

21



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

DETERMINACION DEL GRADO DE SALINIDAD Y/O  
SODICIDAD EN SUELOS DE SAN JUAN ZITLALTEPEC  
MUNICIPIO DE ZUMPANGO, ESTADO DE MEXICO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**I N G E N I E R A   A G R I C O L A**

**P R E S E N T A :**

**MARIA GUADALUPE DEL CARMEN SALCEDO FERNANDEZ**

ASESOR: O. CELIA ELENA VALENCIA ISLAS

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO

2002

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



SECRETARÍA NACIONAL  
AGENCIA LE  
MEXI

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
P R E S E N T E

DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES  
ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Determinación del grado de salinidad y/o sodicidad en suelos de San Juan  
Zitlattepec, Municipio de Zumpango, Estado de México"

que presenta la pasante: María Guadalupe del Carmen Salcedo Fernández  
con número de cuenta: 9256829-7 para obtener el título de :  
Ingeniera Agrícola

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 10 de Junio de 2002

PRESIDENTE O. Celia Elena Valencia Islas

VOCAL Ing. José Manuel Arriola Guerrero

SECRETARIO Q. Arcadia Hernández Beltrán

PRIMER SUPLENTE Ing. Judith Hernández Alfonsina

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Salvador C. del Castillo Rabadán

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, por brindarme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria, por darme la oportunidad de explorar nuevos universos, conduciéndome por las fronteras del conocimiento; así como a sus docentes por compartir conmigo sus conocimientos y sus yerros.

Gracias por brindarme la oportunidad de ser un hijo egresado de esta Casa de Estudios.

Agradezco a la carrera de Ingeniería Agrícola ya que fue el lugar donde pude observar el horizonte desde diferentes perspectivas.

Agradezco infinitamente a la Química Celia Elena Valencia Islas ya que sus observaciones y sugerencias brindadas a este trabajo hicieron posible verlo hecho realidad, así también tengo que agradecer su apoyo al aceptar la dirección de este trabajo de tesis y como por la amistad que me ha demostrado en el desarrollo del mismo.

Agradezco a los miembros que integran el jurado por su atención y sus atinadas y valiosas sugerencias para enriquecer este trabajo de tesis.

Agradezco a mis amigos y compañeros por la ayuda que recibí en forma desinteresada de todos y cada uno de ustedes; en donde quiera que se encuentren agradezco su amistad, confianza y apoyo, ya que de alguna forma han contribuido en mi formación profesional.

Agradezco a todos mis amigos que aunque no son muchos..... sí son los mejores.

Agradezco a mis tías y tíos, ya que sin su apoyo incondicional y económico, este trabajo no podría ser lo que ahora es... un sueño cristalizado en realidad.

## DEDICATORIAS

### A DIOS:

Por darme la oportunidad de vivir y de disfrutar todo esto, por ser la Torre Fuerte en la que me cobijo en los momentos de tempestad y de quien tengo la satisfacción de expresar: "Señor Dios mío, que grande eres, todo lo has hecho con sabiduría y la tierra se llena de tus portentos".

### A MIS PADRES:

Raúl Salcedo Basurto

Por que me has apoyado con todo lo que estuvo a tu alcance y por haberme dado la confianza de saber que podía alcanzar todo lo que me propusiera, gracias papá y espero no defraudarte nunca.

Ma. Elena Fernández Morán

Por ser la amiga que ha estado conmigo compartiendo buenos y malos momentos, y sé que siempre estará ahí apoyándome incondicionalmente, a pesar de todo.

Este triunfo también es de ustedes, ya que son la parte fundamental de mi vida. Se los dedico y comparto con ustedes la alegría de haber concluido una etapa en mi vida, en la cual los dos son actores principales.

"GRACIAS"

### A MIS HERMANAS:

María Elena y Marina Salcedo

Por enseñarme a ver el potencial que albergo en mi ser, porque muchas veces las cosas que vivimos son mejores cuando estamos juntas. Saber que estarán ahí cuando lo llegue a necesitar, es un gran estímulo para mí.

Mariana Salcedo

Por ser el motivo y baluarte que me impulsa a concluir este camino tan largo y que me da fuerzas para salir adelante en la vida, que aunque seas mi hermana, mi compromiso contigo es estar siempre a tu lado, impulsándote y enseñándote siempre de lo mejor de mi persona.

#### A MI HERMANO:

Ricardo Salcedo

Por ser ejemplo de superación, porque todo cuanto te propones lo logras, no importa que a veces el resultado no sea el que esperabas, pero siempre, a pesar de todo, lo intentas. Cuentas con mi apoyo, como sabes que tu cuentas con el mío.

A todos ustedes mis hermanos que no son sino sinónimo de diversidad y tolerancia que me permiten ser como soy y cuyo apoyo fue fundamental para la culminación de mis estudios.

Esta es una meta que hemos alcanzado **juntos** trabajando como lo que somos: una familia.

#### A MIS TÍAS Y TÍOS:

Con gratitud por los momentos difíciles en que me ayudaron, para poder culminar este sueño. En especial a:

Marina Guadalupe y María del Socorro Fernández Morán;  
Bertha Salcedo Basurto

#### A MÍ:

Por el simple hecho de haber alcanzado mi más grande meta hasta ahora, en la cual muchas personas tuvieron inferencia y a las cuales les doy las gracias.

Porque sé que todo lo que cuesta trabajo, tiene más valor cuando se llega a lograr.

## ÍNDICE

	Pág.
Índice de tablas	5
Índice de diagramas y figuras	7
Resumen	8
<b>1. Introducción y Objetivos</b>	<b>10</b>
<b>2. Generalidades</b>	<b>13</b>
2.1 Origen y formación de los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad.	13
2.1.1 Origen y formación de los suelos salinos	13
2.1.1.1 Naturaleza de las sales solubles	14
2.1.1.2 Origen antrópico de los suelos salinos	18
2.1.2 Origen y formación de los suelos sódicos	19
2.1.3 Origen y formación de los suelos salino-sódicos	22
2.2 Distribución geográfica de los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad.	23
2.2.1 Distribución de los suelos salinos en América	25
2.3 Procesos genéticos que intervienen en la formación de suelos salinos y/o sódicos.	26
2.4 Clasificación de los suelos con problemas de salinidad y/o alcalinidad.	28
2.4.1 Solonchak.	29
2.4.2 Solonetz.	31
2.4.3 Xerosol.	33
2.4.4 Yermosol.	34
2.5 Parámetros utilizados para la caracterización de los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad.	35
2.5.1 Conductividad eléctrica.	35
2.5.2 Razón de adsorción de sodio (RAS) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).	37
2.5.3 Reacción del suelo o pH.	40
2.6 Propiedades físicas y químicas de los suelos con problemas de salinidad.	42
2.6.1 Suelos salinos.	42
2.6.1.1 Propiedades físicas.	42
2.6.1.2 Propiedades químicas.	42
2.6.2 Suelos sódicos.	43
2.6.2.1 Propiedades físicas.	43
2.6.2.2. Propiedades químicas.	44
2.6.3 Suelos salinos – sódicos.	45
2.6.3.1 Propiedades físicas.	45
2.6.3.2 Propiedades químicas.	45

2.7 Propiedades biológicas de los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad.	46
2.8 Efecto de la salinidad y alcalinidad sobre el crecimiento de las plantas.	47
2.8.1 Relaciones hídricas.	47
2.8.2 Problemas de toxicidad.	48
2.8.3 Problemas en la estructura del suelo.	48
2.8.4 Balance energético.	48
2.8.5 Nutrición.	49
2.8.6 Clasificación de los cultivos según su tolerancia relativa a la salinidad.	49
3. Recuperación de suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad.	53
3.1 Métodos de recuperación.	54
3.1.1 Recuperación por métodos físicos.	55
3.1.1.1 Inversión del perfil.	56
3.1.1.2 Acondicionamiento de la textura del suelo.	56
3.1.1.3 Subsoleo.	57
3.1.1.4 Labranza o barbecho profundo.	58
3.1.1.5 Uso de películas o capas plásticas.	58
3.1.2 Recuperación por métodos hidrotécnicos.	59
3.1.2.1 Métodos del riego.	60
3.1.2.1.1 Método por surcos.	60
3.1.2.1.2 Método por goteo.	61
3.1.2.1.3 Método por subirrigación.	61
3.1.2.1.4 Métodos por aspersión.	61
3.1.2.1.5 Método por inundación.	61
3.1.2.2 Selección del método de riego:	62
3.1.3 Recuperación por métodos biológicos.	62
3.1.3.1 Efectos de la vegetación sobre las propiedades del suelo.	62
3.1.3.2 Efecto de la adición de la materia orgánica sobre las propiedades físicas y químicas al suelo.	64
3.1.3.2.1 Aplicación de estiércoles o abonos.	65
3.1.3.2.2. Aplicación de abonos verdes.	66
3.1.3.2.3 Residuos de cosecha.	67
3.1.3.2.4 Residuos de los ingenios azucareros durante la producción de azúcar (cachaza)	67
3.1.4 Recuperación por métodos eléctricos.	67
3.1.4.1 Desalinización por la aplicación de corriente eléctrica.	68
3.1.4.2 Desodificación por la aplicación de corriente eléctrica.	69
3.1.5 Recuperación por métodos químicos.	70
3.1.5.1 Elección del mejorador.	72
3.1.5.2 Acción química del mejorador.	73
3.1.5.2.1 Sulfato de calcio (yeso)	74
3.1.5.2.2 Cloruro de calcio.	74



3.1.5.2.3	Azufre.	75
3.1.5.2.4	Ácido sulfúrico.	76
3.1.5.2.5	Sulfatos de hierro y aluminio.	76
3.1.5.2.6	Polisulfuro de calcio.	77
3.1.5.2.7	Caliza.	77
3.1.5.2.8	Sulfato de sodio.	78
3.1.5.2.9	Residuos industriales.	78
3.1.6	Recuperación por métodos químicos - hidrotécnicos (uso de aguas salinas como método para recuperar suelos sódicos)	79
3.1.7	Efecto combinado del establecimiento de vegetación y adiciones de materia orgánica sobre el sodio adsorbido del suelo.	80
3.2	Propuesta para la recuperación de los suelos salinos y/o sódicos.	80
3.3	Recomendaciones para la utilización de suelos con problemas de salinidad.	84
3.3.1	Cultivos para suelos salinos.	85
3.3.2	Riego deficitario.	86
3.4	Medidas post-recuperativas.	86
4.	Materiales y métodos	87
4.1	Ubicación de la zona de estudio	87
4.1.1	Geología.	87
4.1.2	Climatología.	89
4.1.2.1	Temperatura.	91
4.1.2.2	Precipitación	91
4.1.2.3	Granizo.	92
4.1.3.4	Vientos	92
4.1.3	Hidrología.	92
4.1.4	Uso del suelo.	92
4.1.5	Tipos de suelo.	93
4.1.6	Agricultura.	94
4.1.7	Aspectos socioeconómicos.	96
4.1.7.1	Tenencia de la tierra.	96
4.1.7.2	Población económicamente activa en el sector agropecuario.	97
4.2	Trabajo de campo.	98
4.2.1	Muestreo de suelos.	98
4.2.2	Materiales utilizados en la etapa de muestreo.	99
4.3	Trabajo de laboratorio.	99
4.3.1	Preparación de muestras.	99
4.3.2	Análisis granulométrico por el método de Bouyoucos (textura)	100
4.3.3	Densidad aparente, densidad real y porcentaje de espacio poroso.	100
4.3.4	Color	100
4.3.5	pH potencial y pH real.	100
4.3.6	Porcentaje de materia orgánica	100

4.3.7 Calcio y magnesio intercambiables	101
4.3.8 Sodio y potasio intercambiables.	102
4.3.9 Medida de la sodicidad: PSI y RAS.	102
4.3.10 Capacidad de intercambio catiónico total.	103
4.3.11 Fósforo asimilable por el método de Olsen.	103
4.3.12 Porcentaje de carbonatos de calcio en suelos.	103
4.3.13 Conductividad eléctrica por conductimetría, pasta de saturación y porcentaje de saturación.	104
4.4 Resultados.	105
4.5 Análisis y discusión de los resultados.	114
5. Conclusiones y Recomendaciones.	116
6. Bibliografía	118

## ÍNDICE DE TABLAS.

Núm. DE TABLA	TITULO DE LA TABLA	Pág.
Tabla Núm. 1	Condiciones naturales e inducidas que provocan la salinidad del suelo.	13
Tabla Núm. 2	Composición de la corteza terrestre, según Clark (en %)	15
Tabla Núm. 3	Coefficiente de energía, según Fersman	16
Tabla Núm. 4	Movilidad durante la meteorización y capacidad de migración de diversos elementos.	17
Tabla Núm. 5	Diferentes tipos de suelos salinos, basados en la clase de sal predominante y su origen.	17
Tabla Núm. 6	Extensión de la salinización inducida por el hombre en el mundo.	24
Tabla Núm. 7	Problemas de salinidad en el Estado de Sonora y la afectación de terrenos agrícolas por salinidad y/o sodicidad.	26
Tabla Núm. 8	Diferentes clasificaciones de los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad.	28
Tabla Núm. 9	Grados de salinidad, con base en la conductividad eléctrica específica (CE) establecido por el United States Salinity de Riverside.	36
Tabla Núm. 10	Solubilidad de las principales sales encontradas en un suelo árido sometido a una temperatura de 40°C	37
Tabla Núm. 11	Categorías de suelos.	38
Tabla Núm. 12	Clasificación de suelos sódicos según Richards.	38
Tabla Núm. 13	Clasificación de suelos sódicos según Massoud.	39
Tabla Núm. 14	Descripción del pH en la pasta de saturación.	40
Tabla Núm. 15	Frecuencia, grados de solubilidad y los efectos tóxicos particulares las sales presentes en los suelos salinos.	43
Tabla Núm. 16	Tolerancia de frutales a la salinidad.	49
Tabla Núm. 17	Tolerancia de hortalizas a la salinidad.	50
Tabla Núm. 18	Tolerancia de los cultivos comunes a la salinidad.	50
Tabla Núm. 19	Tolerancia de las plantas forrajeras.	51
Tabla Núm. 20	Relación de algunos cultivos con el PSI.	51
Tabla Núm. 21	Clases de suelos sódicos y su relación con PSI y producción.	52
Tabla Núm. 22	Métodos de recuperación de suelos salinos y sódicos.	55
Tabla Núm. 23	Cambios del pH del extracto acuoso de un suelo salino no sódico bajo electrólisis.	68
Tabla Núm. 24	Efecto de la saturación con sodio y calcio sobre las propiedades físicas de la fracción coloidal del suelo.	70

Tabla Núm. 25	Composición de los residuos de azucarería.	78
Tabla Núm. 26	Revisión de trabajos realizados en la zona con anterioridad	83
Tabla Núm. 27	Fórmula climática de la zona de Zumpango de Ocampo.	89
Tabla Núm. 28	Datos climatológicos de Zumpango de Ocampo.	91
Tabla Núm. 29	Producción agrícola 1994, Zumpango de Ocampo.	95
Tabla Núm. 30	Ejidos por comunidad; 1991 y 1993, Zumpango.	97
Tabla Núm. 31	Población ocupada por sector de actividad, 1990. Zumpango de Ocampo.	97
Tabla Núm. 32	Número de pozos y profundidad en cm.	98
Tabla Núm. 33	Principales funciones de la materia orgánica.	101
Tabla Núm. 34	Interpretación de los valores de porcentaje de sodio intercambiable (PSI)	102
Tabla Núm. 35	Clasificación textural.	105
Tabla Núm. 36	Clasificación de color.	106
Tabla Núm. 37	Densidad real, densidad aparente y porcentaje de espacio poroso.	107
Tabla Núm. 38	pH potencial, pH real y pH de la pasta.	108
Tabla Núm. 39	Porcentaje de materia orgánica, porcentaje de nitrógeno total y fósforo asimilable.	109
Tabla Núm. 40	Capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiables y % de saturación de bases.	110
Tabla Núm. 41	CEe (dSm/m) del extracto de la pasta de saturación y de la pasta de saturación.	111
Tabla Núm. 42	CEe (dSm/m) de la relación suelo agua 1:2 y del suelo húmedo.	112
Tabla Núm. 43	RAS y PSI	113

## ÍNDICE DE FIGURAS Y DIAGRAMAS

Núm. DE DIAGRAMA	TITULO DEL DIAGRAMA	Pág.
Diagrama Núm. 1	Transformación de un suelo normal a uno salino-sódico.	23
Diagrama Núm. 2	Transformación de un suelo salino-sódico a uno normal.	65
Núm. DE FIGURA	TITULO DE LA FIGURA	Pág.
Figura Núm. 1	Distribución geográfica de los suelos salinos (Solonchak) y sódicos (Solonetz) en el mundo (adaptado de FitzPatrick, 1980)	24
Figura Núm. 2	Salinidad y Riego en la República Mexicana.	25
Figura Núm. 3	Perfiles tipo de Solonchak (fuente: P.Duchaufour)	31
Figura Núm. 4	Perfil tipo de un Solonetz órtico y de un suelo salino-sódico (fuente: P.Duchaufour)	32
Figura Núm. 5	Relación entre el RAS del extracto de saturación y el PSI del suelo en equilibrio con el extracto.	39
Figura Núm. 6	Clasificación de los suelos a partir del PSI, CEe y pH.	41
Figura Núm. 7	El territorio de Zumpango, colinda al norte con los municipios de Tequixquiác y Hueyxpoxtla; al sur con Nextlalpan, Jaltenco, Melchor Ocampo y Cuautitlán; al este con Tecamac y el Estado de Hidalgo; al oeste con Huehuetoca, Coyotepec y Teoloyucan.	88
Figura Núm. 8	Ubicación de la zona de estudio y sitio de muestreo.	90
Figura Núm. 9	Uso del suelo en el municipio de Zumpango.	93
Figura Núm. 10	Ubicación de los pozos de muestreo.	99

## RESUMEN

En 1998 se llevaron a cabo una serie de reuniones con productores de la zona de San Juan Zitaltepec, Zumpango, Estado de México los que solicitaron el apoyo por parte de alumnos y profesores de la FES-C/UNAM para la caracterización de suelos y aguas de uso agrícola, así como para la detección de los principales problemas existentes relacionados con estos dos recursos en dicha zona. Y así posteriormente formar un grupo de trabajo el cual pudiera dar asesoría sobre el manejo y recuperación de los suelos de esta zona. Se decidió atender a la solicitud tomando como base para este trabajo el aspecto del suelo.

La presente tesis, abarca los siguientes aspectos: revisión bibliográfica detallada utilizando, principalmente, información de fuentes bibliográficas, hemerográficas, folletos y consultas hechas a través de Internet; así como de experiencias documentadas en trabajos de tesis realizados en suelos con problemas similares y cercanos a la zona de estudio. Toda esta información actualizada incluye información relacionada con las principales características de los suelos salinos, sódicos y salino-sódicos, su génesis y clasificación así como una descripción de los principales parámetros que se utilizan para su caracterización.

Otra parte que se efectuó para cumplir con los objetivos de este trabajo de tesis fue la caracterización física y química de los suelos a través de una serie de metodologías analíticas, por lo que se investigaron los principales parámetros que se requieren conocer y determinar en el laboratorio para poder hacer la caracterización de un suelo salino y/o sódico, así como el grado de problemas que presentará para su recuperación.

Además, a pesar de que entre los objetivos de esta tesis no se planteaba llevar a cabo la recuperación de los suelos, se consideró importante recabar la información relacionada para su rehabilitación o recuperación, para que así las personas a las que les correspondiese realizarla pudieran contar con información reciente y actualizada de la forma en que se pueden corregir los efectos de la salinidad y/o sodicidad en los suelos.

También se investigó, lo relacionado con la economía del municipio, su producción y otros aspectos importantes para poder elaborar pláticas que puedan contribuir para hacer conocer a los productores la repercusión que el problema de salinidad tiene dentro de las actividades económicas de su comunidad.

Asimismo, se mencionan experiencias reportadas en revistas técnicas y científicas de varios países, en otros idiomas e inaccesibles para los productores de la zona, pero que servirán para la elaboración de los folletos que se pondrán a disposición de éstos, para planear las asesorías que se les darán. Posteriormente, se presentan una serie de conclusiones y recomendaciones basadas principalmente en los resultados de los análisis realizados y en la observación del área de estudio.

Todo lo anterior, contenido dentro de un marco bibliográfico, lo suficientemente amplio como para facilitar que otro grupo de investigadores continúen con la línea de investigación propuesta y así realizar los subsiguientes trabajos de recuperación de los suelos de la comunidad de San Juan Zitlaltepec, municipio de Zumpango, Estado de México. Por lo que el presente trabajo queda a disposición de los productores de la zona de estudio y demás personas interesadas que desean conocer ampliamente las características principales, la génesis y forma de rehabilitación de los suelos, salinos, salinos-sódicos y sódicos.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Muchos economistas han sostenido que para promover un verdadero desarrollo económico, en cualquier país, es necesario contar con un sector agropecuario fuerte, capaz de obtener excedentes agrícolas suficientes para hacer transferencias de recursos netos al sector no agrícola, ésta es la base para iniciar y sostener un crecimiento económico fuerte (Kocher, 1976 citado por Jasso, 1998).

La base de la producción agrícola está en los recursos agua y suelo; sin embargo, el crecimiento de la población, el aumento de las demandas derivadas de él y su deficiente manejo han afectado éstos recursos, lo que limita incluso, en algunos casos, la productividad de los cultivos.

Durante las últimas décadas, como consecuencia del crecimiento acelerado de los principales centros de población, se han registrado diversos problemas, resultando principalmente los que repercuten sobre las áreas aledañas a ellos mismos, puesto que en estas últimas se reciben los desechos generados en tales centros. Un ejemplo de ello es la contaminación de la zona lacustre de Xochimilco en el D.F., el lago de Guadalupe y la laguna de Zumpango en el Edo. de México, las presas Requena y Endhó en Hidalgo, Trígomil y Miraplanes en Jalisco y la laguna de Yuriría en Guanajuato, entre otros (Jiménez, 1997).

Cuando los agricultores riegan las plantas que comemos, si las sales que se encuentran disueltas en el agua son abundantes éstas se depositan en el suelo, así que cuanto más se riegan los suelos se vuelven más salinos, si sus características físicas son inadecuadas. Con el transcurso del tiempo, áreas eminentemente agrícolas de todos los continentes, han perdido su productividad, debido a la acumulación de sales en los suelos provocada por el mal uso y manejo de aguas, suelos y plantas en ellos.

Como en los países ricos los agricultores han regado extensivamente en las últimas décadas, el problema ha ido creciendo proporcionalmente; además, la temperatura ha ido aumentando globalmente en la Tierra por lo que la sequía constituye cada vez un problema mayor, especialmente en los países más pobres del mundo, donde se incrementa la hambruna y la muerte.

En México, los problemas de salinidad han adquirido una magnitud considerable, ya que cuando se inició el riego de grandes extensiones, la salinidad, sus causas y efectos, no eran bien entendidos, y se le dio poca importancia al problema que representaba. Esto ha provocado que en la actualidad, el 33% de la superficie bajo riego se encuentre afectada, principalmente en lo que a fertilidad se refiere, en mayor o menor grado, disminuyendo notablemente la productividad de algunos distritos de riego lo que ha causado pérdidas económicas al país.



Basándonos en lo anteriormente expuesto, el presente trabajo de tesis se relaciona con los terrenos que son improductivos por causas de salinidad y/o sodicidad y que no pueden ser utilizados de forma eficiente para atender la demanda creciente de alimentos en nuestro país.

Los trabajos de muestreo y recolección de muestras se realizaron en los límites del poblado de San Juan Zitlaltepec, municipio de Zumpango, Estado de México, cerca de la laguna de Zumpango (Fig. Núm. 8).

## **OBJETIVOS:**

### **OBJETIVO GENERAL:**

Realizar la caracterización física y química de los suelos de San Juan Zitlaltepec, Municipio de Zumpango, Estado de México utilizando los principales parámetros analíticos, para clasificarlos como salinos y/o sódicos, y deducir a partir del conocimiento de su nivel de fertilidad, cuáles son los principales problemas que presentan para su uso con fines agrícolas.

### **OBJETIVOS PARTICULARES:**

- Recopilar información sobre génesis, clasificación y caracterización de los suelos salinos y/o sódicos.
- Conocer los principales parámetros analíticos que se requieren para caracterizar a un suelo salino, sódico o salino sódico.
- Reunir información sobre los efectos de la salinidad y/o sodicidad en el crecimiento de las plantas, así como de la recuperación y rehabilitación de estos suelos, que sirva de base para investigaciones posteriores.
- Identificar los problemas de fertilidad en los suelos de la zona de estudio y de que manera se están relacionando con la salinidad y/o la sodicidad del suelo.
- Proporcionar material de apoyo (bibliográfico, resultados analíticos, sugerencias y recomendaciones) para que otros profesionistas del área puedan continuar con este trabajo en conjunto con los productores de la zona.

## 2. GENERALIDADES.

### 2.1 Origen y formación de los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad.

Al proceso de acumulación de sales en los suelos con predominio del calcio y el magnesio se le denomina salinización. Cuando es el sodio el que predomina principalmente, el suelo evoluciona de una manera distinta desarrollándose un proceso llamado sodificación o alcalinización con resultados completamente distintos, este fenómeno se encuentra asociado con los procesos naturales de formación y a los inducidos por el hombre. Estos procesos se pueden apreciar en la tabla siguiente:

Tabla Núm. 1. Condiciones naturales e inducidas que provocan la salinidad del suelo.

<b>CONDICIONES NATURALES</b>	<b>CONDICIONES INDUCIDAS</b>
Actividad volcánica.	Empleo en forma continua de aguas de mala calidad.
Climas áridos de fuerte evapotranspiración donde las sales se acumulan.	Uso de las sales residuos de la industria.
Movimiento de sales por el viento.	Uso excesivo de volúmenes de riego, que favorecen la elevación del manto freático.
Cercanía del mar que contiene sales en gran cantidad.	Exceso de bombeo por lo que existe una intrusión de aguas salinas por abatimiento de niveles en los acuíferos.
Resultado de fenómenos biológicos.	Dosis excesivas de fertilización.
Degradación natural de las rocas y minerales.	Manejo deficiente del agua de riego principalmente en las regiones áridas donde la escasez de lluvias impide el lavado de los suelos y las sales tienden a acumularse lo que forma costras impermeables.
Depresiones con drenaje impedido.	
Planicies con inundaciones periódicas.	
Deltas de ríos.	

FUENTE: Adaptado de Moctezuma H., M. 1987.

#### 2.1.1 Origen y formación de los suelos salinos.

La corteza terrestre está formada por los minerales primarios que son la fuente principal de sales en los suelos, en orden de importancia, le siguen los océanos, donde se generan las llamadas "sales cíclicas". Otras fuentes son los volcanes, los microorganismos capaces de fijar o liberar nitrógeno o dióxido de carbono y los desechos industriales.

Si las sales liberadas por las rocas y los minerales primarios permanecieran en su lugar de origen, no tendrían tanta trascendencia en los procesos de formación de suelos con problemas de sales y/o sodio; es decir, la cuestión surge cuando las sales son transportadas, porque usualmente se acumulan en otras áreas lo que intensifica los problemas asociados con la salinidad.

Con la excepción del transporte atmosférico de sales, el movimiento de éstas se encuentra íntimamente ligado a los movimientos de agua. Una vez que las sales han sido introducidas en una determinada cuenca, la acumulación es factible si se presentan las siguientes condiciones naturales o inducidas:

- Cuando los mecanismos de acumulación de sales se producen por condiciones naturales, se generan principalmente suelos con problemas de salinidad debido a deficiencias de drenaje superficial y/o subterráneo, ya que cuando las aguas no drenan de manera satisfactoria se encharcan o alcanzan altos niveles freáticos que al evaporarse o evapotranspirar acumulan las sales que estaban disueltas en la parte superior del suelo.
- Cuando los mecanismos son inducidos, la acumulación de sales representa un problema de importancia económica, ya que, por lo regular, se presenta en áreas agrícolas bajo riego causados por el mal manejo del recurso agua.

Los suelos salinos se originan por acumulación de sales solubles en el perfil y se asocian a las condiciones hidrológicas de los depósitos superficiales del agua subterránea. Se caracterizan por su alto contenido de sales (en la superficie o en cualquier punto del perfil o por debajo de ésta). No es posible definirlos morfológicamente ya que no muestran cambios de estructura en el espesor del perfil y no presentan horizontes de diferenciación.

#### **2.1.1.1 Naturaleza de las sales solubles.**

Las sales solubles pueden proceder directamente del material original, ya que algunas rocas, fundamentalmente las sedimentarias, contienen sales como minerales constituyentes, y en otros casos ocurre que si bien el material original no contiene estas sales, se pueden producir en el suelo por alteración de los minerales originales de la roca madre.

En cuanto a su composición, estas sales son el resultado de la combinación de unos pocos elementos químicos, fundamentalmente: oxígeno, calcio, magnesio, sodio, potasio, cloro, azufre, carbono, nitrógeno. Estos elementos necesarios para la formación de las sales son muy frecuentes en la corteza terrestre (Tabla Núm. 2).

Tabla Núm. 2 Composición de la corteza terrestre, según Clark (en %)

<b>ELEMENTO</b>	<b>%</b>
Oxígeno	49.13
Silicio	26.00
Aluminio	7.45
Hierro	4.20
Calcio	3.25
Sodio	2.40
Magnesio	2.35
Potasio	2.35
Hidrógeno	1.00
Titanio	0.61
Carbono	0.35
Cloro	0.20
Fósforo	0.12
Azufre	0.10
Manganeso	0.10

FUENTE: Fitz Patrick; 1985.

Las sales se producen por la meteorización de las rocas ígneas y se acumulan en rocas sedimentarias, suelos y aguas. Otra parte de sus iones constituyentes, fundamentalmente cloro y azufre procede de las emanaciones volcánicas.

Además, las sales disueltas en las aguas de escorrentía, tienen también sales disueltas que se acumulan en las depresiones y al evaporarse en ésta solución se forman depósitos salinos. Muchos de los suelos salinos en el mundo deben su salinidad a esta causa.

También frecuentemente los suelos toman las sales a partir de mantos freáticos suficientemente superficiales (normalmente a menos de 3 metros). Los mantos freáticos siempre contienen sales disueltas en mayor o menor proporción y en las regiones áridas estas sales ascienden a través del suelo por capilaridad. En general, la existencia de mantos freáticos superficiales ocurre en las depresiones y tierras bajas, y de aquí la relación entre la salinidad y la topografía.

La contaminación de sales de origen eólico es otra causa de salinización. El viento en las regiones áridas arrastra gran cantidad de partículas en suspensión, principalmente carbonatos, sulfatos y cloruros que pueden contribuir en gran medida a la formación de suelos con sales.

El enriquecimiento de sales en un suelo se puede producir, en las zonas costeras, principalmente por la contaminación directa del agua de mar, a partir del nivel freático salino y por la contribución del viento en el acarreo de sales.

En algunas ocasiones, la descomposición de los residuos de las plantas, libera sales que estaban incluidas en sus tejidos y contribuyen de esta manera a aumentar la salinidad del suelo; otras veces las plantas contribuyen a la descomposición de minerales relativamente insolubles y a partir de ellos se forman sales. De cualquier manera, aunque este efecto ha sido mostrado por varios autores (examinando la salinidad de suelos sin vegetación y suelos con un determinado tipo de vegetación) globalmente este efecto carece de importancia.

Las sales pueden encontrarse en el suelo de varias formas: precipitadas bajo la forma de cristales, disueltas en la solución, o bien retenidas en el complejo de cambio.

El contenido en sales de cualquiera de estas tres condiciones cambia continuamente cuando la humedad edáfica pasa las sales de una posición a otra. Así en el:

- Período seco: la cristalización aumenta, las sales en solución disminuyen (aunque la solución se concentra) y aumentan las adsorbidas.
- Período húmedo: el comportamiento es inverso, la cristalización disminuye, las sales en solución aumentan (la solución se diluye) y disminuyen las adsorbidas.

