



COMISION NACIONAL
DEL AGUA

Anexo Técnico

Estudio general de salinidad analizada



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA



**COMISION NACIONAL
DEL AGUA**

**Anexo Técnico
Estudio general de salinidad
analizada**



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

**Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje
Subcoordinación de Uso Eficiente del Agua
M.C. Leonardo Pulido Madrigal
Octubre, 1994**

DIRECTORIO DE LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Director General

Dr. Fernando J. González Villarreal

Subdirector General de Infraestructura Hidroagrícola

Ing. Manuel Contijoch Escontria

Gerente de Distritos de Riego

Dr. José Luis Trava Manzanilla

Subgerente de Riego y Drenaje

Ing. Carlos Barocio Fregoso

DIRECTORIO DEL INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Presidente

Dr. Fernando J. González Villarreal

Vocal Ejecutivo

Dr. Álvaro A. Aldama Rodríguez

Coordinador de Tecnología de Riego y Drenaje

Dr. Luis Rendón Pimentel

Subcoordinador de Uso Eficiente del Agua de Riego

M.C. Efrén Peña Peña

REVISIÓN DE LA PRIMERA EDICIÓN

Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje

Dr. Carlos Rodríguez Zavaleta

Subgerencia de Riego y Drenaje

M.C. Alfredo Díaz Magaña

SE AGRADECE EL APOYO DE:

Ing. Xochitl Cisneros Estrada
Ing. Nessi Jezreel Rivera Ulloa
Téc. Bulmaro Espinoza Colín

Clasif. 5595

1981

1994

C.B. 0657

Proced. _____

Fecha 30.08.18

Título

Anexo Técnico

Estudio general de salinidad analizada

Diseño y Producción

Subcoordinación de Editorial y Gráfica, IMTA

© Comisión Nacional del Agua

© Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1994

Reservados todos los derechos

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Morelos, C.P. 62550

Tel.: (73) 19-40-00 ext. 131

Fax: (73) 19-39-46

Hecho en México

Made in Mexico

INDICE

INTRODUCCION.....	1
1 CARACTERIZACION DE SUELOS SALINOS, SALINO-SODICOS Y SODICOS.	3
1.1 Generalidades.....	3
1.2 Ubicación de sitios de muestreo.....	4
1.2.1 Ubicación de sitios de muestreo mediante el plano de salinidad aparente.....	5
1.2.2 Elección de sitios de muestreo.....	6
1.3 Equipo para el muestreo de suelos.....	9
1.4 Criterios para la recolección de muestras.....	9
1.4.1 Epoca y densidad de muestreo.....	9
1.4.2 Manejo de muestras.....	12
1.4.2.1 Toma de la muestra.....	12
1.4.2.2 Cantidad de muestra.....	13
1.4.2.3 Control y transporte de muestra.....	13
1.5 Cuantificación en estudios de salinidad analizada.....	13
1.5.1 Análisis de laboratorio.....	15
1.5.2 Presentación de resultados.....	15
1.6 Criterios de clasificación de suelos ensalitrados y su interpretación.....	21
1.6.1 Criterios de clasificación.....	21
1.6.2 Representación en planos.....	24
1.7 Diagnóstico del ensalitramiento de suelos.....	28
2 MANEJO DEL AGUA, SUELO Y PLANTA PARA LA PREVENCION DEL ENSALITRAMIENTO DE SUELOS	31
2.1 Generalidades.....	31
2.2 Riego de conservación y sistemas de cultivos.....	31
2.3 Preparación del suelo y labores de cultivo.....	32
2.4 Método de riego.....	37
2.4.1 Manejo del agua de riego.....	41
2.4.2 Lámina de sobrieriego.....	42
2.5 Caracterización del agua de riego.....	47
2.6 Cultivos tolerantes y su manejo.....	48
3 RECUPERACION DE SUELOS CON PROBLEMAS DE ENSALITRAMIENTO.....	55
3.1 Generalidades.....	55
3.2 Recuperación por métodos físicos.....	56
3.2.1 Suelos salinos.....	56
3.2.2 Suelos salino-sódicos.....	56
3.2.3 Suelos sódicos.....	57
3.3 Recuperación por métodos químicos.....	58
3.3.1 Suelos salino-sódicos.....	59
3.3.1.1 Características y propiedades de los mejoradores.....	60
3.3.1.2 Cantidad de mejorador por aplicar.....	63
3.3.1.3 Forma de aplicación del mejorador.....	63
3.3.1.4 Volumen de agua necesario para disolver el mejorador.....	64
3.3.1.5 Costo por hectárea.....	66
3.3.2 Suelos sódicos.....	67

3.4	<i>Recuperación por métodos biológicos</i>	69
3.5	<i>Recuperación por métodos hidrotécnicos</i>	71
3.5.1	Suelos salinos.....	71
3.5.1.1	Estimación de la lámina total de lavado para suelos salinos.....	72
3.5.2	Suelos salino-sódicos.....	75
3.6	<i>Monitoreo de los suelos en proceso de recuperación</i>	76
BIBLIOGRAFIA.....		83
ANEXOS.....		87
1	Glosario de términos.....	87
2	Planos.....	91

INDICE DE CUADROS

1	Densidad de muestreo de suelos.....	13
2	Datos que se deben obtener durante el muestreo de suelos para su análisis en el laboratorio.....	14
3	Parámetros para interpretar valores de CIC.....	21
4	Resultados del análisis de laboratorio para elaborar los planos de ISOCE e ISOPSI.....	27
5	Grupos de salinidad para formar el plano de salinidad analizada.....	28
6	Salinidad del extracto de saturación que reduciría el 50 % de la germinación.....	34
7	Efecto relativo de los materiales fertilizantes sobre la solución del suelo.....	38
8	Tolerancia relativa de algunos cultivos a la salinidad del agua aplicada por aspersión.....	39
9	Tolerancia a la salinidad de cultivos seleccionados en relación con su rendimiento potencial y salinidad del agua de riego.....	43
10	Agrupación de cultivos por su tolerancia relativa a sales...	50
11	Tolerancia relativa a la salinidad de algunos cultivos.....	50
12	Solubilidad del carbonato de calcio a diferentes valores del pH.....	60
13	Contenido de me/ton de mejoradores.....	65
14	Valores del peso equivalente de los principales mejoradores Coeficientes de corrección por eficiencia de intercambio....	67
15	Dosis de mejorador que resulta de aplicar los coeficientes de corrección.....	68
16	Valores de alfa para diferentes contenidos de cloruros y texturas de suelo.....	73
17	Láminas de riego recomendadas por aplicación al utilizar la fórmula de Volobuyev.....	73
18	Tolerancia relativa de algunos cultivos al sodio intercambiable.....	79

INDICE DE LAMINAS

1	Métodos para elegir los sitios de muestreo.....	8
2	Ejemplo de ubicación de puntos de muestreo.....	10
3	Toma de muestras de suelo para análisis en el laboratorio...	11
4	Nomograma para determinar el valor de la RAS y para estimar el valor del PSI.....	17
5	Equipo portátil para medir la CE en campo.....	18
6	Clasificación de suelos por contenido de sales.....	22
7	El riego y la acumulación de sales en camellones planos.....	36
8	Control de salinidad por camellones inclinados.....	36
9	Patrón de acumulación de sales para varios sistemas de riego.....	40
10	Delimitación de la tolerancia relativa a la salinidad de los cultivos.....	49
11	Control químico entre los lavados de suelos salinos y salino-sódicos.....	78

INDICE DE PLANOS

1	Plano de salinidad manifiesta o aparente.....	7
2	Plano de ISOCE 0 - 30 cm.....	25
3	Plano de ISOPSI 0 - 30 cm.....	26
4	Plano de clasificación por salinidad y porcentaje de sodio....	29

INTRODUCCION

En México, con el desarrollo de la irrigación, y aún cuando generalmente se cuenta con aguas de buena calidad, se ha presentado el problema de la salinidad de los suelos que se manejan bajo condiciones de riego. Esto se debe, en gran medida, al mal manejo que se ha hecho del agua de riego, del suelo y de los cultivos. La superficie con problemas de salinidad de suelo en diferentes niveles se estima en alrededor de 1.8 - 2.2 millones de hectáreas. El problema va desde una reducción en los rendimientos de los cultivos, hasta el abandono de los terrenos, por improductivos.

Para atender los problemas de salinidad de los suelos, en las últimas tres décadas se han realizado experiencias en México, particularmente en la región noroeste sobre la aplicación de metodologías para recuperar suelos con sales, así como prevenir el ensalitramiento de los terrenos en producción.

Dado que en alguna medida se ha estudiado el problema de salinidad en los Distritos de Riego del país, buena parte de la información que en este anexo se presenta, ha sido generada en México, en particular en la región noroeste.

El ensalitramiento de los suelos bajo riego es un problema creciente. En 1976 un 16.8 % de los Distritos de Riego (443,985 ha) presentaban algún grado de afectación; actualmente la superficie irrigada es mayor que en 1976 y el porcentaje de afectación es de alrededor de un 30 %.

Por lo anterior la elaboración de este documento se justifica por la importancia que tiene el problema de la salinidad en la República Mexicana y la necesidad urgente de atenderlo sistemáticamente, y por requerirse de un instrumento que unifique criterios y técnicas para resolver este problema.

El objetivo general del anexo técnico es elaborar un documento que contenga los procedimientos para realizar estudios de salinidad analizada, para la prevención, el manejo y la recuperación de suelos con problemas de salinidad y sodicidad.

Los objetivos específicos son:

- Dar a conocer al personal técnico la forma correcta de obtener muestras de suelo e interpretar resultados de laboratorio que permitan efectuar planos de isosalinidad para establecer los programas y prácticas que prevengan, manejen y recuperen los suelos en áreas bajo riego.

- Proporcionar a los técnicos de campo una herramienta de consulta que les permita dar apoyo a los productores en la prevención, manejo y recuperación de sus terrenos.

- Mediante la aplicación de un criterio de factibilidad técnica y económica, rehabilitar áreas afectadas por salinidad para poder incorporarlas al cultivo.

1 CARACTERIZACION DE SUELOS SALINOS, SALINO-SODICOS Y SODICOS

En este capítulo se trata del muestreo de suelos para salinidad, análisis en el laboratorio, criterios de clasificación de suelos y diagnóstico del ensalitramiento.

1.1 Generalidades

La caracterización de suelos es el procedimiento a seguir para la obtención de información que permitirá realizar planos de isosalinidad, con lo que se estará en posibilidad de obtener un diagnóstico de ensalitramiento de los suelos.

El procedimiento consistirá de varios pasos, como son: ubicación de sitios de muestreo; época, intensidad y profundidad de muestreo; toma de muestra, cantidad y su control para análisis en el laboratorio y la representación en planos de las condiciones de salinidad.

Para realizar este trabajo es necesario considerar lo siguiente:

- Existe un problema de salinidad cuando las sales se acumulan en la zona radical a una concentración tal que ocasionan pérdidas en la producción. Estas sales provienen por lo general de las sales contenidas en las aguas de riego o en las aguas de un manto freático alto. El rendimiento de los cultivos disminuye cuando el contenido de sales en la solución del suelo es tal que no permite que los cultivos extraigan suficiente agua de la zona radical, provocando así un estado de escasez de agua en las plantas por un tiempo significativo.

Si la extracción de agua que hacen las raíces se reduce mucho, las plantas disminuyen su crecimiento y llegan a presentar síntomas similares a los provocados por una sequía, tales como marchitamiento o coloración verdeazulada oscura y, a veces hojas cerosas y de mayor espesor.

- En forma natural todos los suelos agrícolas contienen sales, condición que guardan también las aguas. Algunas sales son utilizadas por las plantas como nutrimentos, aún cuando su uso sea selectivo y preferente. Sin embargo, pueden dañar a plantas y animales, cuando su contenido y forma en que se encuentran excedan de ciertos límites. Estos daños llegan a manifestarse tanto en el desarrollo de las plantas como en sus rendimientos económicos.

- Las sales en el suelo se encuentran en diferentes formas: como compuestos y como iones que son positivos y negativos. Los compuestos más comunes y abundantes son: cloruro de sodio, cloruro de magnesio, sulfato de sodio y sulfato de magnesio, entre otros. Los iones negativos o aniones más comunes son: cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, nitratos y silicatos. Los iones positivos

o cationes más comunes son: calcio, magnesio, sodio, potasio, fierro y boro. De éstos los más abundantes son el calcio, el magnesio y el sodio. Los aniones más abundantes son los cloruros y sulfatos, existiendo en menor cantidad los carbonatos.

- La fuente original de donde provienen las sales del suelo y del agua es de los minerales que se encuentran formando las rocas que constituyen la corteza terrestre.

La formación de suelos con altos contenidos de sales tienen dos orígenes: uno natural y otro inducido. En el primer caso se encuentran los suelos ensalitrados por su cercanía con las costas, por fenómenos meteorológicos como los vientos y por intrusión salina -aunque también esta puede ser artificial-, entre otros.

En el segundo caso su origen obedece al inadecuado manejo que el hombre hace del suelo y del agua en la agricultura bajo riego.

- Incuestionablemente la fuente más común que transporta sales son las aguas superficiales y subterráneas, y su concentración dependerá de las que ya existen en el suelo y en los materiales geológicos que han estado en contacto con ellas.

- Las acumulaciones de sales en la zona radical pueden ser producto de las aguas de riego o de las aguas freáticas. Estas acumulaciones se presentan donde las filtraciones de canales, presas, ríos y aguas de sobrierriegos tienden a elevar el nivel freático acercándolo a la superficie; lo que aumenta la evaporación del agua freática, favorece la capilaridad, su transporte a la superficie, y la acumulación de sales en las primeras capas del suelo, donde está la zona radical.

- El proceso de salinización de un suelo está condicionado por: uso de aguas de mala calidad; mal drenaje; aguas freáticas superficiales y salinas; clima y topografía.

- Una vez que las sales se han acumulado en el suelo presentan gran variabilidad tanto en el tiempo como en el espacio. Las variaciones en el tiempo son consecuencia principalmente de los diferentes procesos que están ocurriendo, como la evapotranspiración, salinización, lavado del suelo, consumo y acumulación de nutrientes. Las variaciones en el espacio, principalmente en la superficie, se deben a heterogeneidad de los suelos, del microrelieve, de la aplicación y consumo de agua y de la cercanía de drenes y canales.

1.2 Ubicación de sitios de muestreo

La ubicación de los sitios de muestreo consistirá en definir en dónde se fijarán los puntos para tomar muestras de suelo para su posterior análisis en el laboratorio.

Los puntos de muestreo se podrán ubicar sobre planos catastrales del Distrito de Riego o en mapas de suelos de los que edita el INEGI. Las cartas del INEGI se publican a escala 1:50 000 mismas que presentan las áreas con presencia de sales hasta una profundidad de 125 cm. En esta carta se indica si los suelos son ligera, moderada o fuertemente salinos, o si son salino sódicos. Con esta información se facilitará la obtención de puntos de muestreo. Los estudios agrológicos que se hayan efectuado con anterioridad en los Distritos de Riego proporcionarán información sobre salinidad.

Existen varios procedimientos para evaluar las áreas afectadas por sales, el más apegado a la realidad es el formado con los mosaicos fotoaéreos, donde la intensidad del área dañada con distintos grados se delinea en un plano de la zona para su planimetría.

También se pueden utilizar diapositivas a color tomadas desde avionetas para localizar las zonas afectadas. Estas se señalan en un plano catastral, mismo que deberá tener referencias tales como: caminos, canales, drenes, estructuras principales.

En la ubicación de los sitios de muestreo debe de considerarse las condiciones que presenta la vegetación, ya que el tipo de plantas y el desarrollo que presentan, son un indicador de la presencia y magnitud de las sales en el suelo. Asimismo los manchones, sin plantas dentro de un área cultivada, pueden ser un indicador de la presencia de sales o sodio.

Dado que en los suelos las sales se presentan en manchones, esto es, en forma heterogénea: horizontal o vertical, en aquellas áreas con evidencias de sales, el muestreo será más intenso que en el resto del terreno a muestrear.

1.2.1 Ubicación de sitios de muestreo mediante el plano de salinidad aparente

El punto de partida es utilizar el plano de salinidad aparente, mismo que existe en varios Distritos de Riego. En caso de que este plano no exista se indicará como hacerlo.

La formación del plano de salinidad aparente tiene por objeto conocer en forma general el problema de la salinidad de la zona por estudiar, la localización y la magnitud de las áreas dañadas. No interviene ningún aspecto de carácter técnico, ya sea químico o edafológico en el levantamiento. La separación de las áreas con problemas de sales se efectúa por estimación visual, tanto de la concentración salina como de los linderos que la delimitan.

El conocimiento que tiene del área el personal del Distrito de Riego, previo adiestramiento, puede ser muy útil para elaborar el plano de salinidad aparente

En el plano que resulte de éste trabajo quedarán clasificados los terrenos en cinco grupos diferentes, de acuerdo con la intensidad aparente o manifiesta de afectación en la parte superficial del suelo:

Primera clase: suelos sin afectación salina; su superficie se presenta sin ningún afloramiento salino.

Segunda clase: suelos ligeramente afectados; sus superficies presentan manchones que cubren hasta el 20% del área total.

Tercera clase: suelos medianamente afectados; comprenden aquellas superficies donde las afloraciones salinas cubren del 20 al 40% del área total.

Cuarta clase: suelos fuertemente afectados; los manchones de sales cubren del 40 al 70% del área total.

Quinta clase: son suelos muy fuertemente afectados que cubren superficies salinas en más del 70% del área total.

Los planos que se elaboran como resultado de éste trabajo se presentan a escala 1:20 000, 1:40 000 o a escala de los planos catastrales del Distrito; dichas áreas se iluminan con diferentes colores para facilitar su presentación (plano 1).

1.2.2 Elección de sitios de muestreo

La elección de los sitios en los cuales se tomarán las muestras es tan importante como la determinación del número de muestras que serán tomadas. Existen básicamente cuatro métodos para elegir los sitios de muestreo (lámina 1).

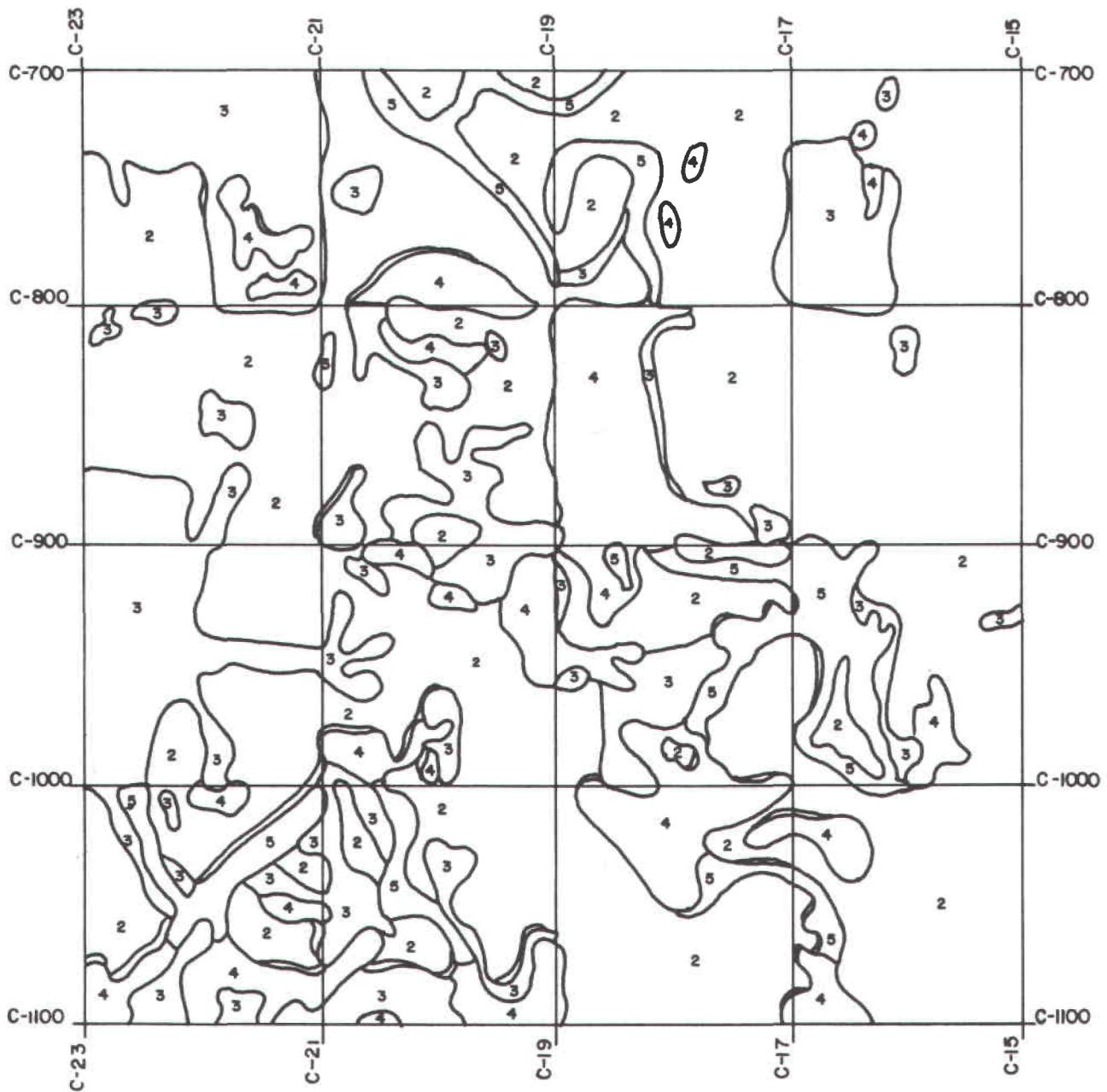
a) A juicio personal. La forma de elegir los sitios de muestreo depende completamente del criterio de la persona que lo efectúa, la cual escoge los sitios del área que le parecen típicos o más representativos (manchones, desarrollo del cultivo, etcétera).

b) Aleatorio simple. En este método los sitios a muestrear se eligen mediante el uso de una tabla de números aleatorios, o bien mediante un sistema de coordenadas cartesianas.

c) Sistemático. El método se basa en el uso de un sistema de coordenadas, ya sea triangular o cuadrangular y tomando las muestras en los sitios donde las líneas se intersectan, o bien en el centro de los cuadros o triángulos. Con esto se asegura una distribución uniforme de los sitios de muestreo en el área.

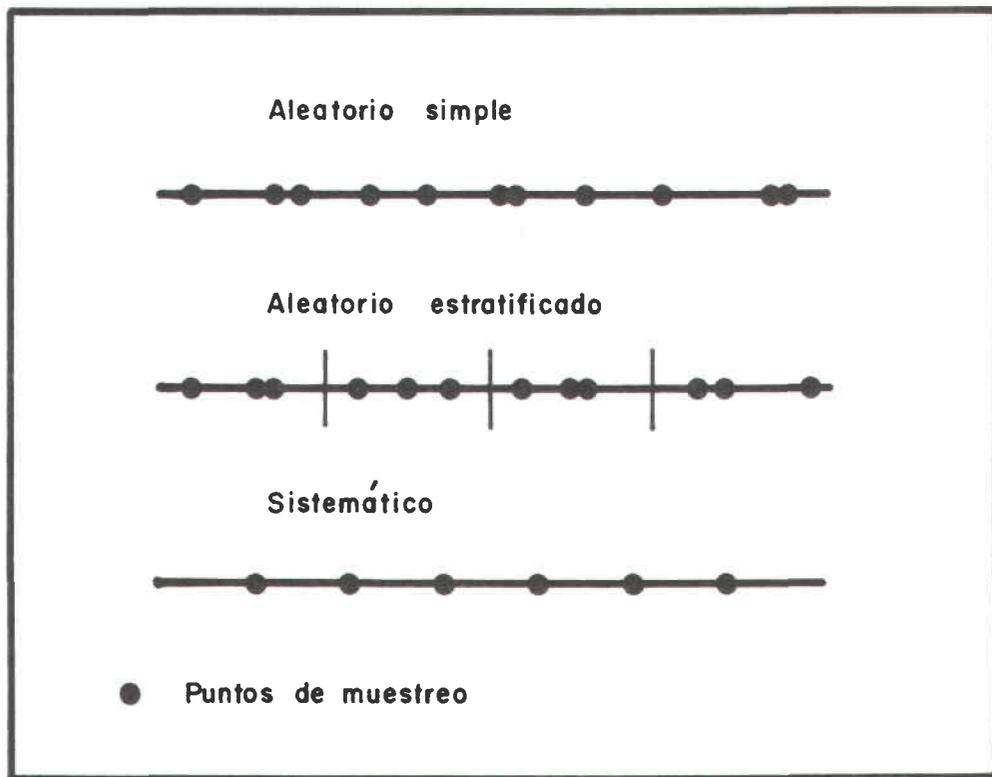
d) Aleatorio complejo o aleatorio estratificado. En este caso, el área a muestrear se divide en subáreas o estratos; por ejemplo, con la ayuda de un sistema de coordenadas cuadrangulares, y dentro de cada subárea, se elige al azar uno o más sitios de muestreo.

Plano 1 Plano de salinidad manifiesta (aparente)



- 1 SIN PROBLEMA DE SALES
- 2 LIGERAMENTE AFECTADO POR SALES
- 3 MEDIANAMENTE AFECTADO POR SALES
- 4 FUERTEMENTE AFECTADO POR SALES
- 5 MUY FUERTEMENTE AFECTADO POR SALES

Lámina 1. Métodos para elegir los sitios de muestreo



Fuente : Kenneth, K, Tanji, 1990

A pesar de que el método aleatorio complejo resulta ser el más conveniente, porque asegura una cobertura uniforme del área, el método de muestreo que debe utilizarse será el sistemático, ya que permite obtener muestras de suelo de manera uniforme en toda una área, como puede ser un módulo de riego; y puede ser menos costoso que un muestreo más intensivo, como el aleatorio complejo o aleatorio estratificado. Los muestreos se harán en cuadrícula, separados un kilómetro uno de otro (lámina 2).

Para suelos con alta variación de la salinidad se recomienda un muestreo sistemático estratificado, complementado con datos que provienen de las áreas con mayor salinidad aparente. La estratificación permite que al dividir el área en subáreas se tenga una menor variación de la salinidad.

1.3 *Equipo para el muestreo de suelos*

El material mínimo indispensable para llevar a cabo el muestreo de un terreno incluye lo siguiente:

Pala recta o pala curva, barrena de tubo para tomar muestras del subsuelo (lámina 3), bolsas de plástico (aprox. 30 x 40 cm), etiquetas de papel, ligas de grosor ordinario, lápices del No. 2 o 2H, costales de plástico o poliestireno, plano de salinidad analizada de los suelos del área o una fotografía aérea o un plano del INEGI.

1.4 *Criterios para la recolección de muestras*

La disposición de las sales en el suelo varía según la época del año, contenido de humedad del suelo, condición del agua freática, presencia de vegetación, efecto del microrrelieve y tipo de sal. Por lo que es importante su consideración para la recolección de las muestras.

1.4.1 *Epoca y densidad de muestreo*

Debido a las variaciones de las sales en el suelo, el muestreo y los análisis deben hacerse en el menor tiempo posible para que los resultados sean aplicables.

Por tratarse de una caracterización del área de riego en cuanto a salinidad, el muestreo se hará sólo una vez. Posteriormente, al estar caracterizada el área de interés, se deberán hacer muestreos para conocer la dinámica del contenido de sales, con la finalidad de tomar las medidas pertinentes para prevenir o recuperar suelos.

