.2 Agua de Pozo

La caracterización de estas aguas, tuvo como fin el conocer las condiciones iniciales del agua tratada y del pozo de riego de los dos efluentes que se emplearon en el proceso de lavado de los suelos.

Las técnicas empleadas para la caracterización de las aguas residuales tratadas y las aguas de pozo para el riego, se mencionan a continuación:

- **Cationes y Aniones Solubles**, en las aguas se determinaron los cationes calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) por titulación con sal disódica del ácido Etilen-Diamino-Tetraacetato (EDTA), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ) con Flamómetro 643 IL, carbonatos y bicarbonatos por titulación con ácido sulfúrico 0.01 N, cloruros por titulación con Nitrato de Plata y sulfatos por el método Turbidimétrico mediante un espectrofotómetro (*Richards et al. 1982*).

La concentración salina de las aguas, se obtuvo determinando su Residuo Seco Evaporado (RSE) y el Residuo Seco Calcinado (RSC), colocando alícuotas de 10 mL en cápsulas de porcelanas y llevadas a la estufa a una temperatura de  $105^\circ\text{C}$  para RSE y posteriormente se colocaron en la mufla a  $600^\circ\text{C}$  para obtener el RSC.

- **pH**, la concentración el ión hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia, el intervalo de concentración adecuado para la existencia de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico (típicamente de 6 a 9). Para descargar efluente tratado al ambiente el intervalo de pH permisible normalmente varía de 6.5 a 8.5 (*Metcalfe y Eddy Inc., 2003; Ramalho, 1996*). Este parámetro se determinó con un potenciómetro con electrodo de vidrio (*Richards et al. 1982*) marca Oakton o Hanna Models.
- **Conductividad Eléctrica (C.E.)**, se usa generalmente para indicar la concentración total de constituyentes ionizados en el agua natural. Está íntimamente relacionada con la suma de cationes (o aniones) determinada químicamente y usualmente se correlaciona con el total de sólidos disueltos. Hasta hace unos años se expresaba en  $\text{mmhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ , hoy día las medidas se expresan en  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  (dS: deciSiemens), siendo ambas medidas equivalentes ( $1.0\text{ mmhos}\cdot\text{cm}^{-1} = 1.0\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ). Este parámetro se determinó mediante un Conductímetro cuyo fundamento es un puente de Wheatstone (*Richards et al. 1982; NOM-021-RECNAT-2000*) marca Oakton.
- **Relación de Adsorción de Sodio (RAS)**, se calculará mediante la ecuación siguiente (*Richards et al. 1982*):

$$RAS = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{\frac{[\text{Ca}^{++}] + [\text{Mg}^{++}]}{2}}}$$

$\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  están expresados en  $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$

Esta relación define la influencia del Sodio contenido en las aguas de riego, en la dispersión coloidal de los suelos.

- **Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)**, usando como base cationes solubles previamente determinados, se calcula el PSI por la ecuación:

$$PSI = \frac{100(-0.0126 + 0.01475 RAS)}{1 + (-0.0126 + 0.01475 RAS)}$$

Dónde: RAS = relación de adsorción de sodio



**Contenido de humedad y porcentaje de saturación**, se determinaron para conocer el contenido de agua en los suelos, de acuerdo a los métodos 26 y 27a respectivamente, propuestos en el manual 60 (*Richards et al. 1982*), Figura 38.



**Figura 38.** Determinación del Contenido de Humedad y porcentaje de saturación.

La **densidad aparente** refleja el contenido total de porosidad en un suelo y es importante para su manejo (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 (expresados en % en peso) a valores de % en volumen en el campo. Esta se determinó in situ de acuerdo al método 38 del manual 60 (*Richards et al. 1982*). (Figura 39)



**Figura 39.** Determinación de la densidad aparente in situ.

**Residuo seco evaporado y residuo seco calcinado**, se determinó para cada espesor o estrato de suelo muestreado en el perfil del suelo, a partir de los extractos de saturación para estimar o determinar su concentración de sales, (Figura 40). Los resultados obtenidos corresponden a extractos acuosos a partir de la relación suelo-agua  $1 \approx 0.2-0.6$  o pasta de saturación, (figura 41)



**Figura 40.** Pasta de saturación para obtención de extractos acuosos.



**Figura 41.** Determinación de RSE y RSC.

Las propiedades químicas son las que dependen de la parte más íntima del suelo como es su propia composición química. Las más importantes desde el punto de vista de la génesis del suelo son la alteración mineral y la formación de nuevas especies, además se deben considerar compuestos que perteneciendo a la fase sólida del suelo, pueden pasar fácilmente a la fase líquida por ser altamente solubles, lo que determina su movilidad (Kovda, V. A., et-al. 1967).