La secuencia se inicia con la liberación de los iones constituyentes de las rocas y minerales, su movilidad y su facilidad para acumularse en las depresiones fisiográficas, lo que genera suelos salinos, son inversamente proporcionales al coeficiente de energía de estos iones (ver Tabla Núm. 3).

Tabla Núm. 3 Coeficiente de energía, según Fersman

<b>ANIONES</b>		<b>CACIONES</b>	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,18	K <sup>+</sup>	0,36
Cl <sup>-</sup>	0,23	Na <sup>+</sup>	0,45
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0,66	Ca <sup>+2</sup>	1,75
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	0,78	Mg <sup>+2</sup>	2,10
SiO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,75	Al <sup>+3</sup>	4,25
		Fe <sup>+3</sup>	5,15

FUENTE: Fitz Patrick; 1985

Por tanto, los nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos de iones alcalinos y alcalinotérreos, son las sales que con mayor facilidad han de formarse como consecuencia de la meteorización de la corteza terrestre por lo que se pueden clasificar de esta manera por su facilidad de lavado (ver Tabla Núm.4).

Tabla Núm. 4 Movilidad durante la meteorización y capacidad de migración de diversos elementos.

<b>GRUPO</b>	<b>FACILIDAD DE LAVADO</b>	<b>ELEMENTOS</b>
1	Virtualmente no lavable	silicio (en cuarzo).
2	Débilmente lavable	hierro, aluminio, silicio.
3	Lavable	silicio, fósforo, manganeso.
4	Fuertemente lavable	calcio, sodio, potasio, magnesio, cobre, cobalto, zinc
5	Muy fuertemente lavable	cloro, bromo, iodo, azufre, carbono, boro.

FUENTE: Pizarro, F. 1978

La posibilidad de encontrar los compuestos en los suelos salinos y aguas salinas, mencionados en las tablas anteriores, es mayor cuanto más alta sea la categoría en que se encuentran clasificados los elementos. Los grupos cuarto y quinto, de la tabla núm. 4, constituyen los principales compuestos acumulados como resultado del proceso de salinización.

Las sales que con más frecuencia se encuentran en los suelos son:

- Cloruros: NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, KCl
- Sulfatos: MgSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,
- Nitratos: NaNO<sub>3</sub>, KNO<sub>3</sub>
- Carbonatos: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>
- Bicarbonatos: NaHCO<sub>3</sub>

Los cloruros junto con los sulfatos son las principales sales que se forman en este proceso. El calcio, el magnesio y el sodio son los cationes que mayoritariamente se unen a los cloruros y a los sulfatos para formar las sales, con menor frecuencia se encuentra el potasio y los bicarbonatos, carbonatos y nitratos; de esta forma es como Kodva relaciona estas sales predominantes con un tipo de suelo salino asociado a ciertas geomorfologías y que pueden observarse en la tabla núm. 5.

Tabla Núm. 5 Diferentes tipos de suelos salinos, basados en la clase de sal predominante y su origen.

<b>TIPO</b>	<b>SAL PREDOMINANTE</b>	<b>ASOCIADO A</b>
1	Cloruros - nitratos, en ocasiones con boratos.	Deltas de ríos, planicies bajas inundadas y deltas sumergidos.
2	Sulfatos - cloruros.	Terrazas de lagos y ríos recientes.
3	Mezclado, cloruros - sulfatos con carbonato de sodio.	Depósitos de aguas continentales interiores sin salida.
4	Cloruros - sulfatos.	Depósitos de aguas interiores, lagos, orillas de lagos parcialmente drenados y terrazas de ríos recientes pobremente drenados.

<b>TIPO</b>	<b>SAL PREDOMINANTE</b>	<b>ASOCIADO A</b>
5	Sulfato – carbonato de sodio.	Depresiones secundarias antiguas bien drenadas, terrazas terceras de ríos, cuencas y playas de lagos abiertos de esas regiones.
6	Sulfatos – yeso.	Primeras y segundas terrazas de lagos y ríos, relativamente bien drenadas.
7	Carbonato de sodio.	Rasgos geomorfológicos similares a los del sexto grupo con un nivel base menor de erosión.
8	sulfatos – cloruros (costeros)	Terrazas marinas y terrazas de deltas.
9	Cloruros – sulfatos – yeso (de laguna)	Lechos de lagos y bahías separadas del océano.
10	Sulfatos – cloruros – carbonatos de calcio (salinización de lechos)	Depósitos de litorales.

FUENTE: Kodva

Las sales solubles son un rasgo inherente de la constitución del perfil no estructurado del suelo salino; sin embargo, para que se forme cualquiera de los diez tipos de suelos mencionados en la tabla anterior, deben prevalecer ciertas condiciones de equilibrio, ya que el percolado, lixiviado u otro factor natural no pueden remover las sales acumuladas o aquellas en proceso de acumulación, sin romper este equilibrio y desencadenar una serie de reacciones que aproximaría a los suelos a la siguiente etapa que sería la desalinización. Los factores capaces de producir la desalinización son los siguientes: disminución del nivel de las aguas subterráneas porque se elimina el abastecimiento de sales por capilaridad; cambio en la composición mineral de las aguas subterráneas; establecimiento de mejor drenaje; aumento en la precipitación ya que produce cambios climáticos y esfuerzos humanos para librar al suelo de sales por medio de riegos, lavados y drenaje.

### 2.1.1.2 Origen antrópico de suelos salinos.

La salinidad del suelo también puede producirse como resultado de un manejo inadecuado por parte del hombre. La agricultura, desde su comienzo, ha provocado salinidad, cuando las técnicas aplicadas no han sido las correctas.

La actividad agraria y especialmente el riego, ha provocado desde tiempos remotos procesos de salinización de diferente gravedad: cuando se han empleado aguas que contienen sales sin el debido control acumulándose directamente en los suelos o que ha contaminado los niveles freáticos, o bien cuando se produce un descenso del nivel freático regional y la intrusión de capas de agua salinas,



situadas en zonas más profundas, como consecuencias de la sobreexplotación.

Es el ejemplo clásico de la región de Mesopotamia en la que la utilización de aguas de riego salinas condujo a la salinidad de los suelos. La pérdida de la productividad de las tierras fue la causa de caída de la civilización sumeria hace unos 5000 años. Hoy día se acepta que la mayor parte de los suelos bajo riego presentan algunas pérdidas de productividad por problemas de salinidad.

También se ocasionan problemas graves de salinidad en superficies de costas bajas, cuando se riegan áreas situadas en zonas altas y no se ha previsto su influencia. También se produce por erosión que provoca la aparición de rocas salinas en la superficie del terreno que además de contaminar a los suelos residuales provocaran acumulación por acción de las aguas de escorrentía en los suelos de las depresiones cercanas.

El empleo de cantidades elevadas de fertilizantes, especialmente los más solubles, es otra de las causas que provocan concentraciones altas de sales, que contaminan los acuíferos y como consecuencia los suelos que reciben estas aguas. Esto es típico de zonas más o menos áridas sometidas a una actividad agrícola muy intensa. Finalmente la actividad industrial, en ocasiones, puede acarrear acumulación de sales en los suelos situados bajo su zona de influencia, por medio de la contaminación atmosférica o mediante las aguas que discurren por su cuenca hidrográfica.

### **2.1.2 Origen y formación de los suelos sódicos.**

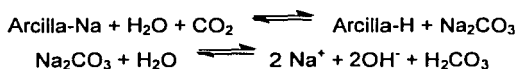
El proceso de formación del suelo sódico se inicia al desalinizarse o removerse las sales solubles del suelo salino. Independientemente de la causa de la acumulación de sales durante esta fase del proceso, los cationes que prevalecen en el complejo de intercambio no sufren desplazamiento alguno. Cuando las sales se encuentran ya removidas, sucede una hidrólisis que, en combinación con los ácidos producidos durante el proceso de humificación, desplazan algunas bases a través del ion hidrógeno. Incluso antes de que ocurra este fenómeno, aún sin las bases del complejo inalteradas, el suelo presenta las características de un suelo sódico.

La sodicidad o alcalinización se desarrolla cuando en la solución del suelo existe una concentración elevada de sales sódicas capaces de sufrir hidrólisis alcalina, de tipo carbonato y bicarbonato de sodio. Junto a estas sales de base fuerte (NaOH) y ácido débil ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), existen importantes cantidades de sales sódicas neutras carentes de propiedades alcalinizantes (principalmente cloruros y sulfatos) y sales de calcio y magnesio.

Un elevado contenido en  $\text{Na}^+$  en la solución del suelo, en relación con el  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , da lugar al incremento de este ion en el complejo de cambio, lo que provocaría, dada su baja densidad de carga (elevado radio de hidratación y baja

carga), el aumento del espesor de la doble capa difusa, los efectos de repulsión entre los coloides y, con ellos, la dispersión de la arcilla y la solubilización de la materia orgánica. Según varios autores la concentración de  $\text{Na}^+$  frente al  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  en la solución del suelo ha de ser superior al valor límite del 70% para que el  $\text{Na}^+$  pueda desplazar al  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  en el complejo de cambio, dada la menor energía de adsorción del sodio. Generalmente se admite que para que el sodio juegue un papel importante en la evolución del suelo, es decir, para que se produzca la alcalinización, la concentración de sodio adsorbido frente a los otros cationes ha de superar el valor crítico del 15%, o sea  $\text{Na/S} > 15\%$  ( $\text{S}$  = suma de otros cationes adsorbidos).

Las arcillas saturadas en  $\text{Na}^+$  tienen propiedades particulares ya que en presencia de agua de lluvia con  $\text{CO}_2$  disuelto, se hidrolizan, y liberan  $\text{Na}^+$  y  $\text{OH}^-$  según las siguientes ecuaciones:



Como consecuencia el medio se alcaliniza rápidamente, alcanzándose valores de pH progresivamente cada vez más altos; 9, 10 o incluso más. Las ecuaciones anteriores se pueden simplificar en una:



La alcalinización del perfil produce una serie de consecuencias desfavorables para las propiedades fisicoquímicas del suelo. Así tanto las arcillas sódicas como el humus se dispersan, los agregados estructurales se destruyen. Las arcillas y los ácidos húmicos se ilúvian, acumulándose en el horizonte B, formándose un horizonte de acumulación de arcillas sódicas, es decir, que se origina un horizonte nátrico (si la intensidad de la iluviación es suficiente). Los cambios estacionales producen el hinchamiento y contracción de las arcillas sódicas (montmorillonita) formándose una estructura prismática fuertemente desarrollada. Finalmente, como el medio se ha vuelto fuertemente alcalino, la cristalinidad de las arcillas disminuye, se vuelven inestables, parte de ellas se descomponen, se destruyen los vértices y aristas superiores de los prismas originándose una estructura muy peculiar llamada columna que presenta la cara superior de los prismas redondeada. En ocasiones, los humatos sódicos iluviados se acumulan en estas superficies revistiéndolas de colores muy oscuros.

Este proceso se puede dar directamente en el suelo o puede aparecer a continuación del proceso de salinización, cuando se produce el lavado de las sales más solubles y se acumulan los carbonatos y bicarbonatos sódicos. En los suelos sódicos, es el sodio el que causa la toxicidad, que puede centrarse en tres vías distintas: efecto nocivo del sodio activo para el metabolismo y nutrición de las plantas; toxicidad debida a los bicarbonatos y otros iones; elevación del pH a

valores extremos por acción del carbonato y bicarbonato sódicos (Simón, 1996).

De las sales solubles los sulfatos son los que menos toxicidad presentan. Las sales de cloro son altamente tóxicas. Las sales sódicas presentan una toxicidad muy alta y además su efecto adverso se ve aumentado por el elevado pH que originan (9.5 a 10.5).

Entre los principales efectos que presentan los suelos con exceso de sodio se tiene que:

- a) El sodio intercambiable está retenido débilmente cuando el suelo tiene un alto porcentaje de sodio intercambiable (PSI), por lo que los iones que se liberan a la solución del suelo serán en su mayoría iones de sodio.
- b) El sodio en grandes cantidades excluye por competencia al K,  $\text{Ca}^{+2}$  y al Mg de los sitios de intercambio de los coloides del suelo, ya que se intercambia este sodio en lugar de los otros y el problema para las plantas es grave.
- c) Por lo general cuando existe exceso de sodio intercambiable en la solución del suelo, se tienen altos valores de pH, debido a la existencia de sales solubles como bicarbonato de sodio  $(\text{NaH})_2\text{CO}_3^-$  y carbonato de sodio  $\text{NaCO}_3^-$  que tienden a precipitar al  $\text{Ca}^{+2}$  y al  $\text{Mg}^{+2}$  en forma de carbonatos o bicarbonatos insolubles.
- d) El pH alcalino también limita la asimilación de diversos nutrimentos tales como Fe, Mg, Zn y P. Asimismo, la solución del suelo alcalino tiene una acción corrosiva sobre la corteza de las raíces y de los tallos.
- e) Las altas concentraciones de sales neutras, como el cloruro de sodio y el sulfato de sodio interfieren con la absorción de nutrientes que las plantas hacen, ya que existe una presión osmótica más alta en la solución del suelo que la que existe en las células de la raíz.

El  $\text{Na}^+$  intercambiable en los suelos sódicos causa floculación de los coloides, ésta se produce cuando las cargas de los coloides están neutralizadas y provoca destrucción de las unidades estructurales del suelo lo que vuelve al suelo más o menos impermeable y retarda la entrada de agua e impide el drenaje.

Las técnicas de cultivo influyen positiva o negativamente sobre las condiciones salinas. La incorporación de fertilizantes puede elevar el contenido de ciertas sales, como sucede con las derivadas del potasio o nitratos o facilitar el lavado, al favorecer los procesos de intercambio. Las técnicas de riego utilizadas así como, las láminas aplicadas, van a influir sobre el lavado y afectarán al equilibrio salino de la solución del suelo, especialmente cuando se emplea la técnica de fertirrigación. Los labores de preparación del terreno, la localización y dosis de la semilla y posteriores labores de escarda tienen especial importancia en condiciones de salinidad.

La dinámica de las sales solubles en el tiempo y en el espacio, es relativamente rápida; de ahí que, tanto en estudios de salinización como en aquellos otros de lavado y recuperación de suelos salinos, sea necesaria una monitorización a intervalos cortos y la toma de un gran número de muestras. Si a esto se une que el análisis de las sales solubles, especialmente los aniones, es un proceso largo y no exento de dificultades, se comprende que, ya desde hace mucho tiempo, la salinidad se estimara de manera indirecta a partir de determinados parámetros de las soluciones salinas, cuya medida fuese relativamente fácil y rápida.

### **2.1.3 Origen y formación de los suelos salino-sódicos.**

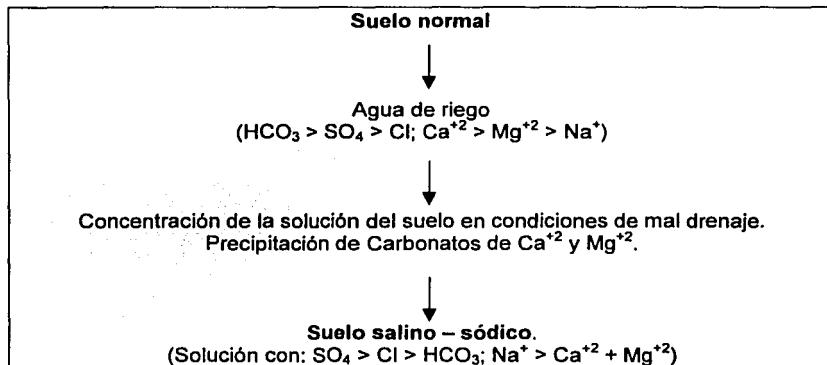
Esta clase de suelos es el resultado de la combinación de procesos de salinidad y acumulación de sodio. Cuando existe un alto contenido en sales y estas son sódicas, el sodio predomina en el complejo de cambio. Los suelos salino-sódicos son suelos típicos de las regiones de clima seco, ya que debido a la alta solubilidad de las sales éstas tienden a movilizarse bajo clima húmedo.

Cuando presentan un exceso de sales son similares a los suelos salinos, es decir su valor de pH rara vez es mayor de 8.2 y las partículas permanecen floculadas en estas condiciones, presentan un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) mayor de 15% y una conductividad eléctrica específica mayor de  $4 \text{ dSm}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$ . La apariencia general es similar a la de los suelos salinos especialmente cuando el contenido de sales es muy alto, puede presentarse igual manchas blancas en el suelo.

Cuando en estos suelos el exceso de sales es lixiviado, originan la mayoría de las veces suelos sódicos, debido que la parte del sodio intercambiable se hidroliza para formar hidróxidos de sodio, desfloculándolo para darle una condición física desfavorable. Cuando estos suelos contienen calcio se disminuye o reemplaza al sodio intercambiable, dándose así la eliminación de este catión en forma simultánea con el exceso de sales.

La diferencia más importante entre los suelos salinos y los salino-sódicos reside en que los últimos deben recibir una rectificación antes de ser lavados. El lavado sin un mejoramiento previo, convierte a los suelos salino-sódicos en sódicos, que son mucho más difíciles de restaurar.

El proceso de desarrollo de dichos suelos puede representarse esquemáticamente (PLA 1967) en la forma siguiente (ver diagrama núm. 1):



FUENTE: PLA, 1997.

Diagrama Núm. 1. Transformación de un suelo normal a uno salino-sódico.

## 2.2 Distribución geográfica de los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad.

Los suelos con problemas de sales y/o sodio se encuentran en los suelos normales mezclados e intercalados a lo largo de extensas fajas, o más frecuentemente en manchones intrusivos por ciertas características topográficas. Se localizan en mayor proporción en las regiones áridas y semiáridas del mundo, definidas entre las latitudes 56° Sur y 59° Norte y entre las longitudes 120° Oeste y 150° Este. (Fig. Núm. 1)

De los 220 millones de hectáreas bajo riego, en el mundo, casi la mitad está en condiciones inadecuadas para ser cultivadas debido a los procesos degradativos de los procesos de salinización. Así mismo, existen aproximadamente unos 300 a 400 millones de hectáreas salinizadas en todo el mundo que ocupan aproximadamente 39% de la superficie total de las regiones áridas y semiáridas.



Figura Núm. 1. Distribución geográfica de los suelos salinos (Solonchak) y sódicos (Solonetz) en el mundo (adaptado de FitzPatrick, 1980).

Sin embargo, los suelos salinos y/o sódicos no se restringen a las regiones áridas y semiáridas; aparecen también en regiones húmedas (tropical y subtropical) principalmente en áreas adyacentes a las costas: lagos de agua salada, lagos estuarios, ríos, arroyos, etc., y en lugares donde el manejo del agua de riego es inadecuado, a latitudes mayores que las mencionadas. Los suelos salino-sódicos son abundantes en las regiones como Egipto, Irán, India, Pakistán, China, Ecuador, Perú, Chile, México. Aunque también están presentes en zonas de clima templado-húmedo, como Holanda y Bélgica, en localizaciones influenciadas por sedimentos o aguas con altas concentraciones de sales. A escala mundial la cifra se eleva a 300/400 de millones, de ellas una parte importante son consecuencia de las actividades antrópicas (alrededor del 5% de las tierras cultivadas).

Tabla Núm. 6. Extensión de la salinización inducida por el hombre en el mundo.

REGIONES DEL MUNDO	SALINIZACIÓN					TOTAL DE TIERRAS CULTIVABLES
	débil	moderada	fuerte	extrema	TOTAL	
África	4.7	7.7	2.4	----	14.8	185
Asia	26.8	8.5	17.0	0.4	52.7	451
Norte América	0.3	1.5	0.5	----	2.3	274
Sur América	1.8	0.3	----	----	2.1	142
Europa	1.0	2.3	0.5	----	3.8	140
Oceania	----	0.5	----	0.4	0.9	282
<b>TOTAL</b>	<b>34.6</b>	<b>20.8</b>	<b>20.4</b>	<b>0.8</b>	<b>76.6</b>	<b>1,474</b>

Datos en millones de hectáreas.

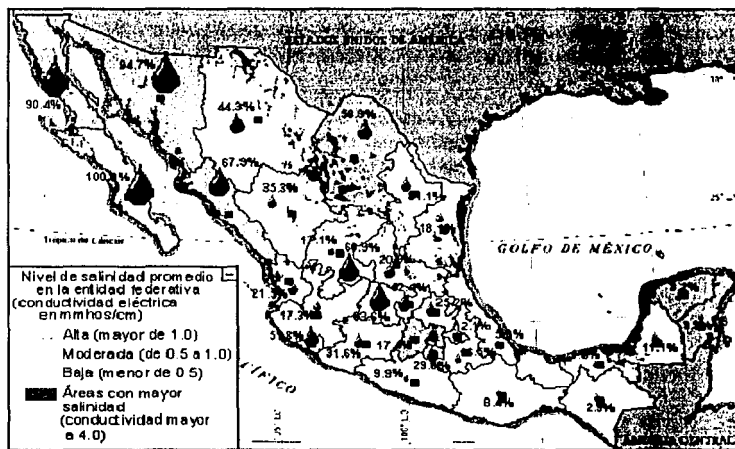
## 2.2.1 Distribución de los suelos salinos en América.

En Sudamérica, las regiones donde se encuentran suelos salinos se localizan, principalmente, al norte de Chile (Atacama e Iquique), al sur de Ecuador, al norte de Perú, en la parte occidental de Brasil y Argentina y al este de los Andes, entre otros.

En Norteamérica se encuentra dividida la zona en dos grandes regiones geográficas, la de los Estados Unidos de América, donde varios estados de la Unión Americana presentan estas características, estos estados son: California, Utah, Nevada, Arizona, Texas, Nuevo México, Idaho, Montana y Dakota del Norte; y en Canadá están principalmente las provincias occidentales.

En México, el problema de la salinización de las tierras aprovechables es de gran relevancia, ya que las zonas áridas y semiáridas ocupan el 75% del territorio nacional y la mayoría de los distritos de riego se ubica en estas zonas. Aproximadamente, de un 30 a un 40% de las áreas bajo riego presentan este problema, que varía en grados de importancia (Cortizo, 1995).

Martínez G. (2000), cita que el área nacional afectada por el problema de la salinización, asciende a un total nacional de 4,300,000 hectáreas.



FUENTE: INEGI, Atlas de México. Estado Actual del Territorio Nacional.  
Figura Núm.2. Salinidad y Riego en la República Mexicana

Aquí los problemas de salinidad en los distritos de riego se dividen en tres grupos:

1. Importancia secundaria.
2. Regular importancia.
3. Importancia básica.

Un ejemplo representativo lo tiene el estado de Sonora, que produce productos agrícolas y su problema de salinidad está patente en la siguiente tabla.

Tabla Núm. 7. Problemas de salinidad en el Estado de Sonora y la afectación de terrenos agrícolas por salinidad y/o sodicidad.

CLAVE	CLASE DE SALINIDAD	ÁREA (ha)	AGRICOLA (ha)	%
C1S1	Suelos no afectados	16522188	539874	62.3
C2S1	Suelos salinos	317766	107783	12.4
C3S1	Fuertemente salino	82348	27480	3.2
C1S2	Suelos sódicos	166520	14787	1.7
C2S2	Suelos salino-sódicos	468421	138109	15.9
C3S2	Fuertemente salino-sódicos	296155	19553	2.3
C1S3	Suelos Fuertemente sódicos	4350	0	0.0
C2S3	Salinos fuertemente sódicos	14651	7112	0.8
C3S3	Fuertemente salinos fuertemente sódicos	330915	11907	1.4
TOTAL		18203314	866605	100

FUENTE: INEGI, 2000.

### 2.3 Procesos genéticos que intervienen en la formación de suelos salinos y/o sódicos.

Los suelos afectados reflejan sus características y propiedades a través de la reacción y circulación de sales solubles en el perfil. Para su formación se conocen tres etapas cada una de las cuales representa un proceso de formación definido y un tipo de suelo.

#### ▪ Primera etapa.

Consiste en la acumulación de sales solubles en la superficie, debajo de ésta o en el perfil, la concentración de sales confiere al suelo unas propiedades muy particulares con efectos muy nocivos para los cultivos. Se distinguen dos casos, con morfologías, propiedades, génesis y usos de los suelos muy diferentes, según que el catión predominante en el complejo de cambio sea el  $\text{Na}^+$  o el  $\text{Ca}^{+2}$ .

Si el catión predominante es el  $\text{Ca}^{+2}$ , las sales solubles son muy abundantes en el suelo. El perfil se encuentra muy poco diferenciado, pero su estructura tiende a ser estable, como resultado de la acción floculante del  $\text{Ca}^{+2}$ . La alta presión osmótica de la solución del suelo es la responsable de la baja productividad. A estos suelos se les denominan suelos salinos (o suelos alomorfos). El suelo representativo es



el Solonchak.

- **Segunda etapa.**

Se produce un proceso de desalinización por medio del cual, las sales solubles son removidas del suelo superficial y depositadas en la parte inferior del horizonte B; el complejo de intercambio se satura considerablemente con el ion sodio. Cuando es éste el catión dominante se produce la dispersión de las arcillas, lo que lleva a una destrucción de la estructura. Por otra parte, la hidrólisis de las arcillas sódicas conduce a la alcalinización del perfil, y esta provoca intensa alteración mineral. El perfil queda bien diferenciado desde el punto de vista morfológico. A estos suelos se les llaman suelos sódicos (en ocasiones alcalinos) y su clase representativa es el Solonetz.

- **Tercera etapa.**

Provoca un proceso de lixiviación más completo en el perfil; las sales solubles se remueven de manera total y, por las reacciones hidrolíticas, los silicatos se fraccionan liberando  $\text{SiO}_2$ ; éstos suelos, llamados degradados, presentan una apariencia blanquecina que se asemeja a un podzol y se denominan solodi. Los suelos sódicos degradados son poco comunes.

Los suelos salinizados y alcalinizados de forma natural se generan en las zonas áridas y semiáridas, ya que las condiciones climáticas los propician más. Los procesos genéticos involucrados se detallan a continuación:

1. **Adiciones.** Las adiciones de materiales son insignificantes. La materia orgánica se presenta en pequeñas cantidades o no existe debido a la falta de vegetación. A veces se agregan a la superficie del suelo materiales transportados por el viento.
2. **Substracciones o remociones** completas no ocurren en la salinización por falta de agua de percolación.
3. **Transferencias o redistribuciones** causan la mayoría de los cambios y resultan en la deposición de sales en la superficie del suelo en forma de incrustaciones blancas, cristalinas y brillantes producidas por movimiento capilar. Los carbonatos y sulfatos son igualmente transportados hacia arriba y depositados a poca profundidad, 3 ó 4 pies en el horizonte B, en forma de puntos blancos, capas delgadas o manchas. En lugares donde hay un poco de materia orgánica y las condiciones son alcalinas, la materia orgánica forma una delgada capa húmica  $\text{A}_o$ , de color negro intenso, que en parte se disuelve durante los períodos ocasionales de lluvia o cuando se aplica riego, lo que forma pozos negros en la superficie del terreno. La presencia de tales pozos da el nombre de álcali negro a los suelos desérticos ricos en sales alcalinas tales como carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ).

Cuando no hay sales alcalinas no se produce agua negra y el contenido de sales consiste solamente de sales neutras tales como cloruros de sodio, potasio, calcio y magnesio ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ) y sulfatos de sodio, potasio, calcio y magnesio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Mg}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Ca}_2\text{SO}_4$ ) los suelos reciben el nombre de álcali blanco.

**4. Transformaciones.** Las transformaciones en los suelos salinos y alcalinos consisten principalmente en la formación de minerales arcillosos de tipo 2:1, especialmente montmorillonita, que si no está ya presente en el material de partida, se forma en el suelo cuando las condiciones de humedad favorecen la síntesis de minerales secundarios. La estructura de estos suelos es típicamente prismática y columnar debido al alto grado de contracción de los minerales arcillosos de tipo 2:1.

#### 2.4 Clasificación de los suelos con problemas de salinidad y/o alcalinidad.

FAO/UNESCO hasta 1988 consideró 4 unidades de suelos para agrupar a los suelos salinos y sódicos: Solonchak, Solonetz, Xerosoles y Yermosoles, fue hasta 1998, que se consideró conveniente realizar una revisión de éstas y decidieron quitar las dos últimas unidades y convertirlas en horizontes de diagnóstico. Esta decisión se consideró principalmente había extensiones de suelo en las que la diferencia entre un tipo de suelo y otra es mínima. La razón por la que en este trabajo de tesis se consideran aún estas unidades de suelo se debe principalmente a que la mayor parte de la cartografía que actualmente se utiliza en México data de los años setentas, por los que se consideró conveniente detallar cada una de las cuatro unidades y su correlación o equivalencia con otras clasificaciones que son utilizadas a escala mundial, como se puede observar en la tabla núm. 8.

Tabla Núm. 8. Diferentes clasificaciones de los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad.

<i>FAO/UNESCO</i>	<i>FRANCESA</i>	<i>E.U.A. ANTIGUA</i>	<i>E.U.A. NUEVA</i>	<i>RUSA</i>
Solonchaks ótricos	Sols Salins	Solonchaks	Solorthirds	Solonchaks
Solonchaks mólicos	Sols Salins	Solonchaks	Solorthirds Calciustolls Salorthidic Haploustolls	Solonchaks
Solonchaks takíricos	Sols bruts xeriques organisés d'apport			

<b>FAO/UNESCO</b>	<b>FRANCESA</b>	<b>E.U.A. ANTIGUA</b>	<b>E.U.A. NUEVA</b>	<b>RUSA</b>
Solonchaks gléyicos				Solonchaks de pradera
Solonetz órticos	Sols sodiqués à horizon B, Solonetz solodisés	Solonetz	Natrustalfs Natrixeralfs Natriargids Nadurargirds	Solonetz
Solonetz mólicos	Sols sidiqués à horizon B, Solonetz solodisés	Solonetz	Natrobollss Natriborollss Natrustollss Natrixerollss	Solonetz
Solonetz gléyicos		Solonetz	Natraqualf	Solonetz de pradera
Xerosols háplicos	Sierozems Sols bruns subarides	Suelos rojos de desierto Sierozems	Camborthidas Durorthids	Suelos semidesérticos Sierozems
Xerosols cálcicos	Sierozems Sols bruns subarides	Calcisols	Calciorthids	Suelos semidesérticos Sierozems
Xerosols lúvicos	Serozems	Suelos de desierto sierozems	Haplargids Durargids	Suelos semidesérticos Sierozems
Yermosol háplicos	Sols bruts xériques inorganisés Sols peu évolués xériques	Suelos rojos de desierto	Camborthids. Durorthids	Suelos de desierto
Yermosol cálcicos		Calcisols	Calciorthids	Suelos de desierto
Yermosol glépsicos	Sols gypseux		Gypsiorthids	Suelos de desierto
Yermosol lúvicos		Suelos de desierto	Argids	Suelos de desierto
Yermosol takíricos	Takyr			Takyr

Adaptada de Fitz Patrick, E.A. 1984.

#### 2.4.1 Solonchak.

Solonchaks su símbolo es (Z). Suelos que tienen alta salinidad en una profundidad de 125 cm a partir de la superficie y que no tienen otros horizontes de diagnóstico

(salvo si están enterrados por 50 cm o más de material reciente), presentan un horizonte A, un horizonte H hístico, un horizonte B cámbico, un horizonte cálcico o un horizonte gypsico.

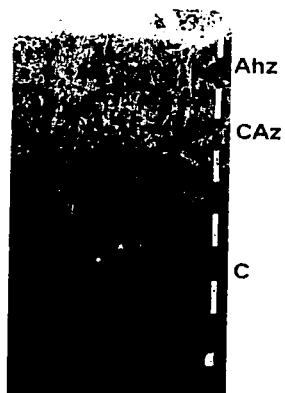
Los suelos Solonchak son suelos que se presentan en diversos climas, en zonas en donde se acumula el salitre, tales como lagunas costeras y lechos de lagos, o en las partes más bajas de los valles y llanos de las zonas secas del país.