En cuanto a la prevención de salinización, los muestreos se harán dos veces al año, en los periodos de febrero-marzo y agosto-

Lámina 2 Ejemplo de ubicación de puntos de muestreo

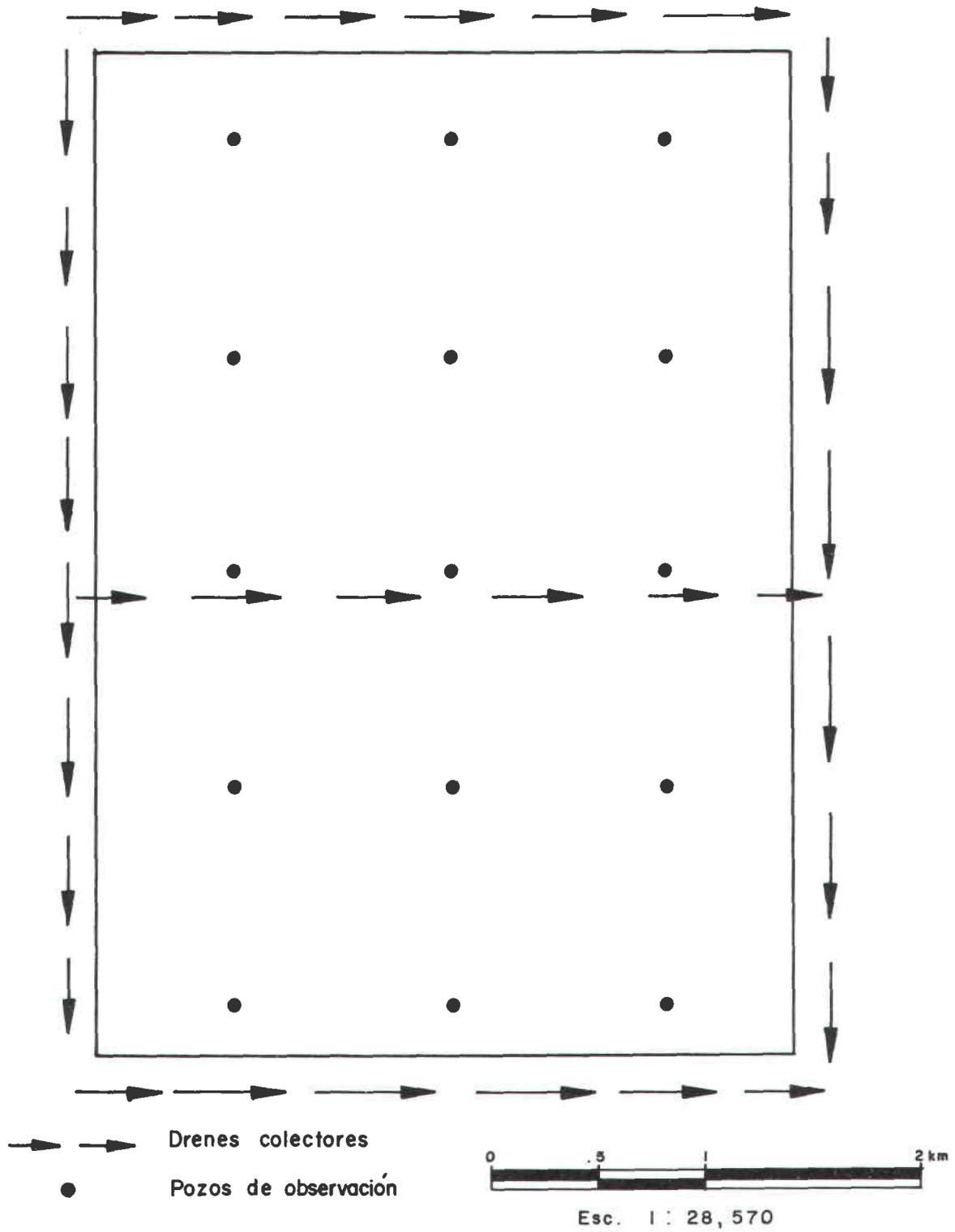
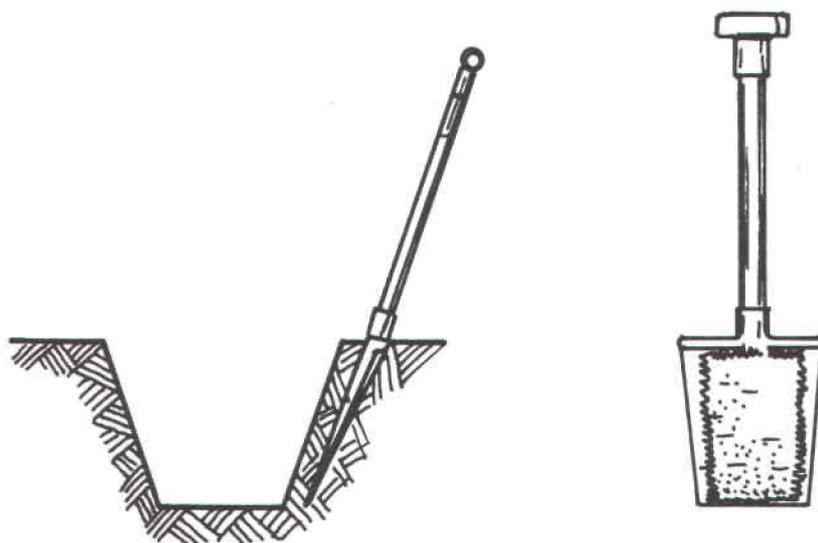
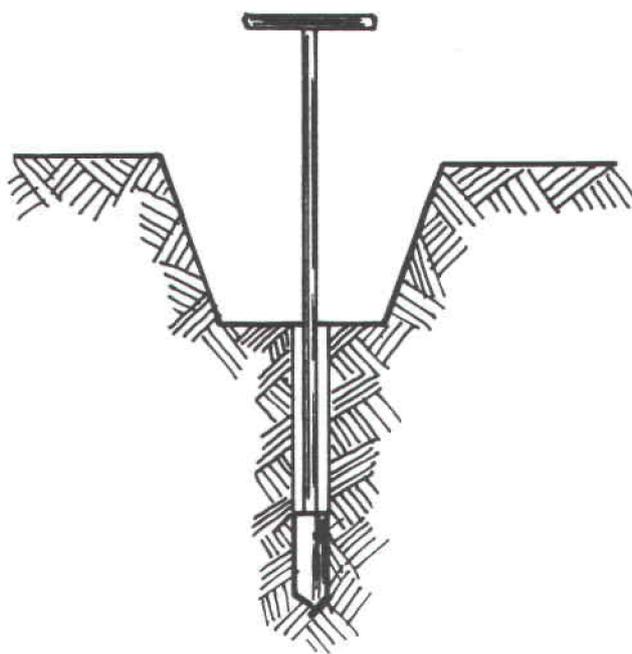


Lámina 3 Toma de muestras de suelos para análisis en el laboratorio



Procedimiento de toma de muestras con pala recta para la profundidad de 0 - 30 cm



Procedimiento de toma de muestras con barrena de tubo, para las profundidades mayores de 30 cm

septiembre, que es cuando en los ciclos de cultivo se tiene mayor actividad en el riego.

En muchos casos resulta conveniente la obtención de muestras compuestas. Para ello se hacen varias submuestras en un sitio, mismas que después se mezclan para constituir una sola unidad que se considerará como un promedio. Una muestra compuesta debe consistir de al menos cinco submuestras.

El tamaño de la muestra se determina en función de los recursos económicos disponibles, de la capacidad de trabajo del laboratorio de análisis, de la precisión deseada y de el tiempo en el que se desea obtener los resultados. Así, cuando el precio del agua es bajo, pero existen problemas de escasez, conviene realizar muestreos de tamaño 0.75/ha. Cuando el costo del agua es alto es necesario hacer un estudio preliminar entre el costo del agua y los posibles costos de decrementos futuros de cosecha por no lavar adecuadamente las áreas con mayor salinidad, para que en base a éste se fije la probabilidad empírica de la concentración que debe utilizarse para calcular la lámina de lavado.

Para casos particulares de recuperación de alguna parcela cuando el agua es barata se recomienda tomar un sitio de muestreo por hectárea, dirigiendo el muestreo a los manchones salinos y utilizar el mayor valor de la salinidad detectada para calcular la lámina de lavado.

De la Peña (S/F) indica que para determinar el tamaño de la muestra conviene considerar la extensión por muestrear, como se señala en el cuadro 1.

1.4.2 Manejo de muestras

Las muestras para determinaciones de salinidad requieren de un manejo especial, ya que con la humedad del campo las sales del suelo se mueven con el agua. Antes de enviarse o almacenarse, los suelos deben secarse al aire. La tierra debe depositarse en bolsas de polietileno para su transporte y manejo en el laboratorio.

Es conveniente que al momento de obtener la muestra se hagan las anotaciones que se indican en el cuadro 2.

1.4.2.1 Toma de la muestra

Para elaborar mapas de isosalinidad se recomienda que las profundidades de muestreo sean de 0-30, 30-60, 60-90 y 90-150 cm.

La herramienta conveniente para muestreo del suelo superficial es una pala de punta redonda; para obtener muestras del subsuelo es recomendable utilizar una barrena de tubo como la de la lámina 3.

Cuadro 1 Densidad de muestreo de suelos

Superficie por muestrear (ha)	Grandes áreas	Pequeñas áreas	Parcelas demostrativas
de 100,000 a 20,000	Un pozo por cada 100 ha (una muestra por cada km ²)		
De 20,000 a 1,000	Un pozo por cada 25 ha (uno por cada 500 m ²)		
De 1,000 a 100		Un pozo por cada 10 ha	
De 100 a 10 o menos			Un pozo por cada 2 ha

Fuente: De la Peña, S/F

1.4.2.2 Cantidad de muestra

La cantidad necesaria de muestra será de un kilogramo. Debe evitarse tomar las muestras en lugares que presenten alguna evidencia de alteración o contaminación, o en las cercanías de drenes o canales. Asimismo, deben evitarse en lo posible los muestreos en suelos muy húmedos por las dificultades que presentan y por el cambio en la distribución de las sales que podrían tener. La inclusión de una costra en la muestra de suelo superficial puede llevar a una interpretación equivocada de la salinidad de esa capa.

1.4.2.3 Control y transporte de muestra

Para su análisis en el laboratorio, las muestras de tierra se colocan y transportan preferentemente en bolsas de papel grueso impregnadas en una solución de parafina, gasolina u otro solvente; también se pueden utilizar bolsas de polietileno de 2 kg de capacidad. En el interior de las bolsas se coloca una etiqueta de papel, en la que se anota con lápiz el número del predio, el número del sitio de muestreo, la profundidad a la que se tomó la muestra y la fecha.

1.5 Cuantificación en estudios de salinidad analizada

Cuadro 2 Datos que se deben obtener durante el muestreo de suelos para su análisis en el laboratorio

Ejido o población-----
Ubicación de la parcela-----
Municipio-----Estado-----
Nombre del propietario del predio-----
Fecha-----No. de muestra-----
Prof. de muestreo-----Uso actual del suelo-----
Pendiente del terreno-----Método de riego-----
Microrrelieve del terreno (lomo del surco, camellón, zanja, etcétera)-----

Tiempo que permanece inundado-----
Lámina de riego aplicada-----No. de riegos-----
Frecuencia de riegos-----Procedencia del agua de riego-----
-----Cultivo anterior-----
Rendimiento-----Labores de preparación del suelo-----

Labores culturales-----

Profundidad del manto freático-----

Los análisis físico-químicos y sobre todo la interpretación de ellos es un tema de gran importancia para clasificar al suelo por su grado de afectación salina y como base de la selección de la metodología a seguir en el mejoramiento de los suelos con diferentes concentraciones salinas.

Los análisis se suelen interpretar con criterio químico o agronómico.

1.5.1 Análisis de laboratorio

Las determinaciones de laboratorio que se realizarán para elaborar el mapa de salinidad analizada serán de tipo químico, siguiendo los procedimientos y métodos que se indican en el *Manual de métodos de análisis de suelos* (Aguilar, S, A, 1991).

Las determinaciones que se realizarán son: reacción del suelo (pH), conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), boro soluble y necesidad de yeso o cal.

1.5.2 Presentación de resultados

De las determinaciones que se harán en el laboratorio, la CE, el sodio (Na), y el calcio más magnesio (Ca+Mg) son los que se utilizan para elaborar los planos de isosalinidad e isoporcentaje de sodio intercambiable. Con los valores de Na y Ca+Mg se calculará el PSI. Es importante indicar la relación que guardan estos indicadores químicos con la salinidad de los suelos.

Conductividad eléctrica. El contenido de sales de un suelo se estima mediante una medición de la conductividad eléctrica (CE) en una pasta de suelo saturada. La CE está correlacionada con la suma de aniones o cationes que se determinan químicamente y con los sólidos totales disueltos.

La cantidad de sales presentes se mide en forma directa cuantificándolas separadamente en el extracto de saturación del suelo y se expresa en forma de miliequivalentes químicos por litro de solución o bien en partes por millón (ppm). En forma indirecta las sales se cuantifican determinando la CE del extracto de saturación del suelo; se expresan en deciciemens por metro (dS/m) a 25°C. Esta medida indirecta se adoptó por ser muy fácil de realizar, además por la correlación directa que tiene el contenido total de sales con la Presión Osmótica (PO):

$$PO = 0.36 \times CE \times 10^3 \quad (1)$$

Los iones se encuentran o en solución o adsorbidos en las arcillas o material orgánico muy fino. Los iones adsorbidos tienen la

propiedad de intercambiarse con los iones presentes en la solución del suelo. Esta propiedad del suelo se conoce como "Capacidad de Intercambio de Cationes", por ser los cationes o iones positivos los que están retenidos por las cargas eléctricas negativas del suelo.

El sodio intercambiable que existe adsorbido se mide en forma similar, pero se cuantifica separadamente y se expresa en porcentaje en relación con el total de las cargas intercambiables, o sea el PSI. La manera de cuantificar el PSI es mediante las fórmulas:

$$\text{PSI} = \frac{100(-0.0126 + 0.01475 \text{ RAS})}{1 + (-0.0126 + 0.01475 \text{ RAS})} \quad (2)$$

RAS= Relación de Adsorción de Sodio

$\frac{1}{2}$

RAS= Na/(Ca + Mg)

Na, Ca, Mg = Concentración de sales (meq/l)

Los valores del PSI y de la RAS se pueden obtener en forma rápida mediante el uso del nomograma de la lámina 4.

De los cationes adsorbidos, el sodio imprime características muy propias al suelo; cuando su presencia rebasa más del 50% en la solución del suelo con relación a los otros cationes, se está en presencia de un suelo sódico.

El estudio del fenómeno de intercambio iónico en el suelo en especial la sodicidad, es importante en el campo de la salinidad.

La parte dinámica del suelo la constituye la arcilla, que está formada por partículas del suelo menores de 0.002 mm de diámetro. Las arcillas tienen generalmente carga negativa que debe ser balanceada por los cationes de la solución donde se adsorben.

En las zonas áridas los cationes predominantes son el calcio y el magnesio, pero al aplicar aguas de alto contenido de sodio éstas se reemplazan por el sodio y se alteran las propiedades del suelo.

La determinación de la CE es de suma importancia en salinidad, por lo cual se describe un método para cuantificarla en campo.

Para medir la CE se utiliza el "Medidor portátil de CE por gota", modelo M-31, de la marca GLA (lámina 5).

Este equipo contiene un medidor de CE, soluciones de ajuste para calibrar este aparato, una jeringa para vacío de 60 cc, una placa metálica extractora con cubierta de papel filtro de 2.5 cm de diámetro, una piseta, recipientes plásticos para preparar la pasta del suelo, y un eliminador de corriente utilizado para cargar las

Lámina 4 Nomograma para determinar el valor de la RAS y para estimar el valor del PSI

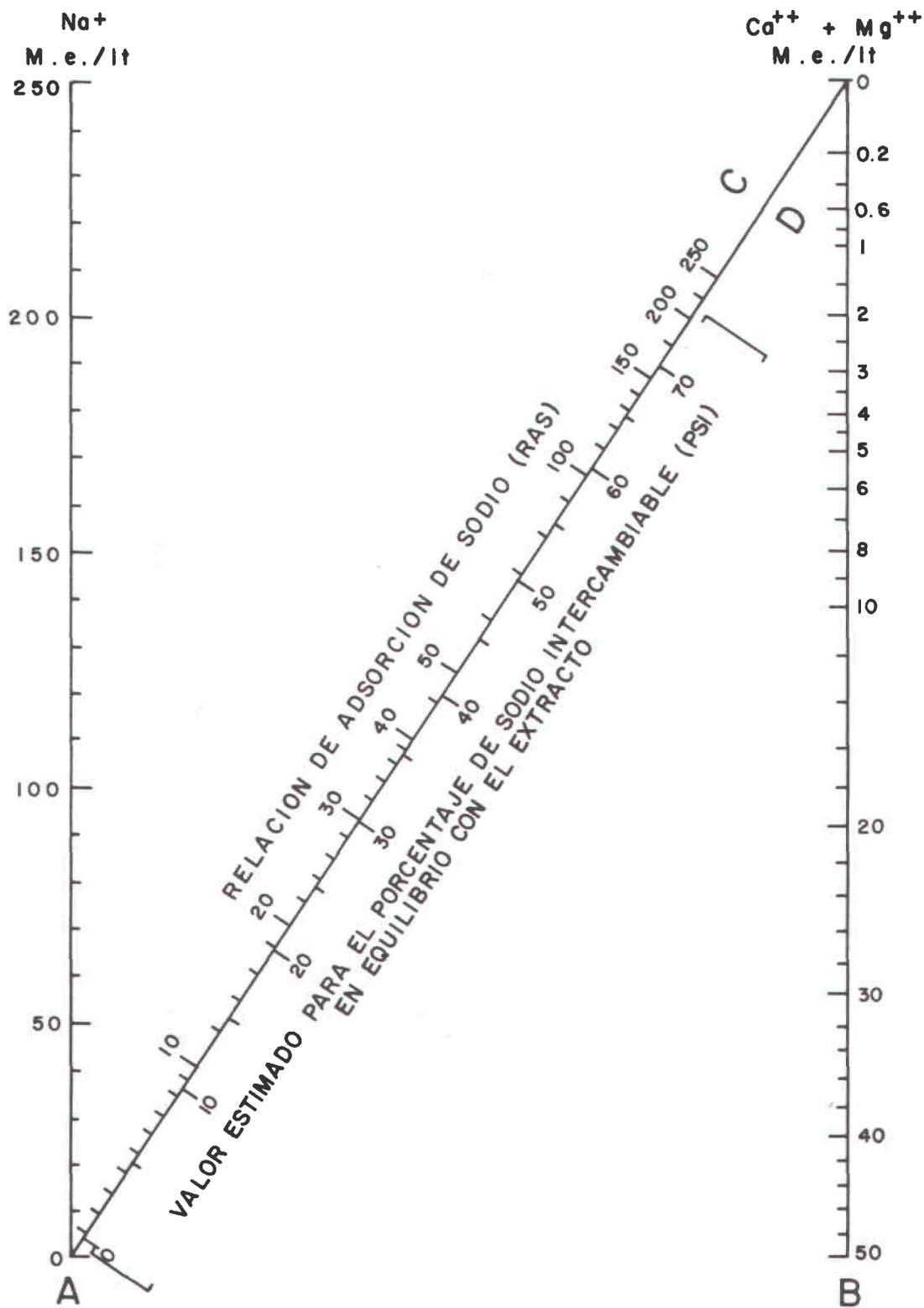
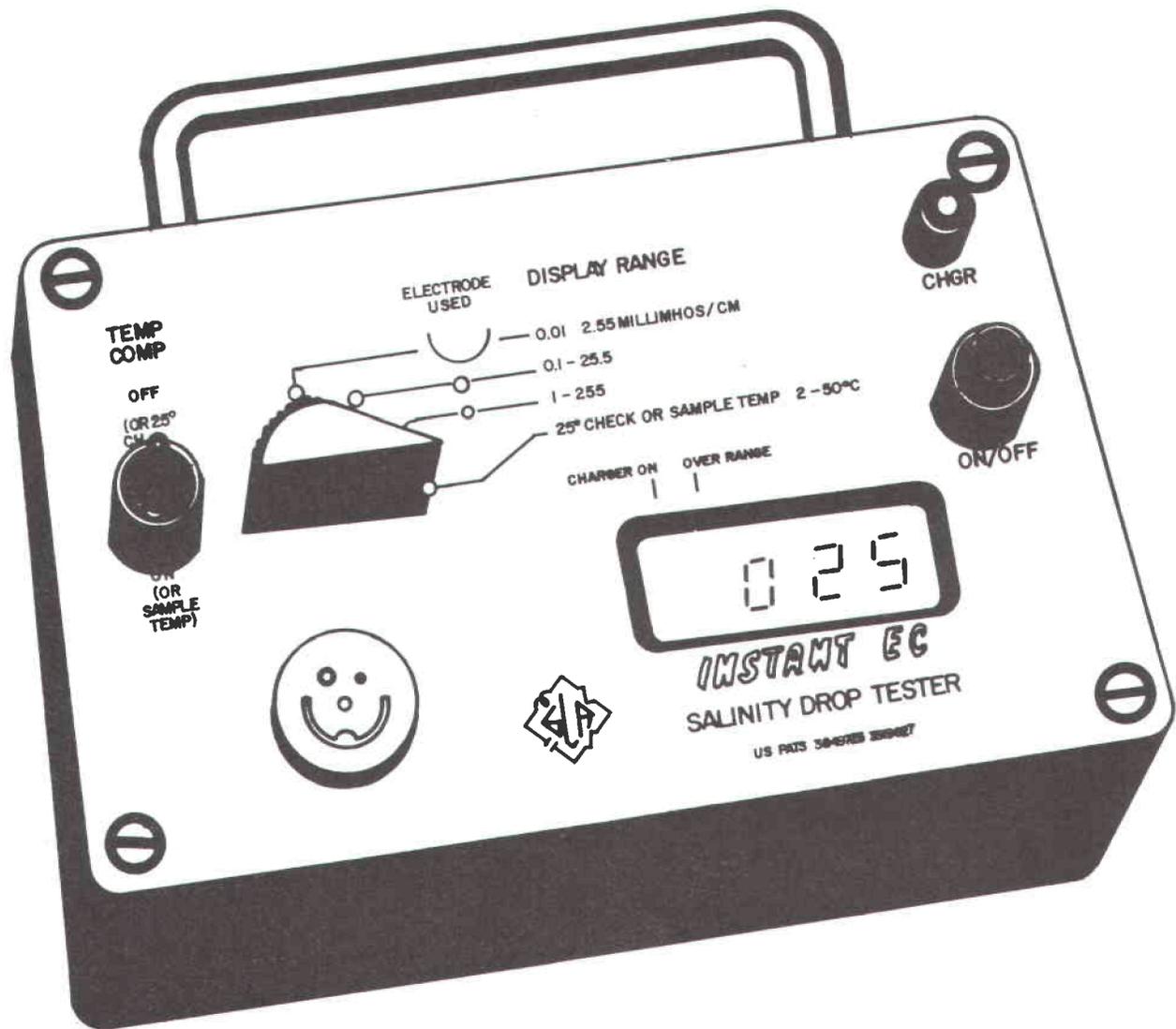


Lámina 5 Equipo portátil para medir la CE en campo



baterías del aparato.

Para proceder a determinar la CE hay que asegurarse de que el aparato esté en buenas condiciones de funcionamiento, lo cual se conoce si el medidor marca que la temperatura es de 25°C.

El medidor está equipado para medir la CE en tres amplitudes diferentes: 0.01 - 2.5, 0.1 - 25.5 y 1 - 250 dS/m. La amplitud que más se utiliza en suelos es la de 0.1 - 25.5, por ser los valores extremos entre los que se ubican las CE de los suelos. La amplitud de 0.01 - 2.5 dS/m se utiliza en donde haya evidencias de una baja salinidad.

Se requieren alrededor de 20 g de muestra de suelo para preparar con agua destilada la pasta saturada. De ésta se extrae suficiente cantidad para la prueba. En suelos arcillosos es más difícil obtener el extracto, por lo que a veces se requiere preparar más de una muestra hasta reunir suficiente cantidad de extracto; en texturas media y gruesa por lo general es suficiente con una muestra del extracto. Al colocar el extracto del suelo en el lugar indicado para tomar la lectura, el medidor indica el valor de la CE en dS/m.

Potencial de hidrógeno (pH). Es un término universal que define las condiciones de acidéz o alcalinidad que presenta una solución. El pH constituye un índice de diagnóstico. Es por ello que valores de pH arriba de 8.4 son indicativos de probables estructuras malas y compactaciones altas que provocan problemas nutricionales por falta de aire y actividad microbiana lenta.

- Valores de pH abajo de 7.0: suelos ácidos
- Valores de pH de 7.0: clasifican a los suelos como neutros
- Valores de pH mayores de 7.0: se clasifican como suelos alcalinos

Los valores inferiores a 7.0 indican la substitución en el complejo de intercambio de metales alcalinos (calcio y magnesio) por el ión H.

Valores de pH arriba de 7.0 a 7.5 indican la presencia de iones alcalinos, pero predominan el calcio y magnesio sobre el sodio.

Los valores de pH entre 7.5 y 8.4 se presentan en suelos con abundancia de iones alcalinos calcio y magnesio y niveles bajos de sodio.

En pH's de 8.4 en adelante los niveles de Na son altos y dominan los iones alcalinos.

En forma práctica, el pH se puede determinar por medio de tres métodos: el primero es el uso de "la caja de pH" (Hellige-Truog Soil Reaction pH Tester), que consiste en el empleo de reactivos químicos, una tablilla de porcelana y un patrón de colores; el

segundo, es el basado en el Sistema "La Motte" y consiste también en el empleo de soluciones químicas y un patrón de colores; y el tercero, el más sencillo y barato de los tres, consiste en hacer una pasta con suelo saturado y mediante un papel indicador de pH y una carta de colores, se determina el valor del pH. En los tres métodos el valor del pH se determina comparando el color que se obtiene con el patrón o carta de colores.

Cationes y aniones solubles. Es deseable que el calcio y el magnesio sean los cationes dominantes en la solución del suelo, y sean adsorbidos en el complejo de intercambio, ya que influyen en las buenas o malas condiciones estructurales. Los iones componentes son el calcio, el magnesio, el sodio y el potasio, los bicarbonatos, los carbonatos, los sulfatos y los cloruros (Ca, Mg, Na y K, HCO₃, CO₃, SO₄ y Cl).

Cuando domina el sodio y en cierta proporción el potasio, su preponderancia casi siempre modifica la estructura del suelo creando un comportamiento adverso, ya que impide la disponibilidad de nutrientes.

Es de gran importancia definir la relación que guardan entre sí los cationes calcio más magnesio con el sodio (Ca + Mg con el Na).

Se ha observado que cuando el Ca + Mg/Na es mayor de 1 o Na/Ca + Mg es menor de tres, los suelos presentan permeabilidad y no requieren mejoradores.

Cuando dominan los cloruros y sulfatos sobre los carbonatos solubles y la conductividad eléctrica es mayor de 15 dS/m, los suelos se conservarán permeables y con buenas condiciones estructurales.