Por tanto, se llevó a cabo la determinación de iones básicos como son: cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) y aniones ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) básicos. Empleando las técnicas citadas en la tabla 5. (Figura de la 42 a la 46)



**Figura 42.** Determinación de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$



**Figura 43.** Determinación de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$



**Figura 44.** Determinación de  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$



**Figura 45.** Determinación de  $\text{Cl}^-$

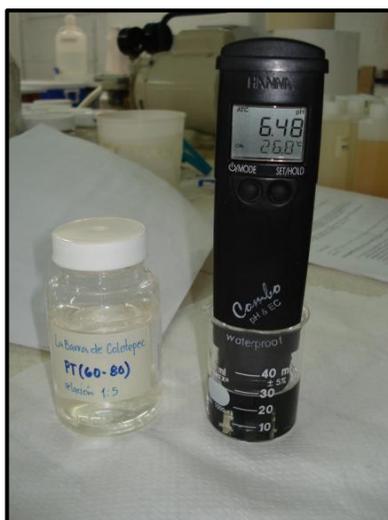


**Figura 46.** Determinación de  $\text{SO}_4^{2-}$

Otros parámetros determinados fueron el pH de la solución del suelo (Figura 47), dicho parámetro es importante ya que algunos iones nutrimentales están indisponibles para las plantas en determinadas condiciones de pH y no son asimilable para las plantas y la conductividad eléctrica del extracto de saturación (C.E.), cuyo parámetro es una forma indirecta de estimar las concentraciones salinas del suelo, (Figura 48). Hasta hace unos años se expresaba en  $\text{mmhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ , hoy día las medidas se expresan en  $\text{dS m}^{-1}$  ( $\text{dS} = \text{deciSiemens}$ ), siendo ambas medidas equivalentes ( $1 \text{ mmhos}\cdot\text{cm}^{-1} = 1 \text{ dS m}^{-1}$ )



**Figura 47.** Medición de la C.E.



**Figura 48.** Medición del pH.

## X.3 Cálculos Estadísticos.

Tabla 29. Parámetros estadísticos.

Perfil	Estrato	pH	C.E. <i>dS m<sup>-1</sup></i>	Salinidad <i>mg·L<sup>-1</sup></i>	Parámetros Estadísticos			
					CE		SALINIDAD	
1 B <sup>1</sup>	0-5	6.94	2.86 b	135.87	<b>m<sub>1</sub>=</b>	<b>4.24</b>	<b>m<sub>1</sub>=</b>	<b>231.60</b>
	5-10	6.96	1.52 b	96.56	<b>σ<sup>2</sup><sub>1</sub>=</b>	<b>5.59</b>	<b>σ<sup>2</sup><sub>1</sub>=</b>	<b>345.78</b>
	10-15	6.97	1.53 b	61.71	<b>C.V.=</b>	<b>1.32</b>	<b>C.V.=</b>	<b>1.49</b>
	15-20	7.21	1.58 b	60.79				
	20-25	7.27	1.50 b	73.70				
	25-30	7.30	1.75 b	91.98				
	30-35	7.31	2.18 b	102.43				
	35-40	7.15	3.36 b	157.98				
	40-45	7.13	6.64 ab	349.33				
	45-50	6.90	19.49 a*	1185.66				
2 A <sup>1</sup>	0-5	7.16	1.68 b	65.26	<b>m<sub>1</sub>=</b>	<b>8.50</b>	<b>m<sub>1</sub>=</b>	<b>498.37</b>
	5-10	7.29	1.13 b	42.96	<b>σ<sup>2</sup><sub>1</sub>=</b>	<b>12.57</b>	<b>σ<sup>2</sup><sub>1</sub>=</b>	<b>823.66</b>
	10-15	7.43	1.25 b	47.18	<b>C.V.=</b>	<b>1.48</b>	<b>C.V.=</b>	<b>1.65</b>
	15-20	7.46	1.32 b	54.52				
	20-25	7.49	1.61 b	77.71				
	25-30	7.50	2.77 b	120.68				
	30-35	7.41	5.11 b	253.77				
	35-40	7.29	10.88 ab	608.14				
	40-45	6.96	18.99 a*	1073.11				
	45-50	6.94	40.28 a*	2640.42				
3 B <sup>1</sup>	0-5	7.08	1.74 b	79.55	<b>m<sub>1</sub>=</b>	<b>1.59</b>	<b>m<sub>1</sub>=</b>	<b>80.99</b>
	5-10	7.20	1.18 b	52.23	<b>σ<sup>2</sup><sub>1</sub>=</b>	<b>0.60</b>	<b>σ<sup>2</sup><sub>1</sub>=</b>	<b>27.98</b>
	10-15	7.15	1.20 b	51.17	<b>C.V.=</b>	<b>0.38</b>	<b>C.V.=</b>	<b>0.35</b>
	15-20	7.25	1.27 b	55.94				
	20-25	7.34	1.26 b	71.72				
	25-30	7.40	1.30 b	86.80				
	30-35	7.49	1.38 b	86.37				
	35-40	7.51	1.53 b	92.28				
	40-45	7.47	1.91 b	86.55				
	45-50	7.40	3.17 b	147.29				
4 B <sup>1</sup>	0-5	7.16	0.76 b	27.80	<b>m<sub>1</sub>=</b>	<b>1.34</b>	<b>m<sub>1</sub>=</b>	<b>85.24</b>
	5-10	7.10	0.80 b	47.17	<b>σ<sup>2</sup><sub>1</sub>=</b>	<b>0.79</b>	<b>σ<sup>2</sup><sub>1</sub>=</b>	<b>40.48</b>
	10-15	7.25	0.90 b	55.20	<b>C.V.=</b>	<b>0.59</b>	<b>C.V.=</b>	<b>0.47</b>
	15-20	7.39	1.00 b	64.63				
	20-25	7.40	1.05 b	82.35				
	25-30	7.47	1.14 b	101.20				
	30-35	7.68	1.27 b	110.00				
	35-40	7.54	1.38 b	118.73				
	40-45	7.61	1.68 b	78.67				
	45-50	7.80	3.46 b	166.67				

NOTAS: <sup>1</sup>Pruebas de medias entre perfiles de suelo para la variable conductividad eléctrica de la solución del suelo.

\* Significancia (Duncan, 0.05)