Se caracterizan por presentar un alto contenido de sales en algunas partes del perfil del suelo, o en todo él. Su vegetación cuando la hay, está formada de pastizales o por algunas plantas que toleran el exceso de sal.

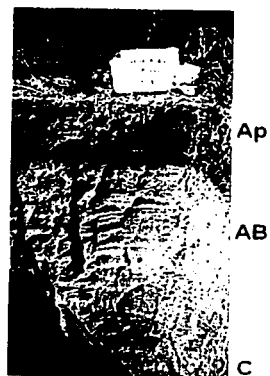
Su uso agrícola se halla limitado a cultivos muy resistentes a las sales. En algunos casos es posible eliminar o disminuir su concentración del salitre por medio del lavado, lo cual los habilita para la agricultura. Su uso pecuario depende de la vegetación que sostenga, pero de cualquier forma, sus rendimientos son bajos. Algunos de estos suelos se utilizan como salinas.

Los Solonchak son el tipo de suelo con poca susceptibilidad a la erosión. Es importante resaltar que este suelo tiene varias posibilidades de combinación, así también, las siguientes subunidades de este suelo se mencionan a continuación:

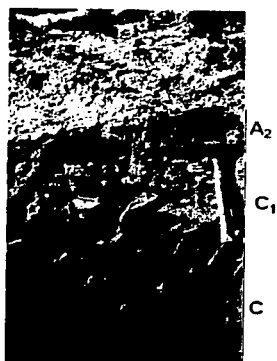
- GLEYICO (del ruso gley: suelo pantanoso): Tienen en el subsuelo una capa en la que se estanca el agua. Esta es gris o azulosa y al exponerse al aire se mancha de rojo. Su símbolo es (Zg).
- TAKIRIKO (del uzbekistano takyr: llano estéril): Presentan en la superficie una capa arcillosa que se rompe en forma de polígonos cuando está seca. Su símbolo es (Zt).
- ORTICO (del griego orthos: recto, derecho): Presentan solo las características definidas para la unidad. Su símbolo es (Zo).
- MOLICO (del latín mollis: suave): Presenta una capa superficial oscura, rica en materia orgánica y fértil. Su símbolo es (Zm).
- HÁPLICO (del griego haplos: simple): No presentan las características mencionadas para los tres grupos anteriores. Su símbolo es (Zh).
- CÁLCICO (del latín calcium: calcio): Presentan acumulación de cal en el subsuelo. Su símbolo es (Zk).
- GYPSICO (del latín gypsum: yeso): Presentan acumulación de yeso en el subsuelo, en forma de cristales. A veces son de color rosado claro. Su símbolo es (Zg).
- NÁTRICO: Este es un horizonte subsuperficial que tiene un contenido en arcilla netamente mayor que el horizonte situado encima, pero con las arcillas saturadas de sodio. Su símbolo es (Zn).



Solonchak órtico



Solonchak cálcico



Solonchak háplico

Figura Núm. 3. Perfiles tipo de solonchak (fuente: P.Duchaufour).

#### 2.4.2 Solonetz.

Solonetz su símbolo es (S). Derivan su nombre la palabra rusa sol = sal;

connotativa de suelos que contienen sal. Suelos que contienen un horizonte B nátrico; carentes de un horizonte E álbico; que muestra propiedades hidromórficas cuando menos en parte del horizonte y un cambio abrupto de textura.

Se caracterizan por tener un subsuelo arcilloso que presenta terrones duros en forma de columnas. Este subsuelo y, a veces, otras partes del suelo, presentan un contenido alto de álcali.

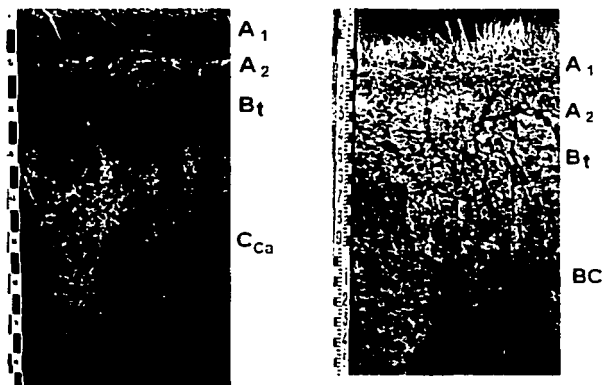


Figura núm. 4. Perfil tipo de un solonetz órtico y de un suelo salino-sódico (fuente: P.Duchaufour).

Estos suelos se localizan en varios climas, en zonas donde se acumulan las sales y, en particular, el álcali de sodio. Su vegetación natural, cuando la hay, es de pastizal o algunos matorrales.

Su utilización agrícola es muy limitada y su mejoramiento difícil y costoso. Cuando presentan pastizales se usan en ganadería de bovinos, con rendimientos bajos. Son poco susceptibles a la erosión.

Las subunidades de este tipo de suelo son las siguientes:

- GLEYICO. Presenta en el subsuelo una capa en la que se estanca el agua, esta presenta colores grises o azulosos y se mancha de rojo al exponerse al aire. Su símbolo es (Sg).
- ÁLBICO (del latín albus: blanco): Presentan en la parte superior del subsuelo una capa de color claro, infértil y más arenosa que el resto. Su símbolo es (Sa).
- MOLICO. Presenta una capa superficial suave, oscura, fértil y rica en materia orgánica y fértil. Su símbolo es (Sm).

- **ORTICO.** Presentan solo las características definidas para la unidad. Su símbolo es (So).
- **HÁPLICO** (del griego haplos: simple): No presentan las características mencionadas para los tres grupos anteriores. Su símbolo es (Sh).
- **CÁLCICO** (del latín calcium: calcio): Presentan acumulación de cal en el subsuelo. Su símbolo es (Sk).
- **GYPSICO** (del latín gypsum: yeso): Presentan acumulación de yeso en el subsuelo, en forma de cristales. A veces son de color rosado claro. Su símbolo es (Sgy).

### 2.4.3 Xerosol.

Xerosoles, su símbolo es (X). Derivan su nombre del griego xeros = seco; connotativo de suelos de zonas secas. Son Suelos que ocurren en un régimen de humedad árido, que tienen un horizonte A ócrico débil y uno o más de los siguientes: un horizonte B cámbico, un horizonte B argílico, un horizonte cálcico, o un horizonte gypsic; carentes de otros horizontes de diagnóstico; carentes de otros horizontes de diagnóstico; carentes de las características que son de diagnóstico para Vertisoles; sin salinidad elevada; sin permafrost dentro de una profundidad de 200 cm desde la superficie. Los xerosoles son suelos con baja susceptibilidad a la erosión, salvo cuando están en pendientes y sobre caliche o tepetate, en donde sí presentan este problema.

Se caracterizan por tener una capa superficial de color claro y muy pobre en humus. Debajo de ella puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien, muy semejante a la capa superficial. Muchas veces presentan a cierta profundidad manchas, polvo o aglomeraciones de cal, y cristales de yeso, o caliche, de mayor o menor dureza. A veces son salinos.

Estos suelos se localizan en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México, su vegetación natural es de matorrales y pastizales. Su utilización agrícola está restringida, en la mayoría de las ocasiones, a las zonas con agua de riego, pero, sobre todo en los estados de Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí y al sur de Durango, existen Xerosoles que pueden cultivarse en el temporal debido a que en esas zonas las lluvias son un poco más abundantes que en las del norte.

La agricultura de temporal, en este tipo de suelos es insegura y de bajos rendimientos. La agricultura de riego, con cultivos de algodón y granos, así como de vid, es de rendimientos altos, debido a su alta fertilidad.

El uso pecuario es también importante en ellos, sobre todo en el norte, en los estado de Coahuila, Chihuahua y Nuevo León, en donde se cría ganado bovino, ovino y caprino, con rendimientos variables en función de la vegetación. La explotación de los matorrales, cuando existen plantas aprovechables, como la

lechuguilla o la candelilla.

Las descripciones características de sus subunidades se presentan a continuación:

- LUVICO (del latín luvi, luo: lavar): Se caracterizan por tener un subsuelo con acumulación de arcillas. Son rojizos o pardos claros. En muchas ocasiones acumulan más agua que los otros Xerosoles. Su vegetación es principalmente de matorral. Su símbolo es (Xl).
- GYPSICO (del latín gypsum: yeso): Presentan acumulación de yeso en el subsuelo, en forma de cristales. A veces son de color rosado claro. Su símbolo es (Xg).
- CÁLCICO (del latín calcium: calcio): Presentan acumulación de cal en el subsuelo. Su símbolo es (Xk).
- HÁPLICO (del griego haplos: simple): No presentan las características mencionadas para los tres grupos anteriores. Su símbolo es (Xh).

#### **2.4.4 Yermosol.**

Yermosol, su símbolo es (Y) y derivan su nombre de la palabra española yermo = desierto o desolado, lo que literalmente significa suelo desolado es connotativa de zonas muy secas.

Son suelos que ocurren en un régimen de humedad árido, con un horizonte A ócrico muy débil y uno o más de los siguientes: un horizonte B argílico, un horizonte cálcico, un horizonte gypsico; carentes de otros horizontes de diagnóstico; sin las características que son de diagnóstico para Vertisoles; sin salinidad elevada; carentes de permafrost dentro de los primeros 200 cm de profundidad desde la superficie. Cuando ocurren en lugares antiguos, la forma actual de Yermosoles con frecuencia ha sido sobrepuesta a una gama previa de suelos en extremo variada, los cuales van de débil a fuertemente intemperizados.

A veces son salinos, se caracterizan por tener, semejanza con los Xerosoles, una capa superficial clara y un subsuelo rico en arcilla o similar a la capa superficial. Presentan también en ocasiones acumulación de cal o yeso en el subsuelo, o bien caliche. Se diferencian de los Xerosoles en que su capa superficial es aún más pobre en humus que en éstos.

Son suelos que se presentan en las zonas áridas del norte del país, su vegetación natural es de matorrales o pastizal. Estos suelos ocupan áreas de gran extensión, Su utilización agrícola está restringida definitivamente a las zonas en donde se puede contar con agua de riego.

Cuando hay agua, se pueden obtener rendimientos altos en cultivos como algodón, los granos o la vid. Cuando estos suelos tienen vegetación de pastizal o, como ocurre en el caso de algunos matorrales, la ganadería es posible con



rendimientos moderados o bajos. La explotación de ciertas plantas del matorral, como la candelilla y la lechuguilla, es común.

Sus subunidades se caracterizan de la siguiente forma:

- TAKIRICO. Presentan en la superficie una capa arcillosa que se rompe en forma de polígonos cuando se seca. Su símbolo es (Yt).
- LUVICO. Se caracterizan por tener un subsuelo con acumulación de arcilla, son rojizos o pardos claros. En muchas ocasiones acumulan más agua que los otros Xerosoles. Su vegetación natural es generalmente de pastizal, y su símbolo (Yl).
- GYPSICO. Presentan acumulación de yeso en el subsuelo, en forma de cristales. A veces son de color rosado claro. Su símbolo es (Yg).
- CALCICO. Presentan acumulación de cal en el subsuelo. Su símbolo es (Yk).
- HALPLICO. No presentan las características mencionadas en los tres grupos anteriores. Su símbolo es (Yh).

## **2.5 Parámetros físicos, químicos y fisicoquímicos utilizados para la caracterización de los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad.**

### **2.5.1 Conductividad eléctrica.**

La conductividad eléctrica ha sido el parámetro más extendido y el más ampliamente utilizado en la estimación de la salinidad. Se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución. Hasta hace unos años se expresaba en mmhos/cm, hoy día las medidas se expresan en dS/m (dS=dSiemens), siendo ambas medidas equivalentes (1 mmhos/cm = 1 dS/m). Por tanto la CEe refleja la concentración de sales solubles en la disolución.

La conductividad eléctrica se relaciona indirectamente con las mediciones de potenciales osmóticos de la solución de un suelo y reduce el potencial del agua. Dos factores determinan la habilidad de una solución para transmitir la corriente eléctrica: 1) su conductancia, que depende directamente de la concentración del ion, y 2) la distancia a través de la cual, la corriente medida, tiene que fluir cuando se aplica esta prueba.

Para distinguir suelos salinos de no salinos, se han sugerido varios límites arbitrarios de salinidad. Se acepta que las plantas empiezan a ser afectadas de manera adversa cuando el contenido en sales excede del 1%. La clasificación americana de suelos, Soil Taxonomy, adopta el valor de 2 dS/m como límite para el carácter salino al nivel de gran grupo y subgrupo, pues considera que a partir de ese valor las propiedades morfológicas y fisicoquímicas del perfil (y por tanto la génesis) quedan fuertemente influenciadas por el carácter salino. Mientras que el laboratorio de salinidad de los EE.UU. ha establecido el límite de 4 dS/m para que la salinidad comience a ser tóxica para las plantas.

Basándose en la CE, el United States Salinity Laboratory de Riverside establece ciertos grados de salinidad, los cuales permiten la clasificación del suelo (tabla núm. 9).

Tabla Núm. 9. Grados de salinidad, con base en la conductividad eléctrica específica (CE) establecido por el United States Salinity de Riverside

<b>CEe dSm<sup>-1</sup> a 25°C)</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>CARACTERIZACIÓN CON RELACIÓN AL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS</b>
0 – 2	Suelos normales.	No se produce cambios en el rendimiento de los cultivos.
2 – 4	Suelos ligeramente salinos.	Quedan afectados los rendimientos de los cultivos muy sensibles.
4 – 8	Suelos salinos.	Quedan afectados los rendimientos de la mayoría de los cultivos.
8 – 16	Suelos fuertemente salinos.	Sólo se obtienen rendimientos aceptables en los cultivos tolerantes.
> 16	Suelos extremadamente salinos.	Muy pocos cultivos dan rendimientos aceptables.

FUENTE: Richards, L.A. 1973.

La CE de un suelo (CEe) cambia con el contenido en humedad, disminuye en capacidad máxima (se diluye la solución) y aumenta en el punto de marchitamiento (se concentran las sales). Se ha adoptado que la medida de la CEe se hace sobre el extracto de saturación a 25°C.

El objetivo de la evaluación de los suelos salinos y sódicos es conseguir un manejo adecuado de los mismos, de manera que permita obtener cultivos rentables, por un lado, y su posible recuperación y regeneración, por otro.

Como ya se ha indicado la solubilidad de las sales es un parámetro evaluador de su toxicidad para los cultivos. En la tabla núm. 10 se reproduce la máxima solubilidad de las sales para un suelo que esté sometido a una temperatura de 40°C (temperatura frecuente en los meses de verano en los climas áridos).

Tabla Núm.10. Solubilidad de las principales sales encontradas en un suelo árido sometido a una temperatura de 40°C

SAL	SOLUBILIDAD MÁXIMA		
	CE dS/m	g/l	meq/l
MgSO <sub>4</sub>	363	262	4,352
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	504	430	6,064
CaSO <sub>4</sub>	2,5	2,04	30
NaCl	453	318	5,440
MgCl <sub>2</sub>	618	353	7,413
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	693	441	8,320
NaCO <sub>3</sub> H	272	137	3,261
CaCO <sub>3</sub>	0,8	0,01	10
MgCO <sub>3</sub>	0,8	0,00	10

FUENTE: U.S. Salinity Laboratory, 1982.

Todas las sales solubles pueden constituir soluciones con altísimos valores de CE, y sin embargo el yeso (CaSO<sub>4</sub>) tan solo puede dar soluciones con un máximo de 2.5 dS/m, es por eso que cuando en un suelo, el yeso es muy abundante, solo se encontrara disuelto 2.04 g/l y el resto se encontrara precipitado, por lo que la solución nunca superará el valor de 2.5 dS/m.

### 2.5.2 Razón de adsorción de sodio (RAS) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

La concentración en Na<sup>+</sup> se puede medir bien en la solución del suelo o bien en el complejo de cambio. En el primer caso se denomina razón de adsorción de sodio (RAS) y en el segundo se habla del porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

En los suelos es muy importante determinar que tipo de cationes predominan en el complejo adsorbente (si es el Ca<sup>+2</sup> o por el contrario el Na<sup>+</sup>). El porcentaje de sodio respecto a los demás cationes adsorbidos se denomina porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

$$\% \text{ PSI} = 100 \times \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{+3})$$

Se considera que un suelo puede empezar a sufrir problemas de sodificación y dispersión de la arcilla cuando el PSI > 15%.

Otra manera de determinar la sodicidad de un suelo es evaluar la concentración de Na<sup>+</sup> en la solución del suelo en vez de medir su concentración en el complejo adsorbente como hace el PSI. Para estimar así el grado de sodificación, Richards et al., (1954) proponen la razón de adsorción de sodio (RAS), calculada a partir de las concentraciones de Na<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup> en mmol/dm<sup>3</sup> de las soluciones salinas:

$$RAS = \frac{Na+}{\sqrt{(Ca+Mg)/2}}$$

A partir del RAS se puede calcular el porcentaje de sodio intercambiable (PSI):

$$PSI = 100 (-0,0126 + 0,01475 RAS) / 1 + (-0,0126 + 0,01475 RAS)$$

Se puede relacionar, así mismo, la presión osmótica PO con la conductividad eléctrica del extracto (CEe), mediante la siguiente ecuación:

$$OP = 0,36 \times CEe \text{ (mmhos/cm)}$$

De esta forma se evalúan los suelos sódicos, cuando la CEe es menor de 4 dS/m a 25°C y el PSI es mayor de 15%, siendo los suelos salinos-sódicos aquellos que tienen un a CEe mayor de 4 dS/m a 25°C y un PSI mayor de 15%.

Quedan por consiguiente establecidas cuatro categorías de suelos, las cuales se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla Núm. 11. Categorías de suelos

<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>CEe a 25°C</b>	<b>PSI</b>
Suelos Normales	< 4 dSm <sup>-1</sup>	< 15%
Suelos Salinos	> 4 dSm <sup>-1</sup>	< 15%
Suelos Sódicos	< 4 dSm <sup>-1</sup>	> 15%
Suelos Salino-Sódicos	> 4 dSm <sup>-1</sup>	> 15%

FUENTE: Richards, L.A. 1973.

De lo anterior derivamos que para caracterizar específicamente a los suelos sódicos se establecen otras cuatro categorías, basándose en su nivel de PSI, mismas que pueden diferir de autor a autor. (Tabla Núm. 12 y 13).

Tabla Núm. 12. Clasificación de suelos sódicos según Richards.

<b>CLASE</b>	<b>PSI</b>
Ligeramente sódico	7-15
Medianamente sódicos	15-20
Fuertemente sódicos	20-30
Extremadamente sódicos	> 30

FUENTE: Richards, L.A. 1973.

Tabla Núm. 13. Clasificación de suelos sódicos según Massoud.

CLASE	PSI
No sódico	< 7
Ligeramente sódico	7-10
Medianamente sódicos	15-20
Fuertemente sódicos	20-30
Muy fuertemente sódicos	> 30

FUENTE: Massoud, 1971

También se pueden clasificar los suelos salinos y/o sódicos a partir de la información contenida en la figura núm. 5.

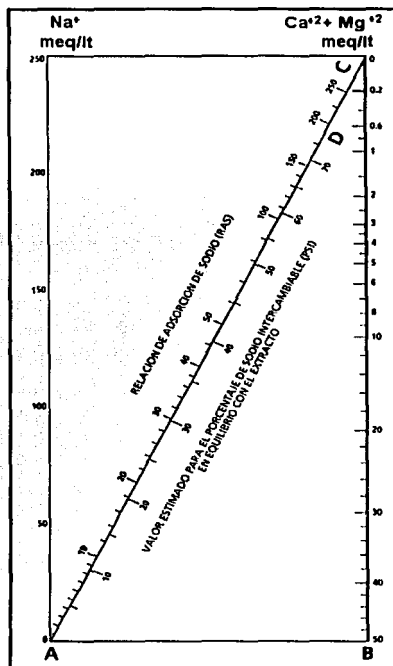


Figura núm. 5. Relación entre el RAS del extracto de saturación y el PSI del suelo en equilibrio con el extracto.

### 2.5.3 Reacción del suelo o pH.

La reacción de la solución del suelo depende de la correlación de los iones ( $H^+$ ) e hidróxido ( $OH^-$ ). La concentración de iones  $H^+$  en la solución se permite expresarla con el símbolo pH, el cual es el logaritmo de la concentración de iones  $H^+$ . Al pH también se le define como el grado o nivel de acidez, neutralidad o basicidad y se representa por:

$$pH = \log_{10} [H^+]$$

El pH del suelo ejerce gran influencia en el desarrollo de las plantas y los microorganismos del mismo, así como en la velocidad y la tendencia de los procesos químicos y bioquímicos que en él transcurren.

El pH del suelo está muy relacionado con las cantidades de cationes ácidos ( $H^+$  y  $Al^{3+}$ ) y bases en los sitios de intercambio. El pH sube cuando las concentraciones de base aumentan, y bajan cuando se incrementa las de ácidos.

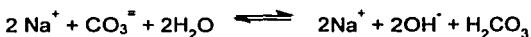
El pH se expresa por el cologaritmo de la concentración de iones  $H^+$ , en estado libre en las soluciones del suelo. El pH varía de 0-14, corresponde la neutralidad a 7; los suelos ácidos presentan un pH de 5-6; los suelos muy ácidos tienen un pH menor de 5; por el contrario los suelos alcalinos tienen un pH superior a 7 y presentan reacción básica.

Tabla Núm. 14. Descripción del pH en la pasta de saturación.

<b>pH (pasta de saturación)</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
< 7	Cantidades importantes de $H^+$ intercambiables
< 7,5	Ausencia de carbonatos de alcalinotérreos
< 8.5	PSI puede o no ser menor de 15
> 8.5	PSI casi siempre mayor de 15 presencia de carbonatos de alcalinotérreos

FUENTE: Aguirre G., A. 1993.

Los suelos sódicos poseen más de un 15% de sus sitios de intercambio ocupados por iones  $Na^+$ , pero son pobres en sales solubles. Esta combinación da lugar a una dispersión de los coloides y a un pH por encima de 8.5. La elevación del pH resulta de la presencia de iones sodio en la solución, ya que el  $NaOH$  es una base fuerte. Algunas sales sódicas, tales como el  $Na_2CO_3$  absorben  $H^+$  del agua y por hidrólisis liberan iones  $Na^+$  y  $OH^-$  que producen la intensa reacción alcalina del  $NaOH$  en disolución, que se representa por medio de la siguiente reacción:



De todos los suelos, los sódicos al ser los más alcalinos, son los más difíciles de corregir, ya que presentan una permeabilidad muy baja y apenas pueden soportar el crecimiento de las plantas, y a un pH elevado, una parte de la materia orgánica se disuelve y se acumula en la superficie del suelo formando una fina capa negra (álcali negro).

Los suelos sódicos-salinos combinan el alto contenido de sales (más de 4 dS/m en el extracto de saturación) de los suelos salinos, con la abundancia en  $\text{Na}^+$  (más del 15% de los sitios de intercambio) de los suelos sódicos, de este modo suelen presentar un pH que oscila entre 8.0 y 8.5; sus propiedades coinciden con las de los suelos salinos excepto que, a diferencia de estos últimos, el lavado los transforma en suelos sódicos y aunque presentan el mismo aspecto físico, es importante distinguirlos, ya que los primeros pueden recuperarse simplemente por lavado, mientras que los segundos, se arruinan si reciben ese tratamiento sin una corrección previa al suelo.

A partir de las características CEE, PSI y pH el USDA (1982), clasifica a los suelos salinos, sódicos o salino-sódicos, como se puede observar en la siguiente figura:

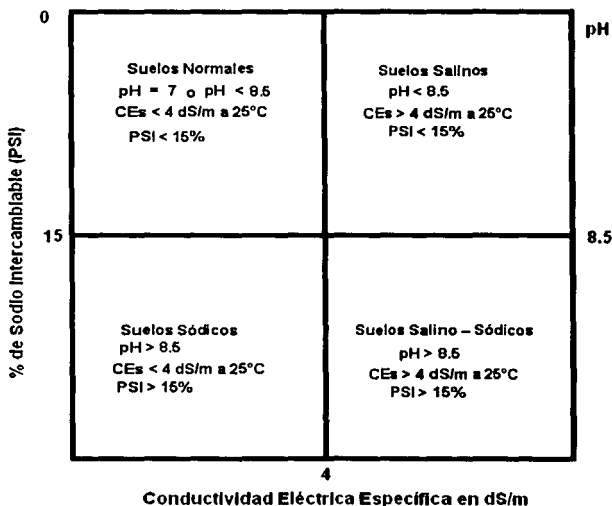


Figura Núm. 6. Clasificación de los suelos a partir del PSI, CEE y pH.

## **2.6 Propiedades físicas y químicas de los suelos con problemas de salinidad.**

El conocimiento de las propiedades físicas y químicas de los suelos salinos, adquiere gran relevancia, pues permite explicar, por una parte, el medio en el que se desarrollan las raíces de los cultivos y, por otra parte, brinda una pauta metodológica para su rehabilitación y/o recuperación.

### **2.6.1 Suelos salinos.**

#### **2.6.1.1 Propiedades físicas.**

Generalmente, los suelos salinos presentan un aceptable estado de agregación, debido al exceso de sales solubles que aminoran el efecto de la "doble capa difusa" en los coloides, de tal modo que el suelo permanece floculado y mantiene condiciones físicas adecuadas para los cultivos como permeabilidad adecuada al aire y al agua.

En cuanto a estructura, los suelos salinos carecen de una característica específica que los identifique, en cambio, su propiedad más importante es la textura, pues de ella va a depender la capacidad de retención de humedad y su permeabilidad, que a su vez, influirá sobre la dilución y lixiviación de los materiales salinos.

Las propiedades físicas de los suelos salinos, en general, son favorables al desarrollo de las plantas cultivadas ya que no se ven afectadas adversamente por la acumulación de sales. En cambio, el daño de dicha acumulación afecta directamente a las plantas ya que origina una elevada presión osmótica que disminuye la disponibilidad de agua para las plantas; por tanto, las sales producen un efecto directo sobre los cultivos más que propiedades físicas desfavorables, esto es la planta necesitará de mayor energía para absorber el agua del suelo a medida que se eleve su concentración salina.

#### **2.6.1.2 Propiedades químicas.**

Las propiedades químicas de los suelos salinos están conferidas por la acumulación de sales solubles en el perfil del suelo y por el tipo de sales. Las sales más comunes en la solución del suelo son sales neutras del tipo  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  y  $\text{MgCl}_2$  (ver tabla núm. 15). Debido a lo anterior, el pH normalmente toma valores menores de 8.5. Los principales aniones son cloruros, sulfatos, algunas veces nitratos, casi nunca carbonatos en cantidades apreciables, y pueden tener caliza o yeso precipitados. Respecto a los cationes, la característica más notable, es que el calcio y el magnesio son los predominantes, en cambio el sodio es raro llegue a la mitad del total de los cationes, lo que explica que los suelos salinos tengan valores de PSI menores del 15%.



**Tabla Núm. 15. Frecuencia, grados de solubilidad y los efectos tóxicos particulares las sales presentes en los suelos salinos.**

<b>CLASE</b>	<b>PRESENCIA EN LOS SUELOS SALINOS</b>	<b>SOLUBILIDAD</b>	<b>TOXICIDAD PARA LAS PLANTAS</b>
<b>CLORUROS</b>			
Sódico	común	Alta	+++
Magnésico	común	Alta	++++
Cálcico	raro	Alta	++
Potásico	baja	Alta	+
<b>SULFATOS</b>			
Sódico	común	muy variable	++
Magnésico	común	media	++++
Potásico	baja	alta	+
<b>CARBONATOS</b>			
Sódico	en suelos sódicos	media	+++++
<b>BICARBONATOS</b>			
Sódico	en suelos sódicos	media	++++

FUENTE: Adaptado de Valencia, 2000.

## **2.6.2 Suelos sódicos.**

### **2.6.2.1 Propiedades físicas.**

Las propiedades físicas de este tipo de suelo, son el reflejo de un exceso de sodio adsorbido en el complejo coloidal del suelo.

Las manifestaciones de esa elevada cantidad de sodio se aprecian en los siguientes efectos:

- Alteración física de las suspensiones coloidales.
- Impermeabilidad del suelo.
- Cambio en la estructura y relaciones de humedad.
- Formación de un "Clay-pan" o un "Hard-pan" cuando existe  $\text{CaCO}_3$  precipitado.

Estos efectos no son independientes sino interrelacionados; se ha demostrado que suelos saturados con sodio tienden a permanecer dispersos, y los agregados no se reconstruyen por medio de los procesos naturales, ya que la agregación está estrechamente relacionada con la floculación, y el comportamiento de la "doble capa difusa". Bajo esas circunstancias, los suelos sódicos están defloculados debido a la fuerte hidratación del ion sodio que dispersa a los coloides del suelo; y a esto se le suma el efecto del  $\text{H}_2\text{CO}_3$  sobre los silicatos coloidales, que en conjunto reducen el tamaño y el diámetro de los poros, reduciéndose la velocidad de infiltración y permeabilidad del suelo al aire y al agua.

Otras características físicas de los suelos sódicos originados por esa defloculación son la impermeabilidad, una fuerte tendencia a amasarse, una alta plasticidad cuando húmedos, una elevada dureza y compactación al secarse y así se forman grandes terrones cuando son barbechados.

Suelos con un PSI mayor del 7% muestran los primeros indicios del desarrollo de los suelos sódicos, y cuando el PSI toma valores alrededor del 20% el suelo presenta todas las características físicas de un suelo sódico.

### 2.6.2.2. Propiedades químicas.

Las propiedades químicas de un suelo sódico se manifiestan con la desalinización del suelo salino, motivo por el cual, normalmente presentan valores de conductividad eléctrica menores de 4 dSiemens/m. La remoción de las sales por el perfil se inicia con los cloruros y los nitratos, seguidos por los sulfatos, carbonatos y bicarbonatos. Como los electrolitos son removidos por lavado, los coloides del suelo se peptizan, y ese grado de peptización depende del tipo de catión y de su cantidad en el complejo de intercambio, que en este caso se satura con sodio. El efecto de los cationes sobre la dispersión (medida de peptización) disminuye en el orden siguiente:



Al lavarse los electrolitos, los efectos del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se hacen prominentes y se inician los rasgos distintivos del suelo sódico.

La remoción de sales por lavado del suelo sódico se hace notoria en los horizontes A y B, y se acumulan usualmente en dos horizontes: B<sub>2</sub> y C; las variaciones en la composición química de las sales están determinadas por la posición físico – geográfica del suelo. Así, en los suelos sódicos del tipo prismático, la acumulación de sales se inicia en el horizonte C donde se encuentran  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{NaCl}$ . En los suelos sódicos columnares la acumulación comienza en el horizonte B<sub>2</sub>, y son iguales las sales que en el tipo prismático, pero se presentan en más pequeñas cantidades. Los suelos sódicos con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  libre en el horizonte B<sub>2</sub> contienen:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$ ; en el horizonte B<sub>3</sub>:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$ ; y en el horizonte C:  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Como puede observarse, los aniones más comunes en los suelos sódicos son: cloruros, sulfatos, bicarbonatos y carbonatos.

Se puede decir que las características químicas de un suelo sódico son:

- Escasa presencia de sales solubles.
- Valores de PSI mayores del 15%
- Valores de pH mayores de 8.5

- Presencia de carbonatos
- Escasa presencia de calcio y magnesio solubles

Las características desfavorables que imparten a los suelos sódicos se pueden modificar desplazando de las miscelas coloidales ese exceso de sodio adsorbido por un catión que restaure las condiciones físicas deseables, como calcio y/o magnesio.

## **2.6.3 Suelos salinos – sódicos.**

### **2.6.3.1 Propiedades físicas.**

Los problemas físicos se originan de la dispersión de los coloides del suelo. Las partículas dispersas forman costras y bloquean los poros. La permeabilidad del suelo desciende de valores tan bajos, que en algún caso es inferior a la tasa de evaporación, esto imposibilita el crecimiento de las plantas y dificulta mucho la aplicación de correcciones químicas para corregir el problema.