Porcentaje de sodio intercambiable. Este valor es útil para calcular las cantidades de mejorador químico que deben aplicarse al suelo para rescatar una parte del sodio del complejo coloidal. Valores de PSI mayores de 15% dan el carácter sódico. Se ha fijado como valor mínimo hasta donde debe disminuirse el PSI a 10%. En suelos muy arcillosos es recomendable bajarlo hasta el 5 o 10%; en suelos francos o de textura media a 15% y en textura arenosa puede conservarse hasta el 20%.

Necesidades de mejorador. Es la cantidad en toneladas de mejorador que deberán aplicarse al suelo. Los valores calculados que resulten con signo negativo expresan la necesidad de aplicar cierto número de toneladas de yeso por hectárea que son indispensables para corregir o mejorar un espesor prefijado. En cambio, cuando el signo es positivo, existe en el suelo una cantidad sobrante y no debe pensarse en agregar el mejorador mencionado. Es costumbre que los análisis se expresen en toneladas por hectárea de yeso, sin que esto quiera decir que dicho mejorador sea el que deberá aplicarse, pues basta tener la equivalencia con otros mejoradores.

Capacidad de intercambio catiónico. La CIC está formada por el conjunto de cargas electrostáticas negativas que en ciertas condiciones dadas tiene un suelo. Estas cargas están neutralizadas por cationes intercambiables, los cuales se miden en miliequivalentes por cien gramos de suelo (me/100 g). La CIC está relacionada siempre con la textura, el contenido de materia orgánica y la composición mineralógica de las arcillas del suelo.

Existen parámetros para interpretar los valores de la CIC:

Cuadro 3 Parámetros para interpretar valores de CIC

Clase	CIC me/100 g de suelo
Muy baja	menor de 5.00
Baja	5.00 - 15.00
Media	15.00 - 25.00
Alta	25.00 - 40.00
Muy alta	mayor de 40.00

Fuente: SARH, Subdirección de Agrología, 1985.

Carbonatos totales. Esta información es útil para seleccionar el tipo de mejorador, ya que cuando existen carbonatos los mejoradores químicos que deberán aplicarse serán del tipo ácido o formadores de ácidos, y cuando no existen carbonatos en el suelo los mejoradores más convenientes deberán ser del tipo cálcico.

1.6 Criterios de clasificación de suelos ensalitrados y su interpretación

Con base en los resultados químicos, para clasificar a los suelos por salinidad se consideran como principales dos aspectos:

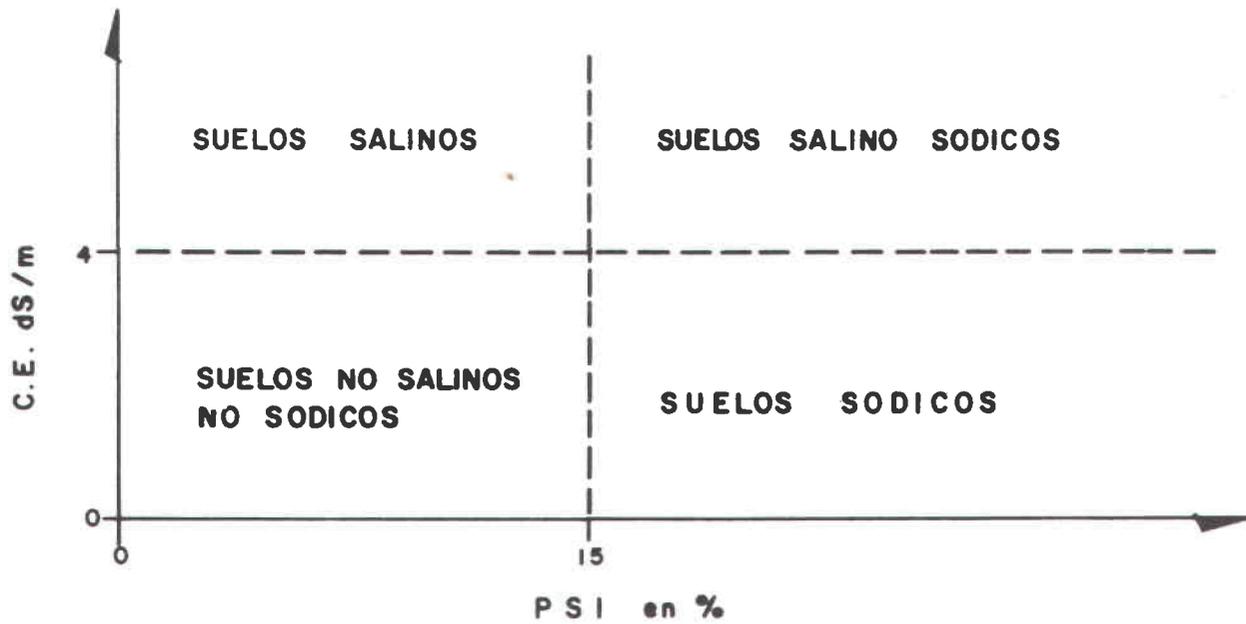
1. Los valores de la conductividad eléctrica (CE)
2. El porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

1.6.1 Criterios de clasificación

Con la combinación de los valores de CE y PSI se forman cuatro grupos (lámina 6):

- Suelos no salinos no sódicos
- Suelos salinos
- Suelos salino-sódicos
- Suelos sódicos

Lámina 6 Clasificación de suelos por contenido de sales



Las características de estos grupos de suelos son:

Suelos no salinos no sódicos. Son aquellos que no presentan problemas a las plantas por concentraciones salinas. Se identifican cuando el valor de las conductividades eléctricas en el extracto de saturación del suelo es menor de 4 dS/m, el PSI es menor de 15 y tienen valores de pH que fluctúan entre 6.5 y 7.5. En términos generales presentan buena permeabilidad, aireación, buena estructura; en general son suelos que no tienen problemas para la agricultura.

Suelos salinos. Contienen sales solubles en tal cantidad que alteran la fisiología de las plantas. Se les identifica cuando la conductividad eléctrica tiene valores mayores de 4 dS/m, el PSI es menor de 15 y el pH varía de 7.0 a 8.5.

Se les reconoce porque en tiempo seco muestran la presencia de costras blancas de sal en su superficie. Casi siempre se encuentran floculados debido al exceso de sales y a la ausencia de cantidades significativas de sodio intercambiable, lo que favorece su permeabilidad. Los aniones más comunes que se presentan son los cloruros, sulfatos y a veces nitratos y pueden presentarse muy rara vez los bicarbonatos. Los cationes más comunes son calcio, magnesio y en menor escala sodio y potasio, además de que generalmente existe yeso en estos suelos. Rara vez más de la mitad de los cationes solubles son sodio.

Suelos salino-sódicos. Los suelos salino-sódicos contienen cantidades de sales solubles y de sodio lo bastante grandes como para interferir en el crecimiento de la mayoría de las plantas cultivadas. Generalmente más de la mitad del total de los cationes solubles son sodio.

Esta clase de suelos es el resultado de la combinación de los procesos de salinización y acumulación de sodio. Cuando presentan un exceso de sales son similares a los suelos salinos, es decir, su conductividad eléctrica es mayor de 4 dS/m, el pH rara vez es mayor de 8.2, el PSI es mayor de 15. Lo elevado del pH se debe a la

interacción del sodio intercambiable con el ácido carbónico que se forma biológicamente y que produce una mezcla de bicarbonato y carbonato de sodio en la solución del suelo. Su apariencia general es similar a la de los suelos salinos, especialmente cuando su contenido de sales solubles es muy alto; pueden encontrarse también manchas oscuras en los suelos.

Suelos sódicos. Los suelos sódicos contienen suficiente sodio intercambiable como para interferir en el crecimiento de la mayoría de las plantas cultivadas, pero no contienen un exceso de sales solubles.

Se considera el valor de 15 PSI como límite de la separación entre

los suelos no sódicos y sódicos. Cuando son mayores del 15 PSI y las CE se presentan con valores menores de 4 dS/m, se les clasifica con el término de sódicos; en éstas condiciones el pH generalmente fluctúa de 8.2 a 10 o mayores. Los suelos sódicos pueden, con el tiempo, formar un horizonte B con estructura prismática y con un contenido de arcilla superior al del horizonte A. Estos suelos presentan mala permeabilidad y baja velocidad de infiltración, son difíciles de trabajar y sus partículas tienen alta defloculación.

1.6.2 Representación en planos

La representación se llevará a efecto mediante dos diferentes planos que se denominan:

- Plano de Isoconductividad Eléctrica (ISOCE)
- Plano de Isoporcentaje de Sodio Intercambiable (ISOPSI)

Cada uno se presentará para las profundidades de suelo 0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm, por lo que se generarán 6 planos en total.

Plano de ISOCE. Para formar este plano se localizan las perforaciones efectuadas para obtener las muestras de suelo; en estos puntos se indican los valores de CE encontrados. Una vez pasada la CE al plano, se trazan las líneas que unirán los puntos con igual valor de CE para una misma profundidad de suelo (plano 2 y planos 1 y 2 del anexo).

Una vez pasada la CE al plano, se trazan las líneas que unirán los puntos con igual valor de CE para una misma profundidad de suelo.

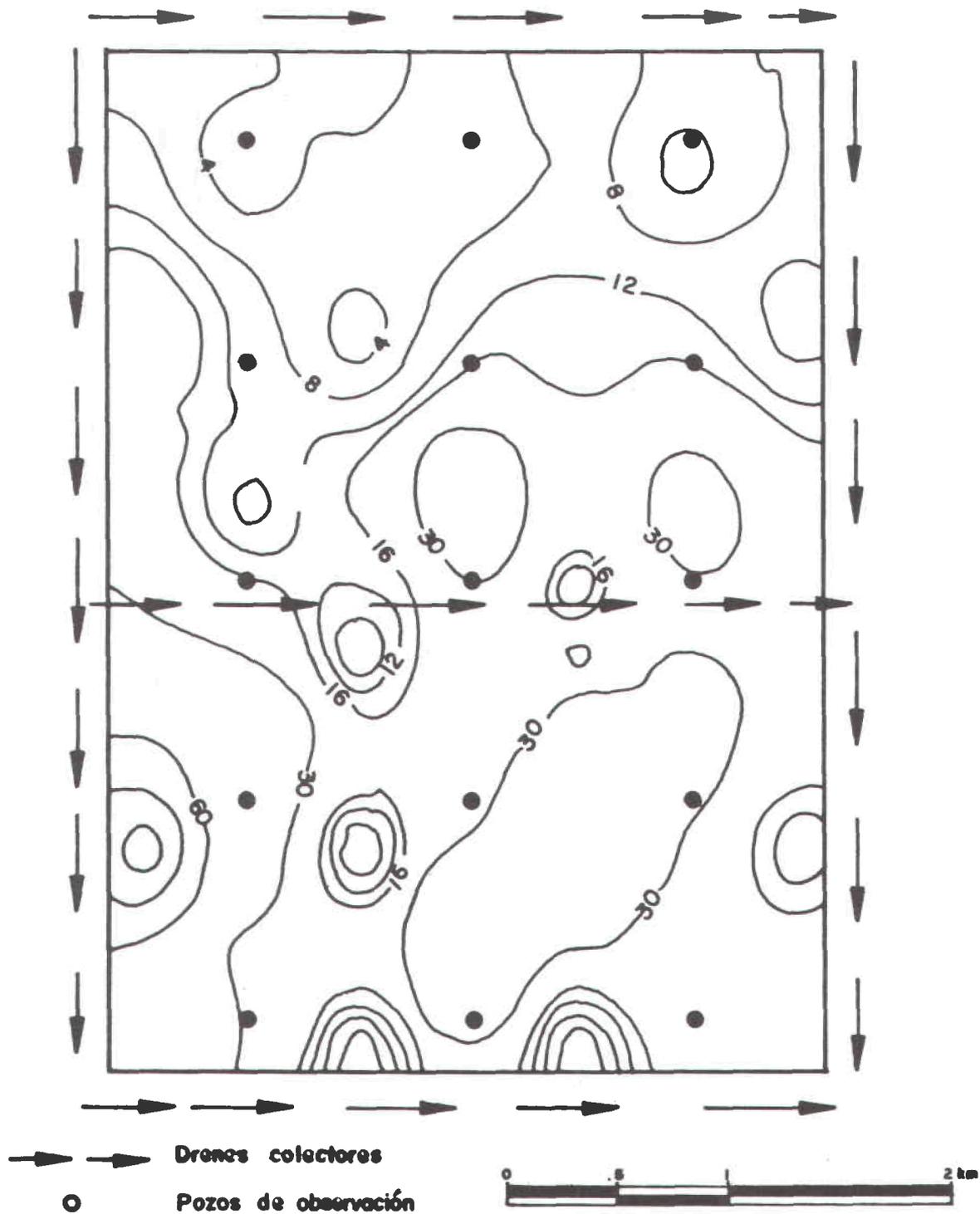
Plano de ISOPSI. Como el anterior, este plano se formará uniendo los mismos valores de PSI, con lo que se formarán isolíneas de PSI (plano 3 y planos 3 y 4 del anexo). Este plano sirve para delimitar la dominancia de los cationes y aniones y juzgar el posible reflejo de las condiciones físico-químicas de los suelos.

En el cuadro 4 se presentan resultados del análisis de algunas muestras de suelo tal y como son reportados por el laboratorio para ser utilizados en la elaboración de planos de ISOCE e ISOPSI.

Para fines de levantamientos del plano de salinidad analizada y PSI se acostumbra clasificar a los suelos bajo dos factores principales: por el valor del contenido de sales presentes y por el valor del PSI.

El plano de clasificación por contenido de sales estará formado por las cuatro diferentes clases de suelos, cuyos grupos se ajustan a la clasificación de suelos con sales establecidos en el *Manual 60 del Laboratorio de Riverside, California* (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, 1974).

Plano 2. Plano de ISOCE 0 - 30 cm



Esc. 1 : 28,570

Cuadro 4 Resultados del análisis de laboratorio para elaborar los planos de ISOCE e ISOPSI.

Clave ¹	Pozo #	Prof. cm	sitio	Ph	CE	Miliequivalentes por litro										RAS	PSI
						Ca	Mg	Na	K	Cationes	CO3	HCO3	SO4	Cl	ANIONES		
S	A2	0-30	Lote 17	6.8	105.0	140.0	420.0	486.0	3.0	1049.0	0	8.0	139.0	900.0	1047.0	29.0	29.4
S	B2	0-30	Lote 17	7.6	6.7	35.0	25.0	6.0	0.08	66.0	0	4.0	16.0	45.0	65.0	1.09	0.2
NSNS	C2	0-30	Lote 17	7.9	2.0	9.0	10.0	1.0	0.04	20.0	0	9.6	4.0	6.0	19.6	0.3	0.2
SS	D2	0-30	Lote 17	7.2	49.2	80.0	240.0	170.0	1.0	491.0	0	8.0	81.0	400.0	489.0	13.4	15.6
S	E2	0-30	Lote 17	8.1	12.3	45.0	25.0	51.0	0.4	121.4	0	4.0	65.0	50.0	119.0	8.6	10.2
S	F2	0-30	Lote 17	7.2	35.0	100.0	120.0	128.0	1.0	349.0	0	8.0	30.0	310.0	348.0	12.2	14.3
S	G2	0-30	Lote 17	7.9	8.8	30.0	35.0	21.0	0.2	86.2	0	4.0	15.0	65.0	84.0	3.6	4.0

¹ NSNS= No salino no sódico; S= Salino; SS= Salino-sódico

1.7 Diagnóstico del ensalitramiento de suelos

Con los valores de CE y PSI se estará en condiciones de saber si el suelo es no-salino no-sódico, salino-sódico y sódico. Al representar en planos las condiciones de salinidad para tres profundidades de suelo, la cuantificación de áreas ensalitradas se obtendrá mediante la planimetría de las áreas representadas en los planos. Los planos deberán contener puntos de referencia para que las áreas salinas o manchones representados se localicen con facilidad. Al sobreponer los planos de CE y PSI se generará un plano que indicará áreas salino-sódicas (plano 4).

Con los datos de superficie y magnitud de CE y PSI, se procede a la recuperación de los suelos. Para los suelos salinos los valores de CE se agrupan en clases para formar cinco categorías (cuadro 5).

Cuadro 5 Grupos de salinidad para formar el plano de salinidad analizada

Grupo	CE del extracto de saturación del suelo (dS/m)
Primera clase	menos de 4 dS/m
Segunda clase	de 4 - 8 dS/m
Tercera clase	de 8 - 12 dS/m
Cuarta clase	de 12 - 20 dS/m
Quinta clase	más de 20 dS/m

Fuente: De la Peña, S/F

Al tener caracterizada por su salinidad el área del módulo surge la pregunta de cuál área de terreno que se deberá atender, en función de su grado de afectación por sales o sodio. Se debe hacer una jerarquización de áreas problema atendiendo a las dificultades y costos necesarios para volverlas suelos no salinos no sódicos.

Para su recuperación se escogerán en primer lugar aquellas áreas que quedan comprendidas dentro de la tercera clase; la segunda selección serán los que correspondan a la cuarta clase y la tercera a la quinta.

Para los suelos con contenido de sodio, es decir, suelos salino-sódicos o sódicos, un criterio será recuperar primero suelos salino-sódicos y dejar al último un suelo sódico, dado que éstos, por lo general, ocupan las áreas afectadas más reducidas.



2 MANEJO DEL AGUA, SUELO Y PLANTA PARA LA PREVENCIÓN DEL ENSALITRAMIENTO DE SUELOS

2.1 Generalidades

La salinización secundaria generalmente se define como aquella causada por un cambio en el medio. Con frecuencia se debe a la transformación en regadío. Los suelos regables reciben cantidades considerables de sales a través del riego, a veces su causa es el drenaje insuficiente o la elevación capilar del agua freática. Por ejemplo, con un agua de excelente calidad, que tenga un contenido total de sólidos disueltos de 0.2 g/l, se aportan con el riego aproximadamente unas 2 ton de sales por hectárea y año cuando se aplican dotaciones del orden de 10,000 m³/ha.

Gran parte de los daños que sufren los terrenos de riego se debe al mal manejo del agua, lo que se refleja en que a veces los surcos son demasiado largos. Para tener agua al final de los surcos o en el último tercio, las cabeceras tienen que estar sobrerregadas. Esto contribuye al desperdicio de agua y a la lixiviación de los nutrientes de las plantas.

2.2 Riego de conservación y sistemas de cultivos

El riego de conservación en la explotación agrícola consiste en utilizar el agua de riego y los métodos de cultivo que mejor se adapten al suelo, pendiente, cultivo y abastecimiento de agua. Esta técnica hace posible regar sin producir erosión, acumulación alcalina, encharcamiento de agua o pérdida indebida de la misma.

Lo que se requiere conocer para proceder a realizar el riego adecuado es:

a) Capacidad de retención de humedad del suelo; b) velocidad de infiltración del suelo; c) profundidad a la que debe regarse, lo que depende de la zona de las raíces y d) qué tan rápido las plantas absorben el agua (en esta misma serie ver *Anexo Técnico. Cuándo y cuánto regar*).

El abastecimiento de agua, el tipo de suelo, la topografía y los cultivos por regar, determinarán los métodos correctos para aplicar el agua de riego. El riego de conservación exige que se preste cuidadosa atención a todos estos factores.

La capacidad de los distintos suelos para absorber y retener agua discrepan manifiestamente. Algunos suelos la absorben y retienen en gran cantidad. Otros, la absorben muy lentamente o tienen poca capacidad de retención. Un conocimiento completo y a fondo de la forma en que el suelo absorbe el agua, de la capacidad para retenerla y de los diversos suelos del área de cultivo, es vital

para el riego de conservación.

El empleo de sistemas de cultivos que conservan el suelo y el agua, es muy importante.

a) Los sistemas de cultivos deben mantener una buena agregación del suelo. Se requiere menos energía para trabajar un terreno que está en buen estado de agregación, debido a que la capa que se tiene que arar es más ligera.

b) Las rotaciones de cultivos son un buen medio para mantener la agregación del suelo; deben contener pastos y leguminosas. Las rotaciones de cultivos dan más flexibilidad al plan de conservación, por la razón de que hacen posibles diversas combinaciones de prácticas.

c) Por medio de las rotaciones de cultivos, el terreno se mantiene cubierto durante un mayor porcentaje del tiempo, cuestión que cuenta para no perder suelo.

2.3 Preparación del suelo y labores de cultivo

En el manejo de suelos con problemas de sales, los métodos de siembra y laboreo pueden llegar a mejorar los rendimientos siempre y cuando se adaptan según el caso y se toma en cuenta el grado de salinidad del suelo, la calidad del agua de riego y la existencia de drenaje que mantenga el manto freático a profundidades que ya no sean peligrosas.

Práctica de subsoleo. La labor inicial de subsoleo se recomienda en el caso de suelos que tienen un grado de salinidad que todavía permite producir cultivos semitolerantes y tolerantes de manera económica, y que ya tienen resuelto su problema de drenaje. Al mejorar las condiciones físicas del suelo, el subsoleo favorece la penetración profunda del agua durante uno o dos riegos; rompe las costras y facilita la lixiviación de las sales.

Roturación o barbecho. Esta práctica de laboreo es muy importante porque modifica las condiciones físicas del terreno, aumentando tanto la velocidad de infiltración del suelo como la facilidad de penetración de las raíces de las plantas. Con esta práctica se obtiene una buena cama para la germinación de la semilla.

Métodos o sistemas de siembra. Para compensar los efectos de la salinidad en la germinación, principalmente cuando se riega por surcos, algunos agricultores siembran con frecuencia dos o tres veces la cantidad necesaria de semillas. Esto puede resultar en una mayor densidad de plantas, pero también eleva los costos de semillas. Una alternativa que podría dar mejores resultados es colocar las semillas en la parte del suelo con baja salinidad. En general el control de la salinidad, durante el delicado periodo de

germinación, puede intensificarse mediante prácticas adecuadas de siembra, conformaciones especiales de las camas de siembra y manejo del riego.

Después de las labores de subsoleo, roturación y rastreo, se está en condiciones de aplicar el método de siembra más conveniente para el cultivo que se vaya a establecer.

Método de siembra al boleo. Consiste en esparcir la semilla en todo el terreno previamente preparado. Esta siembra puede hacerse tanto en seco como en húmedo.

En suelos con problemas de sales la siembra al boleo es muy conveniente, debido a que está ligada con el método de riego por inundación controlada que es el de melgas o curvas a nivel. Existen cultivos que son muy sensibles a la salinidad en la etapa de germinación (cuadro 6) y en las primeras etapas de desarrollo de la plántula. Este método sería muy conveniente aplicarlo en suelos con algún grado de salinidad.

Método de siembra en cama melonera. Cuando por diferentes causas se tiene el suelo con un grado de salinidad que no es muy alto y que todavía permite establecer cultivos semitolerantes a la salinidad, el método de siembra por camas meloneras tiene ventajas; por ejemplo, mayor aereación y mejor aprovechamiento de la luminosidad. Estas camas varían en su tamaño de acuerdo con el cultivo, tipo de suelo y calidad del agua de riego. Este método permite aprovechar mejor el agua de riego al aplicar láminas más pequeñas que otros métodos no permiten.

Método de siembra en corrugaciones. Las corrugaciones consisten en pequeños surcos dentro de bordos melgueros altos. Este método se usa en cultivos de cobertura total; tiene la ventaja de que permite aplicar mejor el riego por la rapidez de su distribución. En suelos con problemas no muy fuertes de salinidad permite, al ser un método de inundación controlada lixiviar las sales.

Método de siembra por surcos normal. Mediante este método el agua se desplaza por capilaridad hacia el centro del camellón, acarreando consigo las sales existentes que se acumulan, por efectos de la evaporación, en el medio de la parte superior de los camellones (lámina 7). Así, las semillas puestas en una sola hilera en el centro del camellón se encuentran precisamente en la zona de mayor concentración de sales (lámina 7A). Por el contrario, las semillas sembradas en doble hilera (lámina 7D) tendrán mayores posibilidades de una mejor germinación y situarán a las plantas en la zona de menor concentración de sales.

Cuadro 6 Salinidad del extracto de saturación que reduciría el 50% de la germinación¹

Cultivos	ECx 50% germinación (dS/m)
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	16.0 - 24.0
Algodón (<i>Gossipyum hirsutum</i>)	15.5
Remolacha azucarera (<i>Beta vulgaris</i>)	6.0 - 12.5
Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	13.0
Cártamo (<i>Carthamus tinctorius</i>)	12.3
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	14.0 - 16.0
Remolacha (<i>Beta vulgaris</i>)	13.8
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	8.0 - 13.4
Tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	7.6
Arroz (<i>Oriza sativa</i>)	18.0
Col, repollo (<i>Brassica oleracea capitata</i>)	13.0
Melón (<i>Cucumis melo</i>)	10.4
Maíz (<i>Zea mays</i>)	21.0 - 24.0
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	11.4
Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	5.6 - 7.5
Frijoles (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	8.0

¹ Fuente: Mass (1984)

Otra práctica es el riego por surcos alternados, en la que las sales se acumulan en el camellón, en su extremo opuesto al agua de riego, dejando el centro del mismo a una concentración menor (lámina 7B). Otra alternativa que favorece la germinación es la que se ilustra en la lámina 7E. En ella se colocan las semillas en una hilera, en el extremo del camellón adyacente al surco de riego. La siembra en doble hilera no es recomendable en los casos de riego por surcos alternados. En general, al aumentar la profundidad del agua en los surcos la germinación de las semillas sembradas mejora, ya sea en la hilera simple o doble.

Una práctica aún mejor para controlar la salinidad es la formación de camellones. Consisten en construir surcos en declive; las semillas se colocan inmediatamente por encima del nivel del agua.

En estos casos se continúa regando hasta que el frente mojado atraviese las hileras de las semillas (lámina 8).

Prácticas culturales. Las prácticas de manejo más apropiadas para un control a largo plazo de la salinidad son: un drenaje adecuado, la lixiviación para controlar la salinidad a niveles dentro de las tolerancias de los cultivos y, si esto no es posible, cambiar el cultivo por otros más tolerantes que requieran una menor lixiviación. Además de estas prácticas de manejo existen otras que pueden tener un efecto positivo en la germinación, en la emergencia, en el desarrollo inicial de las plantas tiernas y en los rendimientos. Los rendimientos bajos son frecuentemente el resultado de fallas durante la germinación y durante el desarrollo de las plantas tiernas.

Las prácticas para control de la salinidad deben aplicarse, por lo general, anualmente y en forma continua, y adquieren mayor importancia a medida que la salinidad del agua de riego aumenta. Tales prácticas son el emparejamiento de la superficie del suelo para una mejor distribución del riego, la programación de los riegos para evitar la formación de costras, la colocación de las semillas para evitar las zonas de mayor concentración de sales y la fertilización adecuada.

Emparejamiento del suelo. El control de la salinidad es más difícil cuando la superficie del suelo no está bien nivelada como para permitir una buena distribución del riego. Debido a la falta de agua y al exceso de sales, la germinación es con frecuencia insuficiente en los puntos altos, mientras que en los bajos, la germinación, emergencia y desarrollo de las plantas tiernas resultan afectadas. El emparejamiento se debe realizar anualmente al cambiar los cultivos para asegurar una distribución uniforme de los riegos.

Programación del riego. El control de la salinidad debe considerar el aumento de la frecuencia de los riegos. Disminuir los intervalos de riego o aumentar su frecuencia permite mantener el agua en la zona radical a disposición de las plantas. Los riegos frecuentes aplican láminas de agua más pequeñas y a mayor frecuencia.