Los suelos salinos-sódicos tendrán la misma apariencia e iguales propiedades físicas de los suelos salinos-no sódicos mientras exista el exceso de sales solubles, pues debido a tal exceso las partículas del suelo permanecen floculadas; pero si las sales solubles son eliminadas mediante la lluvia o riegos, se modificarán las propiedades físicas de dichos suelos y se pondrán de manifiesto las características y propiedades de los suelos sódicos no salinos, ocasionados por esta lixiviación o "congelación".

Esto explica porque no es recomendable lavar las sales de los suelos salinos-sódicos más allá de cierto límite antes de reemplazar al sodio intercambiable de la fracción coloidal del suelo.

Los problemas de los suelos alcalinos no se presentan muy comúnmente, pero cuando lo hacen perjudican de manera importante al crecimiento de todos los cultivos. Los problemas químicos existen siempre de algún modo en todos los suelos alcalinos pero pueden ser no serios, ya que su gravedad se halla correlacionada con la magnitud en que el pH se halla por encima de 7.0.

### **2.6.3.2 Propiedades químicas.**

Los problemas químicos se originan por la reducida disponibilidad de fósforo, de potasio y de la mayoría de los micronutrientes. Las deficiencias en hierro son especialmente frecuentes en suelos alcalinos. Bernstein, Francois y Clark (1974) comprobaron que el aumento de la concentración de sales reducía la respuesta de los cereales y hortalizas a las aplicaciones de fertilizantes.

## **2.7 Propiedades biológicas de los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad.**

Los estudios de las características microbiológicas de los suelos salinos y/o sódicos son escasos, y sólo hasta la década de los setentas se iniciaron con ahínco, por lo cual, los resultados no son lo abundantes que se quisiera.

La salinidad de los suelos crea condiciones específicas para la existencia de los microorganismos, y el número relativo de individuos de diferentes especies cambia debido a la concentración y composición química de las sales en el suelo, así como también a las propiedades químicas de las exudaciones de las raíces.

Las exudaciones difieren en su composición química, su proporción de producción y su importancia para los microorganismos del suelo.

Hay razón para asumir que las raíces de plantas que crecen bajo varios tipos de salinidad, excretan diferentes sustancias dentro de su ambiente circundante debido a cambios en su metabolismo, inducido por los diferentes tipos de salinidad.

En la rizósfera se encuentran concentrados principalmente los siguientes microorganismos:

- a) Bacterias formadoras de esporas.
- b) Bacterias fijadoras de nitrógeno.
- c) Bacterias nitrificantes.
- d) Bacterias reductoras de  $\text{SO}_4^-$
- e) Actinomycetes y hongos.

El tipo de salinidad en el suelo, afecta la relación entre varios organismos en cada zona de las mencionadas.

La exudación de la raíz juega un papel muy importante en la actividad de los microorganismos y es probable que bajo condiciones salinas esas exudaciones determinen el grado de tolerancia a las sales de los microorganismos.

En presencia de exudaciones de raíz, hay siempre un cambio en la relación entre los diferentes microorganismos en suelos de diferente tipo de salinidad. Así, por ejemplo los actinomycetes adquieren clara tolerancia a la salinidad tipo  $\text{SO}_4^-$ , y son también enteramente resistentes a la salinidad tipo Cl-.

La mayor tolerancia a sales se encontró en las bacterias reductoras de sulfatos; concentraciones de sales relativamente elevadas dan condiciones favorables para la actividad de esos microorganismos. Las menos tolerantes fueron las bacterias formadoras de pigmentos, myxobacterias y hongos. La inhibición de desarrollo de éstos últimos organismos, aumenta al aumentar el contenido de sales en el suelo.

## **2.8 Efecto de la salinidad y alcalinidad sobre el crecimiento de las plantas.**

El efecto de la salinidad sobre las plantas es diverso y variable. Existe una clasificación generalizada que agrupa las plantas en halófitas y no halófitas. Las primeras se refieren a aquellas plantas que poseen mecanismos de resistencia a las salinidad, aunque su grado de tolerancia es muy variable. La mayor parte de las plantas cultivadas, se consideran como no halófitas, siendo las más tolerantes la mayoría de los cereales. En general, los paisajes de los suelos salinos se caracterizan por desarrollar una vegetación escasa, con frecuentes claros.

Deben tomarse precauciones especiales para evitar la confusión entre los efectos causados por la baja fertilidad del suelo de aquellos causados por la salinidad. Las plantas poco desarrolladas, achaparradas, debidas a una baja fertilidad, son comúnmente verde-amarillentas, mientras que las achaparradas por efecto de la salinidad son verde-azulosas. Ese tono azulado es causado por una cubierta cerosa de grueso espesor, sobre la superficie de las hojas y el color más oscuro se debe a un aumento del contenido de clorofila por superficie foliar. Este efecto azulado se observa con claridad en la remolacha, la alfalfa y crucíferas.

La salinización y/o sodificación afecta el crecimiento de las plantas de cultivo en las formas siguientes:

### **2.8.1 Relaciones hídricas.**

El riego continuo bajo condiciones desfavorables, produce un incremento gradual de la presión osmótica que es una medida del contenido de sales solubles sobre la base de energía. Si tenemos en cuenta que el agua tiende a pasar de las soluciones menos concentradas a las más concentradas, con objeto de diluir éstas últimas e igualar las presiones osmóticas de ambas, se comprende que cuando la concentración salina de la solución del suelo es superior a la del jugo celular de las plantas, el agua tenderá a salir de éstas últimas hacia la solución del suelo. Este efecto llevó a Shimper (1903) a plantear la teoría de la sequedad fisiológica, en la que se postula que en medios salinos, aunque exista una humedad elevada, las plantas sufren estrés hídrico, se secan y acaban muriendo.

El retardo o atraso del crecimiento, virtualmente tiene una relación lineal con la presión osmótica y no depende mucho de la clase de sales presentes. Es evidente que el efecto de una cantidad dada de sales solubles en solución en el suelo, es intensificada a medida que el contenido de humedad del mismo baja o decrece entre cada riego y consecuentemente, la concentración de sales aumenta. Así, uno de los principales efectos de la salinidad, es el que limita o restringe el abastecimiento de agua de la planta.

### **2.8.2 Problemas de toxicidad.**

Algunas sales o iones que no son dañinos en bajas concentraciones se pueden acumular en el suelo en cantidades suficientes para ocasionar reacciones tóxicas en las plantas. Entre tales iones se encuentran el boro y el litio, que son tóxicos aún en cantidades pequeñas, y los iones de cloro, sodio y bicarbonato que son tóxicos para ciertas plantas, cuando están presentes en concentraciones relativamente elevadas.

Por lo que la presencia en exceso de ciertos iones puede provocar toxicidad al afectar a rutas metabólicas, lo que altera el correcto desarrollo del cultivo, debido a su acumulación en distintas partes de las plantas, como pueden ser las semillas, los tallos y las hojas. Los más significativos, en este aspecto, son los cloruros, el sodio y el boro, lo que afecta con mayor incidencia a los cultivos plurianuales.

### **2.8.3 Problemas en la estructura del suelo.**

El uso de agua con alta proporción o con altas cantidades absolutas de sodio y ocasionalmente de bicarbonato, trae consigo condiciones físicas desfavorables del suelo, a través de reacciones complejas llamadas de intercambios de bases. Los suelos con un contenido elevado de sodio adsorbido tienden a juntarse cuando están húmedos e impiden así el movimiento del agua y del aire. Esos suelos forman también costras y terrones duros cuando están secos.

El exceso de sales favorece la aparición de costras que ocasionan la asfixia radicular. Además, la existencia de ion sodio ocasiona la dispersión de la materia orgánica y de las arcillas, con la consiguiente pérdida de estructura, por lo que los efectos de impermeabilización y formación de costras se acentúan.

### **2.8.4 Balance energético.**

No obstante, esta teoría no describe completamente todos los efectos perjudiciales de la salinidad, ya que en ocasiones las plantas no sufren estrés hídrico sino que disminuyen considerablemente su altura. Para explicar este efecto, Bernstein (1961) desarrolló la teoría del ajuste osmótico, la cual propone que las plantas, al aumentar la presión osmótica de la solución del suelo, se ven obligadas a una adaptación osmótica de sus células para poder seguir absorbiendo agua; adaptación que requiere un consumo de energía que se hace a costa de un menor crecimiento. Aceves (1979) propone la teoría de la división y el crecimiento celular, en la cual la disminución del crecimiento se atribuye a que las sales afectan a la división celular, producen un engrosamiento prematuro de las paredes celulares y limitan el crecimiento de forma irreversible.

## 2.8.5 Nutrición.

En el aspecto nutricional, se produce una serie de importantes modificaciones, debido, por un lado, a las variaciones de pH que afectan a la disponibilidad de los nutrientes, y por otro, a las interacciones ocasionadas por el exceso de determinados elementos. Tal sucede con los cloruros y nitratos y fosfatos, el calcio y el sodio o los del potasio y sodio. La dominancia de calcio provoca antagonismos sobre el potasio, magnesio, hierro, boro y zinc, entre otros. Sin embargo, existen relaciones de sinergismo entre potasio e hierro y entre magnesio y fósforo.

## 2.8.6 Clasificación de los cultivos según su tolerancia relativa a la salinidad.

Con ciertos niveles de salinidad, se pueden obtener rendimientos aceptables, si se eligen aquellas plantas tolerantes a estos niveles. Para ello se utilizan las tablas correspondientes, que sirven como base para la selección de cultivos.

Los cultivos se encuentran enlistados en las tablas núm. 16, 17, 18 y 19; y para una mejor claridad de la información se encuentran clasificados del más tolerante al menos tolerante, los valores de la CE corresponden a una disminución de los rendimientos del 50 % (Richards, I. A. 1973).

Tabla Núm. 16. Tolerancia de frutales a la salinidad.

<b>MUY TOLERANTES (12 a 18 dSiemens/m)</b>	<b>MEDIANAMENTE TOLERANTES (5 a 10 dSiemens/m)</b>	<b>POCO TOLERANTE (3 a 5 dSiemens/m)</b>
Palma datilera	Granada	Peral
	Higuera	Manzano
	Vid	Naranja
	Melón	Toronja
	Ciruelos	
	Almendro	
	Albaricoque	
	Melocotón	
	Fresa	
	Limonero	
	Aguacate	

FUENTE: (Richards, L.A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa, México.)

Tabla Núm. 17. Tolerancia de hortalizas a la salinidad.

<b>MUY TOLERANTES</b> <b>(10 a 12</b> <b>dSiemens/m)</b>	<b>MEDIANAMENTE</b> <b>TOLERANTES (4 a 10</b> <b>dSiemens/m)</b>	<b>POCO TOLERANTES</b> <b>(3 a 4 dSiemens/m)</b>
Remolacha de mesa	Jitomate	Rábano
Bretón o col rosada	Brócoli	Apio
Espárragos	Col o Repollo	Ejotes
Espinacas	Pimiento	
	Coliflor	
	Lechuga	
	Maíz dulce	
	Papas	
	Zanahoria	
	Cebolla	
	Chicharos	
	Calabaza	
	Pepino	

FUENTE: (Richards, L.A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa, México.)

Tabla Núm. 18. Tolerancia de los cultivos comunes a la salinidad.

<b>MUY TOLERANTES (10 a</b> <b>16 dSiemens/m)</b>	<b>MEDIANAMENTE</b> <b>TOLERANTES (6 a 10</b> <b>dSiemens/m)</b>	<b>POCO TOLERANTES</b> <b>(hasta 4 dSiemens/m)</b>
Cebada (grano)	Centeno (grano)	Alubias
Remolacha azucarera	Trigo (grano)	
Colza	Avena (grano)	
Algodón	Arroz	
	Sorgo (grano)	
	Maíz	
	Linaza	
	Girasol	
	Higuerilla	

FUENTE: (Richards, L.A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa, México.)



Tabla Núm. 19. Tolerancia de las plantas forrajeras a la salinidad.

<b>MUY TOLERANTES (12 a 18 dSiemens/m)</b>	<b>MEDIANAMENTE TOLERANTES (4 a 12 dSiemens/m)</b>	<b>POCO TOLERANTES (2 a 4 dSiemens/m)</b>
Zacatón alcalino	Trébol blanco	Trébol blanco
Zacate salado	Trébol amarillo	Holandés
Zacate alcalino	Zacate inglés	Alopécuro
De coquito	perenne	Trébol Alsike
Gramma o Bermuda	Bromo de montaña	Trébol rojo
Hierba rodees	Trébol fresa	Trébol ladino
Cebadilla criolla	Zacate dallis	Pimpinela
Centeno silvestre	Zacate Sudán	
De Canadá	Trébol Hubam	
Gramma de trigo occidental	Alfalfa (California común)	
Cebada (para heno)	Festuca alta	
	Centeno (para heno)	
	Trigo (para heno)	
	Avena (para heno)	
	Dactilo apelonado	
	Gramma azul	
	Festuca	
	Hierba Cinta	
	Trébol grande	
	Bromo suave	
	Veza lechosa Cicer	
	Trébol agrio	
	Veza lechosa (hoz)	

FUENTE: (Richards, L.A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa, México.)

Tabla Núm. 20. Relación de algunos cultivos con el PSI

<b>PSI</b>	<b>CULTIVOS</b>	<b>EFFECTOS</b>
2-10	Muy sensibles Frutales y Agrios	Síntomas de toxicidad debidos al sodio, aun a niveles bajos
10-20	Sensible Judía Maíz	Reducción del crecimiento aun con suelos en buenas condiciones físicas.

<b>PSI</b>	<b>CULTIVOS</b>	<b>EFFECTOS</b>
	Tolerante Zanahoria Trébol Lechuga Avena Cebolla Rábano Arroz Sorgo Espinaca	Ligeros síntomas de toxicidad debida al sodio. Los efectos indirectos (deterioro de las propiedades del suelo) son más importantes.
> 40	Muy tolerantes Tomate Veza Trigo Alfalfa Cebada Remolacha Algodón	Los cultivos se ven afectados únicamente por los efectos indirectos.

FUENTE: (Richards, L.A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa, México.)

Tabla Núm. 21. Clases de suelos sódicos y su relación con PSI y producción.

CLASE	PSI	Producción de los cultivos %
Ligeramente sódico	7-15	80-60
Medianamente sódicos	15-20	60-40
Fuertemente sódicos	20-30	40-20
Extremadamente sódicos	> 30	< 20

FUENTE: Richards, L.A. 1973.

A la hora de evaluar la posible productividad de un suelo salino hay que tener en cuenta que el comportamiento puede ser diferente en función de una serie de factores que suelen alterar significativamente los resultados en la reducción de cosecha de las distintas especies. Esto es una consecuencia de varios factores, entre los que se encuentran la variabilidad que puede presentar la muestra de suelo seleccionada para realizar la diagnosis de salinidad, las técnicas de cultivo aplicadas, las diferentes condiciones de humedad del perfil del suelo, los comportamientos variables según clases de sales existentes, o la selección de especies y variedades adaptadas a las condiciones de salinidad e incluso la relación entre la concentración de las sales durante las distintas fases del desarrollo de los cultivos (Martínez Raya 1996).

### **3. RECUPERACIÓN DE SUELOS CON PROBLEMAS DE SALINIDAD Y/O SODICIDAD.**

Aun cuando las labores agrícolas de una zona bajo riego en comparación con otra que no lo tiene son distintos, los principios generales para la recuperación de los suelos con salinidad o exceso de sodio son en lo general de aplicación universal.

La recuperación de los suelos implica un mejoramiento de sus condiciones con respecto a las plantas; mientras en los suelos salinos es necesario reducir el contenido de sales, para los salino-sódicos se requerirá reducir dicho contenido de sales y tomar medidas para evitar que se deterioren sus propiedades físicas, en cambio, en los suelos sódicos, el desplazamiento de sodio intercambiable de las miscelas coloidales de calcio, repercute en un mejoramiento de sus condiciones físicas.

Las diferencias entre los suelos salino-sódicos y sódicos, en cuanto a su rehabilitación, residen en que los primeros conservan las condiciones físicas, y en los segundos se deben mejorar, por lo que éstos últimos son los más difíciles de recuperar ya que tienen dos problemas principales a resolver, y que son:

- 1.- Exceso de sodio intercambiable
- 2.- Condiciones físicas del suelo desfavorables

Por lo que para su recuperación y/o rehabilitación, normalmente se realiza una combinación de técnicas, como a continuación se menciona:

- a) Medidas químicas; que consisten en la aplicación de mejoradores.
- b) Medidas hidrotécnicas como son: lavado, drenaje y control de la calidad del agua.
- c) Medidas mecánicas, tales como barbecho profundo y subsoleo.
- d) Medidas biológicas, incorporación de abonos verdes y de materia orgánica.

En la India, por ejemplo, estos suelos se han recuperado con una combinación de las medidas anteriores; la secuencia que se siguió, en consideración de que en la zona existía un buen drenaje, fue la siguiente (PLA, 2002):

1. Adición superficial de materia orgánica.
2. Barbecho profundo.
3. Aplicación de yeso al voleo.
4. Labranza superficial para incorporar el yeso.
5. Nivelación en contorno.
6. Riego poco abundante a fin de mantener cierta humedad y que el yeso puede actuar.
7. Lavado con o sin cultivo de arroz, cuyo establecimiento simultáneo dependerá de la lámina por aplicar.
8. Labranza y otro labrado. La labranza se realizará cuando el suelo no esté mojado, para no destruir la estructura.

9. Uso de cultivos resistentes.

10. Rotación de arroz – trigo – algodón – abonos verdes.

Para recuperar los tres tipos de suelos caracterizados anteriormente se utilizan algunos métodos comunes y para una mayor eficiencia deben aplicarse combinados, es decir, complementándose unos con otros.

Las medidas tomadas para recuperar suelos salinos son diversas, pero normalmente se toma el siguiente patrón:

1. Efectuar medidas hidrotécnicas radicales, por medio del lavado, drenaje y control del nivel freático, se recomienda que al realizar esta práctica dejarse secar el suelo hasta que su floculación; Además, se recomienda aumentar de 1.5 a 2.0 veces la lámina calculada, cuando el lavado sea por inundación, pues el primer lavado es el que más sales eliminan.
2. Efectuar una reducción de la evaporación mediante cultivos de cobertura, cuando estos se pueden establecer, o una labranza que rompa la franja capilar.
3. Efectuar un control de la calidad del agua.
4. Llevar a cabo rotación de cultivos cuando sea posible.

### 3.1 Métodos de recuperación.

El avance de la ciencia ha permitido ampliar el conocimiento y uso de las técnicas de recuperación, para que al mismo tiempo se pueda combatir la salinidad y sodicidad en los suelos; por lo que a continuación se describirán dichos métodos.

Los métodos de recuperación se clasifican, principalmente, en técnicas auxiliares y técnicas básicas, en éstas últimas se consideran dos las técnicas principales, el método hidrotécnico y el método químico.

El método hidrotécnico es utilizado para extraer las sales de los suelos cuando el problema es la salinidad, se aplica una cierta cantidad de agua a través del suelo que arrastre las sales existentes. Cuando el problema es sodicidad, las sales dejan de ser tan importantes ya que el principal problema es el sodio que se encuentra retenido por el complejo de cambio a través de enlaces químicos, por lo que el lavado no surtirá efecto ya que se necesita liberar al sodio, para lo cual se deben aplicar sustancias que aporten al suelo cantidades suficientes de calcio o magnesio que reemplacen al sodio del complejo y esto se logra mediante el uso de los métodos químicos.

En cuanto a las técnicas auxiliares, tienen la función de aumentar la eficiencia de las técnicas básicas, no precisamente de recuperar el suelo.

La clasificación de los métodos de recuperación para suelos salinos, sódicos y salino-sódicos se esquematizan en la tabla núm. 22.

Tabla Núm. 22. Métodos de recuperación de suelos salinos y sódicos.

<b>TIPO DE TÉCNICAS</b>	<b>TIPO DE MÉTODO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>
Básicas	Químicos	Aplicación de correctores químicos.	Sódico
	Hidrotécnicos	Aplicación de láminas de agua (lavados)	Salinos principalmente, ya que para los sódicos se utiliza sólo como una técnica complementaria
	Eléctrica	Aplicación de energía eléctrica al suelo: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Desalinización</li> <li>▪ Desodificación</li> </ul>	Salinos Sódicos
Auxiliares	Físicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inversión del perfil</li> <li>▪ Arados profundos</li> <li>▪ Subsoleos</li> <li>▪ Mezclas de arena</li> </ul>	Salinos, sódicos y salino-sódicos
	Biológicos	Mejora orgánica Vegetación tolerante Abonados Mejora de la resistencia de las plantas	Salinos y sódicos
	Técnicas de riego	Bordeo Láminas parciales Técnicas de riego	Salinos principalmente, para los sódicos se usa solo como complemento al método químico.

FUENTE: Adaptado de Moctezuma H., M. 1987.

### 3.1.1 Recuperación por métodos físicos.

La recuperación de los suelos salinos mediante métodos físicos, involucra un conjunto de medidas mecánicas bien diferenciadas, siendo las más usuales, las siguientes: inversión del perfil, acondicionamiento de la textura del suelo, subsoleo, labranza o barbecho profundo e impermeabilizantes artificiales.

El propósito básico de las medidas físicas, consiste en incrementar directamente la permeabilidad del suelo, basándose en la mezcla del material fino y grueso de capas de texturas diferentes, como lo hace la labranza profunda, o como lo efectúa el desmenuzamiento y ruptura de capas impermeables mediante el subsoleo, y por último la incorporación del material arenoso a suelos de textura

fina. Por otro lado, la impermeabilización del suelo se basa en el uso de materiales impermeables (plásticos en general) que se colocan a una determinada profundidad del suelo.

Se podrá observar que todas las medidas que a continuación se describirán y que integran los métodos físicos, inciden principalmente en el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo, auspicia la eficiencia de los métodos hidrotécnicos y químicos, a excepción de la labranza profunda, que mejora las condiciones físicas y químicas de los suelos sódicos y salino-sódicos.

Estos métodos pueden o no aplicarse como auxiliares o complementarios en su recuperación, la mayoría constituye medidas prácticas y muy económicas, (excepto la inversión de perfiles). En general se puede asumir que estas medidas se encaminan a facilitar el lavado pues el problema principal de los suelos sódicos estriba en sus condiciones físicas.

### **3.1.1.1 Inversión del perfil.**

La inversión del perfil se basa en "arropar" una capa de suelo con características indeseables con material de mejor calidad, procedente, por ejemplo, de una capa más profunda. El objetivo de esta medida es conservar la capa superficial deseable, mientras se invierte el sustrato y el subsuelo, es decir, se efectúa una remoción del suelo superficial y labranza profunda al subsuelo y sustrato, reemplazando luego el suelo superficial.

Esta medida debe ser adoptada cuando se tiene un suelo salino de buenas características o propiedades físicas en la capa superficial, pero la parte superior del subsuelo es indeseable, lo que comúnmente ocurre en los suelos sódicos.

Si en los suelos sódicos el sustrato es yeso, éste queda arriba al invertirse el perfil y puede funcionar como mejorador. Aún cuando ese sustrato no sea yeso, generalmente es más permeable, y la recuperación se facilita, lográndose así una mayor penetración de las raíces y el agua.

Este tipo de trabajos no es recomendable económicamente, dado el equipo requerido para desplazar la capa superficial y luego reemplazarla. Sólo se tienen experiencias de esta clase en los países con altos recursos económicos donde éstos trabajos se realizan gracias a su sistema económico y de producción.

### **3.1.1.2 Acondicionamiento de la textura del suelo.**

Cuando se quiere mejorar la textura, se utiliza esta técnica, la cual es solo efectiva en la capa arable y con mayor influencia sobre suelos francos, en los que facilita la penetración de agua y raíces, y previene los fenómenos de evaporación por

capilaridad del nivel freático cuando se usa como colchón. Este método es muy práctico para suelos superficiales que dificultan el lavado; su costo se deriva de la lejanía de la fuente de arena y su transporte.

Estudios realizados en España, Unión Soviética y Arabia, muestran que capas acondicionadas de arena de un grosor de 10 cm al suelo, y que dosis de  $2.5 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/ha o 500 a 700 ton/ha, mejoraron las propiedades físicas y facilitaron el lavado en suelos salinos, que en suelos sódicos fue efectivo en combinación con el lavado para su recuperación. Esta adición puede darse incorporada con el barbecho para tratar de modificar la estructura, o en colchones como medida protectora para suelos con niveles freáticos elevados y/o aguas subterráneas salinas.

Métodos similares se han ensayado en Valencia España, pero en vez de adicionar arena, agregan arcilla a suelos arenosos salinos y añaden suelos Chernozem a suelos sódicos, obteniéndose resultados satisfactorios.

### **3.1.1.3 Subsoleo.**

El método de esta técnica consiste en abrir canales con arados de subsuelo para mejorar su permeabilidad y el efecto benéfico persiste sólo por un ciclo de cultivo, ya que el subsuelo se rompe momentáneamente y el agua lo vuelve a su estado original, a menos que se rompa alguna capa dura en el horizonte B o capas de CaCO<sub>3</sub>, en tal caso, los beneficios se prolongan por varios años.

En experimentos realizados en España con suelos salino-sódicos arcillosos, se removió del subsuelo alrededor de la mitad del contenido salino en los primeros 60 centímetros durante tres años, y ya que por sí solo no es lo más benéfico, se acompañó con la labranza del suelo, por ser una medida que mejora las propiedades físicas del suelo.

Tanto el subsoleo como el barbecho profundo son métodos de labranza considerados como un medio para mejorar los suelos con problemas de sodio. El barbecho profundo y una inversión de la capa sobre la que actúa, sólo son utilizables cuando el horizonte B existe calcio, de lo contrario, al invertir se tendrán sales dañinas en la capa arable.

Dada su morfología, los suelos sódicos que no contienen calcio en los horizontes más bajos son un impedimento para el desarrollo de las raíces, y la capa superficial (20 – 25 cm) no aporta la suficiente humedad para las mismas, lo que hace necesario incrementar la porosidad en el horizonte B sin voltearlo. Para esto se usa el "aflojamiento profundo" con cinceles dobles, que es una variación del subsoleo y un método más de labranza. Éstos cinceles se mueven de 50 a 60 cm de profundidad espaciados a 50 o 60 cm. Así, el suelo aflojado a esa profundidad toma y almacena más agua aprovechable para las plantas, además de incrementar la permeabilidad del terreno.

El agua percolada a mayor profundidad remueve las sales, y este proceso adquiere relevancia cuando el afloramiento profundo se ejerce regularmente.

#### **3.1.1.4 Labranza o barbecho profundo.**

Este término se refiere a un barbecho cuya profundidad varía entre 40 y 150 cm, ésta es una medida muy efectiva para suelos estratificados de diferentes permeabilidades o que tienen capas impermeables entre capas permeables, así como en suelos sódicos que contienen cantidades apreciables de yeso o de  $\text{CaCO}_3$  a una determinada profundidad del perfil. El barbecho profundo es utilizado para poner ese yeso o  $\text{CaCO}_3$  en el suelo superficial y abastecer de calcio soluble dicha capa, para facilitar el desplazamiento del sodio adsorbido por el calcio. La profundidad del barbecho dependerá de la profundidad a que se encuentren tales acumulaciones o capas.

La labranza profunda, al alterar los horizontes aluviales y transportar el yeso o  $\text{CaCO}_3$  a la superficie, incrementa el contenido de humedad de las capas más profundas, y la mayor penetración de las raíces mejora los procesos bioquímicos del suelo, es decir, acondiciona al suelo de tal modo que facilita la desalinización y remoción del sodio para un mejoramiento sobre su estructura, permeabilidad e infiltración del suelo barbechado.

El barbecho profundo ha sido muy efectivo tanto para suelos salinos bajo riego, como para los de secano, los que deben bordearse para retener el máximo de lluvia y asegurar humedad suficiente para el lavado. Se ha observado que esta medida es muy efectiva, en particular para suelos sódicos que poseen cierta capa de yeso o  $\text{CaCO}_3$  en el subsuelo.

Este método es muy económico para suelos que poseen capas de yeso o de  $\text{CaCO}_3$  y la recuperación se lleva por sí misma al existir la fuente de calcio.

#### **3.1.1.5 Uso de películas o capas plásticas.**

Entre las diversas prácticas físicas o mecánicas para recuperar suelos salinos se considera esta técnica que consiste en colocar capas o películas de plástico a una determinada profundidad del suelo con el fin de disminuir las pérdidas de agua por filtración y aumentar, así, la reserva de agua para las plantas para atenuar las presiones osmóticas de la solución del suelo; así como evitar la evaporación de las capas más profundas y de aguas subterráneas e impedir la acumulación de sales en la capa superior de la película de plástico. Esto se ha comprobado tanto en campo como en laboratorio y para su aplicación práctica se consideraría mejor en suelos salinos sin riego, aunque esta práctica elevaría el costo de rehabilitación.



### **3.1.2 Recuperación por métodos hidrotécnicos.**

Los métodos hidrotécnicos comprenden el lavado y el drenaje; el principio de estos métodos es muy simple: "las sales deben ser eliminadas de la capa superficial del perfil y posteriormente removidas del área afectada, con el objeto de evitar su redistribución". Para que el lavado de un suelo, en presencia de un elevado nivel freático o estratos u horizontes de baja permeabilidad, sea efectivo se necesita construir drenaje artificial.

El lavado consiste en la eliminación de las sales de la zona radical por medio de volúmenes de agua, en cantidad suficiente para ello. El lavado, a su vez, es una modalidad del riego, que se diferencia de este, en el fin a que se dispone, pues mientras el riego es una técnica para suministrar agua adecuada al cultivo, el lavado es un riego para eliminar las sales de la parte superior del suelo, basado en el sentido del movimiento y la capacidad del agua para disolver y arrastrar dichas sales.

Respecto al lavado en sí, se puede administrar con o sin drenaje artificial. El lavado es el método específico por excelencia para los suelos salinos y, como caso especial, para los suelos sódicos ricos en contenidos de carbonatos de calcio o yeso. En cambio, en los suelos salino-sódicos y sódicos, el lavado se utiliza como complemento o auxiliar de otros métodos, y su fin es solubilizar los mejoradores y eliminar las sales de sodio desplazadas del complejo de intercambio.

En los suelos con problemas de sales el drenaje artificial tiene la función de controlar la profundidad del nivel freático y, a la vez, es parte esencial en la recuperación de suelos ya que sirve para dar salida a las sales de las áreas afectadas.

La importancia al considerar las condiciones del drenaje, se debe a que el lavado pierde su efectividad si las sales no son removidas del área afectada y la rapidez con la que actúan los mejoradores depende, en sumo grado, de la eficiencia con que el drenaje elimine las sales en el campo.

Este método tiene primordial importancia ya que el agua aplicada genera fuerza de arrastre y solubiliza las sales, las cuales se conducen fuera del área de acción de las raíces, disminuyendo su efecto sobre el suelo y las plantas. Podría afirmarse que sin lavado, sea natural o artificial, no habría recuperación de terrenos salinizados.

En el caso de los suelos sódicos ricos en  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{CaSO}_4$ , al agregarles agua se solubilizan estas sales llevan calcio en solución y reemplazan al sodio adsorbido.

En el caso de tener suelos ricos en yeso, la recuperación se basa en la solubilidad del mismo, el cual reacciona directamente con el sodio adsorbido, siendo la

cantidad de agua añadida, directamente proporcional a la velocidad de recuperación.

Por otra parte se han realizado investigaciones de laboratorio y de campo que confirman que suelos sódicos ricos en carbonatos de calcio se recuperaron eficientemente sólo con lavados sin ocupar mejorador, pues es innecesario y cuando han sido aplicados, no han mostrado efecto alguno.

En virtud de que el lavado y sus variantes, son una modalidad del riego, se van a exponer brevemente los distintos métodos de este último, para entender mejor al primero.

### **3.1.2.1 Métodos del riego.**

Existen cinco métodos principales de riego:

- Por surcos.
- Goteo.
- Subirrigación.
- Aspersión.
- Inundación.

El método de riego más eficiente para realizar lavados, será aquel que mejor transporte las sales a las profundidades del perfil del suelo. Antes de caracterizar muy brevemente a cada uno, debe quedar claro que existen dos tipos de lavado de suelos: lavado profiláctico y lavado de control.

El lavado profiláctico es un lavado necesario para desalinizar suelos muy salinos hasta un nivel aceptable para los cultivos, siendo esto un proceso estacional que se emplea al inicio o al final del cultivo, o en áreas francamente improductivas o abandonadas.

El lavado de control se considera como un proceso continuo de adición en cada riego de un exceso de agua, más allá del uso consuntivo y de la llamada "lámina de sobrieriego" o "fracción de lavado".

Asimismo, debe tenerse presente que cualquiera que sea el método de lavado que se emplee, se requerirá siempre una capacidad de drenaje del suelo que elimine las sales tanto del perfil, como del área problema.

#### **3.1.2.1.1 Método por surcos.**

Este método es el más utilizado en México ya que se está familiarizado con él, y en el caso de suelos salinos sólo se aplica para lavado de control y en áreas con niveles bajos de salinidad, ya que al utilizarse en el campo da origen a fuertes variaciones en el contenido de sales del suelo, al formarse dos movimientos de

sales:

- Hacia abajo en el fondo del surco
- Hacia arriba, en el bordo o cabecera del surco, y se forma así una acumulación de sales en los bordos, siendo difícil que en esta área las plantas extraigan agua.

Visto lo anterior, generalmente se recomienda que la semilla se siembre en el talud y no en la cima del bordo, para aminorar los efectos de la acumulación de sales.

#### **3.1.2.1.2 Método por goteo.**

Al igual que el de surcos, podría sólo aplicarse a lavados de control, siempre y cuando los goteros estén tan próximos que muestren un efecto parecido al de surcos. Pero si se considera que se mantiene un alto contenido de humedad, en un volumen de suelo reducido (el llamado bulbo de mojado), sólo elimina las sales hasta donde éste llega por lo cual se trata de un método más adecuado para el riego que para el lavado.

#### **3.1.2.1.3 Método por subirrigación.**

Debido a que en este método, el abastecimiento del agua va por debajo de la superficie y funciona según los principios de capilaridad y difusión, no se recomienda, ni como método de riego para terrenos salinos ni mucho menos para lavados.

#### **3.1.2.1.4 Métodos por aspersión.**

Este es un excelente método de lavado pues ofrece muchas ventajas sobre los demás en lo referente al lavado, pues genera un mojado intermitente, garantiza una uniforme penetración, lava a bajas intensidades y a bajos contenidos de humedad, requiere de menos agua y se puede utilizar en áreas con cierta pendiente, así como en áreas irregulares y, además, puede utilizarse en ambos tipos de lavado: profiláctico y de control. La desventaja es su costo y la necesidad de fuentes de energía, ya que el agua requiere de impulso.

#### **3.1.2.1.5 Método por inundación.**

Este método es muy efectivo cuando los problemas de salinidad son muy serios y es, por excelencia, un método para lavados profilácticos, y se puede utilizar en lavados de control para cultivos de cobertera (trigo, alfalfa, pastos, etc.). Es un método muy eficiente para áreas planas por lo que se requiere de previa

nivelación del terreno y distribución uniforme del agua, se utilizan para ello bordes o diques desde 0.45 m, hasta 1.20 m; en sus variantes, que pueden ser melgas o cajetes y cuyo tamaño se adecua para evitar patrones de mojado heterogéneos (los mejores van de 1/3 a 1.0 ha), pues cuando se determina mal el tamaño de las parcelas de lavado también las sales se acumulan en el centro y aunque se salinizan los bordes no es de tomarse en cuenta este efecto, dada su poca representación en área o volumen.

### **3.1.2.2 Selección del método de riego:**

Para seleccionar algún método primeramente se debe tomar en consideración los siguientes puntos:

- Cultivo por establecer (Interesa saber si el cultivo es por surcos o de cobertera).
- Topografía del área por recuperar.
- Cantidad y calidad del agua disponible.
- Estructura del suelo.
- Velocidad de infiltración.
- Condiciones climatológicas; por ejemplo, vientos dominantes en el caso de la aspersión.
- Condiciones de drenaje.
- Costos.
- Localización y condiciones de salinidad del suelo.

Si se considera lo mencionado en párrafos anteriores, el método por inundación ha sido el más aceptado mundialmente y el más utilizado, porque ha dado los mejores resultados, ya que se forza el flujo vertical del agua, por lo que se sugiere éste método como el más recomendable para lavados profilácticos y para lavados de control en cultivos de cobertera; Respecto a los métodos restantes, sólo el de aspersión sería recomendable si se justifica los costos de producción. Definitivamente no es conveniente la subirrigación y el goteo para efectuar lavados.

### **3.1.3 Recuperación por métodos biológicos.**

Los métodos biológicos se basan en la adición de materia orgánica al suelo y/o establecimiento de plantas, con el propósito de aprovechar los beneficios que ambos ejercen en el mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

#### **3.1.3.1 Efectos de la vegetación sobre las propiedades del suelo.**

Los efectos benéficos más importantes propiciados por la vegetación sobre las

propiedades de los suelos salinos se deben principalmente a la acción mecánica de sus raíces, las cuales modifican de manera directa las propiedades físicas e indirectamente las propiedades químicas y biológicas; a *grosso modo* incrementan la permeabilidad y conductividad hidráulica por efecto de los canales formados.

El sistema radical afloja al suelo, lo que incrementa su porosidad y permeabilidad; mientras más profundo, mayor es el efecto, lo que facilita que el lavado se verifique a mayores profundidades en el perfil del suelo, y con ello favorezca un mayor drenaje, o sea, la desalinización del suelo mismo.

El primer tipo de vegetación que ayuda en los suelos salinos son los árboles, los árboles que ayudan en el mejoramiento de las condiciones de los suelos salinos son las especies forestales, como son el olmo, arce o maple tártaro, álamo y roble.

Los efectos benéficos de estas especies son, principalmente, la formación de estructuras granulares, la disminución del valor del pH, aumento en el contenido del humus y el mejoramiento de la humedad del suelo. La desventaja que presenta éste método es que es una recuperación a muy largo plazo, debido a su acción lenta, pues su acción se manifiesta entre los 10, 30 y hasta 50 años, según el grado de salinidad y la especie forestal establecida.

Para los arbustos, de manera general, puede decirse, que tienen raíces iguales a la de los árboles con su mismo efecto pero con la única diferencia en la profundidad de su efecto. Los arbustos nativos de suelos salinos y sódicos aunque poseen dos hileras de raíces, presentan la primera en el horizonte húmico, y la segunda por debajo de éste, a poca profundidad.

Algunas plantas silvestres son capaces de tolerar condiciones extremas e incluso colonizar hábitats altamente degradados. La introducción de estas plantas en áreas salinas y/o sódicas diferentes en cuanto a condiciones edafológicas y climatológicas se refiere, no siempre es posible.

Por otra parte, los conocimientos fisiológicos más recientes han permitido identificar los mecanismos de tolerancia tanto a exceso de NaCl como a ciertos metales pesados, lo que permitirá a los científicos mejorar la tolerancia de ciertas especies de plantas, y aunque están al comienzo de obtener una solución adecuada, el éxito conseguido está todavía lejos de satisfacer la creciente demanda de regeneración de suelos salinos.

La "Biorremediación con plantas detoxificadoras de suelos salinos y contaminados por metales tóxicos" es un sólido e innovador proyecto implantado en España, para hacer frente a los problemas generados por un suelo cada vez más improductivo y un planeta cada vez más insalubre. Busca la más poderosa y ecológica combinación que las plantas naturales y los últimos avances en el campo de la Biología puedan ofrecer hoy al ser humano. El objetivo es buscar la forma más rápida y efectiva de regeneración de suelos salinos y contaminados por metales en completo equilibrio con la naturaleza.

En cuanto a cultivos y sus respectivas rotaciones trabajadas en ese proyecto, se han considerado a los pastos, la alfalfa, los cultivos de abonos verdes, arroz y rotaciones con otros cultivos. Cabe destacar, que el arroz y algunos zacates son los más socorridos como auxiliares de los métodos hidrotécnicos, ya que soportan periodos largos de inundación, lo que permiten se efectúen lavados muy pesados.

### **3.1.3.2 Efecto de la adición de la materia orgánica sobre las propiedades físicas y químicas al suelo.**

El sodio adsorbido por la arcilla y los coloides orgánicos producen dispersión de la arcilla, lo que da por resultado una pérdida de estructura deseable y el desarrollo de un efecto pesado. Estos efectos sobre las propiedades físicas del suelo reducen el desagüe, la aireación y la actividad microbiana. El alto pH origina una reducción en la solubilidad y disponibilidad por las plantas del hierro, el cobre, el manganeso y el zinc. (Tamhane, 1983).

Los suelos sódicos, pueden variar considerablemente en sus propiedades físicas (esto se refiere a su capacidad para producir cosechas, a sus respuestas a las prácticas de manejo y a la aplicación de mejoradores). Aunque no muy bien comprendidas las causas del diferente comportamiento de los suelos sódicos, la experiencia y los pocos datos de que se dispone actualmente indican que el efecto del sodio intercambiable puede ser modificado por la aplicación de materia orgánica y de mejoradores. (Richards, 1977).

La materia orgánica ayuda a compensar los suelos contra cambios químicos rápidos en el pH a causa de la agregación de sal y fertilizantes. Además, los ácidos orgánicos liberados de la materia orgánica en descomposición ayudan a reducir la alcalinidad de los suelos, esto es mediante el intercambio catiónico en el que a menudo se utiliza calcio para sustituir al sodio. De todos los compuestos de calcio, el  $\text{CaSO}_3$  (yeso) se considera el mejor para estos fines. (Tamhane, 1983).

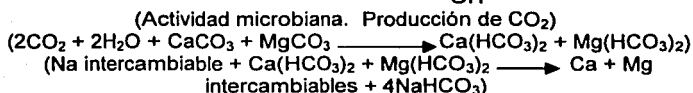
La materia orgánica además de mejorar las propiedades físicas del suelo, es una fuente de elementos nutritivos para las plantas. Existen bases bien fundadas que evidencian que la materia orgánica contrarresta los efectos nocivos del sodio intercambiable en los suelos, la materia orgánica mejora e impide la deterioración de la condición física del suelo por su interacción con los materiales de intercambio catiónico debido a su utilización como material energético para los microorganismos, los cuales inducen la agregación estable de las partículas del suelo y disminuyen indirectamente la densidad aparente de los suelos. (Richards, 1977). En el diagrama núm. 2 se puede observar la transformación de un suelo salino-sódico a uno normal, donde se utiliza un tratamiento orgánico.

### Suelo salino – sódico

(Solución  $\text{Na} > \text{Ca} + \text{Mg}$ ;  $\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$ )  
(Na intercambiable alto. Carbonatos precipitados de Ca y Mg)



Enmienda orgánica (RC(=O)OH)



Condiciones de buen drenaje  
Lixiviación  
(Eliminación de  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  en el agua de drenaje)



**Suelo normal**

FUENTE: PLA, 1997.

Diagrama Núm. 2. Transformación de un suelo salino-sódico a uno normal.

La adición de materia orgánica, se va diferenciar, de acuerdo a su origen en:

- Residuos animales (incluye todos los estiércoles).
- Residuos vegetales, que se divide en:
  - ❖ Incorporación de abonos verdes
  - ❖ Incorporación de residuos de cosecha, tales como: pajas, hojas de árboles, cascarillas de arroz, entre otros.
- Residuos de los ingenios azucareros durante la producción de azúcar (cachaza).

#### 3.1.3.2.1 Aplicación de estiércoles o abonos.

De todos los estiércoles, el comúnmente utilizado como acondicionador de las propiedades físicas y la fertilidad de los suelos, es el estiércol de bovinos y su aplicación constituye una práctica rutinaria en varios países del mundo, incluyendo

a México.

En la recuperación de suelos sódicos, la aplicación del estiércol (aún en forma líquida), se ha revelado como muy buen auxiliar y produce los mejores resultados cuando se utiliza combinado con los métodos químicos; más que cuando se aplican por separado.

El mayor inconveniente que presenta el uso de los estiércoles como método de recuperación, es que se debe aplicar en grandes cantidades para que se manifieste su efecto, además, generalmente solo beneficia a la capa arable, de ahí que se recomienda su uso en combinación con otros métodos, para aprovechar el efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo, y facilitar con ello la eficiencia de otros métodos de recuperación.

### **3.1.3.2.2. Aplicación de abonos verdes.**

Establecido el cultivo, es importante mantener el suelo con un alto porcentaje de humedad durante su desarrollo, para disminuir los efectos de la presión osmótica (de siembra a cosecha), y debe tenerse cuidado con la aplicación de agua, ya que puede ocasionar pérdidas de nutrientes, que deben compensarse mediante aplicaciones de abonos verdes ya que el elemento más expuesto a estas pérdidas es el nitrógeno.

En regiones semiáridas y subhúmedas la irrigación mal conducida lleva a la salinidad de los suelos. Eso puede ser evitado cuando se mantiene la superficie del suelo en estado grumoso, con agregados estables al agua, para garantizar una buena infiltración y evitar una excesiva evaporación. Mantiene la superficie del suelo protegida contra la insolación directa, ya sea por cobertura muerta o por una capa vegetal, se reduce igualmente la evaporación.

Usualmente, la incorporación de abonos verdes se efectúa como medida post-recuperativa o como auxiliar de otros métodos, aunque, en casos excepcionales, han recuperado suelos por sí solos, sin embargo, en estos casos ha dependido del tipo de abono verde y del grado de salinidad del suelo.

Para tal práctica, se utilizan plantas resistentes a la sodicidad, de preferencia plantas nativas, de entre las cuáles la que mejor resultado práctico ha dado, es el "Jantar" o "Daincha" (*Sesbania spp*), debido a su alto contenido de calcio, alta capacidad amortiguadora y su jugo ácido.

El Jantar o Daincha es muy efectivo en reducir la sodicidad y la salinidad, y el fin de su uso es dejar al suelo en estado tal que los cultivos menos resistentes a condiciones de salinidad puedan establecerse. Es de hacer notar que el Daincha es sensible a suelos salinos y sódicos en su etapa de germinación.

En el laboratorio se ha encontrado que una adición del 1 por ciento del peso del



suelo de Sesbiana, incrementó considerablemente el contenido de calcio intercambiable y disminuyó el pH; asimismo, hubo un aumento del 2 a 10 veces la cantidad normal de raíces en el suelo con efecto similar.

Algunos investigadores recomiendan también el uso de Argemone mexicana (chicalote) para recuperar dichos suelos.

### **3.1.3.2.3 Residuos de cosecha.**

Entre los residuos más comunes que se usan con fines de recuperación está, en primer lugar, la caña de azúcar en sus tres variantes: paja, bagazo y cachaza; también las cascarillas de arroz y las pajas de gramíneas en general.

Cuando se utilizan la paja y el bagazo, se recomienda desmenuzarlos y picarlos antes de aplicarlos a la capa arable, se eliminan de la paja los materiales leñosos y se acondicionan con nitrógeno para acelerar la descomposición. El bagazo es la caña molida y contiene aún entre 40 y 50 por ciento de humedad.

Otro material empleado es la cascarilla de arroz, también efectiva para disminuir el pH, grado de sodificación, coeficiente de dispersión y sales solubles. Su aplicación genera un aumento en los rendimientos en cultivos con aplicaciones de 2 por ciento del peso del suelo.

Es importante una rotación de cultivos, donde se alternen: cultivos que soportan un suelo encharcado, o sea, saturado con agua, cultivos que gastan mucho agua, y cultivos que retiran muchas sales, como por ejemplo: arroz – forrajera – algodón o arroz – girasol – forrajera o “canarana” – sorgo – soya.

### **3.1.3.2.4 Residuos de los ingenios azucareros durante la producción de azúcar (cachaza).**

La cachaza está compuesta de una serie de fibras de caña, sacarosa, coloides coagulados, con ceras y albuminoides, fosfatos de cal, arena y tierra. Es un material negro, esponjoso, hidrófilo, amorfo y liviano, con alto porcentaje de materia orgánica y calcio.

La ventaja de estos materiales es que son muy baratos y abundantes en las zonas cañeras, por lo que la desventaja que presenta su utilización es que sólo son aplicables en esas zonas exclusivamente.

### **3.1.4 Recuperación por métodos eléctricos.**

Los métodos eléctricos son los más recientes para la recuperación de suelos con problemas de sales, y aún se hallan en vías de mayor experimentación que

conduzcan a datos más concluyentes sobre las especificaciones de su uso. Estos métodos se basan en la aplicación directa de una corriente eléctrica al suelo, lo que involucran a varios procesos y principios electroquímicos complejos como la electrodiálisis, electrofóresis, electrólisis y electroósmosis, que toman lugar cuando una corriente eléctrica pasa a través de un suelo saturado. Estos procesos favorecen la remoción de cationes intercambiables del suelo.

La electrodiálisis se fundamenta sobre el hecho de que cuando se cargan negativamente las partículas coloidales del suelo, éstas tienden a tener un movimiento direccional, ya que los aniones se mueven hacia el ánodo y los cationes intercambiables hacia el cátodo, lo que amplía las posibilidades de recuperación de suelos sódicos. Pero si se impide la movilidad a las partículas de un bloque de suelo húmedo, el agua y las sales disueltas se mueven hacia el cátodo. Este fenómeno se conoce como electroósmosis. El agua se mueve hacia el cátodo, probablemente porque la fase sólida en el suelo (contacto del sistema de agua) está cargada negativamente. (Tabla Núm. 23)

En la electrólisis el oxígeno se deposita en el ánodo y el hidrógeno queda en la solución del suelo; bajo este fenómeno se obtuvieron los siguientes valores de pH a diferentes tipos de aplicación de corriente:

Tabla Núm. 23. Cambios del pH del extracto acuoso de un suelo *salino no sódico*, bajo electrólisis

<b>Tiempo de aplicación de la corriente (horas)</b>	<b>pH</b>		
	<b>Control</b>	<b>Ánodo</b>	<b>Cátodo</b>
0	9.72	0	0
250	9.72	7.82	10.01
360	9.72	7.56	08.16

FUENTE: Fitz Patrick, 1985.

La electrofóresis es el transporte de las partículas de arcillas altamente dispersas, debido a la aplicación de una corriente eléctrica, de hecho, en los suelos se presentan todos estos fenómenos cuando se aplica una corriente eléctrica. Así, este método origina dos procesos de mejoramiento diferentes, la desalinización y la desodificación.

### 3.1.4.1 Desalinización por la aplicación de corriente eléctrica.

Al paso de la corriente eléctrica, las sales de un suelo saturado que quedan comprendidas entre los electrodos, se remueven hacia el cátodo. La corriente intensifica la disolución de las sales, y la dirección del movimiento de sus iones es hacia los electrodos para acelerar la desalinización.

La distancia entre electrodos y el estudio de la transformación de la fase sólida en ésta zona, es muy importante en la recuperación.

La aplicación de este método para la desalinización quizás no sea la más adecuada y efectiva, pues las condiciones físicas de los suelos salinos y salino-sódicos favorecen el uso de los métodos hidrotécnicos con comprobada efectividad, por lo que se les considera los más adecuados para tales suelos.

#### **3.1.4.2 Desodificación por la aplicación de corriente eléctrica.**

Como todos los métodos de recuperación para los suelos sódicos, el fin de la aplicación de la corriente a estos suelos es básicamente el desplazamiento del sodio por el calcio.

La desodificación se manifiesta por el movimiento y destrucción de la doble capa difusa bajo el efecto de la corriente eléctrica. Es decir, la disociación de los cationes adsorbidos es más elevada que el "potencial zeta".

Mientras que es prácticamente imposible para muchos suelos sódicos recuperarse con el auxilio del lavado, debido a su baja infiltración, es posible recuperar tales suelos con un tratamiento de corriente eléctrica, lavado y drenaje; es más, los mejores resultados se han obtenido en esos suelos imposibles de lavar.

Después de la aplicación de este método de control de suelos salinos, se ha demostrado y se ha observado, que después del lavado aunado con la corriente eléctrica, el contenido relativo de calcio y sulfatos aumentó en la composición cualitativa del suelo.

En cuanto a la agregación, se ha observado que la composición de los micro-agregados cambia por la destrucción de la capa doble difusa, lo cual mejora la condición para el contacto y atracción mutua entre las partículas elementales del suelo lo que propicia que las fuerzas de Van der Waals tomen efecto lo que produce el pegamiento de esas partículas.

Respecto a los cambios de estructura, ésta se mejora substancialmente, formándose fuertes unidades estructurales después del paso de una corriente eléctrica continua en suelos saturados altamente sódicos, siendo posible obtener agregados de una calidad determinada, o sea, del tipo requerido para la agricultura, mejorándose inmediatamente la porosidad de estos suelos. Los resultados del efecto de la corriente eléctrica sobre la porosidad de un suelo salino no sódico, quedarían de la siguiente forma: entre menor sea la distancia del ánodo, mayor será el porcentaje de porosidad, mientras que en el control, la porosidad es mucho menor a la reportada en las distancias.

En Montana, (USA), en breve tiempo fueron recuperados suelos sódicos improductivos durante 19 años, mediante corriente eléctrica (al grado que a los 50

días, el suelo se cubrió con trébol dulce), hasta clasificar al suelo como productivo; en el agua drenada se logró un aumento de alrededor de veinte veces el contenido de sodio, y de 1 500 ppm a 37 000 ppm, se usa para ello corriente continua, y se ubica a los ánodos en el suelo por recuperar, y los cátodos en el fondo del dren, todo ello con un costo por hectárea mucho muy inferior al costo de cualquier otro método.

En la Unión Soviética, en el Valle de Alazansk, se recuperaron suelos sódicos, bajo una corriente constante, en los cuáles la dispersabilidad disminuyó de 79 a 10%, la cantidad de agregados estables al agua aumentó de 0.3 a 70%, y disminuyó el sodio intercambiable, la alcalinidad de la solución del suelo y aumentó su coeficiente de filtración.

Aún se puede considerar prematuro el recomendar los métodos eléctricos para usos prácticos en la agricultura, ya que se requiere de mayor experimentación en campo, pues las condiciones de laboratorio en las que se ha experimentado son diferentes; además, hace falta determinar su costo y su aplicabilidad.

### 3.1.5 Recuperación por métodos químicos.

Los métodos químicos se basan en la adición de sustancias y/o compuestos químicos al suelo llamados mejoradores o correctores, cuyos fines son proveer de calcio en forma soluble a los suelos con problemas de sodio y neutralizar su pH, reaccionar con el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  libre en solución y reemplazar al sodio adsorbido en las partículas de la fracción coloidal. Este propósito puede lograrse mediante la adición de sales de calcio o cuando se movilizan con un ácido o sustancia formadora de ácido, el calcio del suelo, ya que el calcio le imparte al suelo características y propiedades físicas deseables para los cultivos, en contraposición a los impartidos por el sodio.

Tabla Núm. 24. Efecto de la saturación con sodio y calcio sobre las propiedades físicas de la fracción coloidal del suelo.

GRADO DE SATURACIÓN Na(%)	GRADO DE SATURACIÓN Ca(%)	VOLUMEN POR GRAMO DEL MATERIAL DESPUÉS DE LA IMBIBICIÓN POR AGUA( $\text{cm}^3$ )	DISPERSIÓN (%)	MIGRACIÓN ELÉCTRICA (Seg/Vol/cm)
0	100	1.0	2	1.7
5	95	2.0	3	1.9
10	90	2.0	2	1.7
20	80	2.1	13	2.9
30	70	2.3	53	3.0
40	60	3.2	88	3.3
50	50	5.1	97	3.5
75	25	6.5	99	3.5
100	0	7.1	99	3.5

FUENTE: Fitz Patrick, 1985.

Cuando existe un mayor grado de saturación con sodio existe una mayor dispersión en el suelo, que se incrementa exponencialmente; todo lo contrario puede decirse del ion calcio, por lo que éste es utilizado para desplazar al sodio del suelo.

En la actualidad existen varios tipos de mejoradores, al grado que se precisa una diferenciación claramente delimitada conforme a su naturaleza y reacción. Estos se han dividido de la siguiente forma:

1. Sales cálcicas solubles
  - Yeso
  - Cloruro de calcio
2. Ácidos y formadores de ácidos
  - Azufre
  - Ácido sulfúrico
  - Sulfatos de hierro y aluminio
  - Polisulfuro de calcio
  - La pirita
3. Compuestos cálcicos de baja solubilidad
4. Otros tipos de mejoradores o acondicionadores para suelos con problemas de sodio, el más comercial es el **SALTRAD** y que se describe a continuación:

Este producto es un líquido marrón que tiene como agente quelatante ácidos orgánicos con un pH de 4,5 a 5,5 y una densidad de 1,22 gr/ml; se tienen, además, las siguientes riquezas garantizadas (% p/p):

- Oxido de calcio quelatado 6,84
- Azufre (S) 4,80
- Ácidos orgánicos 9,00

Se aplica al suelo en una dosis de 30-75 L/ha, esto está en función del porcentaje de sodio intercambiable. En la aplicación se recomienda mezclar con el agua de riego en goteo; para fraccionar se debe dividir la dosis en 4 o 5 aplicaciones.

SALTRAD es compatible con la mayoría de productos fertilizantes y fitosanitarios, excepto con aquellos de carácter ácido (pH bajo). Se recomienda hacer una pequeña prueba antes de mezclar el producto.

El producto actúa cuando el calcio quelatado con los ácidos orgánicos queda protegido de una fijación anticipada, facilitándose la absorción, los ácidos orgánicos se unen al complejo arcillo-húmico con lo que se incrementa la capacidad de intercambio catiónico del suelo y se reducen los problemas estructurales. Por último, el azufre se combina con el sodio para formar sulfatos muy solubles y que son fácilmente lavables.

### **3.1.5.1 Elección del mejorador.**

Para elegir el mejorador que deberá utilizarse en suelos con problemas de sodicidad es importante que se tomen en consideración los siguientes factores:

- Factor económico.

Se considera que el costo de un mejorador debe ser determinado sobre la base de la cantidad de calcio soluble o yeso que aporta por unidad de peso y no sobre la base del costo comercial del mejorador por unidad de peso; es decir, se debe considerar el costo de un mejorador en función de la pureza y cantidad neta aportada.

Como mejor ilustración, basta decir que para suministrar una tonelada de calcio soluble se necesita aplicar 4.3 ton de yeso al suelo o 2.6 ton de ácido sulfúrico; de ahí que lo que debe compararse sean los costos de los materiales en igualdad de aportaciones.

- Factor tiempo.

En este punto, debe considerarse la rapidez con lo que los diferentes materiales recuperan un suelo, independientemente de su costo comercial y, basándose en ello y al tiempo deseado de recuperación, realizar el balance para elegir el material más económico.

Así, mientras que para suministrar una tonelada de calcio soluble, se requieren de 4.3 ton de yeso, tan sólo se necesitan 0.8 ton de azufre, lo que desde el punto de vista económico se recomendaría el uso de azufre, pero desde el punto de vista del tiempo de recuperación, se preferiría al yeso, pues este actúa al momento de ser solubilizado, mientras que el azufre debe pasar por un proceso de oxidación biológica que requiere mucho mayor tiempo, por lo que la elección aquí se hará basándose en las necesidades del tiempo deseado de recuperación, sacrificando al factor económico.

- Factor suelo.

Respecto a la elección del material mejorador basándose en el suelo, existen dos propiedades del mismo, que definen el uso de determinados mejoradores; estas propiedades son:

- ❖ El valor del pH
- ❖ El contenido de carbonatos alcalino-térreos.

Basándose en estos dos parámetros, se han formado tres grupos de suelos,

definiéndose para cada uno los mejoradores más adecuados, que a continuación se detallan:

El primero, se trata de los suelos que contienen carbonatos alcalino-térreos; los suelos con problemas de sodio pueden recuperarse con cualquiera de las sales cálcicas solubles, ácidos y formadores de ácidos, excepto los compuestos cálcicos de baja solubilidad.

El siguiente grupo trata de los suelos con carbonatos alcalino-térreos y con un pH mayor de 7.5, en el cual la aplicación de ácidos y formadores de ácidos solamente se utilizaría para disminuir el valor del pH del suelo, por lo que se sugiere utilizar preferentemente las sales cálcicas solubles.

Por último, están los suelos sin carbonatos alcalino-térreos y con un pH menor de 7.5, que aunque los suelos sódicos generalmente no se encuentran bajo esas condiciones, algunos suelos salino-sódicos si pudieran ajustarse a este grupo.

Se recomienda preferentemente el uso de sales cálcicas de baja solubilidad y sales cálcicas solubles, como la caliza y el yeso, respectivamente, ya que los ácidos y formadores de ácido, acidificarían innecesariamente más un medio que ya es propicio para las sales propuestas.

- Disponibilidad local del mejorador.

Este factor adquiere importancia sólo cuando el mercado es distante y la transportación al área afectada incrementa el costo total de la recuperación, por lo se tendría que optar por adquirir el mejorador que exista localmente.

Normalmente se ha observado que el  $\text{CaCl}_2$  es mucho más efectivo que el yeso (salvo excepciones, donde ambos resultaron con la misma efectividad) ya que el cloruro de calcio desplaza más sodio que el yeso a igualdad de concentración y tiempo de reacción.

El ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), debido a su rápida reacción, es, en la mayoría de los casos, mejor que el yeso para disminuir y neutralizar la alcalinidad libre, ya que al penetrar descompone los carbonatos de calcio y magnesio para formar sulfatos los cuales en ausencia del carbonato de sodio, desplaza al sodio adsorbido.

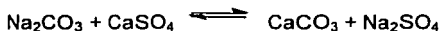
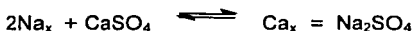
En dichos experimentos se ha observado también que da mejores resultados la combinación de mejoradores (como el yeso y el ácido sulfúrico).

### **3.1.5.2 Acción química del mejorador.**

A continuación se describen las reacciones químicas que se producen en el suelo al aplicar estos mejoradores:

### 3.1.5.2.1 Sulfato de calcio (yeso)

El yeso es un mineral que, en forma pura, contiene aproximadamente 23.2 por ciento de calcio, 18.6 por ciento de azufre y 30.9 por ciento de agua; es el mejorador químico más utilizado, debido a su bajo costo. La aplicación de yeso a un suelo sódico implica las siguientes reacciones:



En esta última reacción, para evitar la reversibilidad, debe lixiviarse el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; la única desventaja que presenta el yeso es que es una sal de baja solubilidad en agua y requiere cantidades considerables de ella para alcanzar efectividad, ya que a temperaturas normales es de aproximadamente 2 g/L, valor que aumenta en presencia de iones sodio y cloro en el agua, y disminuye en presencia de calcio y sulfato.

La cal ( $\text{CaCO}_3$ ) es prácticamente inútil para este propósito debido a su muy baja solubilidad. Solamente bajo ciertas condiciones, la cal ( $\text{CaCO}_3$ ) puede ser el instrumento que en el proceso de reducción del valor de PSI de los suelos sódicos sea efectivo, siempre y cuando esta cal esté presente en el suelo en una forma finamente distribuida, que el lavado se lleve a cabo bajo un cultivo en crecimiento en un ambiente sumergido (arrozales, por ejemplo).

La eficiencia del yeso depende del tamaño de sus partículas. Los mejores resultados se han obtenido con el yeso que pasa por el tamiz de 100 mallas, equivalente a partículas de 2 mm de tamaño.

Después de la aplicación del yeso es conveniente lavar el suelo, para que el mejorador se distribuya en profundidad. Esta práctica es aplicable a todos los mejoradores, excepto al azufre.