Los riegos no frecuentes agravan los efectos de la salinidad sobre el desarrollo de las plantas; inversamente, los riegos más frecuentes mantienen al suelo con un mayor contenido de humedad, evitan las altas concentraciones de sales en la solución del suelo y tienden a disminuir al mínimo los efectos de la salinidad. Por lo anterior, para la mayor parte de las plantas, los suelos salinos deben regarse cuando todavía el contenido de humedad se encuentra cercano a CC, esto es entre 60-70% de la HA; para mantener el esfuerzo de humedad en niveles bajos en los suelos con problemas de ensalitramiento hay que regar con mayor frecuencia.

Lámina 7 El riego y la acumulación de sales en camellones planos

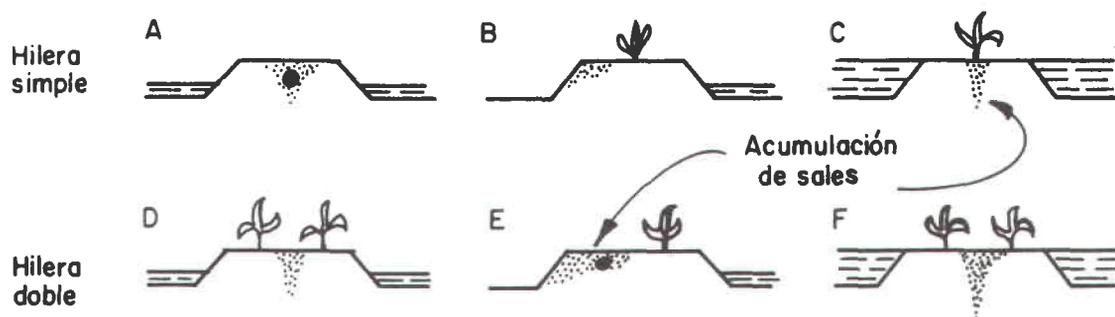
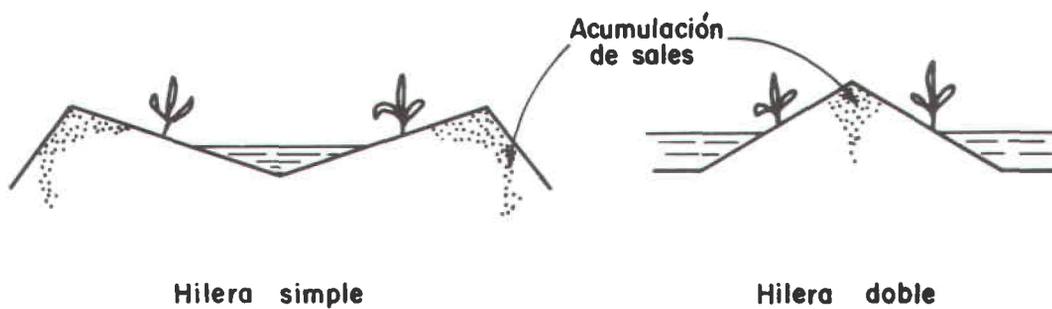


Lámina 8 Control de salinidad por camellones inclinados



Fuente : Bernstein , Fireman y Reeve 1975

Fertilización. TODOS LOS FERTILIZANTES SON SALES. Los fertilizantes naturales y químicos, y los mejoradores contienen concentraciones altas de muchas sales solubles. Cuando se colocan en las proximidades de las semillas o plantas, estos productos provocan o intensifican los problemas de salinidad y toxicidad.

Las plantas tiernas son sensibles a la salinidad y requieren poca fertilización. Por lo tanto, se puede aplicar una pequeña cantidad de fertilizantes antes o en el momento de la siembra y el resto puede suministrarse, en una o más aplicaciones, entre la emergencia y la etapa de crecimiento vigoroso. En la fertilización se debe considerar la aplicación de fertilizantes con índices bajos de sales (cuadro 7).

2.4 Método de riego

Los métodos de aplicación del agua de riego y la cantidad de agua por aplicar son de gran importancia en el control de la salinidad. La elección de un determinado método de riego puede traer buenos resultados, disminuyendo la salinidad y el efecto de las sales sobre la planta.

Los métodos de riego superficiales por inundación pueden ser los más convenientes cuando se tienen problemas para el desarrollo de plantas por efecto de sales; ya que por estos métodos se mantiene una lámina de agua por cierto tiempo sobre la superficie del terreno.

Los métodos de riego por cuadros, curvas de nivel y melgas son los más recomendables para suelos con problemas de salinidad. Dichos métodos sólo se aplicarán para reducir la salinidad cuando existan mantos freáticos profundos.

Los métodos superficiales por líneas parecen no ser los más convenientes cuando se tiene determinado grado de salinidad, debido a que al aplicarse no cubren totalmente el terreno; el humedecimiento del mismo se produce por efecto de la gravedad, de la carga en el surco y por infiltración lateral que se crea por capilaridad. Sin embargo, si se recurre a estos métodos cuando el suelo contiene sales o la calidad del agua de riego no es muy buena hay que combinarlo con los métodos de siembra del mismo nombre.

Los sistemas convencionales de riego por superficie son más apropiados para aplicar láminas grandes, y presentan mayor dificultad y menor eficiencia cuando se les aplican láminas menores de 80 a 100 mm. Debido a esto, los riegos frecuentes, necesarios para reducir los posibles estados de escasez de agua en las plantas, tienden a ser menos eficientes y a crear problemas de drenaje. Por el contrario, los sistemas de riego por aspersión y goteo se presentan mejor a la práctica de riegos frecuentes.

Cuadro 7 Efecto relativo de los materiales fertilizantes sobre la solución del suelo

Material fertilizante	Indice de sal ¹	Indice de sal por unidad de nutriente
Carbonato de calcio	4.7	0.083
Cianamida de calcio	31.0	1.476
Cloruro de potasio, 50%	109.4	2.189
Cloruro de potasio, 60%	116.3	1.936
Cloruro de sodio	153.8	2.899
Dolomita	0.8	0.042
Estiércol, 20% de sales	112.7	5.636
Fosfato biamónico	29.9	1.614
Nitrato de amonio	104.7	2.990
Nitrato de calcio	52.5	4.409
Nitrato de sodio	100.0	6.060
Nitrato de potasio	73.6	5.336
Sulfato de amonio	69.0	3.253
Sulfato de calcio	8.1	0.247
Sulfato de potasio	46.1	0.853
Superfosfato 16%	7.8	0.487
Superfosfato 20%	7.8	0.390
Urea	75.4	1.618

Fuente: Ayers, 1987.

¹ Índice de sal para varios materiales fertilizantes cuando se aplican en un mismo peso. Como base se utiliza el nitrato de sodio correspondiente a un índice de sal igual a 100.

El método de riego por aspersión permite una aplicación y penetración más uniforme del agua y por tanto una mayor eficiencia en el uso de la misma y en el control de la salinidad. Hay casos en que el humedecimiento del follaje en algunos cultivos causa enfermedades fungosas o toxicidad por cloro o sodio en algunos cultivos muy sensibles. En general se piensa que los cultivos sensibles al cloro o al sodio son los más sensibles a la absorción foliar. En el cuadro 8 se presentan valores de toxicidad al regar cultivos por aspersión, con agua salina.

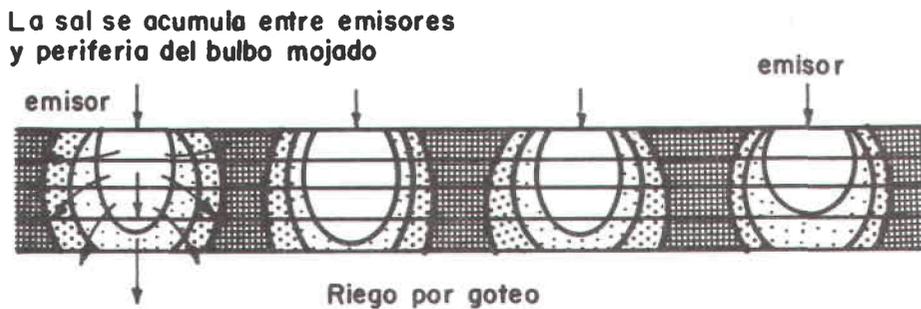
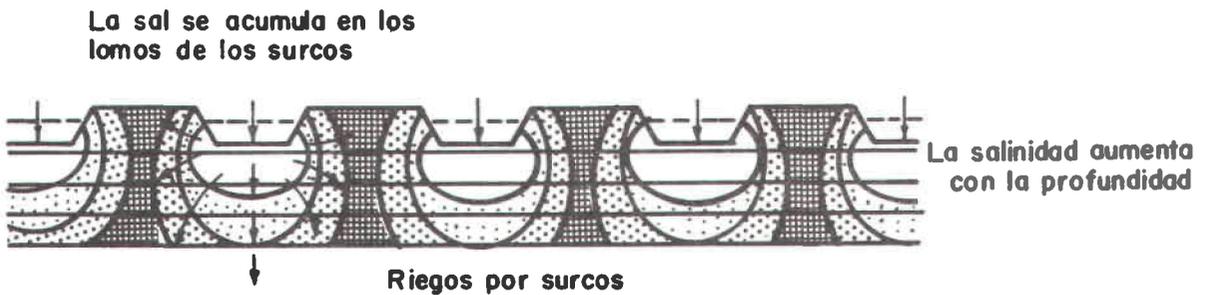
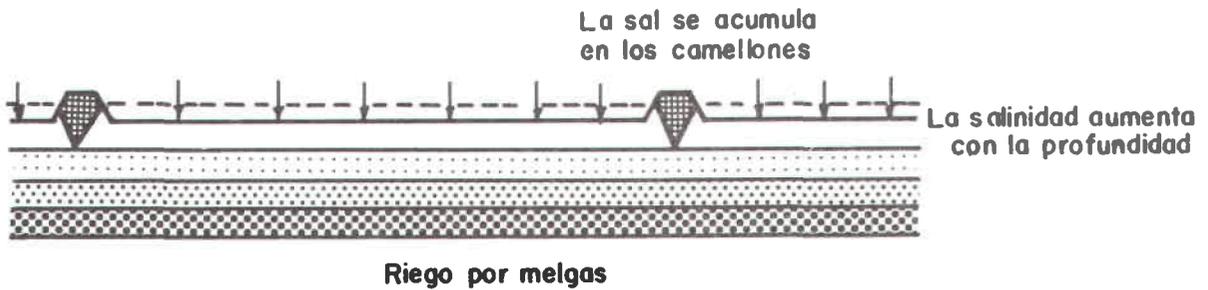
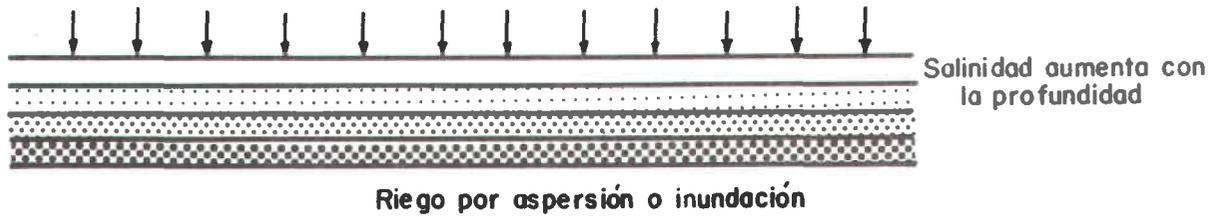
Cuadro 8 Tolerancia relativa de algunos cultivos a la salinidad del agua aplicada por aspersión¹

Concentraciones de Na ⁺ o Cl ⁻ que causan daño foliar (me/l)			
<30	5 - 10	10 - 20	>20
Albaricoquero (<i>Prunus armeniaca</i>)	Papas (<i>Solanum tuberosum</i>)	Ajonjolí (<i>Sesame indicum</i>)	Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)
Almendro (<i>Prunus dulcis</i>)	Pimiento (<i>Capsicum annum</i>)	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	Coliflor (<i>Brassica oleracea</i>)
Cítricos (<i>Citrus sp.</i>)	Tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	Cártamo (<i>Carthamus tintorius</i>)	Girasol (<i>Helianthus annuus</i>)
Ciruelo (<i>Prunus domestica</i>)	Vid (<i>Vitis sp.</i>)	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	Remolacha azucarera (<i>Beta vulgaris</i>)
		Maíz (<i>Zea mays</i>)	
		Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	
		Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	

¹ Fuente: Maas (1984)

En los sistemas de riego localizado, las sales se concentran en la superficie del suelo y en la masa de su periferia mojada por los emisores (lámina 9). Con el riego por goteo con aguas de buena calidad se pueden obtener rendimientos comparables, o muy superiores, a los rendimientos conseguidos con otros sistemas. Aunque cuando se utilizan aguas más salinas, los rendimientos siguen siendo con ese tipo de sistema frecuentemente superiores.

Lámina 9 Patrón de acumulación de sales para varios sistemas de riego



El método de riego por goteo tiene la ventaja de que puede regar suelos con altos contenidos de sales y con aguas de riego de baja calidad, debido a que el esfuerzo de humedad del suelo siempre está bajo (o el potencial del agua alto) y la planta no tiene ningún problema para absorber el agua.

El método de riego por subirrigación no es aplicable donde la salinidad es un problema.

2.4.1 Manejo del agua de riego

En el manejo del agua de riego, para los suelos que se hayan recuperado o tienen baja salinidad y bajo PSI, se deberá seguir las especificaciones adecuadas para cada módulo de riego, en lo referente a cómo regar: gasto en la regadera, tiempo de riego, pendiente en los surcos o melgas, longitud de éstos y láminas de riego (por lo que en la asistencia técnica deberá emplearse el procedimiento del Plan de Mejoramiento Parcelario "PLAMEPA" que se aplicó con éxito en los Distritos de Riego en la década de 1970).

Para que los cultivos logren un desarrollo óptimo no sólo requieren de cierta cantidad de agua, sino que su aplicación debe dosificarse adecuadamente durante el tiempo que dura su ciclo vegetativo, desde la siembra hasta su maduración. Si el agua escasea durante periodos considerables, el rendimiento de dichos cultivos disminuye proporcionalmente al déficit de humedad que sufra, pudiendo llegar a marchitarse y morir prematuramente si la escasez de agua se prolonga. Por otra parte, cuando la cantidad de agua que reciben es excesiva y el sobrante no puede drenarse con facilidad también el rendimiento se afecta, llegando a ser nulo si la humedad impide la respiración de las raíces.

Sin embargo, para lograr cosechas óptimas no basta con proporcionarle al cultivo agua en cantidad y oportunidad adecuadas, hay que seleccionar las semillas, preparar la tierra, la fertilización, controlar plagas y enfermedades, y realizar otras actividades que garanticen el desarrollo del cultivo en condiciones favorables.

En general, se dispone de suficiente tecnología agrícola, que si se utiliza debidamente, garantizará rendimientos muy superiores a los que actualmente se obtienen en la mayoría de los cultivos. Sin embargo, la mayor parte de los agricultores no la utilizan bien y en consecuencia sus rendimientos son bastante menores que los potenciales.

Por otra parte, regar bien un cultivo implica a su vez que la cantidad y la oportunidad del riego se distribuya uniformemente en el suelo de manera que las raíces del cultivo puedan tomar el agua sin dificultad. Si su distribución no es uniforme pueden quedar zonas del terreno sin suficiente humedad y otras saturadas, por lo

que habrá plantas que padezcan de un déficit, mientras que otras tendrán problemas de empantanamiento. En ambos casos las plantas no se desarrollarán bien. En general el buen riego considera además de un buen manejo del agua un buen manejo de la tierra.

Los detalles concernientes a las recomendaciones de cuándo debe regarse, se expresan en el *Anexo Técnico. Cuándo y cuánto regar*, de esta misma serie.

Cuando existe un problema de salinidad, el principio general en el manejo del agua de riego es regar con más frecuencia para que el contenido de humedad no se aproxime al límite mínimo permisible por cada cultivo. El mantenimiento de un contenido constante y alto de humedad, junto con el desplazamiento de las sales fuera de la zona de las raíces, es la razón por la que el riego por goteo ha sido utilizado con éxito con aguas de alta salinidad ($CE > 3 \text{ dS/m}$).

2.4.2 Lámina de sobrerriego

Cuando la acumulación de las sales es excesiva, o cuando se sospecha que va a alcanzar este nivel, se pueden lixiviar las sales aplicando a la zona radical más agua que la que necesitan los cultivos durante su periodo de crecimiento. Esta cantidad extra de agua percola por debajo de la zona radical, desplazando por lo menos una parte de las sales acumuladas en ella. A largo plazo, la cantidad de las sales desplazadas por la lixiviación debe ser igual o superior a la de las sales aplicadas con el agua de riego, para evitar su acumulación y concentración a niveles peligrosos. Los factores críticos en el control de sales son la cantidad de agua necesaria para la lixiviación y el momento oportuno de su aplicación.

Considerando que todas las aguas de riego tienen sales, al regar un cultivo las plantas absorben el agua y dejan las sales disueltas. Con objeto de evitar la acumulación de sales en un terreno de riego es necesario aplicar una lámina de sobrerriego.

El sobrerriego puede aplicarse con cualquier sistema de riego, excepto con el de subirrigación; el más efectivo es el de inundación, ya que cubre el área completamente.

Por razones de seguridad algunos autores recomiendan que siempre que se alcance un nivel de salinidad inaceptable, la lámina de sobrerriego debe aplicarse en todos los riegos. También el sobrerriego se puede aplicar con riegos intercalados, o una vez por cada ciclo de cultivo. Es necesario considerar que la frecuencia de aplicación de la lámina de sobrerriego debe ser tal que permita mantener la salinidad por debajo de la concentración que ocasionaría reducciones inaceptables en los rendimientos.

En algunos casos, los riegos con eficiencia de aplicación aceptable

satisfacen las necesidades de sobrerriego.

Conviene distinguir entre lámina de sobrerriego y lámina de lavado, ya que esta última se aplica para recuperar un suelo ensalitrado, y la primera para prevenir el ensalitrado del suelo.

Para estimar la lámina de sobrerriego se necesita conocer tanto la salinidad del agua de riego, como la salinidad tolerable por el cultivo. La salinidad del agua de riego puede medirse directamente en términos de conductividad eléctrica u obtenerse de los análisis de laboratorio. La salinidad tolerable por los cultivos puede ser estimada utilizando la información del cuadro 9; esta salinidad está de acuerdo con la disminución de rendimiento que se requiera.

Cuadro 9 Tolerancia a la salinidad de cultivos seleccionados en relación con su rendimiento potencial y salinidad del agua de riego (ECa)¹

9A

Cultivos extensivos	Rendimiento				Potencial ²				0% ³	
	100%		90%		75%		50%		ECx	ECa
	ECx	ECa	ECx	ECa	ECx	ECa	ECx	ECa	ECx	ECa
Cebada ⁴	8.0	5.3	10.0	6.7	13.0	8.7	18.0	12.0	28.0	19.0
Algodón	7.7	5.1	9.6	6.4	13.0	8.4	17.0	12.0	27.0	18.0
Remolacha azucarera	7.0	4.7	8.7	5.8	11.0	7.5	15.0	10.0	24.0	16.0
Sorgo	6.8	4.5	7.4	5.0	8.4	5.6	9.9	6.7	13.0	8.7
Trigo	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.3	13.0	8.7	20.0	13.0
Trigo duro	5.7	3.8	7.6	5.0	10.0	6.9	15.0	10.0	24.0	16.0
Soya	5.5	3.3	5.5	3.7	6.3	4.2	7.5	5.0	10.0	6.7
Caupíes	4.9	3.3	5.7	3.8	7.0	4.7	9.1	6.0	13.0	8.8
Cacahuate	3.1	2.1	3.5	2.4	4.1	2.7	4.9	3.3	6.6	4.4
Arroz	3.3	2.0	3.8	2.6	5.1	3.4	7.2	4.8	11.0	7.6
Caña de azúcar	1.7	1.1	3.4	2.3	5.9	4.0	10.0	6.8	19.0	12.0
Maíz	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0	6.2
Lino	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0	6.7
Frijol	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2

9B

Hortalizas

Calabaza, zapallito italiano	4.1	3.1	5.8	3.8	7.4	4.9	10.0	6.7	15.0	10.0
Remolacha	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15.0	10.0

azucarera										
Calabaza	3.2	2.1	3.8	2.6	4.8	3.2	6.3	4.2	9.4	6.3
Brócoli	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14.0	9.1
Tomate	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13.0	8.4
Pepino	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10.0	6.8
Espinaca	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15.0	10.0
Apio	1.8	1.2	3.4	2.3	5.8	3.9	9.9	6.6	18.0	12.0
Col	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12.0	8.1
Papa	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0	6.7
Maíz dulce	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10.0	6.7
Camote	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	11.0	7.1
Pimiento	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	8.6	5.8
Lechuga	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.1	3.4	9.0	6.0
Rábano	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	8.9	5.9
Cebolla	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	7.4	5.0
Zanahoria	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.0	8.1	5.4
Frijoles	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2
Nabo	0.9	0.6	2.0	1.3	3.7	2.5	6.5	4.3	12.0	8.0

9C

Cultivos forrajeros

Agropiro	7.5	5.0	9.9	6.6	13.0	9.0	19.0	13.0	31.0	21.0
Agropiro crestado	7.5	5.0	9.0	6.0	11.0	7.4	15.0	9.8	22.0	15.0
Pasto de Bermuda	6.9	4.6	8.5	5.6	11.0	7.2	15.0	9.8	23.0	15.0
Cebada forrajera	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.4	13.0	8.7	20.0	13.0
Ballico	5.6	3.7	6.9	4.6	8.9	5.9	12.0	8.1	19.0	13.0
Loto, pata de pájaro	5.0	3.3	6.0	4.0	7.5	5.0	10.0	6.7	15.0	10.0
Alpiste bulboso	4.6	3.1	5.9	3.9	7.9	5.3	11.0	7.4	18.0	12.0
Festuca alta	3.9	2.6	5.5	3.6	7.8	5.2	12.0	7.8	20.0	13.0
Agropiro	3.5	2.9	6.0	4.0	9.8	6.5	16.0	11.0	28.0	19.0
Veza de hoja estrecha	3.0	2.0	3.9	2.6	5.3	3.5	7.6	5.0	12.0	8.1
Sorgo de Sudan	2.8	1.9	5.1	3.4	8.6	5.7	14.0	9.6	26.0	17.0
Elimo	2.7	1.8	4.4	2.9	6.9	4.6	11.0	7.4	19.0	13.0
Caupí	2.5	1.7	3.4	2.3	4.8	3.2	7.1	4.8	12.0	7.8
Loto de los pantanos	2.3	1.5	2.8	1.9	3.6	2.4	4.9	3.3	7.6	5.0
Sesbania	2.3	1.5	3.7	2.5	5.9	3.9	9.4	6.3	17.0	11.0
Esfaerofisa	2.2	1.5	3.6	2.4	5.8	3.8	9.3	6.2	16.0	11.0

Alfalfa	2.0	1.3	3.4	2.2	5.4	3.6	8.8	5.9	16.0	10.0
Eragrostis	9.0	1.3	3.2	2.1	5.0	3.3	8.0	5.3	14.0	9.3
Maíz forrajero	1.8	1.2	3.2	2.1	5.2	3.5	8.6	5.7	15.0	10.0
Barsim, trébol de Alejandría	1.5	1.0	3.2	2.2	5.9	3.9	10.0	6.8	19.0	13.0
Dactilo ramoso	1.5	1.0	3.1	2.1	5.5	3.7	9.6	6.4	18.0	12.0
Cola de zorra	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12.0	7.9
Trébol rojo	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Trébol híbrido	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Trébol blanco	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Trébol fresa	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6

9D

Cultivos frutales

Palma datilera	4.0	2.7	6.8	4.5	11.0	7.3	18.0	12.0	32.0	21.0
Toronja	1.8	1.2	2.4	1.6	3.4	2.2	4.9	3.3	8.0	5.4
Naranja	1.7	1.1	2.4	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0	5.3
Melocotone- ro	1.7	1.1	2.2	1.5	2.9	1.9	4.1	2.7	6.5	4.3
Albarico- quero	1.6	1.1	2.0	1.3	2.6	1.8	3.7	2.5	5.8	3.8
Vid	1.5	1.0	2.5	2.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12.0	7.9
Almendro	1.5	1.0	2.0	1.4	2.8	1.9	4.1	2.8	6.8	4.5
Ciruelo	1.5	1.0	2.1	1.4	2.8	1.9	4.1	2.8	6.8	4.5
Zarzamora	1.5	1.0	2.0	1.3	2.6	1.8	3.8	2.5	6.0	4.0
Boysenberry	1.5	1.0	2.0	1.3	2.6	1.8	3.8	2.5	6.0	4.0
Fresa	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4.0	2.7

¹ Fuente: Mass y Hoffman (1977) y de Mass (1984) citados por Ayers y Westcot (1987). Los valores deben tomarse únicamente como guía de tolerancia relativa entre los grupos de cultivos. Los valores de tolerancia absoluta varían con el clima, condiciones de suelo y prácticas de cultivo. En los suelos con yeso natural, las plantas pueden tolerar aproximadamente 2.0 dS/m de salinidad en el suelo (EC_x), por encima de los valores dados. La salinidad del agua (EC_a), sin embargo, permanece igual a la mostrada en el cuadro.

² La EC_x, es la salinidad promedio del agua del suelo contenida en la zona radical, representada por la conductividad eléctrica del extracto de saturación de su suelo, expresada en dS/m a 25 °C. La

relación entre la salinidad del agua y del suelo ($EC_x = 1.5 EC_a$), supone una fracción de lixiviación entre 0.15 y 0.20 y un patrón de extracción de agua normal.

³ El rendimiento potencial de 0%, implica la salinidad máxima teórica (EC_x), con la cual las plantas dejan de crecer.

⁴ La cebada y el trigo son menos tolerantes en las fases de germinación y desarrollo de plantas tiernas. Durante estas etapas la salinidad (EC_x) no debe ser mayor de 4 a 5 dS/m en la capa arable del suelo.

Para cultivos específicos y aproximaciones más exactas del requerimiento de lavado (o lámina de sobrerriego), se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$RL = \frac{EC_a}{5EC_x - EC_a} \quad (3)$$

Donde: RL= al requerimiento de lixiviación mínimo que se necesita para controlar las sales dentro de la tolerancia de un cultivo, empleando métodos comunes de riego por superficie. EC_a = la salinidad del agua de riego en dS/m. EC_x = la salinidad del extracto de saturación, en dS/m, que representa la salinidad tolerable por un cultivo determinado.

El valor de EC_x para un determinado cultivo y el rendimiento potencial se obtiene del cuadro 9. Se recomienda que en los cálculos con la ecuación anterior se utilicen los valores de EC_x , correspondientes a un potencial de rendimiento mínimo de 90%. Igualmente se recomienda que para aguas de salinidad moderada a alta ($EC_a > 1.5$ dS/m) se seleccione el valor de EC_x correspondiente a un potencial de 100%.

La lámina de consumo para todo el ciclo de desarrollo del cultivo puede calcularse utilizando la siguiente fórmula:

$$LA = \frac{ET_c}{1 - RL} \quad (4)$$

Donde: LA = lámina total de consumo por ciclo (mm/ciclo). ET_c = evapotranspiración del cultivo por ciclo (mm/ciclo). RL= requerimiento de lixiviación.