### 3.1.5.2.2 Cloruro de calcio.

Debido a su elevada solubilidad (477 gr/l a 20° C), este es un mejorador químico de efectos muy rápidos y de gran eficiencia, sin embargo, su empleo está muy limitado por su elevado costo. En el suelo produce la siguiente reacción:



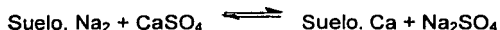
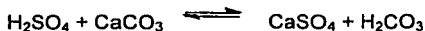
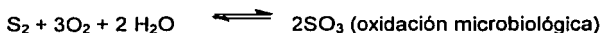
Se puede aplicar extendiéndolo sobre el terreno o con el agua de riego, aunque su



empleo es poco frecuente.

### 3.1.5.2.3 Azufre.

El azufre también es un mejorador químico muy utilizado, debido a su bajo costo. Antes de que éste actúe en el suelo tiene algunas transformaciones, como se indica a continuación:



En la primera fase de su transformación, el azufre es oxidado por la acción microbiana, hasta formar ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ); esta reacción requiere de algún tiempo, ya que depende del grado de finura del azufre (entre más fino, más rápidamente se transforma), la cantidad aplicada, la mezcla con el suelo y los factores que favorecen la actividad microbiana.

El azufre es un mejorador que aumenta la acidez del suelo y se indica especialmente para suelos que contengan carbonatos alcalinotérreos, en los otros casos hace descender demasiado el pH y da lugar a una acidificación excesiva.

Cuando el azufre se oxida y reacciona, forma ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), y sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), menos perjudiciales para las plantas y disminuye la alcalinidad del suelo. Este  $\text{CaSO}_4$  formado, reacciona con el sodio y el  $\text{H}_2\text{CO}_3$  favorece la disolución del  $\text{CaCO}_3$  y acelera la sustitución del sodio intercambiable por el calcio.

Deben considerarse los siguientes aspectos para poder usar el azufre como método de recuperación, primeramente que el contenido de  $\text{CaCO}_3$  en el suelo sea suficiente para que se pueda formar  $\text{CaSO}_4$ , y después, según las reacciones anteriores, se requiere de una oxidación microbiológica para formar el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y dicha reacción puede ocurrir a diferentes velocidades dependiendo de que las condiciones del suelo sean o no favorables para que las bacterias *Thiobacillus thiooxidans* oxiden el azufre. Para una buena efectividad del azufre se requieren, además, que esté finamente pulverizado y se mezcle en el suelo, ya que bajo estas condiciones la reacción se acelera y logra la oxidación con mayor rapidez y efectividad. Se recomienda que la aplicación se lleve en verano cuando las temperaturas son elevadas y favorables; así mismo debe mantenerse el suelo húmedo durante este periodo pues el agua es requerida para formar el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y crear una humedad relativa favorable a los microorganismos. Esta acción es lenta,

y puede transcurrir en pocas semanas e incluso en más de un año.

Este mejorador no debe ser usado dentro del agua de riego, ya que se puede lixiviar antes de empezar a reaccionar con el suelo.

#### 3.1.5.2.4 Ácido Sulfúrico.

El ácido sulfúrico es un mejorador de acción muy rápida, que en presencia de carbonatos alcalinotérreos, sobre todo caliza, da lugar a la reacción siguiente:



En ausencia de carbonatos alcalinotérreos puede provocar una acidez excesiva en el suelo, en estos casos es conveniente estudiar previamente la transformación que va a experimentar el suelo; en presencia de esos carbonatos, el ácido sulfúrico reacciona rápidamente y produce yeso.

Inicialmente su empleo era rechazado por peligroso, pero hoy existen equipos adecuados que lo incorporan al terreno mediante inyección, y se puede aplicar, incluso, a diferentes profundidades; aunque es de un costo más elevado que el del yeso y el azufre, está dentro de lo aceptable y ocupa el tercer lugar de uso en el mundo.

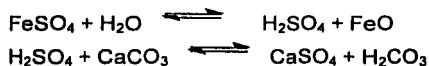
Los principales inconvenientes en el uso del ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) son su costo elevado, la severidad con que ataca las partículas del suelo y que su manejo requiere un operador experimentado y equipo especial de aplicación.

Al igual que en el caso del azufre no se recomienda utilizarlo por medio del riego cuando es por tuberías o canales revestidos, ya que su principal característica es ser altamente corrosivo.

#### 3.1.5.2.5 Sulfatos de hierro y aluminio.

El sulfato ferroso se obtiene como un subproducto de la industria minera; es soluble en agua, sólido y granular, con alto grado de pureza y su reacción se incrementa en suelos húmedos. Estos sulfatos se hidrolizan en el suelo fácilmente y generan ácido sulfúrico.

En el caso del sulfato de hierro ( $\text{Fe SO}_4$ ), las reacciones en presencia de agua y carbonato de calcio son las siguientes:



El sulfato de hierro es un excelente mejorador pero su único gran inconveniente es su elevado costo, por lo que su empleo es poco frecuente.

El sulfato de aluminio posee propiedades semejantes, con la única diferencia de que es más efectivo que el sulfato de hierro para reemplazar al sodio adsorbido.

Las reacciones correspondientes en presencia de agua y carbonato de calcio son:



Los inconvenientes que presenta su utilización como mejorador, son su elevado costo y el efecto tóxico residual del aluminio sobre las plantas.

Desde el punto de vista técnico, el empleo de ambos sulfatos es muy adecuado en presencia de carbonatos alcalinotérreos; en ausencia de estos, pueden ocasionar una acidez excesiva en el suelo.

#### 3.1.5.2.6 Polisulfuro de calcio.

El polisulfuro de calcio es un líquido café de reacción fuertemente alcalina; contiene aproximadamente de 23 a 24% de azufre y 6% de calcio, porque su composición es un tanto indefinida; al reaccionar con el agua, el azufre se precipita en forma elemental, donde todavía deberá oxidarse.

Es recomendable aplicarla con el agua de riego, pues no es corrosivo. Su reacción en el suelo es la siguiente:



#### 3.1.5.2.7 Caliza.

La caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) puede ser un mejorador químico muy barato, sobre todo si se emplean los carbonatos existentes propios del suelo. Kelley y Brown, citados por Pizarro, sugieren dos posibles reacciones en el suelo:





La eficiencia del empleo del carbonato de calcio o caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) depende de su solubilidad, que normalmente es muy baja, pero que aumenta en presencia de  $\text{CO}_2$  y al disminuir el pH; por tanto el empleo de caliza está indicado en suelo de pH inferior a 7.5 y en ausencia de carbonatos alcalinotérreos.

La eficiencia de la caliza como mejorador se eleva por cualquier procedimiento adicional que aumente el contenido de  $\text{CO}_2$  y disminuya el pH; el método más práctico consiste en el empleo de abonos orgánicos o enterrados en verde e intensificar, por medio de labores mecánicas, el proceso de descomposición microbiana de la materia orgánica.

### 3.1.5.2.8 Sulfato de sodio.



### 3.1.5.2.9 Residuos industriales.

Algunos subproductos de la industria pueden actuar como mejoradores, ya sea porque son acidificadores, porque aporten calcio o por ambas cosas a la vez. Entre estos subproductos, el más utilizado en algunas regiones azucareras en España, ha sido la espuma de azucarería, cuya composición se puede observar en la tabla siguiente:

Tabla Núm. 25. Composición de los residuos de azucarería.

Composición	Porcentaje
$\text{CaCO}_3$	35 a 45%
Materia orgánica	5 a 15%
Agua	40 a 45%

FUENTE: Martínez Raya, 1996.

Las espumas aportan carbonatos de calcio en forma de un precipitado muy fino, fácilmente soluble y el contenido de materia orgánica colabora a la mejora química.

Las dosis usuales de espumas de azucarería son de 10 a 12 toneladas por hectárea.

Otros subproductos utilizados para la mejora química de suelos sódicos son las cales residuales de la fabricación industrial de acetileno.

### **3.1.6 Recuperación por métodos químicos - hidrotécnicos (uso de aguas salinas como método para recuperar suelos sódicos).**

Este método se considera una transición entre los métodos químicos y los hidrotécnicos, pues su fundamento y aplicación son una combinación de ambos. Utiliza los principios propios del lavado, así como el abastecimiento de cationes divalentes para el desplazamiento del sodio intercambiable.

Normalmente, para la recuperación de suelos sódicos se utilizan mejoradores químicos acompañados de lavados, lo cual, en ocasiones, lleva a fracasos, o su aplicación resulta económicamente imposible principalmente por la baja permeabilidad de estos suelos, que no permiten los lavados, ni mayor rapidez de reacción de los mejoradores; de ahí que resulte primordial mejorar sus condiciones físicas hasta la medida en que permitan lo anterior.

Es sabido que la velocidad de infiltración a través de los suelos sódicos depende bastante de la concentración de electrolitos del agua; se observa que el uso de aguas de baja concentración disminuye la permeabilidad por efecto de la dispersión de partículas y el sellado de los poros del suelo, de esta manera se hace poco factible su recuperación.

Asimismo, existen numerosas pruebas de que las sales solubles puede modificar las condiciones físicas del suelo por su efecto coagulante. Scofield, Quirk, Fireman y Boadman, encontraron que los electrolitos en el agua de riego elevaban la permeabilidad de los suelos sódicos; estos autores fueron los primeros en sugerir el uso de aguas salinas para recuperarlos.

Dos son, primordialmente, las bases por las cuales funciona éste método:

- Acción de las sales como floculantes, que provocan que las partículas se agrupen en agregados mayores, esto origina mayor porosidad y propicia mayor y más rápida admisión de agua; en el campo permite velocidades de infiltración del orden de 10 cm/día. (Principio de floculación).
- El desplazamiento de los iones de sodio retenidos por los iones de calcio, donde se altera la concentración en el lavado (Principio de valencia de dilución).

Los métodos para recuperar y/o rehabilitar los suelos sódicos generalmente involucra la aplicación de un mejorador químico; la concentración electrolítica resultante en la solución del suelo es aún relativamente baja y los suelos sódicos siguen hinchados y defloculados. A consecuencia de ello la velocidad de infiltración es tan baja que a menudo falla el programa de recuperación.

Como ya se asentó, la velocidad de movimiento del agua en el suelo se incrementa, sea en flujo saturado o insaturado, al incrementarse la concentración del agua aplicada.

En este método de recuperación, así como en su modificación, para mejorar los suelos sódicos actuaron simultáneamente dos factores: el principio de valencia de dilución sobre el intercambio de cationes divalentes del agua y el efecto floculante en las soluciones con alto contenido de sales; este último factor resultó de mayor influencia, pues permite el intercambio y la eliminación de sodio mediante el drenaje.

### **3.1.7 Efecto combinado del establecimiento de vegetación y adiciones de materia orgánica sobre el sodio adsorbido del suelo.**

El efecto sobre el sodio adsorbido se hace patente sólo en presencia de carbonatos de calcio, el cuál reacciona con el bicarbonato de calcio y  $\text{CO}_2$  producidos en la descomposición de la materia orgánica, y la respiración de las raíces de las plantas.

En Fresno California, se recuperaron suelos salinos debido al efecto del  $\text{CO}_2$  producido por el zacate bermuda.

En el desarrollo de este método, se ha asumido que tanto la materia orgánica como los cultivos, muestran sus principales efectos benéficos en la recuperación de los suelos salinos y sódicos, en:

- El mejoramiento de la permeabilidad del suelo.
- La liberación de  $\text{CO}_2$  y la formación de bicarbonatos de calcio durante la respiración y la descomposición.
- Evitar la evaporación excesiva, así como el movimiento capilar.

Este método, con todas sus variantes, raramente se utiliza como método único; es más bien auxiliar de los métodos químicos e hidrotécnicos, y su práctica es requerida o recomendada para efectos de post-recuperación. Su ventaja reside en que favorece la desalinización y desodificación del suelo ya que para ello pueden utilizarse una gama de cultivos y plantas nativas resistentes, lo que hace a esta práctica muy económica.

Lo anterior ha permitido que se recomiende en cualquier trabajo de rehabilitación y/o control de suelos salinos.

### **3.2 Propuesta para la recuperación de los suelos salinos y/o sódicos.**

Para atacar un problema de salinidad y/o sodicidad se recomienda combinar varios métodos de recuperación; para poder determinarlo, es necesario conocer primero el tipo de problema que se quiere resolver, por lo que se recomienda la siguiente metodología:

- Investigar las condiciones climáticas

- Colectar datos de las propiedades y características de los suelos tales como: textura, infiltración y permeabilidad, estado de la afectación salina, distribución cuantitativa de las sales en el perfil, tipo y clase de sales incluyendo su grado de solubilidad mediante análisis químicos.
- Hacer un análisis geomorfológico e hidrológico de fuentes de sales, pendiente, niveles freáticos, su profundidad y mineralización, la calidad del agua disponible y las posibilidades de drenaje y métodos a usar.

Basándose en estos datos puede tomarse una decisión para la recuperación de los suelos, pues suministran los datos suficientes para visualizar los siguientes puntos:

1. Tipo y grado de facilidades de drenaje natural y/o establecimiento de un sistema artificial.
2. Lugares donde el riego es idóneo para permitir la desalinización, salinización y/o sodificación secundaria y anegamiento o lavado.
3. Tipo de cultivo por establecer.
4. Relaciones genéticas, entre el área problema y las áreas vecinas.

Con lo anterior como base, es factible decidirse por cualquiera de los métodos que se especificaron anteriormente y de acuerdo a las necesidades de recuperación del área o suelo problema.

Una vez obtenida la información anterior se procede a:

1. Agrupar zonas de rehabilitación y/o recuperación semejantes. Esto es, zonas de suelos salinos, sódicos o salino-sódicos.
2. Antes de decidir la recuperación general de toda el área se requieren pruebas experimentales en esas zonas representativas, y verificar en ellas los efectos del lavado y/o adición de mejoradores, y observar hasta cuando se obtiene el nivel deseado.
3. Simultáneamente a lo anterior, es recomendable conducir la misma experimentación en el laboratorio, con muestras alteradas de suelo, y hacer las comparaciones pertinentes.
4. Antes de decidir la metodología de recuperación para el problema existente, se recomienda atacar, de manera previa la fuente de origen de la salinidad, ya que de lo contrario sólo se atacarían los efectos y no las causas.

Es importante recalcar que cuando los suelos se tornan salinos se debe de considerar lo siguiente:

- Aumentar al máximo la permeabilidad del suelo, a fin de permitir la percolación del agua por el perfil y con eso, el "lavado" de las sales acumuladas, que anteriormente deben ser transformadas en formas hidrosolubles.
- Bajar la toxicidad de los compuestos minerales, reduciendo su solubilidad.

- Utilizar una rotación de cultivos que incluya plantas con tolerancia a la salinidad y que retiren muchas sales, como algodón, sorgo o trigo sarraceno, y algunos mijos que se deberán alternar con plantas que soporten la inundación del terreno.
- Mantener el suelo siempre cubierto, cuidar que el nivel freático no suba, y proveer regularmente materia orgánica.

Para que los suelos se tornen menos alcalinos y por lo tanto, menos tóxicos, se requiere que el carbonato de sodio se transforme en bicarbonato, de la misma manera los cloruros pueden ser transformados en carbonatos y bicarbonatos, esta transformación ocurre cuando se agrega ácido carbónico al suelo. El ácido carbónico es el resultado de la descomposición de la materia orgánica.

Con yeso ( $\text{CaSO}_4$ ), la desalinización es muy lenta, por lo que para evitar una futura resalinización, se debe cuidar que la superficie del suelo esté siempre cubierta, ya sea con vegetación o con paja.

En anteriores trabajos de investigación, se han determinado que la mejor forma de rehabilitar suelos salinos y salino-sódicos es con la aplicación de mejoradores químicos combinado con lavados; estos trabajos se han realizado dentro del Estado de México, tanto en las zonas lacustres del lago de Texcoco y de Zumpango así como de Santiago Atocan, información que se puede observar en la Tabla Núm. 26



Tabla Núm. 26. Revisión de trabajos realizados en la zona con anterioridad.

NOMBRE	ZONA	CLASIFICACIÓN	TRATAMIENTOS	DETERMINACIONES	RESULTADOS					
Camarillo Gaytán - Téllez López (1985)	Santiago Atocan	Salinidad por falta de drenaje	Método hidrotécnico (lavado de sales)	Densidad aparente y real	El 53.3% de los pozos resultaron normales; el 20% salinos y el 26.7% como salino sódicos.					
				Humedad y/o capacidad de campo						
				Textura						
			Método químico (aplicación de yeso)	Cationes adsorbidos en el complejo de intercambio		No se rebasan los 20 dS/m				
				Capacidad de intercambio catiónico						
				Porcentaje de sodio intercambiable						
Método químico (polisulfuro de calcio)	PH	Se emplearon aguas negras tratadas y no tratadas con aplicación de mejorador químico a principio de la etapa de lavado.								
	Conductividad eléctrica específica									
	Textura									
Campoy Otero (1990)	Zona del extago de Texcoco		Sodicidad y salinidad	Método hidrotécnico (empleo de aguas negras y tratadas y no salinas)	Conductividad eléctrica específica					
					PH					
				Lavado con dosis completa y dosis fraccionada; en diferentes etapas de riego.	Cationes adsorbidos en el complejo de intercambio					
		Capacidad de intercambio catiónico								
		Humedad y/o capacidad de campo								
		Porcentaje de sodio intercambiable								
		Materia orgánica								
		Cloruros, bicarbonatos y sulfatos								
		García Horta (1985)			Proyecto de Riego de la Laguna de Zumpango		Suelos normales (sin problemas de sodio)	Método biológico	PH	Los estudios en la zona muestran suelos normales, que no presentan altos índices de sales ni de sodio.
									Textura	
Capacidad de intercambio catiónico										
Cationes adsorbidos en el complejo de intercambio										
Porcentaje de sodio intercambiable										
Materia orgánica										

Adaptado de García Horta, 1985; Campoy Otero, 1990 y Camarillo G. 1985.

### **3.3 Recomendaciones para la utilización de suelos con problemas de salinidad.**

El manejo del suelo, para la eliminación de las sales, se realiza de distinta manera y con resultados diferentes según que el problema tóxico sean las sales solubles o el sodio en el complejo de cambio (carbonato y bicarbonato sódicos).

En el caso de que sea un problema tóxico por sales solubles, el planteamiento es muy sencillo y su realización práctica también es, en general, relativamente fácil, pero si el problema de toxicidad lo representan las sales alcalinas de sodio el problema es más complejo y los resultados son aún más problemáticos.

En cultivos no muy sensibles, la siembra debe de realizarse de tal manera que se consiga una buena germinación. Para ello la semilla debe colocarse en zonas donde la concentración de sales sea lo más baja posible y disponga de la humedad suficiente. Si el riego se hace por surcos, el lugar recomendable de colocación de la semilla es en la mitad del lomo del surco. Un aumento en la dosis de siembra minimiza el bajo porcentaje de germinación que ocasiona la presencia de sales.

La fertilización se realiza cuidando la selección y localización de los abonos. Se deben aplicar abonos que no eleven la salinidad y faciliten el intercambio iónico desde el punto de vista de su lavado. Existen en la bibliografía, diversas tablas que permiten seleccionar aquellos abonos con menor índice de salinidad y aconsejables para cada caso concreto.

La aplicación de los fertilizantes a través del agua de riego, altera la composición de ésta. Para no incidir negativamente en la presión osmótica deben seleccionarse las clases y cantidades máximas de abono por volumen de agua de riego aplicada. Esta técnica, normalmente se emplea en riegos localizados y como consecuencia actúa con rapidez y directamente sobre el volumen de suelo explorado por las raíces, por lo cual, puede tener consecuencias negativas, o beneficiosas si se utilizan productos que mejoren las condiciones químicas del agua del suelo. Finalmente todos aquellos fertilizantes que mejoran las propiedades físicas del mismo facilitarán el movimiento de agua del perfil. La incorporación de materia orgánica actúa sobre estas propiedades e incrementa su fertilidad.

Para la recuperación de suelos salinos es necesario el lavado de las sales, mediante el cual, estas son transportadas a horizontes más profundos de los explorados por las raíces de las plantas, o son trasladadas a otras zonas, por medio de drenes. Las zonas receptoras no deben ser sensibles a la contaminación que se originará.

### **3.3.1 Cultivos para Suelos Salinos.**

En muchas partes del mundo los suelos se han vuelto tan salobres que los cultivos no pueden sobrevivir y la tierra permanece sin explotar. Una de las formas de recuperar estas tierras para el cultivo consiste en combinar una mejor ordenación de los recursos hídricos y cultivos resistentes a la salinidad. La tecnología nuclear tiene una importante función que desempeñar en el logro de este objetivo.

Muchas veces se ha recurrido al agua para resolver problemas de salinidad. Sin embargo, en tierras de regadío el resultado suele ser una perjudicial concentración de sales en la capa superficial del suelo de donde la mayoría de los cultivos obtienen los nutrientes. La salinidad de los suelos se agudiza en las regiones áridas y semiáridas, donde escasea el agua superficial y la subterránea tiende a ser salina.

La actividad humana es la responsable de las condiciones salinas de unos 77 millones de hectáreas en todo el mundo, de las cuales 45 millones aproximadamente se encuentran en zonas de regadío.

El problema radica en hacer un uso productivo de las tierras afectadas por la salinidad y en el aprovechamiento de las aguas subterráneas salinas. En tal sentido, un proyecto del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) denominado "Utilización sostenible de las tierras salinas", trabaja "adaptando la planta al suelo", como una variante más redituable de la vieja tradición de adaptar el suelo a la planta.

Existen cientos de especies vegetales que son resistentes a la sal, incluidos gramíneas, arbustos y árboles. En lugar de sembrar cultivos vulnerables a la sal, como el trigo, el maíz, el algodón y la caña de azúcar, el proyecto promueve la siembra de especies vegetales resistentes a ella para su posterior uso como fuentes de energía o madera.

En cientos de hectáreas se cultivan acacias, atriplex, eucalipto o gramíneas resistentes a la sal y se usan aguas subterráneas salinas. Estos cultivos se usan como forraje y para la fabricación de papel, y se realizan experimentos a fin de poder utilizar la biomasa procedente de dichos cultivos con fines de conversión. El forraje proveniente de estas tierras no produce efectos nocivos en los animales.

Lo que hay que evitar es el exceso de agua salina, y es allí donde se emplea la tecnología nuclear que, a través de humidímetros neutrónicos, permite vigilar los niveles de humedad del suelo y el movimiento de las aguas salinas para ordenar mejor el riego. Las técnicas nucleares también pueden servir para analizar la composición del agua subterránea, una información que ayuda a evaluar la tasa de recarga.

El empleo de un método biológico para la recuperación de tierras afectadas por la salinidad presenta muchas ventajas. La biomasa vegetal mejora gradualmente la

textura y fertilidad de la tierra. Al cubrir la tierra, la vegetación disminuye la erosión, da sombra y aumenta la materia orgánica y la actividad biológica del suelo.

Ningún país puede darse el lujo de desperdiciar agua ni de abandonar a la sal grandes extensiones de tierra. En tal sentido, las técnicas nucleares pueden ayudar a dar un uso más racional y económicamente conveniente a suelos y aguas salinas.

### **3.3.2 Riego Deficitario.**

Alrededor de las dos terceras partes de toda el agua de río se emplea en la agricultura, y los científicos están estudiando con detenimiento cómo obtener más con menos. Mediante investigaciones apoyadas por el OIEA, se examina una práctica denominada "riego deficitario" que utiliza sondas de neutrones para investigar y evaluar la humedad del suelo y las necesidades de agua de los cultivos. Hasta ahora, se han observado algunos resultados positivos.

En nuestro país, los investigadores descubrieron que los productores de algodón podían alcanzar altos rendimientos cuando se emplea la mitad del agua necesaria en las etapas vegetativa y de floración, y sin recurrir al riego cuando la humedad del suelo es del 90% o superior. En el Brasil, el riego con la mitad del agua requerida en determinados períodos de crecimiento proporcionó mayores rendimientos en cultivos como el frijol y el maíz. En Marruecos, esta técnica se aplicó para elaborar mejores planes de aprovechamiento del agua en el caso de la remolacha azucarera y el trigo.

### **3.4 Medidas post-recuperativas.**

Una vez concluida la primera fase de recuperación o recuperación inicial, debe prevenirse y/o controlarse una salinización y/o sodificación secundaria, para lo cual se recomienda la siguiente metodología general:

- Mejorar los métodos de riego y manejo del suelo, haciéndolo más eficientes.
- Continuar la operación de drenaje y lavado como medida preventiva de una salinización secundaria.
- Observaciones periódicas del nivel freático en cuanto a su profundidad y mineralización.
- Hacer rotaciones de cultivos, desde los más tolerantes, hasta los sensibles a la salinidad.
- Plantar árboles en caminos y canales como una ayuda secundaria.

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS.**

### **4.1 Ubicación de la zona de estudio.**

En la zona Noroeste del Estado de México, se localiza el municipio de Zumpango de Ocampo, a 60 km de distancia de la Ciudad de México y a 120 km de la Ciudad de Toluca; aproximadamente entre las coordenadas: 19° 43'33" y 19° 47'04" de latitud Norte; 98° 57'28" y 99° 11'57" de longitud Oeste del Meridiano de Greenwich, con una altitud de 2550 msnm. La extensión territorial del municipio es de 244.08 km<sup>2</sup>.

El municipio de Zumpango de Ocampo está cubierto en un 50% de superficie plana y algunas mesetas, localizadas entre los siguientes límites geográficos (Figura Núm. 7):

- Al norte con los municipios de Tequixquiac y Hueyoxtla;
- Al sur con los municipios de Jaltenco y Nextlalpan;
- Al este con el municipio de Tecamac en el estado de México y con el municipio de Tizayuca en el Estado de Hidalgo.
- Al oeste con los municipios de Huehuetoca, Coyotepec y Teoloyucan.

Cuenta con pendientes que van del 2% al 5%, principalmente.

Para el cumplimiento de sus funciones políticas y administrativas el municipio de Zumpango de Ocampo está formado por la cabecera municipal y 8 barrios.

#### **4.1.1 Geología.**

El Estado de México está comprendido dentro de dos provincias geológicas, que son: el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur. El municipio de Zumpango de Ocampo está enclavado dentro de la provincia geológica del Eje Neovolcánico, que está caracterizado geológicamente por el predominio de rocas volcánicas cenozoicas que datan del terciario y el cuaternario.

En esta provincia hay algunos afloramientos de rocas triásicas litológicamente clasificadas como filitas y pizarras. Del cretácico, afloran rocas sedimentarias marinas de composición carbonatadas, en Apaxco municipio cercano a Zumpango de Ocampo, éstas son explotadas por la industria de la construcción. Las rocas ígneas extrusivas (andesitas, riolitas y basaltos) del terciario, yacen sobre las rocas mesozoicas, y cubren la mayor parte de ésta provincia.

#### **4.1.2 Climatología.**

El clima que caracteriza a la zona de Zumpango de Ocampo es el templado subhúmedo, que pertenece al grupo de climas templados y al tipo de los subhúmedos, de los cuales es la variante más seca. La clasificación del clima de

ésta zona se determinó basándose en el sistema de Köppen, modificado por Enriqueta García.

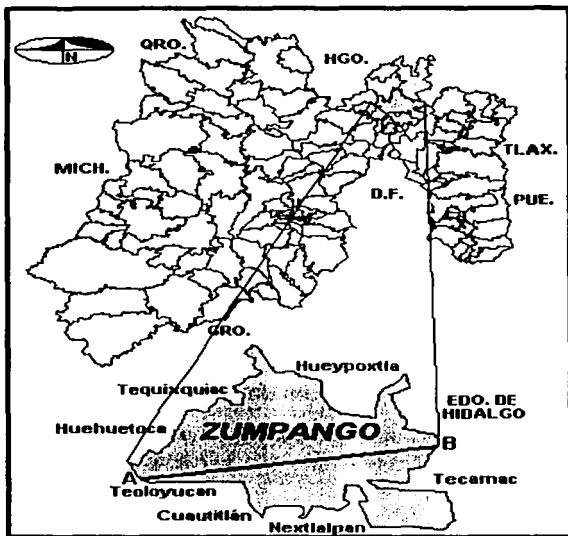


Figura Núm. 7. El territorio de Zumpango, colinda al norte con los municipios de Tequixquiac y Hueyoptlia; al sur con Nextlalpan, Jaltenco, Melchor Ocampo y Cuautitlán; al este con Tecamac y el Estado de Hidalgo; al oeste con Huehuetoca, Coyotepec y Teoloyucan.

De acuerdo a la fórmula climática de Zumpango de Ocampo (Ver Tabla Núm. 27), se tiene:

Cw<sup>n</sup> (Wo) b (1') g que indica que es un clima templado subhúmedo de la variante más seca de los templados, con lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal de 5.6%. El régimen pluvial medio anual es de 745.0 mm y la temperatura media anual es de 15.2° C.

Existe presencia de sequía intraestival y presenta poca oscilación de las temperaturas medias mensuales. La comunidad vegetativa que está asociada a este tipo de clima a los bosques de pino, de encino, mixtos y pastizales.

Tabla Núm. 27. Fórmula climática de la zona de Zumpango de Ocampo

<b>CLAVE</b>	<b>DESIGNACIÓN VALOR</b>	<b>PARÁMETRO</b>	<b>RANGO DESIGNADO</b>
	Grupos de climas	Temperatura media	-3 a 18° C
C	Templados húmedos 11.0° C	Temperatura mes frío	6.5° C
		Temperatura mes cálido	17.5° C
		Temperatura media anual	12 a 18° C
c	Subgrupos de climas templados 15.2° C	Régimen de lluvias: % lluvias en invierno	5 a 10.2%
C(W)	Tipo: templado subhúmedo con lluvias 5.6 % en verano 1.4 mm	Precipitación mes seco	40 mm
c(Wo)	Subtipo: el más seco de los templados, con subhúmedos, con lluvias en verano 9.0	Cociente p.p/t	
W"	Presencia de dos épocas de sequías Sí	Sequía intraestival	Sí
(i')	Poca oscilación de temperatura 6.5° C	Oscilación anual de temperatura	5 a 7° C
g	Marcha de la temperatura tipo Ganges Agosto	Mes más caliente del año	Antes de junio
b	Verano fresco largo	Temperatura media del mes más cálido	17.5° C

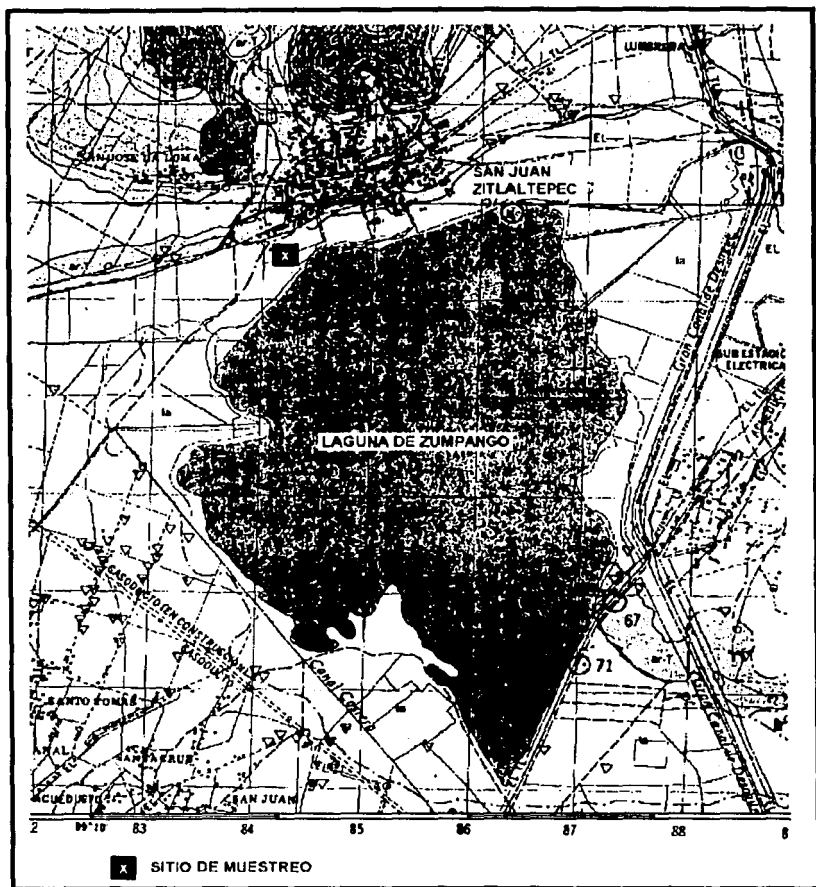


Figura Núm. 8. Ubicación de la zona de estudio y sitio de muestreo.



#### 4.1.2.1 Temperatura.

- Media anual: 15.2° C
- Del mes más cálido: 17.5° C (junio)
- Del mes más frío: 11.0° C (enero)

Oscilación anual de la temperatura media: temperatura media del mes más cálido menos temperatura media del mes más frío =  $17.5 - 11.0 = 6.5^{\circ} \text{C}$

Heladas: Las heladas se presentan en los meses de noviembre a marzo, principalmente.

Ubicación estación climatológica:

Km 47 Gran Canal, Núm. 032.

m.s.n.m.: 2550

coordenadas: 19° 43' 33"

Lat. Norte y 98° 57' 28" Longitud Oeste

Tabla Núm. 28. Datos climatológicos mensuales de Zumpango de Ocampo

<b>MES</b>	<b>Temp. °C</b>	<b>Pp mm</b>
Enero	11.0	19.4
Febrero	13.0	1.4
Marzo	14.8	4.0
Abril	16.8	42.5
Mayo	17.3	72.0
Junio	17.5	117.7
Julio	17.0	126.3
Agosto	17.4	150.4
Septiembre	16.6	113.5
Octubre	15.4	67.8
Noviembre	13.8	20.2
Diciembre	11.7	9.8

FUENTE: García E. 1981.

#### 4.1.2.2 Precipitación.

- Precipitación anual: 745 mm
- Precipitación del mes más lluvioso: 150.4 mm (agosto)
- Precipitación del mes menos lluvioso: 1.4 mm (febrero)

Existe presencia de sequía intraestival en la zona ya que se presentan dos picos que abarcan los meses de mayo, junio, julio y septiembre.

#### **4.1.2.3 Granizo.**

En los meses de mayo a junio tiene lugar fuertes granizadas en el lugar.

#### **4.1.2.4 Vientos**

Los vientos dominantes van de noroeste a suroeste según los datos oficiales del Sistema Estatal de Información (SEI). En cuanto a luminosidad los meses con más días nublados son de mayo a octubre en un porcentaje de un 50% de días nublados lo cual influye en la temperatura.

#### **4.1.3 Hidrología.**

En el municipio en cuanto a disponibilidad de aguas superficiales sólo cuenta con la laguna de Zumpango, rehabilitada recientemente y centro vital del sistema de riego; "Los Insurgentes", constituye el acuífero de mayor importancia, ya que cuenta con una capacidad de 100 millones de metros cúbicos, cuyo abastecimiento es originado por las descargas de la presa de Guadalupe, pero que aún no entra en operación y que beneficiará a 572.41 has en la parte noroeste del municipio principalmente los ejidos de San Juan Zitlaltepec, Cuevas, Bocanegra, y otros.

Zumpango no cuenta con arroyos de caudal permanente pero sí con arroyos de caudal sólo en la época de lluvias que drenan directamente a la presa.

Al poniente del centro de la población se localiza el Gran Canal de desagüe proveniente de la Ciudad de México que, por medio de plantas de bombeo, se utiliza para riego agrícola, sin embargo, su alta contaminación, por la descarga de agentes químicos han propiciado el deterioro de la composición de los suelos contaminándolos.

El municipio está ubicado en una zona con recursos de aguas superficiales muy limitadas y ocasionales, lo que ha originado que una parte del municipio se abastezca principalmente de aguas subterráneas, para llevar a cabo sus actividades agrícolas a través de pozos profundos. El acuífero de la zona recibe aportaciones importantes que provienen del río Pánuco y de las avenidas del río Pachuca.

#### **4.1.4 Uso del suelo.**

El municipio cuenta con un tipo de suelo mixto, propicio para la agricultura de temporal y de riego, el área total de 24,408.39 has de las cuales 18,432.23 has se destinan al uso agrícola. De dicha superficie el 69.41% (12,432.81 has) son de temporal y el 30.59% (5,638.42 has) de riego. En relación con el uso de suelo forestal se cuenta con 49.13 has, ubicadas en el ejido de San Juan Zitlaltepec. En

cuanto al uso del suelo pecuario se tiene una superficie de 2,198.63 has. Para uso urbano se cuenta con 1,629.0 has y para uso industrial de 1.6 has.

En referencia a nuestra área de estudio nos enfocaremos a la agricultura bajo condiciones de riego que representa el 30.59% (5,638.42 has) la cual se localiza en la parte centro y sureste del municipio, comprendiendo los barrios de Santiago, San Lorenzo, San Marcos, San Miguel, San Pedro, Santa María, San Sebastián, San Bartolo Naucapán, principalmente, cuyos ejidos cuentan con suministro de agua por medio de pozos profundos.

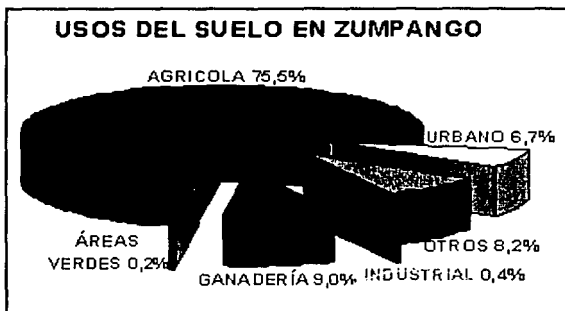


Figura Núm. 9. Uso del suelo en el municipio de Zumpango.

#### 4.1.5 Tipos de suelo.

Las unidades de suelo que predomina en la zona de estudio, según la clasificación de suelos, elaboradas por la FAO - UNESCO (1970), modificada por la Dirección General de Geografía e Informática del INEGI son los siguientes:

1. SOLONCHAK MOLICO (Zm) (en las cercanías de la laguna de Zumpango), con fase sódica, presenta una capa superficial oscura, rica en materia orgánica y fértil. Se caracterizan por presentar un alto contenido de sales en algunas partes del suelo, o en todo él.
2. FEOZEM HÁPLICO (Hp): Suelos con textura migajón arcillo – arenosa. Color pardo – grisáceo en húmedo. Adhesividad nula y plasticidad ligera. Estructura de forma granular, tamaño medio y desarrollo débil. Porosidad moderada. Drenaje interno drenado.
3. GLEYSOL (Gh): Suelo con textura arcillosa. Color gris muy oscuro en húmedo, estructura en forma masiva. Drenaje interno, moderadamente drenado. Suelos con más de 15% de saturación de sodio en alguna porción a menos de 125 cm de profundidad.

4. VERTISOL PÉLICO (Vp): Suelos con textura migajón – arcillosa. Color negro en húmedo. Adhesividad moderada, plasticidad moderada. Estructura de forma de bloques angulares, tamaño fino y desarrollo moderado. Porosidad abundante y constitución cavernosa. Drenaje interno, drenado.
5. REGOSOL EUTRICO (Re): Presentan textura franca. Color pardo oscuro en húmedo. Adhesividad nula y plasticidad ligera. Estructura en forma granular, tamaño fino y desarrollo débil. Drenaje interno, drenado.

#### 4.1.6 Agricultura.

El municipio de Zumpango de Ocampo, es uno de los lugares en donde su agricultura se basa principalmente en los cultivos básicos, granos y en menor proporción, cultivos perennes.

Los cultivos sembrados son: maíz de grano, cebada de grano, trigo de grano, frijol, avena, alfalfa, nopal de tuna y algunas hortalizas en una superficie de 18,432.23 has que representa alrededor del 75.51% de la superficie total de la entidad. De estas hectáreas el 69.41% es de agricultura de temporal y el 30.59% es de riego.

En cuanto a la producción de granos básicos el que destaca por su importancia es el cultivo del maíz, con una superficie sembrada de 6,906.16 has que representan el 37.46% del total del área sembrada de granos básicos que es de 13,540.0 has.

En los últimos años, la producción promedio de maíz fue de 20,121 toneladas anuales, que representa el 1.0% de la producción total del Estado de México que es de 2,000,000 de toneladas anuales (ver tabla núm. 29). El rendimiento promedio en la entidad es de 2.5 ton/ha.

De la misma forma que el cultivo del maíz, los demás básicos reflejan una baja productividad, cuyo problema que enfrentan es la baja calidad, debido al uso en algunos casos, de aguas tratadas, así como las hortalizas debido a una tecnología obsoleta en la cosecha y en el empaclado.

Así mismo existen otros problemas como son: la falta de planeación de cultivos que aprovechen de una mejor manera el recurso agua, sobre todo, en zonas ejidales que cuentan con pozos profundos y que en muchos de los casos por no tener un conocimiento previo de las necesidades del cultivo utilizan grandes volúmenes de agua para cultivos de autoconsumo y forrajeros, que en su mayoría no son redituables, tanto económica como productivamente.

La falta de eficiencia productiva, la poca diversificación de sus actividades económicas y la falta de organización por parte de los productores así como la

mala o nula asistencia técnica, acidez de los suelos agrícolas, insuficiente mecanización, escasez de financiamiento y sistema de comercialización en poder de intermediarios y acaparamientos, son algunos de los problemas a los que se enfrentan en el municipio.

Tabla Núm. 29. Producción agrícola 1994, Zumpango de Ocampo.

PRODUCTO	SUPERFICIE COSECHADA		TOTAL	VOLUMEN PRODUCIDO		TOTAL	Rend. x ton/ha
	Temp.	Riego		Temp.	Riego		
<b>CEREALES</b>							
Cebada	3,310	86	3,596	7,020	172	7,192	2.0
Maíz	3,652	3,254	6,906	5,478	14,643	20,121	2.9
Trigo	1,672	32	1,704	3,347	64	3,347	2.0
<b>LEGUMINOSAS</b>							
Frijol	1,260	72	1,332	756	43	799	600 kg
<b>HORTALIZAS</b>							
Calabacitas	-----	15	15	-----	150	150	10.0
Lechuga	-----	60	60	-----	1,500	1,500	25.0
Zanahoria	-----	10	10	-----	400	400	40.0
Tomate	-----	15	15	-----	180	180	12.0
<b>FORRAJES</b>							
Alfalfa	-----	1,211	1,211	-----	76,293	76,293	63.0
Maíz	-----	532	582	-----	37,240	37,240	70.0
<b>TOTAL</b>	<b>10,094</b>	<b>5,287</b>	<b>15,381</b>	<b>16,601</b>	<b>130,685</b>	<b>147,286</b>	

FUENTE: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1994.

Por otra parte es importante hacer notar, que el riego por medio de aguas superficiales abarca 1,518.0 has abastecidas por aguas negras extraídas mediante plantas de bombeo proveniente del Gran Canal, que incluye los municipios de San Juan Zitlaltepec, Santa María Cuevas, San Miguel Bocanegra y Barrio de San Juan, así como del proyecto de riego "Los Insurgentes" que abastecerá a 572.41 has cuyo suministro proviene de la Laguna de Zumpango, pero que aún no entra en funcionamiento, la cual beneficiará a las localidades de San Juan Zitlaltepec, Bocanegra, Santa María Cuevas, entre otros.

El riego por medio de aguas subterráneas extraídas por pozos profundos abastecen a 1,194.70 ha beneficiado al Barrio de San Sebastián, Barrio de San Lorenzo, San Bartolo Cuautlalpan, Barrio de San Miguel, San Bartolo Naucalpan, Barrio de San Pedro, Barrio Santa María y Barrio de Santiago.

La agricultura de temporal abarca 12,794.0 has en todo el municipio (Ver Tabla Núm. 29) El abastecimiento de agua potable proviene de 8 pozos localizados cada uno de ellos en las 11 principales localidades del lugar. El suministro del líquido así como la cobertura actual de las redes es insuficiente a nivel municipal,

el 5.05% de las viviendas no cuentan con este servicio (equivalente a 581 viviendas) lo que afecta a 3,512 habitantes, las viviendas que cuentan con este servicio son el 94.95% equivalente a 11,494 viviendas.

Por ello el agua como elemento constituye la fuente del desarrollo social, económico y ecológico en la entidad, por su creciente escasez se ha convertido en un tema prioritario de política actual. Es necesario enfocar la política hidráulica a una atención básica para propiciar un uso racional del líquido, por medio de la concientización de la población, así como realizar un servicio eficiente en todas las etapas del proceso hidráulico que son: el acoplo, la distribución, la recolección y el saneamiento, aunque el estado y el municipio tiene la función de ofrecer los servicios a toda la población, los sectores sociales y privados deben ser corresponsables en el uso y la preservación del agua.

#### **4.1.7 Aspectos socioeconómicos.**

La población es una parte principal dentro del desarrollo de México, la cual es sin lugar a dudas la base para planear. México como uno de los países más poblados del mundo tiene un reto que atender a corto, mediano y largo plazo. La población del Estado de México como factor importante en el desarrollo debe atender a corto y mediano plazo, una serie de retos que por años han sido un obstáculo en el desarrollo del estado.

##### **4.1.7.1 Tenencia de la tierra.**

En la actualidad en el municipio la tenencia de la tierra tiene las siguientes variantes jurídicas:

- a) Ejidal: corresponde a los siguientes poblados, (Tabla Núm. 30):
- b) Pequeña propiedad: con 2,441 pequeños propietarios, con dotaciones promedio de 1.67 y 5.36 hectáreas, por ejido y pequeños propietarios respectivamente.
- c) Comunal: No existe en esta localidad
- d) Propiedad privada: Propiamente dicha, definida en las áreas comprendidas en los anteriores, corresponde al 75% del total del municipio. De ahí que el 90% de la propiedad es irregular, es decir, no están inscritas en las Oficinas del Registro Público de la Propiedad, e incluso son omisas para efectos fiscales.

Tabla Núm. 30. Ejidos por comunidad; 1991 y 1993, Zumpango.

<b>NÚM. DE EJIDOS</b>	<b>COMUNIDADES</b>	<b>SUP HAS 1991</b>	<b>SUP HAS 1993</b>	<b>NÚM. DE EJIDATARIOS</b>
1	Zumpango Cerro Nido	257.00	257.50	89
1	S. Bartolo Cuautlalpan	1,673.00	1,330.00	304
1	S. Juan Zitlaltepec	2,247.00	2,025.00	950
1	S. Miguel Bocanegra	200.00	207.50	206
1	S. Miguel y S. Lorenzo	37.00	41.00	37
1	S. Sebastián	94.00	94.00	94
1	Sta. Ma. Cuevas	1,500.00	1,418.00	332
1	S. Bartolo Naucalpan	-----	725.00	61
<b>TOTAL</b>				
8		6,008.00	6,098.00	2,073

FUENTE: Procuraduría Agraria, Delegación Regional, Estado de México. 1991 y 1993.

#### 4.1.7.2 Población económicamente activa en el sector agropecuario.

El municipio de Zumpango de Ocampo ocupa el decimonoveno lugar en población en relación con los 112 municipios del Estado de México.

Tabla Núm. 31. Población ocupada por sector de actividad, 1990. Zumpango de Ocampo.

<b>ACTIVIDAD</b>	<b>POBLACIÓN</b>
Agricultura, ganadería, caza y pesca	2,426
Minería (materiales para construcción)	16
Extracción de petróleo y gas (reparto)	29
Industria manufacturera	4,667
Electricidad y agua	115
Comercio	2,193
Transporte y comunicaciones	965
Servicios financieros	105
Administración pública y defensa	905
Servicios comunales y sociales	1,230
Servicios profesionales y técnicos	219
Servicios de restaurantes y hoteles	302
Servicios personales y mantenimiento	1,706
No especificado	407
<b>TOTAL</b>	<b>18,669</b>

FUENTE: "El estado de México, resultados definitivos; tabulados básicos; tomo III, IX Censo General de Población y Vivienda, 1990" INEGI

Según los censos locales de 1993 realizados por el municipio y localidades del lugar, Zumpango registró una población de 88,467 habitantes, cifra que arroja una

tasa de crecimiento anual promedio de 3.45% respecto de la correspondiente a 1980 que entonces fue de 45,680 habitantes con un aumento de 3.59% anual, en el transcurso de la década anterior, esto revela una leve disminución de la tasa de incremento poblacional, que ha modificado demográficamente el municipio e iniciado una tendencia para su estabilización.

Con la creación y aprovechamiento racional de los usos del suelo para uso industrial, se pretende dar en su oportunidad, empleo en su propio municipio a hombres y mujeres en edad productiva, lo que evita que en lo posible la migración a la Ciudad de México y su área conurbada, que actualmente es extremadamente elevada y que ocasiona y seguirá ocasionando, otra serie de fenómenos sociales y económicos, los cuales inevitablemente repercutirán generando impactos negativos en la población y su territorio así como en el comportamiento de la población económicamente activa.

## 4.2 Trabajo de campo.

### 4.2.1 Muestreo de suelos.

Se siguió un diseño de muestreo no probabilístico llamado también muestreo "por criterio", "selectivo" o "basado en el juicio del investigador".

Este diseño de muestreo se utiliza en zonas heterogéneas o en zonas homogéneas en las que no se desea seguir un plan probabilístico; consiste en tomar la muestra en los lugares que el investigador considera como las más adecuadas. En este plan de muestreo fue elegido por las características de la zona ya que presentaba unas zonas de características heterogéneas, en la figura núm. 10 se esquematizan los puntos para la apertura de los pozos. En este diseño de muestreo no se deben preparar muestras compuestas, ya que los resultados obtenidos a partir del análisis se alterarían (Valencia, 2000).

La extensión del área de estudio es de aproximadamente de 1 hectárea, se recolectaron un total de 12 muestras individuales en 5 pozos de muestreo (Tabla Núm. 32):

Tabla Núm. 32. Número de pozos y profundidad en cm

<b>POZO</b>	<b>PROFUNDIDAD EN CM</b>
1	0 - 30, 30-60
2	0 - 30, 30 - 60, 60 -90
3	0 - 30, 30 60
4	0 - 30, 30 - 60, 60-90
5	0 - 30, 30-60



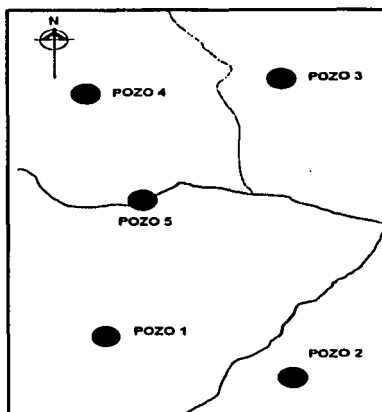


Figura Núm. 10. Ubicación de los pozos de muestreo

#### 4.2.2 Materiales utilizados en la etapa de muestreo.

- Guía de campo
- Regla graduada
- Libreta de campo
- Pala recta, pala curva y pico
- Espátula
- Bolsas
- Etiquetas adheribles
- Masking tape
- Lápiz
- Marcador indeleble
- Tarjetas de cartulina blanca (12.5 x 7.5 cm)

#### 4.3 Trabajo de laboratorio.

##### 4.3.1 Preparación de muestras.

La preparación de las muestras de suelo es importante desde el punto de vista analítico porque permite visualizar los resultados obtenidos de manera representativa, para ello es indispensable iniciar una serie de procedimientos, principalmente de secado, molido, tamizado y mezclado; para su posterior análisis y para tener un mejor almacenamiento de las mismas.

#### **4.3.2 Análisis granulométrico por el método de Bouyoucos (textura)**

El tamaño de las partículas elementales que integran el suelo se determinó por medio de un análisis mecánico realizado por el método de Bouyoucos.

Es importante considerar el análisis de este parámetro, porque en el suelo el tamaño de las partículas se relaciona con la porosidad, estructura y drenaje, así como con la retención y disponibilidad de nutrimentos; además nos sirve para clasificar a los suelos en parámetros como gruesos, medios o finos, siendo esto lo que a fin de cuentas permite dar las recomendaciones agronómicas para su uso, manejo e implementación de las prácticas de mejoramiento y conservación pertinentes.

#### **4.3.3 Densidad aparente, densidad real y porcentaje de espacio poroso.**

La densidad aparente se utiliza para calcular el peso del volumen del suelo, este se toma como base para poder transformar a Kg/ha ya que los resultados analíticos de los nutrimentos se reportan en partes por millón (ppm) y/o miliequivalentes/100 g de suelo (meq/100 g), así como para el cálculo de láminas de riego y dosis de aplicación de fertilizante, abonos o mejoradores químicos (materiales de encalado o enyesado) que se aplicarán a un suelo.

#### **4.3.4 Color**

El color de las muestras de suelo fue determinado en seco y húmedo por el método de comparación con las tablas de Munsell.

Esto nos sirvió para caracterizar los procesos de coloración que se presentaron durante el proceso de formación de los suelos que se están estudiando.

#### **4.3.5 pH potencial y pH real.**

La determinación del pH se hizo por medio del método potenciométrico para poder determinar el nivel de acidez, neutralidad o alcalinidad del suelo. Este parámetro tiene su relevancia principalmente en lo que a disponibilidad de nutrimentos se refiere.

#### **4.3.6 Porcentaje de materia orgánica**

Se determina el porcentaje de materia orgánica de las muestras de suelo, por el método de Walkey y Black.

Es importante considerar las funciones en las que interviene la materia orgánica

en el suelo, ya que es un parámetro que permite hacer desde el punto de vista recuperación, las rehabilitaciones del suelo pertinentes; éstas se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla Núm. 33. Principales funciones de la materia orgánica.

<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	<b>PROPIEDADES QUÍMICAS</b>	<b>PROPIEDADES BIOLÓGICAS</b>
Reduce el impacto de la gota de lluvia.	Suministra los nutrimentos esenciales, nitrógeno, fósforo, azufre, entre otros.	Es hábitat y fuente de energía para los microorganismos del suelo.
Proporciona una estructura al suelo al actuar como cemento de unión entre las partículas (forma parte del complejo húmico-arcilloso).	Actúa como un amortiguador al moderar los cambios de acidez o de alcalinidad.	Al mejorar el drenaje y la estructura beneficia la aireación de los suelos.
Aumenta el porcentaje de espacio poroso en los suelos arenosos.	Inactiva a los elementos químicos y a los compuestos orgánicos tóxicos, añadidos al suelo por contaminación.	Al oscurecerse el suelo en los climas templados promueve su calentamiento y también una mejor germinación y el fácil aprovechamiento del agua.
Incide sobre el balance hídrico del suelo ya que favorece la retención de humedad y mejora la infiltración del agua.	Interviene en la retención de nutrimentos debido a su elevada capacidad de intercambio catiónico.	
Minimiza la erosión eólica.		
Reduce las oscilaciones térmicas.		

FUENTE: Adaptado de Valencia, 2002.

#### 4.3.7 Calcio y magnesio intercambiables

La cantidad de calcio y magnesio presentes en el suelo se determinó por medio del método complejométrico con EDTA, donde los valores obtenidos se transforman de calcio y magnesio en meq/100 g de suelo a Kg/ha.

#### 4.3.8 Sodio y potasio intercambiables.

La concentración de sodio y potasio se determinó por el método de flamometría.

La emisión y la absorción por flama, son técnicas complementarias en las que algunos elementos pueden ser detectados a bajas concentraciones. Sin embargo, las técnicas de absorción están sujetas a menos interferencias. En ambas técnicas las moléculas son disociadas en sus átomos de los cuales solo podemos observar sus líneas espectrales atómicas.

Suponiendo que la cantidad de  $K^+$  es pequeña en comparación con la concentración de  $Na^+$  (lo cual es generalmente el caso en suelos salinos y alcalinos), esta estimación es aceptable para fines de orientación en el cálculo del factor de dilución.

#### 4.3.9 Medida de la sodicidad: PSI y RAS.

La concentración del sodio se puede medir de dos formas, en la solución del suelo o en el complejo de cambio. En el primer caso se denomina razón de adsorción de sodio (RAS) y en el segundo hablamos del porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

La determinación del PSI se determina cuando en un suelo se sospecha que existen problemas de sodicidad o existe una vegetación muy escasa o la presencia de manchas negras en la superficie del suelo es una característica general del terreno; otro indicador de la presencia de sodio en el suelo sería la existencia de plantas que solo crecen en medios alcalinos. Así, el PSI informará cual es la cantidad de sodio que se intercambia entre la disolución acuosa del suelo y el complejo arcillo – húmico del mismo, con respecto a otros cationes.

Para ello, la tabla núm.34, nos ayudará a interpretar los valores del PSI, relacionándolo principalmente con la producción de los cultivos en cada clase de suelo.

Tabla Núm. 34. Interpretación de los valores de porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

<b>CLASE</b>	<b>PSI</b>	<b>PRODUCCIÓN DE LOS CULTIVOS (%)</b>
Normal	0 – 7	100 - 80
Ligeramente sódicos	7 – 15	80 - 60
Medianamente sódicos	15 – 20	60 - 40
Fuertemente sódicos	20 – 30	40 - 20
Extremadamente sódicos	Más de 30	menos de 20

FUENTE: Pizarro, F. (1978) en Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos

#### 4.3.10 Capacidad de intercambio catiónico.

Se determina la capacidad de intercambio catiónico (CIC) por un método de percolación y titulación y se relacionan el valor obtenido de la CIC junto con los valores de sodio, potasio, calcio y magnesio para calcular el porcentaje de saturación de bases (% SB).

El porcentaje de saturación de bases es el porcentaje de sitios de intercambio que están ocupados por las denominadas bases intercambiables: sodio, potasio, calcio y magnesio. Se le considera también un índice de fertilidad del suelo, cuando el catión sodio se encuentra en concentraciones muy bajas.

El % de SB se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ SB} = \frac{\sum \text{Ca}^{+2}, \text{Mg}^{+2}, \text{Na}^+, \text{K}^+}{\text{CIC T}} \times 100$$

#### 4.3.11 Fósforo asimilable por el método de Olsen.

Se determina el fósforo en las muestras de suelos, neutros o alcalinos, por medio del método calorimétrico de Olsen y se relaciona el resultado con su nivel de fertilidad.

En el método de Olsen se utiliza una solución de bicarbonato de sodio  $\text{NaHCO}_3$  0.5 M con un pH casi constante de 8.5 para extraer el fósforo de suelos alcalinos, calcáreos y neutros que contienen fosfatos de calcio, lo que precipitan al calcio en forma de carbonatos.

#### 4.3.12 Porcentaje de carbonatos de calcio en suelos.

La importancia del conocimiento del contenido en carbonato de calcio del suelo se deriva por ser la principal fuente del elemento calcio.

Una alta concentración de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en los suelos, confiere propiedades diferentes de textura en éstos, debido a su acción aglutinante. Cuando la concentración no es tan alta como para variar el valor del pH, puede resultar bueno en los suelos de textura arenosos de baja productividad. La estructura grumosa más estable corresponde a los suelos calizos con materia orgánica.

#### **4.3.13 Conductividad eléctrica por conductimetría, pasta de saturación y porcentaje de saturación.**

La conductividad eléctrica se determinó a partir de la preparación de un extracto de saturación con uno de los métodos más comunes para obtenerlo y que consiste en añadir agua destilada a 25°C a una muestra de suelo hasta conseguir la saturación y extraer el agua de la pasta mediante succión a través de un filtro; de esta forma, la salinidad del suelo se estima basándose en la habilidad de un extracto acuoso para conducir la corriente eléctrica, e independientemente del tipo de iones presentes, parte del gran éxito de estas mediciones, es el comportamiento casi paralelo con la concentración de una solución.

La concentración de sales está definida solo aproximadamente por el valor de la CE específica, principalmente debido a la movilidad iónica de los diferentes iones es cercanamente la misma (excepto para los iones  $H^+$  y  $OH^-$ ). Sin embargo, para propósitos prácticos, una buena estimación es suficiente.

Para suelos muy arcillosos se recomienda hacer extractos con agua en las proporciones 1:1 y 1:5 en lugar de los extractos de saturación se emplea para determinar por separado la suma de cationes y aniones en suelos salinos.

#### 4.4 Resultados.

El manejo de las muestras de los resultados de laboratorio se realizó, en el laboratorio de suelos L-211, de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Los métodos por los cuales se analizó cada parámetro se describieron con anterioridad.

En la tabla núm. 35, se muestran los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio referentes a textura; se puede ver que en las muestras de los cinco pozos la textura se clasifica de franco-arcillosa a arcillosa; esto se corrobora directamente en campo, ya que en el terreno de estudio los suelos presentan una apariencia de suelo agrietado en seco, textura al tacto chiclosa cuando esta húmedo y en algunas zonas donde todavía no se había drenado totalmente el agua habían encharcamientos de agua.

Tabla Núm. 35. Clasificación textural.

<b>POZO</b>	<b>PROF.</b>	<b>%ARC.</b>	<b>%ARN.</b>	<b>%LIM.</b>	<b>CLASIFICACIÓN TEXTURAL</b>
1	0 – 30	27.08	58.56	14.36	FRANCO ARCILLOSO ARENOSO
	30 – 60	52.72	24.92	22.36	ARCILLOSO
2	0 – 30	39.08	38.92	22.00	FRANCO ARCILLOSO A ARCILLOSO
	30 – 60	47.08	30.56	22.36	ARCILLOSO
	60 – 90	63.44	24.20	12.36	ARCILLOSO
3	0 – 30	31.08	44.56	24.36	FRANCO ARCILLOSO
	30 – 60	41.08	36.56	22.36	ARCILLOSO
4	0 – 30	39.44	32.92	27.64	FRANCO ARCILLOSO
	30 – 60	51.80	28.56	19.64	ARCILLOSO
	60 – 90	49.08	32.56	18.36	ARCILLOSO
5	0 – 30	37.44	34.56	28.00	FRANCO ARCILLOSO
	30 – 60	47.44	30.56	22.00	ARCILLOSO

Se puede observar, además, que a partir de la profundidad de 30 cm en adelante la textura es pesada, ya que el porcentaje de arcillas es superior al 45%, en cambio en la capa arable (0 – 30 cm) las características son diferentes, ya que el contenido de arenas y limos es mayor.

En la zona de muestreo se pudo observar que las características superficiales aparentaban que todo el terreno tenía la misma coloración gris oscura, pero al hacer el recorrido se observó que algunas zonas eran más oscuras que otras.

La tabla núm. 36, indica el color de los suelos de la zona de estudio en función de la clave de color de las tablas de Munsell.

Tabla Núm. 36. Clasificación de color.

<b>POZO</b>	<b>PROF.</b>	<b>CLAVE</b>	<b>COLOR SECO</b>	<b>CLAVE</b>	<b>COLOR HUMEDO</b>
1	0 - 30	5 YR 6/1	GRIS CLARO	5 YR 3/1	GRIS MUY OBSCURO
	30 - 60	5 YR 6/1	GRIS CLARO	5 YR 3/1	GRIS MUY OBSCURO
2	0 - 30	5 YR 5/1	GRIS	5YR 4/1	GRIS OBSCURO
	30 - 60	5 YR 5/1	GRIS	5YR 4/1	GRIS OBSCURO
	60 - 90	5 YR 6/1	GRIS CLARO	5YR 3/1	GRIS MUY OBSCURO
3	0 - 30	10 YR 6/1	GRIS CLARO	10 YR 3/1	GRIS MUY OBSCURO
	30 - 60	10 YR 6/1	GRIS CLARO	10YR 3/1	GRIS MUY OBSCURO
4	0 - 30	10 YR 7/1	GRIS CLARO	10YR 4/1	GRIS OBSCURO
	30 - 60	10 YR 6/1	GRIS CLARO	10YR 3/1	GRIS MUY OBSCURO
	60 - 90	10 YR 6/1	GRIS CLARO	10YR 3/1	GRIS MUY OBSCURO
5	0 - 30	10 YR 6/1	GRIS CLARO	10YR 3/1	GRIS MUY OBSCURO
	30 - 60	10 YR 6/1	GRIS CLARO	10YR 3/1	GRIS MUY OBSCURO

Por la coloración que presenta el suelo se puede concluir que el proceso de coloración que se ha producido en la zona es el de melanización originada por el exceso de sodio presente.