La frecuencia de lixiviación debe ser tal que permita mantener la salinidad por debajo de la concentración que ocasionaría reducciones inaceptables en los rendimientos. Esto implica que la lixiviación puede practicarse con cada riego, con riegos intercalados, o con menos frecuencia en ciclos de cultivo con plantas anuales o a intervalos más grandes. En muchos casos, los riegos con eficiencias de aplicación aceptables satisfacen las necesidades de lixiviación y, por lo tanto, el aplicar agua

adicional para lavar las sales puede ser contraproducente.

Ejemplo:

Un cultivo de trigo sembrado en un suelo franco y uniforme se riega por surcos, con un agua de $ECa = 4.0$ dS/m. Si la evapotranspiración anual del cultivo es de 650 mm, determinar la lámina total requerida para satisfacer la ETc y la lixiviación de las sales.

Datos:

$ECa = 4.0$ dS/m

$ECx = 7.6$ dS/m (del cuadro 9 para trigo y rendimiento potencial del 90%)

$ECx = 5.7$ dS/m (del cuadro 9 para trigo, con un rendimiento potencial del 100%)

Solución:

$$RL = \frac{ECa}{(5ECx - ECa)}; = \frac{4.0}{(5 \times 7.6 - 4.0)}; = 0.117$$

para un rendimiento potencial del 90%

$$RL = \frac{4.0}{(5 \times 5.7 - 4.0)}; = 0.163 \text{ para un rendimiento potencial de } 100\%$$

La lámina total para satisfacer la ETc y el RL es:

$$LA = \frac{ETc}{1 - RL} = \frac{650}{1 - 0.163} = 776 \text{ mm/ciclo}$$

2.5 Caracterización del agua de riego

Para determinar la calidad del agua desde el punto de vista químico es necesario determinar la cantidad, proporción y tipo de los diferentes iones que tiene en solución. Para esto será necesario tomar una muestra. Los cationes considerados en el análisis son calcio, magnesio, sodio y potasio; y entre los aniones, carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos. Otras determinaciones importantes son el pH, la conductividad eléctrica y el contenido de boro.

Puede decirse que desde el punto de vista químico existen en la actualidad tres criterios principales para juzgar la conveniencia o limitación del empleo del agua con fines de riego. Estos criterios son: contenido de sales solubles, el efecto probable del sodio sobre las características físicas del suelo y el contenido de elementos tóxicos para las plantas.

Este tema se trata con suficiente amplitud en el *Anexo Técnico. Monitoreo de la calidad del agua de riego*, de esta misma serie.

2.6 Cultivos tolerantes y su manejo

No todos los cultivos responden de igual manera a la salinidad: algunos producen rendimientos aceptables a niveles altos de salinidad y otros son sensibles a niveles relativamente bajos.

Esta diferencia se debe a la mejor capacidad de adaptación osmótica que tienen algunos cultivos, lo que les permite absorber bajo condiciones de salinidad una mayor cantidad de agua. Esta capacidad de adaptación es muy útil y permite la selección de cultivos más tolerantes y capaces de producir rendimientos económicamente aceptables, cuando no se puede mantener la salinidad del suelo al nivel de tolerancia de las plantas que se cultivan.

La tolerancia a la salinidad de algunos cultivos puede alcanzar valores entre 8-10 veces la tolerancia de otros. La amplitud de esta tolerancia relativa permite un mayor uso de las aguas de salinidad moderada y aumenta la amplitud aceptable de las aguas salinas que se consideran adecuadas para el riego.

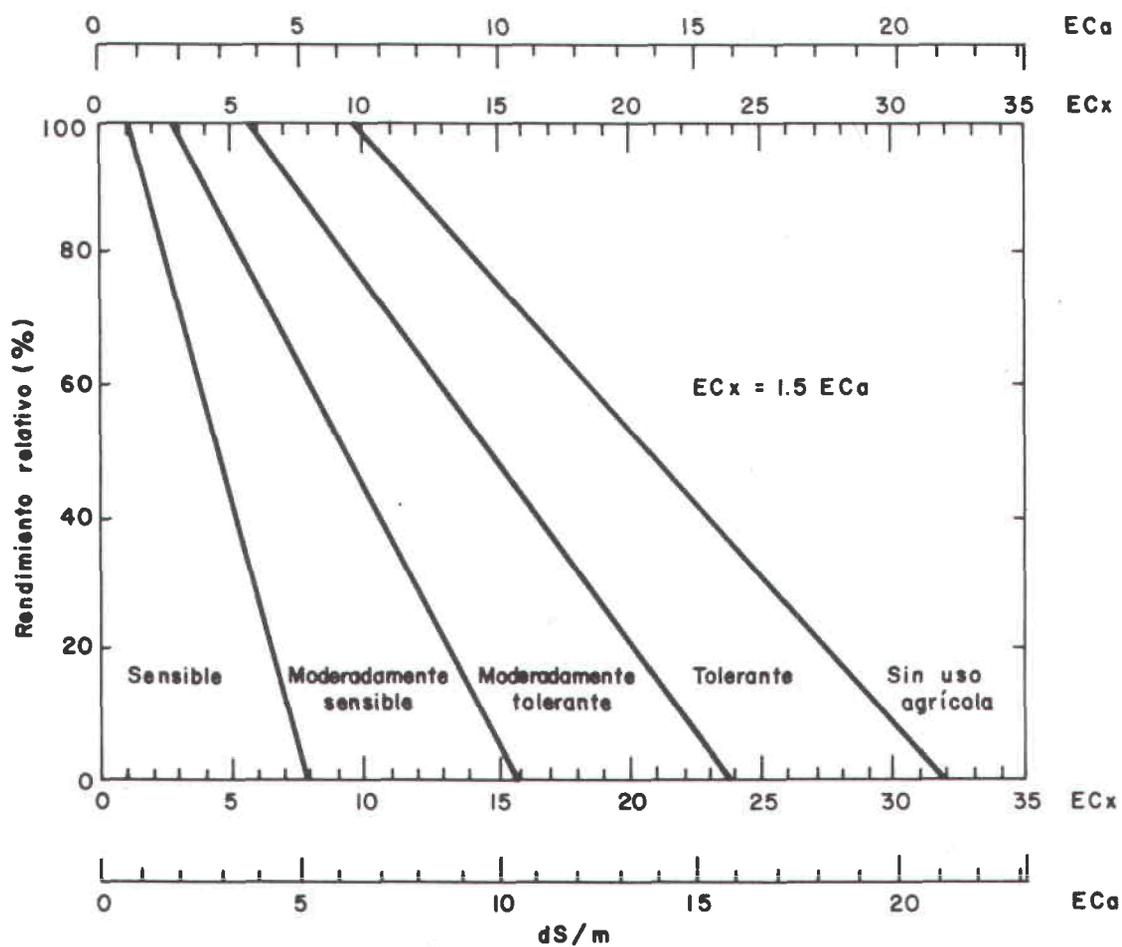
El concepto de tolerancia relativa es muy útil para comparar y seleccionar cultivos. Los valores de tolerancia del cuadro 9 indican que prácticamente todos los cultivos pueden alcanzar su máximo potencial de rendimiento cuando el agua de riego tiene una salinidad menor de 0.7 dS/m.

Para el manejo del agua de riego en los suelos con problemas de sales se ha investigado y se dispone de información sobre cuáles son los niveles de esfuerzo de humedad del suelo a que éste debe someterse para diferentes cultivos y la importancia de mantenerlo en los más altos niveles posibles para que la planta no sufra y por esta causa baje su rendimiento. Se han sometido también diferentes cultivos a diversas condiciones de salinidad. Actualmente se conoce qué rendimientos se pueden esperar al establecer un cultivo en determinadas condiciones de salinidad (cuadro 9).

Niveles de tolerancia. El nivel máximo de la salinidad promedio de la zona radical que pueden tolerar las plantas, sin afectar negativamente su desarrollo, es la SALINIDAD UMBRAL. Con esta salinidad el rendimiento potencial de los cultivos es todavía del 100% (lámina 10).

Al construir un cuadro con la tolerancia de los cultivos se forman grupos con tolerancias similares, lo que permite designar los límites de tolerancia relativa para cada grupo de cultivos (cuadro 10)

Lámina 10 Delimitación de la tolerancia relativa a la salinidad de los cultivos



Cuadro 10 Agrupación de cultivos por su tolerancia relativa a las sales

Grupos de tolerancia relativa	Salinidad umbral (Su) (salinidad a Y = 100%)
Sensibles	< 1.3 dS/m
Moderadamente sensibles	1.3 - 3.0 dS/m
Moderadamente tolerantes	3.0 - 6.0 dS/m
Tolerantes	6.0 - 10.0 dS/m
No tolerantes	> 10.0 dS/m

Fuente: Ayers, 1987.

La relación de cultivos por grupo de tolerancia se indica en el cuadro 11.

Cuadro 11 Tolerancia relativa a la salinidad de algunos cultivos¹

11A

TOLERANTES

Cultivos de fibra, semilla o azúcar

Algodón	<i>Gossypium hirsutum</i>
Cebada	<i>Hordeum vulgare</i>
Jojoba	<i>Simmondsia chinensis</i>
Remolacha azucarera	<i>Beta vulgaris</i>

Cultivos forrajeros y gramas

Agropiro alargado	<i>Agropyron elongatum</i>
Agropiro crestado	<i>Agropyron crestatum</i>
Elimo	<i>Elymus angustus</i>
Elimo	<i>Elymus junceus</i>
Grana alcalina	<i>Puccinellia airoides</i>
Grana de Bermuda	<i>Cynodon dactylon</i>
Grana Kallar	<i>Diplachne fusca</i>
Grana salada	<i>Distichlis stricta</i>
Sacatón alcalino	<i>Sporobolus airoides</i>

Hortalizas

Espárrago	<i>Asparagus officinalis</i>
-----------	------------------------------

Cultivos frutales

Palma datilera	<i>Phoenix dactylifera</i>
----------------	----------------------------

 MODERADAMENTE TOLERANTES

Cultivos de fibra, semilla o azúcar

Avena	<i>Avena sativa</i>
Cártamo	<i>Carthamus tinctorius</i>
Caupés	<i>Vigna unguiculata</i>
Centeno	<i>Secale cereale</i>
Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i>
Soya	<i>Glycine max</i>
Trigo	<i>Triticum aestivum</i>
Trigo duro	<i>Triticum turgidum</i>
Triticale	<i>X triticosecale</i>

Cultivos forrajeros y gramas

Agropiro	<i>Agropyron sibiricum</i>
Agropiro delgado	<i>Agropyron trachycaulum</i>
Agropiro intermedio	<i>Agropyron intermedium</i>
Agropiro occidental	<i>Agropyron smithii</i>
Ballico italiano	<i>Lolium italicum multiflorum</i>
Ballico perenne	<i>Lolium perenne</i>
Bromo argentino	<i>Bromus unioloides</i>
Bromo montañoso	<i>Bromus marginatus</i>
Cebada forrajera	<i>Hordeum vulgare</i>
Nabo	<i>Brassica napus</i>
Elimo	<i>Elymus triticoides</i>
Elimo canadiense	<i>Elymus canadensis</i>
Falaris bulbosa	<i>Phalaris tuberosa</i>
Fetusca	<i>Fetusca elatior</i>
Fetusca alta	<i>Festuca pratensis</i>
Grama canaria	<i>Phalaris arundinacea</i>
Grama Rhodes	<i>Chloris gayana</i>
Trébol	<i>Melilotus albus</i>
Panizo azul	<i>Panicum antidotale</i>
Sorgo de Sudán	<i>Sorghum sudanense</i>
Trébol de cuernos	<i>Lotus corniculatus tenuifolium</i>
Trébol de cuernos	<i>Lotus corniculatus arvensis</i>
Trigo forrajero	<i>Triticum aestivum</i>

Hortalizas

Alcachofa	<i>Helianthus tuberosus</i>
Betarraga	<i>Beta vulgaris</i>
Calabaza	<i>Cucurbita pepo melopepo</i>

Cultivos frutales

Piña	<i>Ananas comosus</i>
Azufaito	<i>Zizifus jujuba</i>
Granado	<i>Punica granatum</i>

Higuera
Olivo
Papaya

Ficus carica
Olea europaea
Carica papaya

11C

MODERADAMENTE SENSIBLES

Cultivos de fibra, semilla o azúcar

Arroz	<i>Oriza sativa</i>
Caña de azúcar	<i>Saccharum officinarum</i>
Girasol	<i>Helianthus annuus</i>
Habas	<i>Vicia faba</i>
Lino	<i>Linum usitatissimum</i>
Maíz	<i>Zea mays</i>
Cacahuete	<i>Arachis hypogaea</i>
Mijo Italiano	<i>Setaria italica</i>
Ricino	<i>Ricinus communis</i>

Cultivos forrajeros y gramas

Alfalfa	<i>Medicago sativa</i>
Agróstide	<i>Agrostis stolonifera palustris</i>
Astrágalo, tragacanto	<i>Astragalus cicer</i>
Avena forrajera	<i>Avena sativa</i>
Bersim	<i>Trifolium alexandrinum</i>
Bromo liso	<i>Bromus inermis</i>
Buffel, pasto salinas	<i>Cenchrus ciliaris</i>
Caupíes forrajeros	<i>Vigna unguiculata</i>
Centeno forrajero	<i>Dactylis glomerata</i>
Cola de zorra	<i>Alopecurus pratensis</i>
Eragrostis	<i>Eragrostis sp.</i>
Esfaerofisa	<i>Sphaerophysa salsula</i>
Fleo, timoteo	<i>Phleum pratense</i>
Grama de avena alta	<i>Arrhenatherum, Danthonia</i>
Grama azul	<i>Bouteloua gracilis</i>
Grama de Bahía	<i>Paspalum dilatatum</i>
Loto de los pantanos	<i>Lotus uliginosus</i>
Maíz forrajero	<i>Zea mays</i>
Sanguisorba, pimpinela	<i>Poterium sanguisorba</i>
Sesbania	<i>Sesbania exaltata</i>
Siratro	<i>Macroptilium atropurpureum</i>
Tallo azul, angleton	<i>Dichanthium aristatum</i>
Trébol blanco	<i>Trifolium repens</i>
Trébol fresa	<i>Trifolium fragiferum</i>
Trébol híbrido	<i>Trifolium hybridum</i>
Trébol ladino	<i>Trifolium repens</i>
Trébol rojo	<i>Trifolium pratense</i>
Veza de hoja angosta	<i>Vicia angustifolia</i>

Hortalizas

Apio	<i>Apium graveolens</i>
Camote	<i>Ipomoea batatas</i>
Berengena	<i>Solanum Melongena esculentum</i>
Berza	<i>Brassica oleracea acephala</i>
Brócoli	<i>Brassica oleracea botrytis</i>
Calabaza	<i>Cucurbita pepo</i>
Calabaza	<i>Cucurbita pepo melopepo</i>
Col de Bruselas	<i>Brassica oleracea gemmifera</i>
Col, repollo	<i>B. oleracea capitata</i>
Coliflor	<i>B. oleracea botrytis</i>
Colinabo	<i>B. oleracea gongylode</i>
Espinaca	<i>Spinacia oleracea</i>
Lechuga	<i>Latuca sativa</i>
Maíz	<i>Zea mays</i>
Melón	<i>Cucumis melo</i>
Nabo	<i>Brassica rapa</i>
Papas	<i>Solanum tuberosum</i>
Pepino	<i>Cucumis sativus</i>
Pimiento, chile	<i>Capsicum annum</i>
Rábano	<i>Raphanus sativus</i>
Sandía	<i>Citrullus lanatus</i>
Tomate	<i>Lycopersicon esculentum</i>

Cultivos frutales

Vid	<i>Vitis sp.</i>
-----	------------------

11D

SENSIBLES

Cultivos de fibra, semilla o azúcar

Ajonjolí	<i>Sesamum indicum</i>
Frijoles	<i>Phaseolus vulgaris</i>
Guayule	<i>Parthenium argentatum</i>

Hortalizas

Cebolla	<i>Allium cepa</i>
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i>
Ocra	<i>Abelmoschus esculentus</i>
Pastinaca, chirivía	<i>Pastinaca sativa</i>
Zanahoria	<i>Daucus carota</i>

Cultivos frutales

Aguacate	<i>Persea americana</i>
Albaricoquero	<i>Prunus armenica</i>
Almendro	<i>Prunus dulcis</i>
Caqui de Virginia	<i>Diospyros virginiana</i>
Cerezo	<i>Prunus besseyi</i>

Cerezo	<i>Prunus avium</i>
Chirimoya	<i>Anona cherimola</i>
Ciruelos	<i>Prunus domestica</i>
Frambueso	<i>Rubus idaeus</i>
Fresa	<i>Fragaria sp.</i>
Grosellero	<i>Ribes sp.</i>
Lima, L. agria	<i>Citrus aurantifolia</i>
Limonero	<i>Citrus limon</i>
Mandarina	<i>Citrus reticulata</i>
Mango	<i>Mangifera indica</i>
Manzano	<i>Malus sylvestris</i>
Maracuyá	<i>Passiflora edulis</i>
Melocotonero	<i>Prunus persica</i>
Naranja	<i>Citrus sinensis</i>
Níspero del Japón	<i>Eriobotrya japonica</i>
Peral	<i>Pyrus communis</i>
Pomarrosa	<i>Syzygium jambos</i>
Pomelo	<i>Citrus maxima</i>
Toronja	<i>Citrus paradisi</i>
Zarza	<i>Rubus ursinus</i>

Fuente: Maas (1984) citado por Ayers, 1987

¹ Esta información es únicamente una guía sobre la tolerancia relativa entre cultivos. La tolerancia absoluta depende del clima, condiciones del suelo y prácticas de cultivo.

Las etapas de desarrollo consideradas en el cuadro 11 abarcan desde el estado final de plantas tiernas, hasta la madurez de los cultivos. Las tolerancias durante las etapas de germinación y desarrollo inicial de las plantas tiernas pueden ser diferentes y por el momento solamente se encuentran definidas con claridad las tolerancias de unos cuantos cultivos.

Por lo general, la salinidad del suelo superficial que recibe las semillas, por encima de 4 dS/m, inhibe o retarda la germinación y el crecimiento inicial de las plantas tiernas. Las lluvias y los riegos de presiembra, generalmente ayudan a mantener una salinidad baja, retrasan la formación de costras y promueven una buena germinación y emergencia.

Normalmente los cultivos de climas o estaciones frías son más tolerantes a la salinidad que los que se desarrollan en climas calientes o en los meses cálidos y secos. El clima en general parece afectar bastante más a los cultivos sensibles a la salinidad que a los tolerantes.

3 RECUPERACION DE SUELOS CON PROBLEMAS DE ENSALITRAMIENTO

En este capítulo se trata de los diferentes métodos recomendables para recuperar suelos ensalitrados, y de los procedimientos para monitorear los suelos en proceso de recuperación.

3.1 Generalidades

Puede decirse que cualquier suelo con problema de ensalitramiento, sin importar su grado de afectación puede ser recuperado, siempre que exista agua. El factor limitante en estos casos no es la tecnología, sino el costo de recuperación, ya que puede resultar más económico comprar terreno en otro lugar, destinar el suelo a otros usos o cambiar el tipo de explotación.

Como primera condición necesaria para recuperar un suelo con problemas de sales, es indispensable contar con un buen drenaje para poder realizar la lixiviación y salida de las sales. Es condición indispensable para eliminar las sales y propiciar los procesos de intercambio catiónico, que el agua pase a través del perfil del suelo por recuperar y que una vez que ha pasado sea evacuada fuera del área. Si esta condición no se cumple, el combate del ensalitramiento es prácticamente imposible, ya que no se asegura la eficiencia del lavado pues, como se sabe, las sales se mueven con el agua.

Para realizar una labor de recuperación de suelos con sales, es necesario conocer la superficie afectada en diferentes grados y los volúmenes de agua disponibles para eliminar las sales; en estos volúmenes deben considerarse los canales, los drenes y todas las fuentes superficiales y subterráneas existentes en el área. Otra información indispensable es la que se refiere a las profundidades del nivel freático, en base a lo cual se debe determinar si para recuperar el suelo es necesario construir una red de drenaje, puesto que si el agua no se elimina de la zona problema, tampoco se eliminan las sales.

Existen diferentes métodos para recuperar suelos con problemas de sales, entre los más comunes se tienen los métodos físicos, los biológicos, los eléctricos, los químicos y los hidrotécnicos. Todos estos métodos tienen como objetivos principales el mejorar la permeabilidad del suelo y propiciar el intercambio de calcio por sodio en el complejo de intercambio. De todos estos métodos, los eléctricos son los de menor aplicación.

Sin embargo, en general los métodos de recuperación no se utilizan en forma aislada, sino en forma combinada: los físicos, los químicos, los hidrotécnicos y a veces los biológicos. Esta combinación permite la eliminación eficiente de las sales.

La selección y aprovechamiento de ellos o de cada uno de estos

métodos requiere del conocimiento de las características estructurales de los suelos; del tipo y clase de sales, del lugar de las concentraciones mas altas, de las condiciones físicas del perfil, así como de la capacidad natural del drenaje.

3.2 Recuperación por métodos físicos

Estos métodos se aplican a los suelos salinos, salino-sódicos y sódicos, y consisten en el uso de maquinaria agrícola para mejorar las condiciones estructurales de los suelos.

3.2.1 Suelos salinos

En suelos salinos los métodos físicos dan un tratamiento mecánico del suelo, el cual puede ser un subsoleo, un arado profundo, aplicación de arena o inversión del perfil. Esto tiene el propósito de romper capas endurecidas, tales como pisos de arado y capas de carbonatos y sulfatos precipitados que impiden el paso del agua a través del perfil del suelo. En algunos casos se trata de mezclar materiales de diferentes características como arenas con arcillas y limos o bien poner en la parte superficial del suelo elementos como calcio, el cual se encuentra precipitado en capas más profundas.

El tratamiento mecánico consistirá en:

- a) Emparejar la topografía del terreno.
- b) Romper con implementos los espesores de arcilla calcáreos para mejorar la permeabilidad del suelo.
- c) Rastreo para uniformizar y romper los terrones.
- d) Emparejar con niveladora tipo Land-Plane mediante dos pasos para que el agua sea fácilmente aplicada.

3.2.2 Suelos salino-sódicos

En suelos salino-sódicos estos métodos consisten en dar un tratamiento mecánico al suelo que puede ser un subsoleo, un arado profundo, aplicación de arena o inversión del perfil. Esto se hace con el propósito de romper capas endurecidas, como pisos de arado, capas de carbonatos y sulfatos precipitados que impiden el paso del agua a través del perfil del suelo.

El aspecto físico de los suelos salino-sódicos antes de recuperarlos, se parece mucho al de los suelos salinos, pero en cuanto se ha lavado la mayor parte de las sales, se hace evidente el efecto perjudicial del alto PSI.

La secuencia de las labores culturales que se realizan en la recuperación es ligeramente distinta cuando los suelos salino-

sódicos tienen diferentes contenidos de sales:

a) Suelos salino-sódicos con contenidos salinos mayores de 20 dS/m.

b) Suelos salino-sódicos con contenidos salinos de 4 a 20 dS/m.

a) Cuando la conductividad eléctrica es mayor de 20 dS/m y el porcentaje de sodio intercambiable mayor de 15:

Cinceleo; barbecho; rastreo; emparejamiento; bordeo; canalización; aplicación de láminas de lavado hasta 20 dS/m; secado; y seguir aplicando agua y haciendo determinaciones de laboratorio hasta que la conductividad eléctrica llegue a 10 dS/m; siembra cuando la salinidad baje a 10 dS/m, con cultivos que admitan franjas separadas con bordos a nivel para lograr una inundación completa.

b) Cuando la conductividad eléctrica es de 4 a 20 dS/m y el porcentaje de sodio intercambiable mayor de 15:

Cinceleo; barbecho; rastreo; emparejamiento; aplicación de mejoradores químicos; bordeo; canalización; aplicación de láminas de lavado; determinaciones de laboratorio; siembra.

La recuperación de estos suelos es complicada porque es necesario tomar especiales medidas durante el lavado, ya que en ellos pueden llegar a formarse condiciones estructurales adversas después de que se lixivian o se precipitan las sales de calcio con el sodio intercambiable en la arcilla y degenerar en suelos sódicos.

En los suelos no salinos no sódicos, así como en el caso de suelos salino-sódicos, es necesario evitar una posterior salinización haciendo descender el nivel freático.

3.2.3 Suelos sódicos

El mejoramiento de la condición física de los suelos sódicos comprende el reacomodo y la agregación de las partículas del suelo, así como la substitución del sodio intercambiable. El reacomodo de las partículas del suelo para mejorar su condición física, se facilita mediante el proceso de mojado y secado del suelo y por la acción de las raíces de las plantas.

En los métodos físicos para recuperar un suelo sódico, la preparación del suelo y el tipo de mejorador seleccionado desempeñan un papel muy importante.

En estos suelos, cuando los porcentajes de arcilla son altos, se agudiza el deterioro estructural y la baja penetración del agua y las raíces, y en consecuencia la infiltración del agua es casi nula.

Con lo anterior, la penetración del agua es lentísima y el

intercambio de sales de los productos químicos difícilmente entra en función. Sin embargo, la preparación de estos suelos requiere de la utilización de implementos agrícolas más pesados y de arados de subsuelo que benefician la permeabilidad en un espesor de cuando menos 60 cm.

El problema se agudiza cuando la posición del estrato deteriorado se presenta a una profundidad mayor de 80 cm, en donde la penetración de los implementos de "subsuelo" normales no llegan a destruirlo.

Una práctica común para aumentar infiltración originada por el uso de aguas de baja salinidad, es labrar el suelo antes de cada riego, o cada dos riegos. La aradura más profunda favorece una mayor penetración del agua durante uno o dos riegos, después de los cuales la superficie del terreno vuelve a su condición original. Las araduras profundas se practican antes de las siembras o durante los periodos de reposo de los cultivos, cuando causan menos daños a las raíces de los cultivos perennes y, únicamente cuando los suelos se encuentran lo suficientemente secos como para favorecer su ruptura y la formación de terrones. Si las araduras se practican cuando los terrenos están mojados se pueden crear problemas de compactación, deformación de la estructura, aireación y permeabilidad.

Se obtienen mejores resultados preparando el terreno con bordos altos haciendo la siembra en la parte superior.

3.3 *Recuperación por métodos químicos*

ESTOS METODOS SE EMPLEAN PARA RECUPERAR SUELOS SALINO-SODICOS Y SODICOS.

Los métodos químicos consisten en agregar sustancias al suelo con la finalidad de solubilizar el calcio existente o agregarlo directamente en forma soluble, en caso de que éste no exista, para propiciar el intercambio catiónico y la substitución del sodio por calcio en el complejo de intercambio.

Existen varias sustancias que se usan como mejoradores, dependiendo de las características del suelo, de la velocidad deseada de la recuperación y de las limitaciones económicas o costo en el mercado por equivalente químico.

Entre las sustancias más comunes se tienen:

- a) Sales solubles de calcio: cloruro de calcio y el yeso.
- b) Acidos o sustancias formadoras de ácidos: azufre, ácido sulfúrico, sulfato ferroso, sulfato de aluminio y el polisulfuro de calcio.
- c) Sales de calcio de baja solubilidad: calcita y dolomita.

Selección del tipo de mejorador. La selección de un mejorador

químico puede estar determinada por el tiempo que requiere su reacción en el suelo. EN GENERAL LOS MEJORADORES MAS BARATOS ACTUAN MAS LENTAMENTE. Por ejemplo, hay datos que indican que la aplicación de 90-120 cm de agua de riego son suficientes para disolver de 10-12 ton/ha de yeso agrícola. El azufre aplicado a razón de 2.4 ton/ha sufre su oxidación completa en unas dos o tres semanas bajo condiciones favorables de humedad y temperatura; mayores aplicaciones requieren más tiempo para su completa oxidación.

La adición de mejoradores al agua de riego es más eficaz cuando el problema de infiltración se debe a una baja salinidad del agua (< 0.2 dS/m) o a un RAS alto en un agua de baja a moderada salinidad (1.0 dS/m). Los mejoradores como el yeso y el azufre, aplicados directamente al suelo, son preferibles y muchas veces más eficaces, cuando el agua tiene una salinidad entre moderada y alta (>1.0 dS/m) y un valor RAS elevado.

3.3.1 Suelos salino-sódicos

Las características de los suelos salino-sódicos más importantes para la selección del mejorador son: el contenido de carbonatos de calcio y el pH. Con base en estas características se pueden establecer tres grupos de suelos:

a) Suelos que contienen carbonatos de calcio. En este caso pueden utilizarse cualquiera de las sales solubles de calcio, las sustancias formadoras de ácidos y los ácidos. La aplicación de caliza será inútil.

b) Suelos que no contienen carbonatos de calcio y cuyo pH es mayor de 7.5. Para los suelos de este grupo no es recomendable usar ácidos o sustancias formadoras de ácidos, porque en el complejo de intercambio se fija hidrógeno, el pH del suelo se abate y puede causar otro tipo de problema, sobre todo en lo referente a la disponibilidad de nutrientes para las plantas. La aplicación de mejoradores ácidos o formadores de ácidos en suelos de los grupos b) y c) tiende a acidificar su reacción. Cuando la cantidad de mejorador ácido o formador de ácido es suficiente para volver muy ácido al suelo, la elección de mejoradores debe limitarse a las sales solubles de calcio.

c) Suelos que no contienen carbonato de calcio y cuyo pH es menor de 7.5. En estos suelos se puede usar roca caliza molida, no así el azufre y el ácido sulfúrico. Para la aplicación de los mejoradores ácidos, se requiere la presencia de calcio en los suelos y cuando el pH es mayor de 7.5, como en el primero y segundo grupo, la caliza tiene muy baja solubilidad lo que disminuye y retarda su aprovechamiento.

En el cuadro 12 se observa que a valores de pH mayores de 7.15, la solubilidad del carbonato de calcio se abate notablemente, por lo

que si se aplica caliza en un suelo del grupo b) su eficiencia es dudosa.

Cuadro 12 Solubilidad del carbonato de calcio a diferentes valores del pH

pH de la solución saturada con carbonato de calcio	Solubilidad del carbonato de calcio (me/l)
6.21	19.30
6.50	14.40
7.15	7.10
9.20	2.70
10.12	0.36

Fuente: Aceves, 1979.

Velocidad de reacción de los diferentes mejoradores. Los ácidos reaccionan inmediatamente al entrar en contacto con el suelo. La velocidad de reacción de las sales solubles de calcio depende de la solubilidad de las mismas; es mucho más soluble el cloruro de calcio que el yeso, ya que este último tiene una solubilidad en agua pura de 30 me/l. En suelos salinos esta solubilidad varía con la composición de la solución y en suelos sódicos con un pH menor de 8.5 la solubilidad puede ser de 35 a 40 me/l.

Como las reacciones en el suelo son de superficie, entre más pulverizado esté el mejorador más rápidamente reacciona. El contenido de humedad del suelo, la forma de aplicación y la pureza del producto también tienen influencia en la velocidad de la reacción.

3.3.1.1 Características y propiedades de los mejoradores

Yeso. De los mejoradores el yeso es el más utilizado por su bajo costo. Presenta la desventaja de ser una sal de baja solubilidad en agua y requiere cantidades considerables de producto para que sea efectivo.

Para la recuperación de suelos sódicos se esparce el yeso en forma granular y posteriormente se incorpora en el suelo, en cantidades que oscilan entre 5-30 ton/ha. Con frecuencia, las aplicaciones de yeso se fraccionan, iniciándose la recuperación con la capa arable y se continúa con las capas más profundas. La aplicación de 40 ton/ha se utiliza en suelos altamente sódicos y cuando se necesita una recuperación rápida con una sola aplicación de mejorador.

Dado que el problema de infiltración inducido por la calidad del agua de riego es un problema que se ubica en la capa superficial del suelo, las aplicaciones de yeso en cantidades relativamente pequeñas son más eficaces cuando se deja el mejorador en la superficie, o se incorpora en los primeros centímetros del suelo. Las aplicaciones ligeras y frecuentes son más eficaces para solucionar problemas de infiltración provocados por el agua, mientras que el aplicar una gran cantidad de yeso una sola vez es más eficaz para la recuperación de suelos sódicos. LAS APLICACIONES DE YESO DIRECTAMENTE AL AGUA REQUIEREN, POR LO GENERAL, MENOS YESO POR HECTAREA QUE LAS APLICACIONES AL SUELO.

El yeso en general, beneficia a la mayor parte de los suelos y causa daños a muy pocos cultivos, como son los cítricos.

En el mercado se le encuentra en condiciones naturales como "yesita", donde la pureza varía del 20-70%; también se presenta en cristales de yeso cuya pureza está arriba del 90%. Para que su uso se recomiende es necesario que su pureza sea del 70% como mínimo y pase el 90% por la malla No. 100.

Cloruro de calcio. Es altamente soluble y muy eficaz como mejorador. Su costo es elevado lo cual limita su utilización.

Sulfato ferroso y sulfato de aluminio. Cuando se aplican estos mejoradores la reacción es lenta, ya que primero se tiene que formar ácido sulfúrico, el cual después reacciona con el carbonato de calcio del suelo para formar yeso.

Azufre. Al igual que el yeso, el azufre es de los mejoradores más comúnmente usados por su bajo costo. Generalmente se usa en su forma natural con pureza del 50-90%. Es insoluble en el agua por lo que es necesario que el suelo contenga cuando menos el 1% de carbonato de calcio. Debe tener un medio de calor y humedad favorable. Este producto debe ser aplicado con gran finura (más del 75% que debe pasar por la malla No. 100). La reacción mencionada puede tardar en efectuarse dos o más semanas o hasta más de un año.

El azufre no es adecuado en aplicaciones con el agua de riego; no es muy eficaz para mejorar la infiltración del agua y es de reacción lenta. Tiene que ser oxidado por bacterias para formar ácido sulfúrico o sulfuros, que más tarde reaccionan con la caliza, liberando el calcio. El proceso de oxidación es lento, requiere suelos calientes, húmedos y bien aireados y demora por lo menos 30 días. Cuando el tiempo de espera para que se recupere un suelo no es un factor limitante, el azufre es un buen mejorador para recuperar los suelos calcáreo-sódicos. A causa del lento proceso de oxidación, el calcio liberado en el suelo superficial es lavado con los riegos, por lo que no es eficaz para mejorar la infiltración.

En el caso de las sustancias formadoras de ácido, éstas son de reacción lenta, sobre todo el azufre y el polisulfuro de calcio, ya

que primero se tiene que formar ácido sulfúrico a través de una oxidación microbiológica del azufre elemental que es insoluble en agua.

Acido sulfúrico. El ácido sulfúrico es un ácido fuerte y corrosivo que se aplica directamente al suelo en su máxima concentración, o bien con el riego, para reducir la concentración de bicarbonatos del agua y contribuir a la acidéz del suelo para liberar el calcio. Es eficaz para mejorar la infiltración, ya que no requiere ningún tiempo de oxidación. Las aplicaciones se efectúan antes de la siembra, seguidas de un lavado extensivo para lavar las sales del suelo y las sales liberadas por la reacción del ácido con la caliza.

El ácido tiene una pureza aproximadamente de 93%, es corrosivo y su uso no es recomendable cuando se conduce mediante el agua de riego por tubería de fierro. Reacciona rápidamente produciendo sulfato de calcio en presencia de carbonato de calcio. Se le atribuyen los inconvenientes de: tener un costo elevado; atacar a las partículas del suelo; ser de manejo delicado y producir quemaduras a los regadores cuando no se toman las debidas precauciones.

Sulfato de fierro y aluminio. Estas substancias son solubles en el agua. Su pureza es de 12% de azufre, cuando reacciona y forma yeso y óxidos de fierro que actúan como cementante y fuentes de fierro. Son de costo elevado y los óxidos de aluminio pueden dejar un efecto residual para las plantas.

Polisulfuro de calcio. Es un líquido de reacción fuertemente alcalina. Se puede encontrar con una pureza de 12-24% de azufre y de 5-6% de calcio. Se aplica preferentemente en el agua de riego, no es corrosivo y su penetración en el suelo es más objetiva.

Después de oxidarse e hidratarse forma el ácido sulfúrico, el cual al reaccionar con los carbonatos de calcio forman el sulfato de calcio; su oxidación es tan o más lenta que la del azufre y su contenido total es menor proporcionalmente que el aportado por el yeso.

Caliza y dolomita. Son compuestos de baja solubilidad; la caliza es más comúnmente utilizada y se obtiene de depósitos naturales originados por deposiciones marinas. La caliza se identifica como carbonato de calcio, debido a que es el constituyente de mayor proporción.

Algunos fertilizantes dejan un residuo ácido y contribuyen también a la liberación de calcio a través de su reacción ácida. El uso de estos puede evitar o retardar la sodificación de los suelos que resultaría de aplicar aguas sódicas ligeramente marginales.

3.3.1.2 Cantidad de mejorador por aplicar

La cantidad de mejorador por aplicar depende de la CIC del suelo, del PSI que se desea sustituir en el complejo de intercambio, del contenido de carbonatos y bicarbonatos solubles, de la pureza del mejorador, de la profundidad y superficie del suelo por recuperar y del volumen de agua disponible para disolver el mejorador.

Para calcular la necesidad de mejorador, conviene seguir esta secuencia:

1. Calcular los miliequivalentes que deben substituir al sodio adsorbido en el complejo coloidal, mediante la reducción del PSI hasta el nivel deseado, utilizando la siguiente fórmula:

$$Dm = (PSIi - PSIf) \times T \times Pe \times h \times Da/100 \quad (5)$$

Donde:

Dm = Dosis de mejorador en kg/ha.

PSIi= Porcentaje de sodio intercambiable inicial.

PSIf= Porcentaje de sodio intercambiable final.

T = Capacidad de intercambio catiónico, en meq/100 g de suelo.

Pe = Peso equivalente del mejorador, en unidades (mol).

h = Profundidad de suelo a mejorar (cm).

Da = Densidad aparente del suelo a mejorar (g/cc).

2. La cantidad de mejorador requerida por hectárea puede ser satisfecha con cualquier producto, siempre y cuando el cálculo se haga sobre la necesidad de combinarse con los miliequivalentes que estén presentes en el peso de una hectárea de suelo de un espesor determinado.

3. Los miliequivalentes de sodio intercambiable en el suelo se deben de considerar con base en una hectárea y en un espesor de suelo determinado. Debe considerarse que en los informes de análisis de laboratorio los miliequivalentes se indican para cada 100 gramos de suelo.

4. Dividir la cantidad de miliequivalentes por tonelada de diferentes mejoradores químicos de una pureza de 100%.

Más adelante en este inciso se presentará un ejemplo.

3.3.1.3 Forma de aplicación del mejorador

Los mejoradores pueden ser líquidos como el ácido sulfúrico y el polisulfuro de calcio, o sólidos como son las sales solubles e insolubles de calcio y los sulfatos de fierro y aluminio, y el azufre.

Los mejoradores sólidos se deben aplicar directamente en el suelo lo

más finamente pulverizados que sea posible, al voleo o con una sembradora de trigo.

La aplicación en forma de polvo se hace superficialmente y su incorporación al suelo se lleva a efecto bajo el siguiente criterio:

1. Si la sodicidad del suelo se presenta en un espesor de 0-30 cm, solamente se hace un paso de rastra.
2. Si la sodicidad del suelo se presenta en un espesor de 30-60 cm de profundidad, se aplica la mitad del mejorador en la superficie y después se voltea en el suelo mediante una labor de arado para que quede abajo y sea arrastrado a más profundidad con el agua de riego. En seguida se aplica el complemento del mejorador químico y se deja en la superficie incorporándolo con un rastreo para que se infiltre con el agua en los primeros 30. cm.

Las sales solubles de calcio pueden aplicarse en el agua de lavado a la entrada de la parcela. Lo mismo se debe hacer con el ácido sulfúrico y el polisulfuro de calcio, teniendo cuidado de controlar la dosificación, de tal forma que la cantidad aplicada esté de acuerdo con el volumen de agua usado, considerando que el agua no va a mojar más allá de la superficie por recuperar.

En el caso de la aplicación de ácido, se recomienda que se haga en forma intermitente en láminas de agua pequeñas (10 cm) poniendo un chorro de ácido directamente en la regadera de la parcela. Con el polisulfuro de calcio se sigue el mismo procedimiento. Entre mejor sea la distribución del mejorador, tanto en superficie como en profundidad, más eficiente será la recuperación del suelo.

3.3.1.4 Volumen de agua necesario para disolver el mejorador

Antes de proceder a la aplicación del mejorador, se debe saber si se cuenta con los volúmenes de agua necesarios para disolverlo. Esta consideración es muy importante ya que en muchas ocasiones se aplica el mejorador al suelo y no se cuenta con el agua necesaria para disolverlo.

Por ejemplo, si para reducir el PSI de 23 a 6 en una hectárea, son necesarios 280.55×10^6 miliequivalentes (24.123 ton/ha) de mejorador por hectárea, supóngase que el mejorador por utilizar es yeso comercial con 70% de pureza, cuya solubilidad determinada en el laboratorio es de 30 me/l. El volumen de agua necesario para disolver el yeso se calcula con la ecuación:

$$VAN = \frac{NMH}{SM} \quad (6)$$

Donde:

VAN= Volumen de agua necesario (l)
 NMH= Necesidad de mejorador por hectárea (me/ha)
 SM = Solubilidad del mejorador (me/l)

$$\text{VAN} = \frac{280.55 \times 10^6 \text{ me/ha}}{30 \text{ me/l}} = 9' 351 667 \text{ litros;} = 93.5 \text{ cm de lámina}$$

Para auxiliarse en los cálculos de NMH y poder calcular el VAN, se presenta en el cuadro 13 los me/ton de los mejoradores más comunes. Si se obtiene la dosis o NMH en kg/ha, se puede transformar estas unidades en me/ha.

Cuadro 13 Contenido de me/ton de mejoradores

Nombre del producto	me/ton de mejorador
Cloruro de calcio	18.0 x 10 ⁶
Yeso	11.6 x 10 ⁶
Azufre	62.5 x 10 ⁶
Acido sulfúrico	20.4 x 10 ⁶
Sulfato ferroso	7.2 x 10 ⁶
Sulfato de aluminio	9.0 x 10 ⁶
Polisulfuro de calcio	20.0 x 10 ⁶
Carbonato de calcio	20.0 x 10 ⁶

Fuente: Aceves, 1979.

Cuando la conductividad eléctrica es mayor de 20 dS/m, es difícil calcular la cantidad de mejorador que económicamente deberá aplicarse por el bloqueo o interacción del calcio y sodio solubles. Por lo anterior, se recurre al lavado para disminuir los contenidos de sales hasta un nivel en que no sea afectada la permeabilidad.

En suelos con altos contenidos de sales (más de 20 dS/m), aunque el PSI sea muy alto, la permeabilidad es buena cuando el calcio y el magnesio permanezcan altos o cuando las cantidades de cloruros sean considerables.

El yeso es un constituyente natural de los suelos, por lo que para su aplicación debe tenerse en cuenta este factor, ya que puede presentarse en niveles más elevados que los aplicados. Si es necesario hacer las aplicaciones, se procederá a efectuarlas cuando los contenidos salinos sean menores de 20 dS/m.

De acuerdo con experiencias de De La Peña, realizadas en diferentes lavados, es factible lograr una recuperación casi total sin agregar

mejoradores químicos mientras exista una relación $(Ca + Mg)/Na > 1$ o $Na/(Ca + Mg) < 3$.

El cálculo de la necesidad de mejoradores para estos suelos se realizará cuando la salinidad decrezca con los lavados, disminuyan los PSI y con ello el cálculo de ton/ha.

Ejemplo:

Para calcular las necesidades de mejorador se utilizará la ecuación (5) ya señalada anteriormente:

$$Dm = \frac{(PSI_i - PSI_f) \times T \times Pe \times h \times Da}{100}$$

Si se supone que las características del suelo por mejorar son las siguientes:

PSI_i = 23
PSI_f = 6
T = 40 me/100 g de suelo
Da = 1.1 g/cm³
h = 30 cm

Al sustituir valores:

$$Dm = \frac{(23 - 6) \times 40 \times 86 \times 30 \times 1.1}{100} = 19\,298.4 \text{ kg/ha}$$

Los valores del peso equivalente que contienen los diferentes productos comerciales se muestran en el cuadro 14. Esta información se utiliza para aplicar la ecuación de dosis de mejorador.

Como los mejoradores calculados están con el 100% de pureza, tendrá que multiplicarse la cantidad obtenida por el coeficiente C de corrección indicado en el cuadro anterior.

Las cantidades de producto comercial que resultarán al confrontar esta corrección con los datos de este ejemplo, se presentan en el cuadro 15.

3.3.1.5 Costo por hectárea

El costo por hectárea de los diferentes mejoradores, considerando el grado de pureza, puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$CMH = \frac{NMH \times PTM}{meT \times PM} \quad (7)$$

Cuadro 14 Valores del peso equivalente de los principales mejoradores. Coeficientes de corrección por eficiencia de intercambio

Mejorador	Peso equivalente (Pe)	Coeficiente de corrección (C)
Yeso	86	1.25
Cloruro de calcio	73	1.10
Azufre	16	1.25
Polisulfuro de calcio	100	1.25
Acido sulfúrico	49	1.10
Sulfato de hierro	139	1.10
Sulfato de aluminio	111	1.10
Caliza (carbonato de calcio)	50	1.25

Fuente: Aceves, 1979.

Donde:

CMH= Costo del mejorador por hectárea (pesos)

NMH= Necesidad de mejorador por hectárea (me/ha)

PTM= Precio de la tonelada del mejorador (pesos/ton)

meT= Miliequivalentes de mejorador químicamente puro por tonelada (me/ton)

PM = Pureza del mejorador (%)

Ejemplo:

Se desea aplicar 280.55×10^6 me/ha de yeso (24.123 ton/ha), con una pureza de 80% y un precio por tonelada de \$26,500:

$$CMH = \frac{280.55 \times 10^6 \times 26,500}{11.63 \times 10^6 \times 0.8} = \$ 799,416.7$$

3.3.2 Suelos sódicos

LOS SUELOS SODICOS SON SIN DUDA LOS MAS DIFICILES DE RECUPERAR Y MAS CAROS; se requiere proporcionar calcio soluble en el suelo o bien aumentar la solubilidad del calcio ya existente, con el fin de mejorar la permeabilidad del suelo.

Si el agua de riego incluye cantidades apreciables de calcio soluble,

Cuadro 15 Dosis de mejorador que resultan de aplicar los coeficientes de corrección

Mejorador	Dosis de mejorador (Dm) kg/ha	Dosis de mejorador corregida kg/ha
Yeso	19,298.4	24,123.0
Cloruro de calcio	16,381.2	18,019.3
Azufre	3,590.4	4,488.0
Polisulfuro de calcio	22,440.0	28,050.0
Acido sulfúrico	10,995.6	12,095.2
Sulfato de hierro	31,191.6	34,310.8
Sulfato de aluminio	24,908.4	27,399.2
Caliza	11,220.0	14,025.0

puede ser utilizada para recuperar suelos sódicos, simplemente regando cultivos tolerantes por varios años y adoptando prácticas culturales que favorecen la percolación profunda (drenaje y aplicación de materia orgánica).

La recuperación de suelos altamente sódicos en un año puede requerir hasta 40 ton/ha de yeso y un lavado extensivo para lavar las sales sódicas resultantes. El éxito o fracaso de la recuperación de suelos sódicos depende, en cierto grado, de la infiltración del agua y de la cantidad de agua que penetra en el suelo, además del contenido de calcio en el agua y de la gravedad del problema. Las labranzas profundas estimulan y favorecen la infiltración del agua y aceleran el proceso de recuperación, ya sea que se utilicen o no los mejoradores.

El proceso de recuperación de suelos sódicos tiene como base desplazar del complejo coloidal del suelo al ión "sódico", ya sea agregando calcio o removiendo el que ya existe en el suelo.

En estos suelos, se agudiza el deterioro estructural cuando los porcentajes de arcilla son altos, creando tipos de estructuras que impiden la penetración del agua y raíces, limitando con ello el espesor de suelo donde se desarrolla el sistema radical de las plantas.

Las cantidades de mejorador que se requieren aplicar para recuperar un espesor de suelo determinado, están en función del tipo de mejorador. Esto da por resultado que se tengan que aplicar, por ejemplo, 42 ton/ha de yeso o 24 ton/ha de ácido sulfúrico, para recuperar un espesor de 0.60 m.

Cantidades como éstas hacen caro el proceso de recuperación de un suelo sódico; además de que la recuperación se convierte en un trabajo lento, dado que solamente se aplican las dosis correspondientes a un espesor de 30 cm/año como máximo.

Se hace la observación que en trabajos conducidos en nuestro país (Chena, 1958), se encontró que al combinar el yeso con el ácido sulfúrico hubo un aumento en la eficiencia del yeso, si se compara cuando éste se aplicó solo.

EL PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA RECUPERAR POR METODOS QUIMICOS LOS SUELOS SALINO-SODICOS Y SODICOS ES SIMILAR.

El cálculo del mejorador por aplicar se hace con las siguientes bases:

- a) El valor mínimo o límite deseado a que deberá bajarse el PSI
- b) El espesor de suelo que tendrá que ser mejorado
- c) El tipo y clase de mejorador que debe aplicarse

El valor mínimo hasta donde debe disminuirse el PSI dependerá de la textura así como del tipo de arcilla. Para los casos donde se tiene un 45% de arcilla a través de un metro de profundidad se recomienda un valor mínimo de PSI de 5; para tener una mayor seguridad en la recuperación. Si el caso fuera un contenido de arcilla de 30-40%, el valor seleccionado de disminución del PSI sería 10.

El espesor de suelo por corregir dependerá de la profundidad radical del cultivo por establecer, así como de las condiciones químicas y del estado estructural que presente el suelo.

Generalmente las cantidades requeridas de mejorador son muy altas y económicamente muy caras, si se mejora todo el espesor dañado, y si éste es mayor de 0.60 m, por lo que se toma solamente una parte del mismo para abaratar la operación.

Es norma calcular la cantidad requerida para el espesor dañado y aplicarlo en varios años, mejorando primeramente un espesor que sea suficiente para alojar el sistema radical. Por lo general se acostumbra agregarlo para espesores de 30-60 cm por año o por cultivo.

3.4 *Recuperación por métodos biológicos*

Consistirán en hacer uso de la materia orgánica (estiércoles, abonos verdes, rastrojo, etc.) y plantas tolerantes a las sales para propiciar una mejora de la permeabilidad del suelo. El efecto benéfico de la vegetación (árboles, arbustos, cultivos, etc.) se debe a la acción mecánica de sus raíces, la cual incrementa la permeabilidad y conductividad hidráulica. En el caso de plantas tolerantes, sus raíces dejan conductos por los cuales el agua

circula mejor en el suelo. Además, la materia orgánica o los abonos verdes liberan nutrimentos que estimulan el desarrollo de las plantas y aceleran el proceso de recuperación.

Se seleccionarán cultivos semitolerantes para establecerse en la última fase de lavado, en la que las conductividades eléctricas alcanzarán valores hasta de 20 dS/m. Los cultivos usuales para estos fines son el trigo, la cebada y el arroz que se sembrarán utilizando el método de riego por inundación. Debe considerarse que al sembrar cultivos en la última fase de recuperación, esto es, cuando la CE= 20 dS/m, permite ahorros de agua, ya que en este valor de CE la eficiencia de lavado se hace mínima (la eficiencia de lavado es la cantidad de sales desplazadas por unidad de volumen de agua) al reducir lavados, costos y posibilita obtener algún rendimiento; además de que los cultivos, entre otras ventajas, absorben sales aunque en mínimo grado.

No todos los cultivos responden de igual manera a la salinidad: algunos producen rendimientos aceptables a niveles altos de salinidad y otros son sensibles a niveles relativamente bajos.

En este método de recuperar suelos debe de considerarse la rotación de cultivos y la siembra de especies como la alfalfa y pastos; estos últimos para establecer praderas, que ayudan a reducir la humedad en suelos con manto freático elevado. También las plantas establecidas antes o después de la recuperación impiden que el agua se evapore directamente de la superficie del suelo, dejando las sales acumuladas.

Cuando los residuos de los cultivos se dejan sobre la superficie o se incorporan en el suelo superficial de terrenos rugosos y con terrones, mejoran la penetración del agua en los suelos sódicos y en los terrenos regados con aguas de baja salinidad de RAS alto. Tanto los residuos superficiales como el sistema radical de los cultivos mantienen la porosidad del suelo mediante grietas y vacíos que favorecen la penetración del agua.

Mientras que los residuos fibrosos y de difícil descomposición, como la cebada, maíz, trigo, arroz y sorgo, mejoran la infiltración, los residuos de legumbres y hortalizas generalmente no producen cambio alguno. Los residuos más eficaces son los que no se descomponen con rapidez y mantienen la porosidad del suelo mediante grietas y vacíos.

Para que la incorporación sea efectiva se necesitan grandes cantidades de residuos. Por ejemplo, de estiércol se han utilizado cantidades que varían de 40-400 ton/ha. Para que las aplicaciones de residuos sean eficaces, se necesitan cantidades equivalentes al 10-30% del volumen del suelo en los primeros 15 cm de terreno (de 195 a 585 ton/ha).

A largo plazo la incorporación de residuos orgánicos a los suelos le permiten mantener su estructura y devolverle algunos de los nutrientes utilizados por los cultivos. Sin embargo, la aplicación de materia orgánica en grandes cantidades (400 ton/ha) también puede traer consigo consecuencias negativas, como desequilibrios nutricionales, aumento de salinidad producido por residuos con sales, falta o exceso de nitrógeno provocados por ciertos residuos (estiércol) y toxicidad (cloro y potasio provenientes de la cascarilla de arroz).

3.5 Recuperación por métodos hidrotécnicos

EN EL CASO DE SUELOS SALINOS, SU RECUPERACION SE EFECTUA MEDIANTE LA APLICACION DE AGUA UNICAMENTE y el volumen necesario se calcula con base en la cantidad de sales que se desea desplazar de una profundidad determinada, generalmente relacionada con la profundidad radical del cultivo.

3.5.1 Suelos salinos

La disminución del contenido de sales en suelos de este grupo se lleva a efecto preferentemente mediante la aplicación de diferentes "láminas de lavado", sin utilizar mejoradores químicos, aprovechando que los contenidos de calcio son dominantes sobre el sodio.

Las sales sólo pueden transportarse fuera del suelo con el agua de riego, por lo que la eficacia en todo proceso de recuperación de un suelo con problemas de sales dependerá en gran parte de dos aspectos básicos: el lavado de sales y el drenaje.