Tabla Núm 37. Densidad real, densidad aparente y porcentaje de espacio poroso.

<b>POZO</b>	<b>PROF.</b>	<b>DENSIDAD REAL PROMEDIO</b>	<b>DENSIDAD APARENTE PROMEDIO</b>	<b>%ESPACIO POROSO</b>
1	0 - 30	2.047	1.09	46.70
	30 - 60	2.073	1.11	46.49
2	0 - 30	2.075	1.13	45.67
	30 - 60	2.140	1.11	47.92
	60 - 90	2.052	1.03	49.68
3	0 - 30	2.223	1.12	49.71
	30 - 60	1.995	1.16	41.69
4	0 - 30	2.243	1.13	49.56
	30 - 60	2.186	1.12	48.89
	60 - 90	2.108	1.09	48.38
5	0 - 30	2.016	1.10	45.43
	30 - 60	2.045	1.06	48.37

En la tabla núm. 37 se puede observar que los valores promedio de la densidad real, la aparente y el porcentaje de espacio poroso, nos muestran una densidad real arriba de 2.0 y una densidad aparente promedio de 1.0 y el % E.P. se encuentra alrededor del 50%, lo cual podría representar que no se tendrán problemas de drenaje ni aireación en los suelo, pero la presencia del sodio al dispersar la materia orgánica ocasiona que la estructura no sea muy estable y se produzca taponamiento de poros y un drenaje deficiente.

En la tabla siguiente (núm. 38), se presentan los valores de pH potencia y real del suelo en una relación 1:2.5 y el pH de la pasta de saturación.

Tabla Núm. 38. pH potencial, pH real y pH de la pasta de saturación.

<b>POZO</b>	<b>PROF.</b>	<b>pH pot.</b>	<b>pH real</b>	<b>INTERPRETACIÓN</b>	<b>pH pasta</b>	<b>INTERPRETACIÓN</b>
1	0 - 30	7.2	8.2	Muy ligeramente alcalino a medianamente alcalino	8.0	Medianamente alcalino
	30 - 60	7.4	8.5	Ligeramente alcalino a fuertemente alcalino	8.2	Medianamente alcalino
2	0 - 30	7.5	8.9	Ligeramente alcalino a muy fuertemente alcalino	9.1	Muy fuertemente alcalino
	30 - 60	7.6	9.1	Ligeramente alcalino a muy fuertemente alcalino	9.5	Muy fuertemente alcalino
	60 - 90	7.8	9.3	Medianamente alcalino a muy fuertemente alcalino	9.4	Muy fuertemente alcalino
3	0 - 30	7.6	8.5	Ligeramente alcalino a fuertemente alcalino	8.5	Fuertemente alcalino
	30 - 60	7.5	8.4	Ligeramente alcalino a fuertemente alcalino	8.7	Fuertemente alcalino
4	0 - 30	7.4	8.4	Ligeramente alcalino a fuertemente alcalino	8.5	Fuertemente alcalino
	30 - 60	7.3	8.5	Muy ligeramente alcalino a fuertemente alcalino	8.3	Medianamente alcalino
	60 - 90	7.0	8.7	Neutro a fuertemente alcalino	8.7	Fuertemente alcalino
5	0 - 30	7.0	8.3	Neutro a medianamente alcalino	8.3	Medianamente alcalino
	30 - 60	7.1	8.8	Neutro a muy fuertemente alcalino	8.5	Fuertemente alcalino

En esta tabla se puede observar que el pH real varía en las muestras de 0-30 cm de 8.2 a 9.3, lo que indica que se trata de suelos que van de muy ligeramente alcalinos a muy fuertemente alcalinos. El pH real aumenta en todos los pozos conforme aumenta la profundidad, el pH de la pasta de saturación muestra la misma tendencia. Considerando que un suelo presenta problemas de alcalinidad arriba de un pH de 8.5 se tiene que ésta se agrava a mayores profundidades.

Tabla Núm.39. Porciento de materia orgánica, porciento de nitrógeno total y fósforo asimilable.

POZO	PROF.	% MATERIA ORGÁNICA	INT.	%N tot.	INT.	PO4-3 ppm.	INT.
1	0 - 30	3.22	Muy rico	0.236	Medio rico	31.96	Medianamente pobre
	30 - 60	1.75	Mediano	0.128	Medio pobre	38.93	Mediano
2	0 - 30	1.46	Mediano	0.083	Muy pobre	30.28	Medianamente pobre
	30 - 60	1.68	Rico	0.128	Medio pobre	25.37	Medianamente pobre
	60 - 90	1.56	Mediano	0.114	Medio pobre	28.62	Medianamente pobre
3	0 - 30	2.92	Rico	0.204	Medio rico	19.10	Medianamente pobre
	30 - 60	2.24	Rico	0.175	Medio	30.28	Medianamente pobre
4	0 - 30	2.83	Rico	0.205	Medio rico	30.28	Medianamente pobre
	30 - 60	1.56	Mediano	0.114	Medio pobre	16.08	Medianamente pobre
	60 - 90	1.27	Mediano	0.099	Muy pobre	22.19	Medianamente pobre
5	0 - 30	3.02	Muy rico	0.235	Medio rico	23.77	Medianamente pobre
	30 - 60	2.05	Rico	0.144	Medio pobre	23.77	Medianamente pobre

En la tabla anterior se tiene que los contenidos de materia orgánica varían de valores muy a ricos a medianos mientras que en las concentraciones de nitrógeno y fósforo, se presentan contenidos medios. Con esta información se concluye que el efecto de las sales del suelo al provocar la dispersión de la materia orgánica presente produce que ésta no libere los elementos nutritivos nitrógeno y fósforo de forma eficiente.

Tabla Núm. 40. Capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiables y % de saturación de bases.

POZO	PROF.	CICT	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	% SB	INTERPRETACIÓN
		promedio	meq/100g de suelo					
1	0 - 30	45.74	9.45	4.06	6.24	25.45	98.84	Extremadamente alto
	30 - 60	43.90	10.62	3.40	3.82	26.02	99.91	Extremadamente alto
2	0 - 30	43.25	7.88	0.95	4.09	30.17	99.59	Extremadamente alto
	30 - 60	49.98	6.62	1.45	3.28	38.04	98.81	Extremadamente alto
	60 - 90	66.40	3.75	1.76	5.44	55.09	99.46	Extremadamente alto
3	0 - 30	45.19	7.28	3.53	4.09	30.22	99.85	Extremadamente alto
	30 - 60	46.66	9.10	3.65	3.82	30.05	99.92	Extremadamente alto
4	0 - 30	50.35	9.20	4.16	4.09	32.07	98.33	Extremadamente alto
	30 - 60	49.34	8.73	3.53	1.94	35.12	99.94	Extremadamente alto
	60 - 90	60.04	9.26	3.53	1.67	45.52	99.90	Extremadamente alto
5	0 - 30	50.26	7.40	3.87	4.36	34.43	99.62	Extremadamente alto
	30 - 60	49.52	9.14	3.75	3.55	33.07	99.96	Extremadamente alto

La tabla núm. 40, indica que el porcentaje de saturación de bases es extremadamente alto, o sea, que los lugares de intercambio del suelo se encuentran casi totalmente ocupados por los cationes Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup> intercambiables, predominando principalmente el sodio.

Tabla Núm. 41. CEE (dSm/m) del extracto de la pasta de saturación y de la pasta de saturación.

POZO	PROF.	Ext de pasta sat.	Interpretación Pizarro	Interpretación USDA	Pasta de sat	Interpretación Pizarro	Interpretación USDA
1	0 - 30	2.35	Ligeramente salino	no salino	2.264	Ligeramente salino	no salino
	30 - 60	2.245	Ligeramente salino	no salino	2.192	Ligeramente salino	no salino
2	0 - 30	4.34	Medianamente salino	salino	2.875	Ligeramente salino	no salino
	30 - 60	4.341	Medianamente salino	salino	3.414	Ligeramente salino	no salino
	60 - 90	7.746	Medianamente salino	salino	5.75	Medianamente salino	salino
3	0 - 30	5.943	Medianamente salino	salino	2.516	Ligeramente salino	no salino
	30 - 60	2.695	Ligeramente salino	no salino	2.516	Ligeramente salino	no salino
4	0 - 30	2.29	Ligeramente salino	no salino	2.048	Ligeramente salino	no salino
	30 - 60	4.697	Medianamente salino	salino	2.408	Ligeramente salino	no salino
	60 - 90	2.263	Ligeramente salino	no salino	2.336	Ligeramente salino	no salino
5	0 - 30	2.901	Ligeramente salino	no salino	2.372	Ligeramente salino	no salino
	30 - 60	1.845	Sin salinidad	no salino	2.048	Ligeramente salino	no salino

Como uno de los principales parámetros para clasificar a un suelo como salino es la conductividad eléctrica se consideró conveniente hacer esta determinación utilizando cuatro procedimientos distintos, los resultados se presentan en la tabla 41. encuentran:

- 1.- Extracto de la pasta de saturación.
- 2.- Pasta de saturación.
- 3.- Relación suelo agua 1:2.
- 4.- Suelo húmedo.

Tabla núm. 42. CEe (dSm/m) de la relación suelo agua 1:2 y del suelo húmedo.

POZO	PROF.	Relación suelo agua 1:2	Interpretación Pizarro	Interpretación USDA	Suelo húmedo	Interpretación Pizarro	Interpretación USDA
1	0 - 30	3.998	Ligeramente salino	salino	1.509	Sin salinidad	no salino
	30 - 60	1.551	Ligeramente salino	no salino	2.024	Ligeramente salino	no salino
2	0 - 30	6.656	Medianamente salino	salino	2.264	Ligeramente salino	no salino
	30 - 60	4.028	Medianamente salino	salino	3.067	Ligeramente salino	no salino
	60 - 90	4.928	Medianamente salino	salino	3.267	Ligeramente salino	no salino
3	0 - 30	4.593	Medianamente salino	salino	1.701	Sin salinidad	no salino
	30 - 60	4.563	Medianamente salino	salino	2.084	Ligeramente salino	no salino
4	0 - 30	3.234	Ligeramente salino	no salino	1.785	Sin salinidad	no salino
	30 - 60	4.451	Medianamente salino	salino	2.072	Ligeramente salino	no salino
	60 - 90	4.278	Medianamente salino	salino	1.905	Ligeramente salino	no salino
5	0 - 30	5.261	Medianamente salino	salino	2.216	Ligeramente salino	no salino
	30 - 60	2.684	Ligeramente salino	no salino	2.166	Ligeramente salino	no salino

Como se observa en la tabla, la variación de los resultados de la conductividad eléctrica no tiene una tendencia uniforme pero en general los valores obtenidos por los distintos procedimientos nos sirve para corroborar que si existen problemas de salinidad en la zona aunque éstos son mas graves en el pozo 2. También se consideró conveniente interpretar los resultados utilizando dos fuentes bibliográficas distintas, el USDA y Fernando Pizarro las cuales consideran valores y parámetros distintos para considerar el nivel de salinidad.

Tabla Núm. 43. RAS y PSI

POZO	PROF.	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	% RAS	% PSI
		meq/L					
1	0 - 30	94.50	40.64	170.47	62.44	29.33	29.58
	30 - 60	106.16	34.02	187.46	38.21	31.67	31.25
2	0 - 30	78.75	9.45	484.21	40.91	103.12	60.13
	30 - 60	66.15	14.49	625.80	32.83	139.38	67.14
	60 - 90	37.49	17.64	767.38	54.37	206.71	75.23
3	0 - 30	72.77	35.28	210.11	40.91	29.09	29.40
	30 - 60	91.04	36.54	238.43	38.21	36.91	34.72
4	0 - 30	91.98	41.58	170.47	40.91	19.23	21.32
	30 - 60	87.26	35.28	427.58	19.37	26.13	27.16
	60 - 90	92.61	35.28	221.44	16.68	28.81	29.19
5	0 - 30	74.03	38.75	210.11	43.60	23.88	25.36
	30 - 60	91.35	37.49	342.63	35.52	24.78	26.09

En la tabla núm. 42 se muestran los valores que las muestras del suelo tienen de PSI y RAS.

Se puede notar como los valores de PSI rebasan por mucho el valor límite de 15% (que establece el USDA), ya que los valores se elevan de 21.32% hasta en un 75.23%, por lo que los problemas de sodicidad que están presentes en estos suelos son muy graves.

En cuanto a los valores de RAS, este parámetro se calculó a partir de los resultados experimentales de Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup> y Na<sup>+</sup> y el conocer este valor sirve de referencia para determinar que el nivel de alcalinización al que está sometido el suelo.

#### 4.5 Análisis y discusión de los resultados.

Los suelos de la zona de estudio son pesados, ya que su clasificación textural se encuentra ubicada principalmente entre los arcillosos y los francos arcillosos. El % de espacio poroso oscila entre el 45 y 49%, lo que significa la potencialidad del suelo en cuanto a intercambio de agua y gases en la fase sólida del suelo debe ser buena pero por los valores arrojados en el estudio se puede indicar que por el parámetro de densidad real, aparente y de espacio poroso existe una ligera compactación del terreno, lo que se comprueba ya que durante el muestreo se observaron encharcamientos.

El suelo de la zona de estudio se clasifica como de tipo Solonchak con un horizonte diagnóstico de tipo nátrico.

El color predominante en las muestras nos dice que es un tipo de suelo formado principalmente por material de acarreo (de la laguna y por erosión de las zonas más altas de la zona).

Estos suelos no son salinos y su pH fluctúa de muy fuertemente alcalino a medianamente alcalino, lo cual concuerda con la interpretación del PSI que nos indica elevada sodicidad (hay valores de hasta 75.23% en la profundidad de 60 – 90 cm en el pozo núm. 2)

En los contenidos de bases intercambiables de calcio, magnesio y potasio son extremadamente altos (los valores varían desde 98.33% hasta 99.92%), esto es importante ya que nos indica generalmente el porcentaje de bases que están intercambiadas en el suelo, aunque el problema principal de esto radica en que la cantidad de sodio calculado presente varía de 25.45 a 55.09 meq/100g de suelo, esto nos indica que al encontrarse el sodio, principalmente intercambiado o soluble, el proceso de sodicidad era inminente que ocurriera en ese suelo. Estos suelos, por consiguiente, están considerados por sus características, como suelos altamente sódicos.

El contenido de materia orgánica es de muy rico a mediano. El nitrógeno total es de medio pobre a medio rico; el fósforo asimilable es de medianamente pobre a mediano, por lo que se requerirá añadir estos materiales como fertilizantes o abonos. Por lo tanto por sus contenidos de N, P, K; esta zona puede ser considerada poco fértil (media concentración de nitrógeno y de potasio aunque en relación con el fósforo es medianamente pobre), y puede presentar más problemas de no realizarse los tratamientos adecuados para poder rehabilitar la zona ya que tiene una tendencia a la sodificación, esto es debido a que el agua con la que riegan.

En vista que uno de los parámetros fundamentales para determinar el grado de salinidad de un suelo es la conductividad eléctrica que se presenta en los suelos, se decidió hacer esta determinación a distintos grados de humedad obteniéndose los siguientes resultados: en suelos húmedos (valores, bajos que varían de 1.059



a 3.267 dS/m); en pasta de saturación los valores varían de bajo a alto (valores desde 1.845 a 7.746 dS/m como valor máximo).

Puede precisarse además mayor grado de salinidad y alcalinidad en el pozo 2 el cual esta cerca de un canal de riego a cielo abierto sin recubrimiento, lo cual es comprensible ya que como se indicó el agua con que se riega presenta características inadecuadas ya que parte de este canal se alimenta con el agua de la laguna.

Los resultados (principalmente para analizar la conductividad eléctrica), difieren según el método de análisis, ya que para las muestras analizadas por medio de la pasta de saturación se considera que su CE no es altamente salino, ya que fluctúa de 67 a 39 dS/m, mientras que para el resto de las muestras analizadas por medio de la pasta de saturación es un suelo con una CE medianamente salina ya que supera las 4.0 dS/m (para el USDA, es un suelo altamente salino), principalmente en profundidades de 0 a 30 cm. Esto nos resulta de vital importancia, ya que al momento de requerirse los servicios profesionales de un laboratorio debe especificarse la metodología que va a emplearse y sobre todo la fuente de identificación al momento de tener los resultados, para evitar confusiones posteriores en el momento del análisis y de recomendaciones.

La zona de estudio se encuentra altamente sodificada, esto se ha debido, principalmente, a la génesis del suelo de la zona y a que en el área se riega con agua de la laguna, misma que se alimentan con aguas negras, ya que la mayoría de las industrias incumplen con la obligación que tienen de tratar sus aguas residuales antes de descargarlas a los causes naturales de los ríos, lagos y lagunas, tal como la Ley Federal de Aguas lo pide.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En el presente trabajo se analiza el problema específico del suelo, el impacto que éste problema tiene en el municipio ya que es un municipio en expansión y con bases para un desarrollo industrializado, por lo que es importante considerar que las áreas de cultivo en la zona debe promoverse que adquieran las características físicas y químicas más apropiadas para este fin, para evitar que las zonas agrícolas conviertan su uso de suelo a una actividad diferente, por lo que se debe procurar que las zonas no productivas se adicionen a la producción mediante trabajos de rehabilitación, para un mejor desarrollo agrícola del municipio. Así que se considera que basándose en este trabajo de investigación se puede iniciar la rehabilitación de los suelos estudiados, por lo tanto, de acuerdo a los objetivos planteados se concluye lo siguiente:

- La información bibliográfica que existe actualmente sobre salinidad y sodicidad de suelos es muy extensa, por lo que al compilar, ordenar y sistematizar la información se favorece que esté a disposición de las personas interesadas en el tema y principalmente disponible para los profesionistas que continuaran con este proyecto y así puedan proporcionar dicha información a los productores con los que se tiene establecido continuar con la asesoría.
- La forma de riego que se utiliza en la zona de estudio es principalmente por el método de inundación, la cual no es adecuada, ya que por la calidad del agua, la falta de drenes y el hecho de que no se le aplica a los suelos estudiados ningún mejorador, indica que esta forma de regar ha contribuido a empeorar las condiciones de los suelos, por lo que se recomienda la construcción de drenes de desagüe y la aplicación de enmiendas orgánicas en combinación con las químicas, ya que esta combinación disminuirá el tiempo de la mejora. También se observó que los suelos estudiados se encuentran con problemas de sodificación debido no sólo a su origen sino también al manejo que el hombre ha hecho en la zona, la salinidad puede agravarse si se continúa regando con agua de mala calidad.
- En la zona de estudio el lavado de las sales no es posible por las características de impermeabilidad que la sodicidad le da al suelo, la cual es excesiva, además de que la calidad del agua de riego no es la más recomendable, por lo que es conveniente realizar una aplicación de abonos o se sugiere un cambio del cultivo de maíz, sorgo y frijol, por el de alfalfa y/o de plantas forrajeras.
- Se pueden mejorar las características de los suelos mediante enmiendas orgánicas (aplicación de estiércoles y abonos verdes), así como también por la aplicación de mejoradores químicos del tipo del yeso que contribuiría además de bajar el pH a facilitar el desplazamiento del sodio de los sitios de intercambio; el problema es que además de comprar los mejoradores se

requeriría hacer el cálculo de las cantidades necesarias de los mismos basándonos en los resultados analíticos que en este trabajo de tesis se presentan, así como posteriormente se necesitaría buscar la mejor forma de aplicación y distribución, lo cual sobrepasa los objetivos de esta tesis.

- Para mejorar la calidad del agua del suelo, se propone el tratamiento de las aguas de la laguna mediante una planta tratadora de agua y quizás proponer un estudio acerca de la posibilidad de que un manglar potabilizara el agua de la laguna de forma natural.
- Se considera que a través de un manejo integral que contemple mejorar las características físicas, químicas y biológicas, se puede incrementar la producción de la zona, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos estos suelos son factibles de incrementar su productividad con un manejo integral.
- Conocer los parámetros que se requieren para caracterizar a los suelos salinos y/o sódicos y los parámetros de interpretación servirá a los productores de la zona que hayan recibido la capacitación necesaria para que ellos muestren y envíen sus muestras a algún laboratorio de análisis y puedan seguir llevando a lo largo del tiempo el control de la recuperación de sus suelos, sin requerir necesariamente de la presencia del asesor. Por lo que se deberá continuar con el muestreo de otros sitios para poder hacer una caracterización más detallada y completa sobre las condiciones de salinidad y/o sodicidad de toda la zona.
- Para que se de un verdadero desarrollo agrícola en cualquier región, no solo es importante que prevalezcan las condiciones ambientales favorables, sino que deben imperar también condiciones sociales y económicas que contribuyan e impulsen esta actividad económica, para ello es necesario que participen en el cambio tanto autoridades como también organizaciones sociales y organismos no gubernamentales, por lo que los resultados obtenidos de este trabajo se darán a conocer a los habitantes de la región afectada; ya que es importante que se den a conocer para tener una rehabilitación integral de la zona.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ACEVES A., L. 1981. Los terrenos ensalitrados y los métodos para su recuperación. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 244 pp.
2. AGUIRRE, G., A. 1993. Química de los suelos salinos y sódicos. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 140 pp.
3. ANSORENA M. J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-prensa. Barcelona, España.
4. AUBERT C. s.a. La fertilización en Agricultura Biológica. Serie de Libros y Cuadernos Técnicos. Asociación Vida Sana. España. 15 pp.
5. BECERRA M., A. et.al. 1984. Algunas investigaciones recientes sobre recuperación de suelos en el exlago de Texcoco. XVI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Guadalajara, Jalisco. 15 pp.
6. Ibid. 1984. Evaluación de la aplicación del azufre durante la recuperación de suelos salino-sódicos del exlago de Texcoco. XVI Congreso Nacional de la Sociedad de la Ciencia del Suelo. Guadalajara, Jalisco. 20 pp.
7. BLACK, C.A. 1975. Relaciones suelo – planta (Tomo I). Ed. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. 444 pp.
8. BOLAÑOS, F. 1990. El impacto biológico. Problema ambiental contemporáneo. Colección Postgrado. Coordinación General de Estudios de Postgrado, 1ª edición. Instituto de Biología. UNAM, México. 477 pp.
9. BOUL, S. W. et.al. 1981. Génesis y clasificación de suelos. Ed. Trillas. México, DF. 417 pp.
10. BUCKMAN, H. y Nilec Brady. 1977. Naturaleza y propiedades de los suelos. Ed. Montaner y Simons, S.A. Barcelona, España. 590 pp.
11. CAJUSTE L., J. 1977. Química de suelos (con enfoque agrícola). Ed. Colegio de postgraduados (Chapingo). México. 278 pp.
12. CAMPOY O., I. 1990. Evaluación del efecto interaccional; tipos de agua para lavado, dosis de mejorador químico (polisulfuro de calcio) y tiempos de su aplicación, en la recuperación de suelos salinos – sódicos en la zona del ex – lago de Texcoco. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM.
13. CARABIAS, J. y Leff, E. 1993. Cultura y manejo sustentable de los recursos naturales. Vol. 1. Centro de investigaciones interdisciplinarias en humanidades. Ed. Porrúa. 1ª edición. México, DF. 278 pp.
14. Ibid.. 1993. Cultura y manejo de sustentable de los recursos naturales. Vol. 2. Centro de investigaciones interdisciplinarias en humanidades. Ed. Porrúa. 1ª edición. México, DF. 507 pp.
15. CARBALLAS F., T. 1981. Clave para la clasificación de los suelos. Ed. Sociedad Española de la ciencia del suelo. España. 58 pp.
16. CEPEDA D., J.M. 1991. Química de suelos. Ed. Trillas. México. 167 pp.
17. COMBONI, S. et.al. 1990. Introducción a las técnicas de investigación. Editorial Trillas, UAM. México, DF. 134 pp.
18. CORTIZO R., M.A. 1995. Alternativas de cultivos forrajeros para el aprovechamiento de suelos salinos y/o sódicos en el poblado de Ozumbilla, Municipio de Tecamac, Estado de México. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM.

19. DONAHUE, R. L. et.al. 1981. Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas. Ed. Prentice Hall Internacional. Nueva Jersey, E.U.A. 624 pp.
20. DUCHAUFOR, P. 1984. Edafología (Edafogénesis y clasificación). Ed. Masson. España. 493 pp.
21. FASSBENDER, H W. y E. Bornemisza. 1985. Química de suelos (con énfasis en suelos de América Latina). Ed. IICA. Costa Rica. 420 pp.
22. FITZ PATRICK. 1985. Suelos (Su formación, clasificación y distribución). Ed. C.E.C.S.A. México. 430 pp.
23. FOTH, H. D. 1985. Fundamentos de la ciencia del suelo. Ed. C.E.C.S.A. México. 433 pp.
24. FUENTES Y., J.L. 1989. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Ediciones Mundi-prensa, 3ª edición. Madrid, España. 285 pp.
25. GARCÍA C., N.E. et.al. (editores). 1995. Simposio Universitario de Edafología. Coordinación de Servicios Editoriales, Facultad de Ciencias, UNAM. México, DF. 252 pp.
26. GARCÍA E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). UNAM, 3ª edición. México, DF.
27. GARCÍA F. J. y R. García del Caz. 1982. Edafología y fertilización agrícola. Ed. AEDOS. Barcelona, España. 256 pp.
28. GARCÍA H., S. 1995. Estudio de rehabilitación de suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad dentro del proyecto de riego de la laguna de Zumpango. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM.
29. GARRISON, S. 1989. The Chemistry of soils. Ed. Oxford University Press. E.U.A. 345 pp.
30. GAUCHER, G. 1971. El suelo y sus características agronómicas. Ed. Mundi-prensa. Madrid, España. 639 pp.
31. GAVANDE S. A. 1973. Física de suelos (principios y aplicaciones). Ed. Limusa – Wiley. México. 351 pp.
32. GONZÁLEZ H., P. 1998. Efectos del riego con diferentes calidades de agua, sobre las características físico-químicas del suelo. Tesis de Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM. 138 pp.
33. GROS A. 1986. Abonos. Guía práctica de la fertilización. Ediciones Mundiprensa, 7ª edición. Barcelona, España.
34. HARDY, F. 1970. Suelos tropicales (Pedología tropical con énfasis en América). Ed. Herrero Hnos. México. 334 pp.
35. HURTADO C., G. y J. S. Rojas. 1989. Estudio técnico para el aprovechamiento de las aguas residuales municipales de Zumpango, Estado de México con fines de riego agrícola. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM. 222 pp.
36. IBARRA P., B. 1998. Evaluación de 4 dosis de biofertilizante SIRDO para el cultivo de acelga en el municipio de Tepotzotlán, Estado de México. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM.
37. INEGI. s.a. Síntesis Geográfica, Nomenclator y Anexo Cartográfico del Estado de México.
38. INEGI. 2000. Plan de desarrollo para el estado de Sonora.

39. JACKSON, M.L. 1976. Análisis químicos de suelos. Ediciones Omega, 3ª edición. Barcelona, España.
40. JASSO R., A. 1998. Tópicos selectos de la producción agrícola actual: "El hongo comestible *Pleurotus spp.* cultivado en condiciones semirústicas". Trabajo de Seminario. Ing. Agrícola. FES - Cuautitlán, UNAM, México. 67 pp.
41. JIMÉNEZ H., I. 1997. Determinación de. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM.
42. LABRADOR M., J. s.a. La materia orgánica en los agrosistemas. Ediciones Mundiprensa. Madrid, España. 174 pp.
43. LANDA R., M. 1997. Informe de Servicio Social: "Pueblos Nahuas III". Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM.
44. LEÓN A., R. 1984. Nueva edafología (Regiones tropicales y áreas templadas de México). Ed. Gaceta. México. 340 pp.
45. LUTHIN, J. N. 1983. Drenaje de tierras agrícolas. Ed. Limusa. México 684 pp.
46. MÁRQUEZ R., A. 1998. Alternativas agronómicas para la incorporación de tepates a la producción agrícola: un diseño experimental en condición de manejo campesino, en Santiago Tlalpan, Municipio de Hueyotlipan, Tlaxcala. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM.
47. MARTÍNEZ G., J.E. 2000. Tolerancia a la salinidad durante las etapas de germinación y plántula de dos variedades de maíz resistente a la sequía. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM.
48. MOCTEZUMA H., M. 1987. Uso de mejoradores en la recuperación de suelos salinos y sódicos. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM.
49. MURRAY, B. McBride. 1994. Environmental Chemistry of soils. Ed. Oxford University Press. Oxford E.U.A. 434 pp.
50. ORTIZ V., B. 1990. Edafología. Ed. UACH. Chapingo, México. 331 pp.
51. ORTIZ S., C.A. y Torres G., J. 1981. Clasificación francesa de suelos. Ed. Colegio de postgraduados. México. 141 pp.
52. ORTEGA T., E. 1981. Química de suelos. Ed. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 415 pp.
53. PIZARRO, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Ed. Agrícola Española. Madrid España. 394 pp.
54. PLA SENTÍS. 1997. Evaluación de la influencia de factores naturales y artificiales en la recuperación y prevención de desarrollo de suelos afectados por sales. Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía. Maracay, Venezuela. Revista: Agronomía Tropical 21(5):411-420
55. PORTA, J. et.al. 1994. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ediciones Mundi-prensa. Madrid, España. 807 pp.
56. PRO – TIERRA. 1998. Práctica Elemental de Huerta Orgánica. Ed. Hemisferio Sur. Argentina. 60 pp.
57. REYES C., P. 1980. Diseño de experimentos aplicados. Editorial Trillas, 2ª edición. México, DF.
58. RICHARDS, L. A. 1973. Diagnóstico y Rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Ed. Allison. México. 172.
59. RUSSELL E., J. y Russell E., W. 1968. Las Condiciones del suelo y el crecimiento en las plantas. Ed. Aguilar. 9a. España. 801 pp.

60. SEP. 2000. Suelos y fertilización. Manuales para educación agropecuaria: área: suelos y agua 34. Editorial Trillas, 2ª edición. México, D.F. 80 pp.
61. SHAINBERG, I. y J. Shalhevet. 1984. Soils Salinity under Irrigation. Ed. Springer-Verlag, Alemania. 349 pp.
62. TÉLLEZ L., J.L. y Gaytán C., M.A. 1985. Determinación del tipo de suelo y formulación de un programa para la rehabilitación de suelos con problemas de salinidad en la unidad de riego "Santiago Atocan" del municipio de Santa Ana Nextlalpan en el estado de México. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM. 139 pp.
63. THOMPSON L., M. y F. R Troek. 1980. Los suelos y su fertilidad. Ed. Reverté. Barcelona, España. 649 pp.
64. TORRES C., R. 1996. Fertilidad de suelos. Ingeniería Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM. 184 pp.
65. U.S. Salinity Laboratory. 1982. Suelos salinos y sódicos. Ed. Limusa. México. 172 pp.
66. VALENCIA I., C.E. y Hernández B., A. 1998. Manual de prácticas para la caracterización física y química de las muestras de suelo y composta (material de apoyo para el plan de estudios actualizado del CCH. Laboratorio de Investigación de Suelos (L-211), FES – Cuautitlán / Plantel Azcapotzalco, UNAM. México. 108 pp.
67. VALENCIA I., C.E. Y Hernández B., A. 2002. Muestreo de suelos, preparación de muestras y guía de campo. Coordinación de Extensión Universitaria FES – Cuautitlán, UNAM. C. Izcalli, México. 134 pp.
68. VÁZQUEZ A., E. 1984. Evaluación de las reservas de sales en los suelos salinos. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM. 186 pp.
69. WILD, A. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas, según Russell. Ediciones Mundiprensa, 11ª edición. Madrid, España. 1200 pp.
70. YEPEZ C., J. 1997. Técnicas de acondicionamiento de terreno y plantación de árboles para la forestación extensiva en suelos salino-sódicos del exlago de Texcoco. Tesis Ingeniero Agrícola, FES – Cuautitlán, UNAM. 64 pp.