La finalidad del lavado del suelo es poner en solución las sales que causan problemas a los cultivos y transportarlas fuera de la zona radical. El agua que se utilice en el proceso de lavado debe ser de buena calidad para que tenga mayor poder de solubilidad; pero también pueden usarse aguas salinas, por ejemplo, de drenaje, especialmente cuando son aguas ricas en carbonatos, cloruros y sulfatos de calcio y magnesio y se trata de recuperar suelos sódicos.

Las aguas de lavado más convenientes son aquellas que contienen fuertes cantidades de calcio, con conductividades eléctricas de 1,000 a 2,500 micromhos/cm ó más. Conviene, si hay posibilidad, regarlas con aguas saladas para que adquieran una condición salina o salino-sódica e iniciar un mejoramiento en estas condiciones, en forma más rápida y efectiva.

El proceso que se sigue para el lavado de los suelos es como sigue:

a) Construir bordos a nivel, trazados para uniformizar y al mismo tiempo para control del tirante o lámina de agua. Con estos bordos

se formarán melgas o cuadros cuyos bordos no serán menores de 30 cm y de 12 a 15 metros por lado. Entre el bordo más alto y el más bajo de un cuadro no debe haber una equidistancia vertical mayor de 3 cm. Si el terreno lo permite podrán construirse melgas en lugar de cuadros. Las superficies no deberán ser mayores de 0.25 ha. La época de aplicación más conveniente es cuando la evaporación es mínima

b) Aplicación de láminas parciales de aproximadamente 20 cm hasta bajar la conductividad eléctrica a niveles menores de 10 dS/m en cualquier punto del terreno.

c) La efectividad en tiempo para lograrlo dependerá de la forma de aplicación y de la calidad del agua utilizada para el lavado con respecto a los contenidos y dominancia del calcio y magnesio sobre el sodio.

3.5.1.1 Estimación de la lámina total de lavado para suelos salinos

Existen varias fórmulas empíricas para determinar las láminas de lavado necesarias para abatir la salinidad del suelo hasta un nivel deseado, según el cultivo de que se trate. De todas ellas, la que mejor describe el proceso del desplazamiento de las sales con diferentes cantidades de agua es la fórmula propuesta por Volobuyev. Esta fórmula es la que más se ha utilizado en México.

Tiene la siguiente estructura:

$$L(\text{cm}) = \alpha \log \frac{CE}{CE_0} \quad (8)$$

Donde:

- L = Lámina de lavado en cm, hasta un metro de profundidad
- CE = Contenido inicial de sales en valores de CE en dS/m
- CE₀ = Valores permisibles de CE en dS/m en el extracto de solución del suelo después del lavado
- α = Coeficiente cuyo valor depende del contenido de cloruros y de la textura del suelo.

Los valores de alfa para utilizar la fórmula de Volobuyev, se muestran en el cuadro 16.

Cuadro 16 Valores de alfa para diferentes contenidos de cloruros y texturas de suelo

Textura	Contenido de cloruros en % con respecto a aniones			
	60 a 40	40 a 20	20 a 10	menos de 10
Pesada	122	132	142	178
Media	92	102	112	148
Ligera	62	72	82	118

Fuente: De la Peña, S/F.

La lámina que resulta de esta fórmula se recomienda aplicarla varias veces (cuadro 17):

Cuadro 17 Láminas de riego recomendadas por aplicación, al utilizar la fórmula de Volobuyev

Textura	Lámina (cm)
Ligera	7 - 9
Media	9 - 11
Pesada	11 - 15

Fuente: De la Peña, S/F.

Los intervalos entre aplicación y aplicación serán de 3 - 8 días, siendo más cortos a principios del lavado y cuando los suelos tienen un alto contenido de sales. Para suelos pesados y al final del lavado los intervalos no deberán ser de más de 8 días.

En caso de que se tengan niveles freáticos elevados (a menos de 2.0 o 2.5 m) deberán construirse drenes para evitar un eventual ascenso del manto freático. PARA LOGRAR UN LAVADO EFECTIVO, ES NECESARIO CONTAR POR REGLA GENERAL, CON UN SISTEMA DE DRENAJE (ver Anexo Técnico. *Freatimetría* de esta misma serie).

En trabajos conducidos en el distrito de riego 041 en el río Yaqui, Sonora, utilizando la fórmula de Volobuyev, se concluyó que para dosificar la lámina de agua calculada para lavar un suelo, en la primera aplicación conviene hacerlo con la mayor cantidad posible, puesto que la eficiencia de lavado es mejor que cuando se utilizan cantidades más pequeñas. Después de la primera aplicación, las siguientes deben hacerse con la menor cantidad posible en condiciones prácticas; el número de aplicaciones dependerá de las condiciones particulares del suelo, tanto físicas como químicas.

Aceves (1974), al hacer referencia a la fórmula de Volobuyev, indica que ésta presenta varias limitaciones, como son que el coeficiente α está dado sólo en función del contenido de cloruros del suelo y de la textura, sin considerar la influencia que pueden tener las otras sales y las incorporadas con el agua de riego sobre el comportamiento físico y químico de los suelos que se someten a lavado. Por otro lado, la fórmula considera como profundidad de lavado un metro y, como se sabe, en el lavado de sales a diferentes espesores de suelo no existe linealidad, lo que indica que si, por ejemplo, un espesor de 10 cm de suelo se lava con 7 cm de lámina de agua, 20 cm de espesor no se lavarán con 14 cm de agua, sino con menos, ya que cuando el agua pasa de un espesor a otro sigue lavando sales.

Por lo anterior, Aceves propone la fórmula siguiente, donde el valor de alfa se ha puesto en función de la calidad química del agua de lavado, del rango de salinidad de los suelos y del espesor del suelo por lavar.

$$L = 9.0 (P)^{0.75} (70 - C_{Er}/C_{Ei} - C_{Er})^{0.3} \log C_{Ei}/C_{Ef} \quad (9)$$

Donde:

L = Lámina de agua para lavado, en cm
P = Profundidad de suelo por lavar, en cm
C_{Er} = Conductividad eléctrica del agua de lavado en dS/m a 25° C
C_{Ei} = Conductividad eléctrica inicial
C_{Ef} = Conductividad eléctrica final del suelo o permisible para un cultivo por establecer, en dS/m a 25 °C

Ejemplo de aplicación de las fórmulas de Volobuyev y de Aceves:

Calcular la lámina de lavado de un suelo con un contenido de sales promedio, que ha sido valorado en el extracto de saturación en 80 dS/m, el cual se desea bajar a un espesor de 100 cm de suelo de textura arcillosa o pesada, es decir, a 4 dS/m que es tolerante para el cultivo de soya (cuadros 10 y 11). El porcentaje de cloruros en el espesor del suelo sobre los demás aniones es de 42%.

Fórmula de Volobuyev:

CE = 80 dS/m (antes)
CE_o = 4 dS/m (después)
 α = 122 de acuerdo con el cuadro 16

$$L = \alpha \log \frac{CE}{CE_o} ; = 122 \log \frac{80}{4} ; = 122 \times 1.3010 ; = 158.72 \text{ cm}$$

Al utilizar la fórmula de Aceves con los mismos datos, se tiene:

P = 100 cm; C_{Ei} = 80 dS/m; C_{Er} = 0.350 dS/m; C_{Ef} = 4 dS/m

$$L = 9.00(P)^{0.75} (70 - C_{Er}/C_{Ei} - C_{Er})^{0.3} \log C_{Ei}/C_{Ef}; =$$

$$L = 9.00(100)^{0.75} (70 - 0.350/80 - 0.350)^{0.3} \log 80/4;$$

L = 355 cm, que es la lámina requerida para lavar 100 cm de suelo.

Como se observará, hay una gran diferencia entre las láminas calculadas con una y otra fórmulas. Si se considera que existen restricciones de agua en general en los distritos de riego, sobre todo en los de bombeo, y considerando que existe mayor experiencia en México con la aplicación de la fórmula de Volobuyev, se observa que esta fórmula debería utilizarse para la recuperación de suelos ensalitrados, ya que se obtienen menores láminas de lavado que con la fórmula de Aceves. No se considera que sea limitante el que la fórmula de Volobuyev está diseñada para lavar un metro de espesor de suelo, ya que ésta es la profundidad de exploración de las raíces de la mayoría de los cultivos.

3.5.2 Suelos salino-sódicos

La recuperación de estos suelos es complicada porque es necesario tomar medidas especiales durante el lavado, ya que en ellos pueden llegar a formarse condiciones estructurales adversas después de lixiviarse o precipitarse las sales de calcio con el sodio intercambiable en la arcilla y degenerar en suelos sódicos.

LA LAMINA DE LAVADO PARA SUELOS SALINO-SODICOS SE CALCULA DE LA MISMA MANERA QUE PARA SUELOS SALINOS.

En la aplicación del riego conviene utilizar aguas con calcio; si esto no es posible, el mejoramiento total necesita un mayor número de aplicaciones de láminas de lavado. Durante los lavados, cuando la CE decrece a menos de 10 dS/m, se recomienda vigilar los índices del pH, debido a que en este límite se pueden sobrepasar los valores y hacer perceptibles los cambios adversos estructurales por el incremento sódico. Si ello sucede, se recomienda suspender los lavados para hacer las determinaciones químicas y calcular las necesidades de mejoradores.

En el proceso de recuperación de un suelo salino-sódico, conviene considerar las experiencias dadas por De la Peña, en el sentido de que los suelos que presenten CE mayores de 30 dS/m, podrán ser lavados sin tener que efectuarse análisis de laboratorio.

La efectividad y tiempo que requieren los lavados dependerán de la calidad del agua de riego en cuanto a contenidos de calcio y magnesio sobre el sodio se refiere y también en cuanto al drenaje y al nivel del manto freático.

Su forma de aplicación es importante debido a que se obtienen resultados más rápidos cuando se lleva a efecto en láminas de 15-25

cm y a intervalos, con el fin de conservar la humedad del suelo entre 60-70% de la humedad aprovechable. Se debe preferir la aplicación del agua por medio de melgas o cuadros limitados con bordos a nivel.

Cuando los contenidos de sales están por arriba de los 20 dS/m, aproximadamente se requieren 1.5 cm de lámina de lavado por cada decisiómen que se requiere disminuir. En suelos donde la CE es menor de 20 dS/m, la cantidad de agua varía de acuerdo con el sodio que debe ser reemplazado, es decir, con los volúmenes de agua requeridos para disolver el mejorador y con la presencia o ausencia de calcio en las aguas que se utilizan en el lavado.

Cuando se alcanzan valores de menos de 10 dS/m en los primeros 50 cm, es posible iniciar la explotación agrícola con cultivos medianamente tolerantes a las sales.

Establecido el cultivo, es importante mantener al suelo con un alto porcentaje de humedad durante su desarrollo para disminuir los efectos de la presión osmótica.

La ventaja que se obtiene al aumentar la eficiencia de sustitución del sodio intercambiable, por efecto del lavado previo, puede ser eliminada por la disminución en permeabilidad que generalmente sucede con el lavado de un suelo salino-sódico. La aplicación de mejoradores, antes o después del lavado para eliminar sales solubles, dependerá, por lo tanto, de las características de permeabilidad.

Excepto cuando se aplica azufre, los suelos salino-sódicos deben lavarse inmediatamente después de la aplicación del mejorador, porque el lavado lo disuelve y transporta hacia abajo, eliminando también las sales solubles de sodio que se forman a consecuencia del intercambio catiónico. Todo suelo que ordinariamente recibe azufre no debe lavarse hasta después de un tiempo conveniente, para dar oportunidad a que se oxide este elemento y se forme yeso, pero el suelo deberá mantenerse húmedo porque la humedad es esencial para el proceso de oxidación microbiana.

3.6 Monitoreo de los suelos en proceso de recuperación

EL PROCESO DE RECUPERACION DE SUELOS ES TARDADO Y ADEMAS COSTOSO; por esta razón se deben realizar constantemente análisis químicos a un suelo que se está recuperando, para conocer el avance del proceso y, además, para ver la posibilidad de establecer cultivos tolerantes antes de la rehabilitación total.

Tanto en los suelos que se están recuperando como en los que se encuentran bajo explotación, es necesario verificar periódicamente la CE, pH y PSI.

La conductividad eléctrica es importante para determinar la eficiencia del lavado o la acumulación de sales, sobre todo el pH cuando se aplica al suelo un ácido o una substancia formadora de ácido, ya que permite verificar su grado de oxidación en el suelo. El PSI lo es también para ver si se está dando el proceso de intercambio de sodio por calcio en el complejo de intercambio.

La determinación de las variaciones de la profundidad del nivel freático son fundamentales durante los procesos de lavado de suelos, ya que esto permite saber si habrá o no salinización secundaria por redistribución de las sales debido a ascenso capilar.

En suelos salinos se requiere efectuar muestreos de suelo cada dos o tres aplicaciones de agua, para hacer análisis en el laboratorio y controlar con ellos la lixiviación de los contenidos salinos, mediante la forma de gráficas (lámina 11).

Como resultado de las determinaciones de laboratorio, cuando se alcancen valores de menos de 10 dS/m en los primeros 50 cm, es posible iniciar la explotación agrícola con cultivos medianamente tolerantes a las sales.

Para el caso del PSI, el valor al que debe reducirse dependerá de la textura, del tipo de arcilla y del cultivo. Si el contenido de arcilla es mayor al 45%, es recomendable bajar el valor del PSI al 5%; si la arcilla representa de 30-40%, el valor seleccionado del PSI será de 10%. En el cuadro 18 se presenta una relación de cultivos indicando su tolerancia relativa al PSI, lo cual da elementos para tomar la decisión sobre qué tanto reducir el PSI.

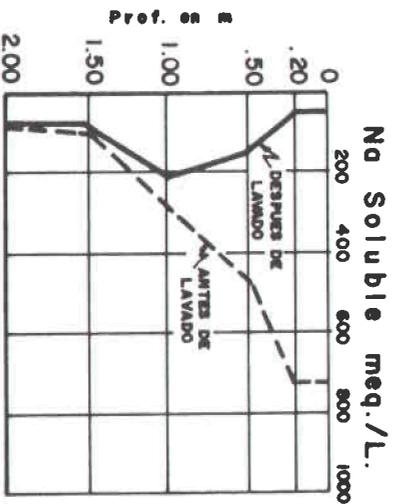
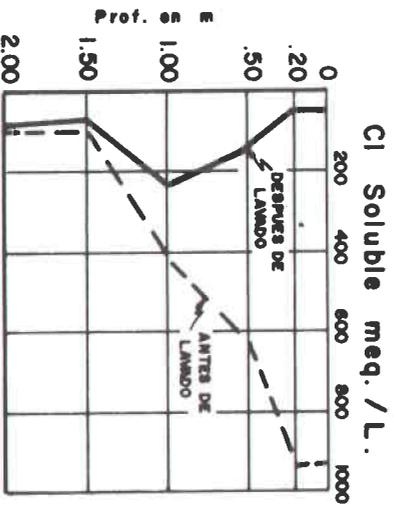
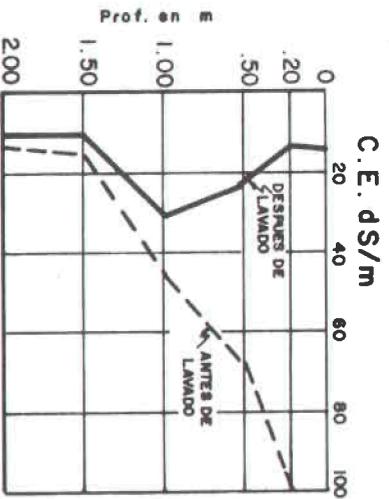
Es necesario llevar un control en el laboratorio de los decrementos de salinidad de la relación del calcio y magnesio contra el sodio y de los diferentes cationes y aniones, sobre todo cuando la conductividad eléctrica desciende cerca de los 10 dS/m en un espesor de suelo no menor de 50 cm.

Cuando esto ocurra, se suspenderán los lavados para iniciar los cultivos después de verificar el movimiento de sales en atención a las gráficas indicadas en la lámina 11, y haber comprobado que sus sales a los 0.50 m han descendido a niveles tolerables (menos de 12 dS/m).

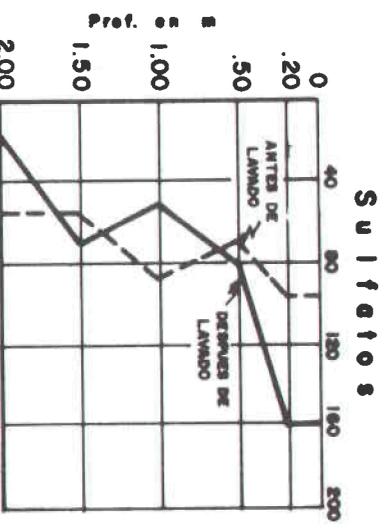
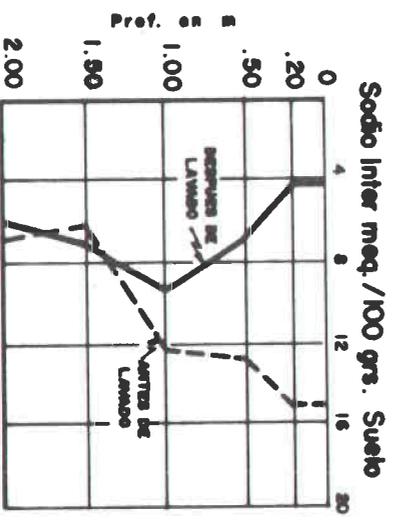
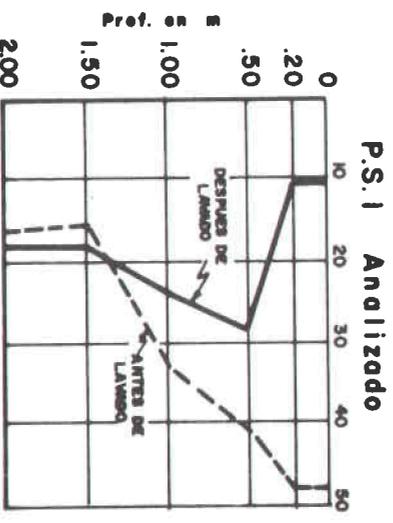
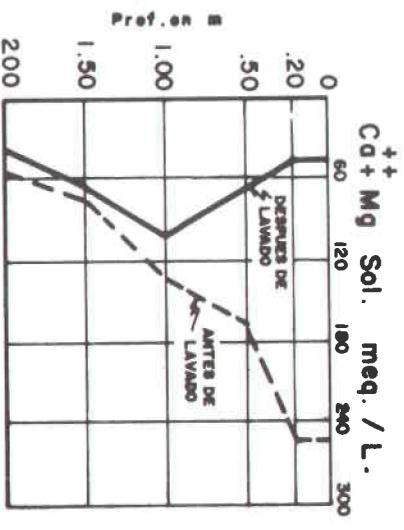
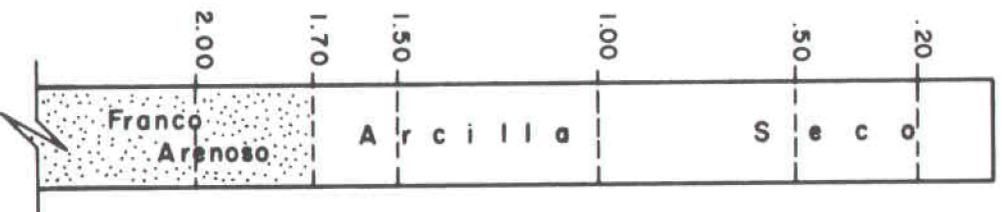
Para disminuir el número de análisis es útil hacer una clasificación de las plantas silvestres que crecen durante el proceso de lavado y relacionar la disminución de la salinidad que va quedando en el suelo con las plantas que van germinando. Deben observarse las primeras plantas silvestres resistentes a la salinidad.

Al respecto, se deben tomar ciertas precauciones en el uso de plantas indicadoras como una señal de la evolución en la recuperación de un suelo con sales. Algunas especies de plantas que crecen en regiones semiáridas son indicadoras muy deficientes aun

Lámina II Control químico entre los lavados de suelos salinos y salinos sódicos



PERFIL DE POZO



Cuadro 18 Tolerancia relativa de algunos cultivos al sodio intercambiable

Sensibles PSI < 15 ¹	Semitolerantes 15 < PSI < 40	Tolerantes PSI > 40
Aguacate (<i>Persea americana</i>)	Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)
Frutas caducifolias	Trébol ladino (<i>Trifolium repens</i>)	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)
Nueces	Pasto miel, grammalote (<i>Paspalum dilatatum</i>)	Betarraga hornamental, Remolacha azucarera (<i>Beta vulgaris</i>)
Frijoles (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Festuca alta (<i>Festuca arundinacea</i>)	Gramma de bermuda (<i>Cynodon dactylon</i>)
Algodón (germinación) (<i>Gossypium hirsutum</i>)	Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)
Maíz (<i>Zea mays</i>)	Mijo (<i>Pennisetum typhoides</i>)	Hierba de pará (<i>Brachiaria mutica</i>)
Chícharo (<i>Pisum sativum</i>)	Caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	Gramma rhodes (<i>Chloris gayana</i>)
Toronjo (<i>Citrus paradisi</i>)	Trébol de alejandría (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	Agropiro crestado (<i>Agropyron cristatum</i>)
Naranja (<i>Citrus sinensis</i>)	Trébol dulce (<i>Melilotus parviflora</i>)	Agropiro alargado (<i>Agropyron elongatum</i>)
Durazno (<i>Prunus persica</i>)	Mostaza (<i>Brassica juncea</i>)	Gramma karnal (<i>Diplachna fusca</i>)
Mandarina (<i>Citrus reticulata</i>)	Avena (<i>Avena sativa</i>)	
Frijol chino (<i>Phaseolus aureus</i>)	Rábano (<i>Raphanus sativus</i>)	
Lentejas (<i>Lens culinaris</i>)	Arroz (<i>Oriza sativa</i>)	

Cacahuete (<i>Arachis hypogaea</i>)	Centeno (<i>Secale cereale</i>)	
Garbanzo (<i>Cicer arietinum</i>)	Gramma de centeno (<i>Lolium multiflorum</i>)	
Caupíes (<i>Vigna sinensis</i>)	Sorgo (<i>Sorghum vulgare</i>)	
	Espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>)	
	Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	
	Veza (<i>Vicia sativa</i>)	
	Trigo (<i>Triticum vulgare</i>)	

Fuente: Ayers, 1987

¹ Los cultivos están colocados en orden descendente en cuanto a sus tolerancias al sodio. Las tolerancias son relativas debido a que los factores de nutrición y condiciones adversas del suelo, por lo general, paralizan el crecimiento antes de alcanzar estos niveles de PSI.

cuando puedan tolerar grandes cantidades de sales, ya que también se pueden desarrollar bien en ausencia de sales o de sodio intercambiable.

Por ejemplo el "zacatón alcalino" (*Sporobolus airoides*), el "zacate salado" (*Distichlis stricta*), y el "chamizo" (*Atriplex polycarpa*), toleran un alto grado de salinidad, pero son capaces de crecer bien en ausencia de sales. El "chico" no es un indicador infalible, ya que se le ha encontrado desarrollandose bien en terrenos no salinos.

La "gobernadora" (*Larrea tridentata*) indica que cuando la población vegetal es buena, los suelos no son salinos y tienen suficiente profundidad para sostener una agricultura especializada.

El "Chamizo", indica que cuando la población es pura y su desarrollo es bueno, los suelos son no salinos o ligeramente salinos; si el crecimiento es pobre, puede deberse a la presencia de sales.

La "hierba de la reuma" (*Frankenia grandifolia* var. *campestris*), indica que cuando su desarrollo es exuberante en una población uniforme, los suelos son por lo regular altamente salinos.

La planta "Chico" (*Sarcobatus vermiculatus*), indica usualmente una textura fina y suelo relativamente impermeable, ya que esta especie es muy tolerante a salinidad y al sodio.

El "Zacate salado" (*Distichlis stricta*), indica suelos altamente salinos, húmedos y con mantos freáticos elevados; puede prosperar en áreas de baja salinidad.

El "Romerillo" (*Suaeda spp*), cuando su crecimiento natural es vigoroso, indica que el suelo es altamente salino o salino-sódico.

"Zacatón alcalino". Es muy tolerante al sodio; en poblaciones puras y vigorosas, esta planta es un buen indicador de suelos húmedos muy salinos o salino-sódicos y con manto freático elevado.

La "Saladilla" (*Allenrolfea occidentalis*) indica que los suelos son generalmente de textura fina, muy húmedos y excesivamente salinos.

Al estar caracterizada el área por recuperar se deberán hacer muestreos para conocer la dinámica del contenido de sales, con la finalidad de tomar las medidas pertinentes para prevenir el ensalitramiento y recuperar suelos.

En las áreas sujetas a recuperación, en las que se aplican láminas de lavado, conviene muestrear al principio de la aplicación, en etapas intermedias y al final del proceso de lavado, con la finalidad de evaluar cómo se va dando la recuperación y efectuar alguna corrección que pudiera ser necesaria.

En estas áreas, se recomienda tomar muestras antes del lavado, únicamente cuando la salinidad es menor de 30 dS/m en las partes más afectadas, lo cual puede detectarse con base en muy pocas muestras, con lo que se ahorrará tiempo y recursos; si esto se verifica, entonces hay que planificar y hacer un muestreo antes de iniciar el lavado.

Si la salinidad es mayor de 30 dS/m, primero debe aplicarse una fracción de la lámina de lavado y posteriormente, cuando se haya bajado la salinidad alrededor de 30 dS/m, es el momento de realizar un primer muestreo. Después de haber aplicado un cierto porcentaje o fracción de la lámina total de lavado se debe hacer otro muestreo para evaluar el proceso y hacer los ajustes necesarios según se requiera.

Los primeros cultivos por establecer deberán ser resistentes a la salinidad y cubrir toda la superficie. Se debe evitar hasta donde sea posible los surcos o las camas meloneras ya que estos favorecen la elevación de las sales.

Cuando exista la necesidad de establecer cultivos que requieran de surcos, se procederá a hacer la siembra en el "costado" o "talúd" del surco, a una altura ligeramente arriba del nivel del agua.

Conviene controlar la permeabilidad o velocidad de infiltración, mediante la colocación de un infiltrómetro de doble cilindro en el centro de una melga con agua (ver Anexo Técnico. Cuándo y cuánto

regar).

Un suelo que ha estado afectado de sales y ha sido recuperado deberá ser protegido con la paja de los residuos de la cosecha sin dejarlo desnudo. También es necesario realizar labores de rastreo en la capa superficial para disminuir la elevación de las sales por capilaridad.

En el caso de los suelos salino-sódicos, es conveniente efectuar análisis químicos y controlar, en forma similar a los suelos salinos, mediante gráficas. Cuando se alcanzan valores de menos de 10 dS/m en los primeros 0.50 m es posible iniciar la explotación agrícola con cultivos medianamente tolerantes a las sales.

Una vez que disminuye la salinidad, emergen primeramente las plantas más tolerantes, por lo que conviene clasificarlas según los grados de salinidad que resisten.

Establecido el cultivo en suelos salino-sódicos es importante mantener el suelo con un alto porcentaje de humedad (60-70% de HA) durante su desarrollo para disminuir los efectos de la presión osmótica.

BIBLIOGRAFIA

- Aceves, N. E. *El ensalitramiento de los suelos bajo riego (identificación, control, combate y adaptación)*, Chapingo, Méx, Colegio de Postgraduados, 1979, pp 375.
- Aguilar, S. A., *Manual de métodos de análisis de suelos*, México, CNA, Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, 1991.
- Ayers, R. S. y Westcot, D. W, *La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 29, Rev. 1*, Roma, 1987, pp 172.
- Black, C. A. *Soil - Plant Relationships*, U.S.A, John Wiley & Sons, Second Edition, 1968, pp 792.
- Borquez, O. R., *Efecto de tres sales solubles sobre el comportamiento de dos variedades de trigo (Triticum spp) con diferente respuesta a salinidad. Tesis de M. C.*, Chapingo, Méx. Colegio de Postgraduados, 1986.
- Castellanos, R. J. Z., "La eficiente utilización de los estiércoles como fertilizantes y mejoradores del suelo", en *Aprovechamiento del agua y los fertilizantes en las regiones áridas de México*. XXIII Congreso de la Ciencia del Suelo, México, 1990.
- Cinco, C. R. A., "Evaluación de variedades comerciales de arroz para tolerancia a sales en el valle de Mexicali, B. C.", en *Memoria del XXIV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*, Pachuca, Méx. 1991.
- CNA, "CNA, aprovechamiento integral del agua", *Programas hidroagrícolas 1990 - 1994*, Colección desarrollo institucional, S/F.
- De la Peña, I., "Salinidad de los suelos agrícolas. Su origen - clasificación, prevención y recuperación", *Boletín Técnico No. 10*, México, SARH, S/F.
- _____, "Recuperación de suelos ensalitrados", en *Salinidad de los suelos y calidad del agua de riego*, Memorándum Técnico No. 351, SRH, 1976.
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*, L. A. Richards, Editor, México, LIMUSA, 1974.
- Fernández, G. R., "Algunas experiencias y proposiciones sobre recuperación de suelos con problemas de sales en México", *Terra*, Vol. 8, Núm. 2, 1990, pp 226-240.
- IMTA, *Guía Técnica para producción y conservación en el trópico*, Serie didáctica 1, SARH, Jiutepec, Mor. 1988.

INIFAP, "Reunión Nacional de Análisis y Perspectivas del Sistema de Investigación de la SARH" *La ciencia forestal y agropecuaria en México*, SARH, 1988.

Foster, A. B., *Métodos aprobados en conservación de suelos*, México, Trillas, 1977.

Kobaev, V. E., "Resultados del mejoramiento radical de suelos salinos en la región de Bukhara", en *La aplicación del drenaje en la recuperación de suelos salinos*, Academia de Ciencias de la URSS, 1964.

López, U. J. A., *Efecto de mejoradores y lavado de suelos en la recuperación de un suelo salino-sódico del Distrito de Riego No. 25, Bajo Río Bravo, Tamps*, Tesis profesional, Chapingo, Méx., Escuela Nacional de Agricultura, 1976.

Llerena V., F. A., "Definición óptimo-económica del tamaño de muestra e intensidad de lavado para la recuperación de suelos con problemas de sales", *Memorándum Técnico No. 366*, SARH, 1977.

Llerena V.; Tanori, E. V. J.; de la Peña, I., "Uso del agua proveniente de los drenes en la recuperación de los suelos con problemas de sales en el Distrito de Riego Num. 41, Río Yaqui, Sonora", en *trabajos de investigación desarrollados en el Distrito de Riego El Río Yaqui, Sonora*, Memorándum Técnico No. 365, SARH, 1977.

Llerena V.; y de la Peña, I., "Caracterización de la afectación salina mediante el uso de transparencias aéreas a color en el Distrito de Riego No. 41, Río Yaqui, Sonora", en *Ibid*.

Llerena V.; Tanori, E. V. J.; de la Peña, I., "Evaluación de diferentes fraccionamientos para la aplicación de una lámina de lavado en la recuperación de suelos afectados por sales", en *Ibid*, No. 364.

Llerena V.; de la Peña, I.; Aceves, N. E., "El trigo como complemento en la recuperación de los suelos afectados por sales", en *Ibid*.

Maas, E. V. and Hoffman, G. J. "Crop Salt Tolerance -current assessment" in, *Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE*, 1977.

Martínez, B. J. "Drenaje agrícola", Volumen I, *Manual técnico No. 5*, Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1986, pp 239.

Martínez, L. A. y Benítez, L. E., "Estudio de salinidad y drenaje para el proyecto de recuperación de suelos ensalitrados de una fracción del ejido de Meoqui, Chih.", *Ingeniería Hidráulica en*

México, vol. XV, núm. 3, México, 1961.

Neja, R. A.; Ayers, R. S.; Kasimatis, A. N., "Salinity Appraisal of Soil and Water, for Successful Production of Grapes", Leaflet 21056, University of California, 1978.

Ortíz, M. O., *El muestreo de suelos salinos y sódicos*, Chapingo, México, Publicaciones del Departamento de Suelos, UACH, S/F.

Palacios, V. E. y Exebio, G. A., "Importancia del riego en los cultivos", Vol. I, *Curso Internacional de Sistemas de Riego*, Chapingo, México, 1992.

Paliwal, K. V. and Gandhi, A. P., "Effect of salinity, SAR, Ca; Mg ratio in irrigation water, and soil texture on the predictability of exchangeable sodium percentage", *Soil Science*, vol. 122, núm. 2, U. S. A., 1975.

Rozanov V. A. N., *La salinidad y el mejoramiento de los suelos*, en, *La aplicación del drenaje en la recuperación de suelos salinos*, Academia de Ciencias de la URSS, 1964.

Salazar, C. F., "Mejoramiento de la productividad de suelos ensalitrados", en *Salinidad de los suelos y calidad del agua de riego*, Memorándum Técnico No. 351, SRH, 1976.

Salazar, G. S. et-al, "Daños por salinidad en árboles de aguacate Fuerte en Atlixco, Puebla", *Agrociencia*, Montecillo, Méx., 1987.

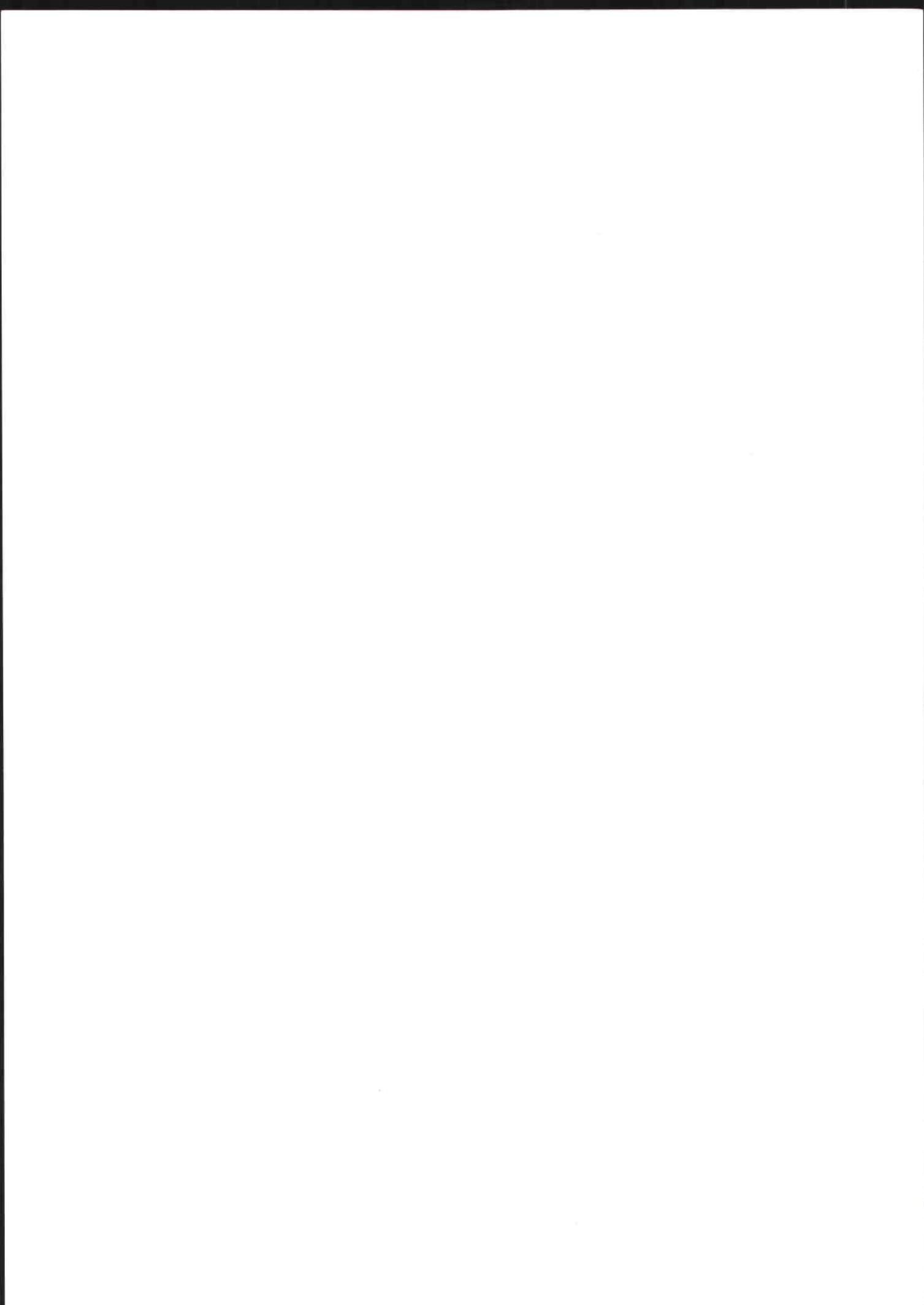
SARH; Subdirección de Agrología, *Interpretaciones agronómicas que se deben realizar a partir de los resultados de laboratorio*, México, 1985.

SARH, *Academias de nivel técnico superior*, tomo III D. 7, "Salinidad de los suelos. Su origen, clasificación y trascendencia. Prevención y rehabilitación", S/F.

SRH, "La concentración de sales en los suelos y sus efectos sobre el movimiento del agua y la evaporación", *Memorándum Técnico No. 194*, 1963.

SRH, "Uso de aguas ricas en sales, como floculante y fuente de cationes divalentes para el mejoramiento de los suelos sódicos", *Memorándum Técnico No. 189*, 1962.

Tanji, K., *Agricultural Salinity Assesment and Management*, American Society of Civil Enginners, 1990 pp 619.



ANEXOS

ANEXO 1 Glosario de términos

Absorción. Proceso por el cual una sustancia es retenida por otra, por ejemplo: entrada de agua al suelo o de agua, nutrientes y otras sustancias a las plantas.

Adsorción. Concentración excesiva de moléculas o iones en una superficie, incluyendo cationes y aniones intercambiables en las partículas del suelo.

Agregado de suelo. Masa única que consiste de muchas partículas de suelo unidas entre sí para formar un terrón, prisma o gránulo.

Capacidad de intercambio de cationes. La cantidad total de cationes que puede adsorber un suelo y que se expresa generalmente en miliequivalentes por cien gramos.

Cación intercambiable. Un catión adsorbido en el complejo de intercambio que es capaz de intercambiarse con otros cationes.

Complejo de intercambio. Los constituyentes en la superficie activa de los suelos (orgánicos e inorgánicos) que son capaces de intercambio de cationes.

Conductividad eléctrica. Propiedad de una sustancia para transferir una carga eléctrica (recíproca de la resistencia). La conductividad eléctrica del extracto de saturación es la transmisión de electricidad a través del extracto a 25 °C, obtenido de una pasta de suelo utilizada para medir su contenido de sales. Se expresa en dS/m.

Conductividad hidráulica del suelo. Tasa de circulación del agua a través de una sección unitaria del suelo con un gradiente hidráulico unitario.

Densidad aparente. La relación entre la masa de suelo seco y su volumen; se expresa en g/cm³. También se designa como densidad de volumen.

Densidad real. Es la densidad media aparente de las partículas del suelo; se expresa en g/cm³. Algunas veces se menciona como densidad de partículas.

Drenaje. Proceso de descarga de agua de un suelo por corriente superficial (drenaje superficial) y eliminación de agua excesiva dentro del suelo por movimiento descendente a través del mismo (drenaje interno).

Efecto osmótico. Efecto de las sales que hace que se requiera mayor energía para extraer una unidad de masa de agua de una solución salina, en comparación con el agua pura. La presencia de sales en el agua del suelo aumenta la energía requerida por las plantas para extraer el agua del suelo.

Equivalente, peso equivalente. Es el peso atómico o peso de la fórmula dividido por su valencia.

Esfuerzo de la humedad del suelo. La suma de la tensión de la humedad del suelo y de la presión osmótica de la solución del suelo. Es la succión o presión negativa a la cual debe sujetarse el agua para estar en equilibrio con la solución del suelo a través de una membrana semipermeable.

Extracto de saturación. La solución que se extrae del suelo cuando éste contiene agua a su porcentaje de saturación.

Estructura del suelo. Ordenación de las partículas del suelo en unos conjuntos que se presentan en toda una serie de formas, consistencia y tamaño reconocidos.

Evapotranspiración. Cantidad de agua por unidad de tiempo transmitida hacia la atmósfera por la transpiración de las plantas y la evaporación del agua del follaje y del suelo.

Floculación. Unión o agregación de las partículas del suelo.

Lavado. El proceso de remoción de material soluble del suelo cuando pasa agua a través del mismo.

Lámina de sobreriego. Parte del agua infiltrada que debe atravesar la zona radical para evitar la acumulación de sales. La lámina de sobreriego se expresa como fracción o porcentaje del agua aplicada.

Mejoradores. Para los suelos, substancia o material que mejora las características físicas de los suelos. Para las aguas, substancias químicas que se agregan al agua para mejorar ciertas propiedades del sistema suelo-agua, como una mejor infiltración producida por un cambio en la composición química del mismo.

Miliequivalente por litro. Un miliequivalente de un ión o compuesto en un litro de solución.

Necesidad de lavado. La fracción del agua que entra en el suelo y que debe pasar a través de la zona radical para evitar salinidad del suelo al exceder un valor específico.

Porcentaje de sodio intercambiable. Grado de saturación con sodio del complejo de intercambio del suelo.

Potencial de agua en el suelo. Potencial total del agua o energía por unidad de cantidad, es el trabajo mecánico requerido para transportar de manera reversible e isotérmicamente una unidad de agua pura desde un estado de referencia normal -en el cual el potencial se considera igual a cero- a la posición en consideración del agua del suelo. El potencial total del agua en el suelo es la suma de los potenciales matricial y osmótico.

Pasta saturada del suelo. Una mezcla de suelo y agua. A saturación, la pasta brilla al reflejar la luz, escurre ligeramente al inclinar el recipiente y la pasta se desliza libremente de una espátula, excepto en suelos de alto contenido de arcilla.

Permeabilidad. 1. *Cualitativa.* Estado de un medio en relación con la rapidez con la que dicho medio conduce o transmite fluidos. 2. *Cuantitativa.* Propiedad específica que gobierna el grado o rapidez con que un medio poroso transmite fluidos bajo condiciones estándar.

Planta indicadora. Planta nativa que indica en general, y a veces en forma específica, la naturaleza de las condiciones del suelo con respecto a humedad y salinidad. Las especies dominantes son las indicadoras más importantes en tales condiciones.

Recuperación de suelos ensalitrados. Proceso para eliminar el exceso de sales solubles o el exceso de sodio intercambiable en el suelo.

Relación de adsorción de sodio. Valor que expresa la actividad relativa del ión sodio contenido en las aguas de riego, en los extractos del suelo o en las reacciones de intercambio con el suelo. Las concentraciones de los iones se expresan generalmente en me/l.

Suelo dispersado. Los suelos dispersados tienen generalmente poca permeabilidad. Tienden a contraerse, agrietarse y a endurecerse cuando se secan, y a desmoronarse y ser plásticos cuando están húmedos.

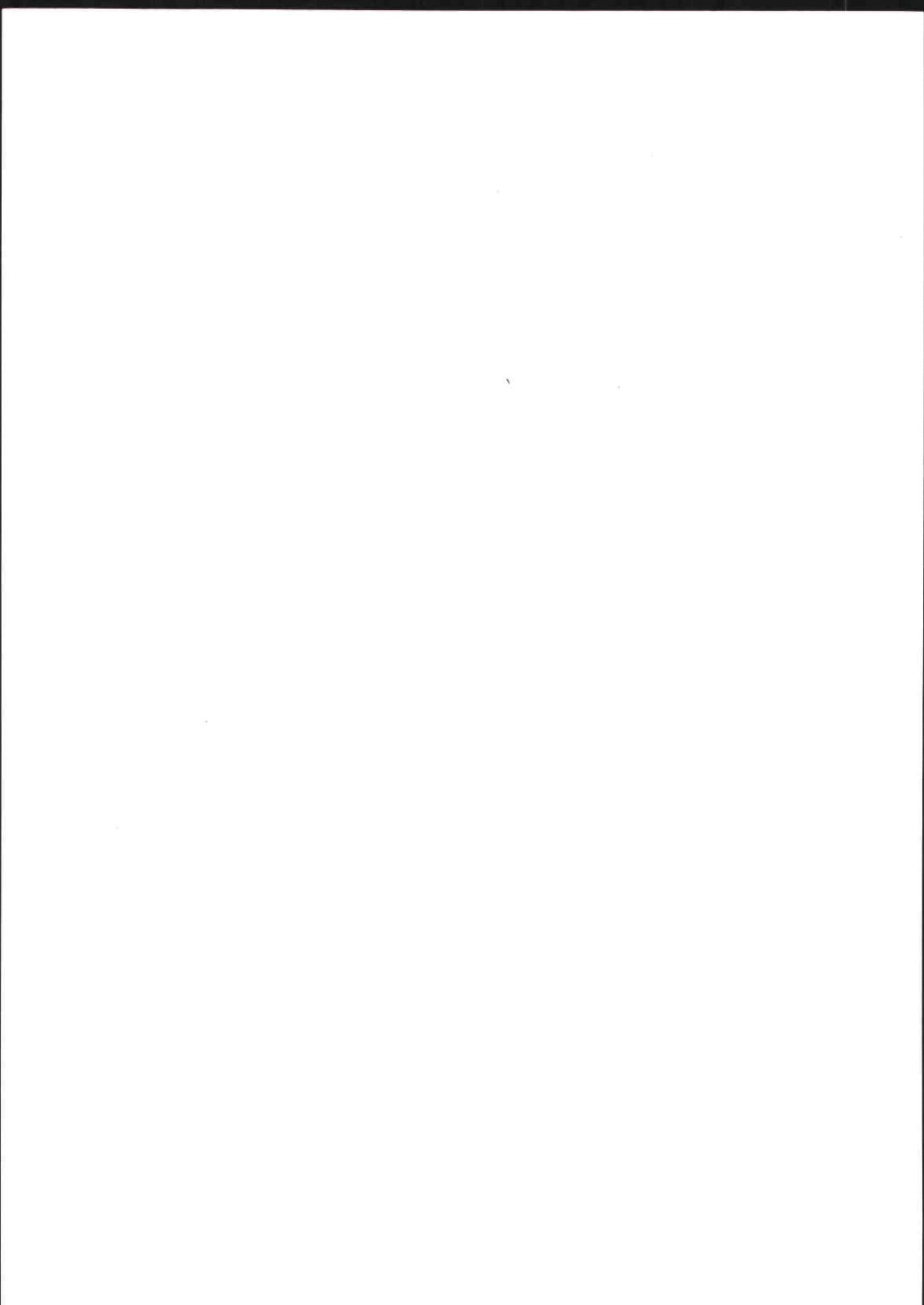
Solución del suelo. Solución acuosa contenida en los poros del suelo bajo una determinada tensión y en equilibrio químico con el suelo.

Textura. Características de los suelos en relación con el tamaño de sus partículas y su distribución.

Transpiración. Cantidad de agua transferida de las plantas a la atmósfera por unidad de tiempo y controlada por los procesos físicos y biológicos.

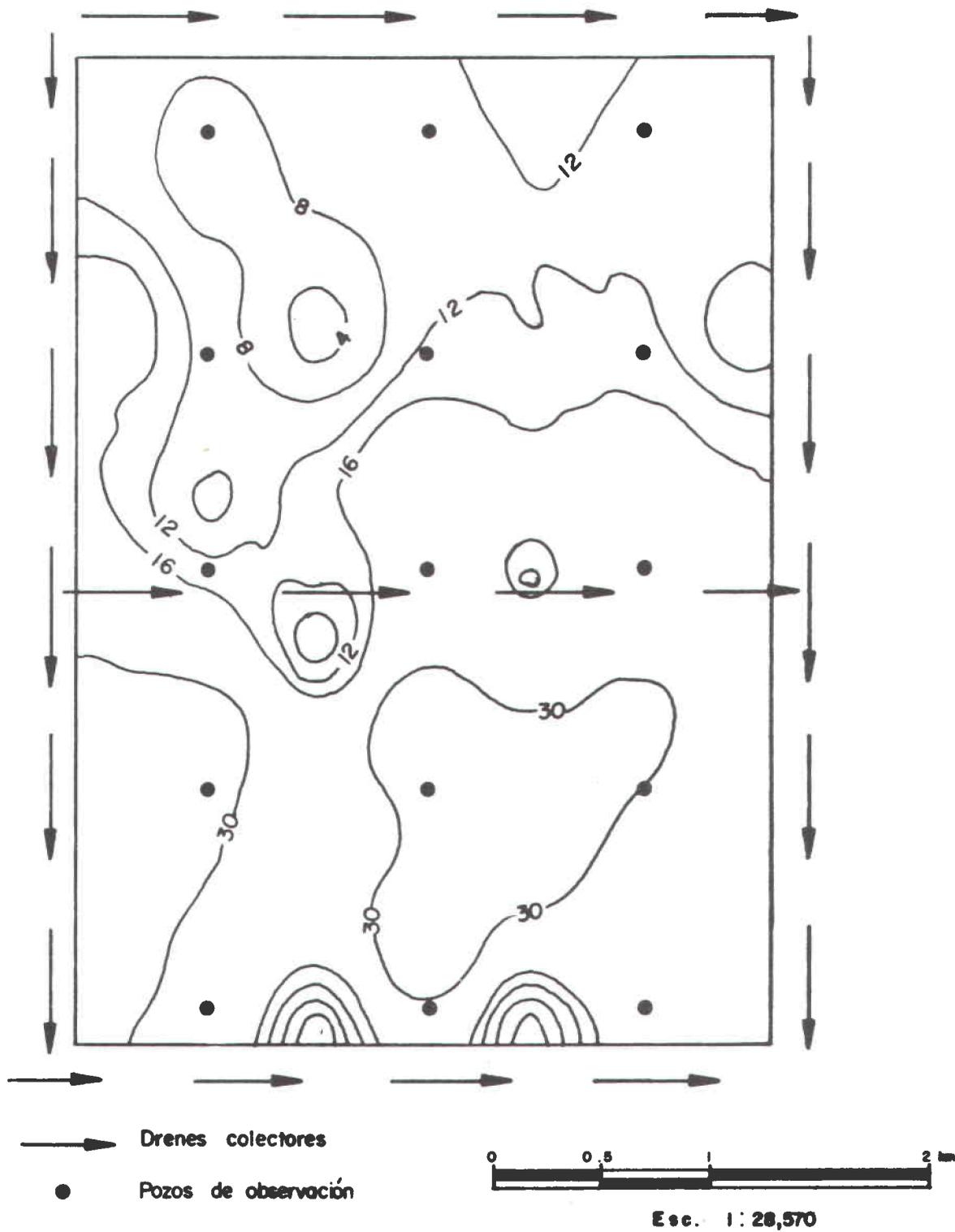
Velocidad de infiltración. Es el grado de penetración de agua en el suelo expresado como lámina de agua por unidad de tiempo.

Zona radical. Volumen del suelo del cual las raíces de las plantas extraen el agua y los nutrientes necesarios.

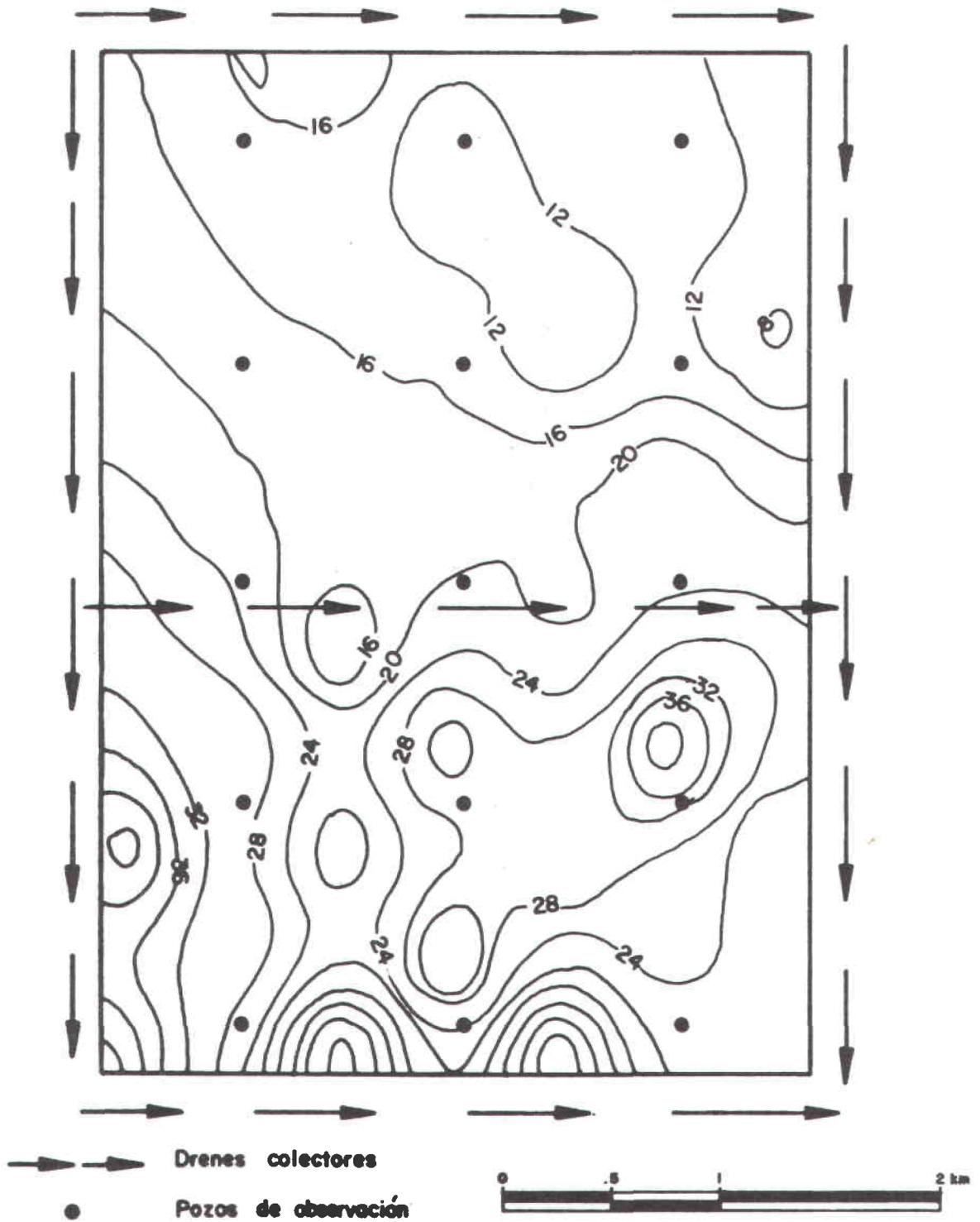


ANEXO 2 Planos 1 al 4

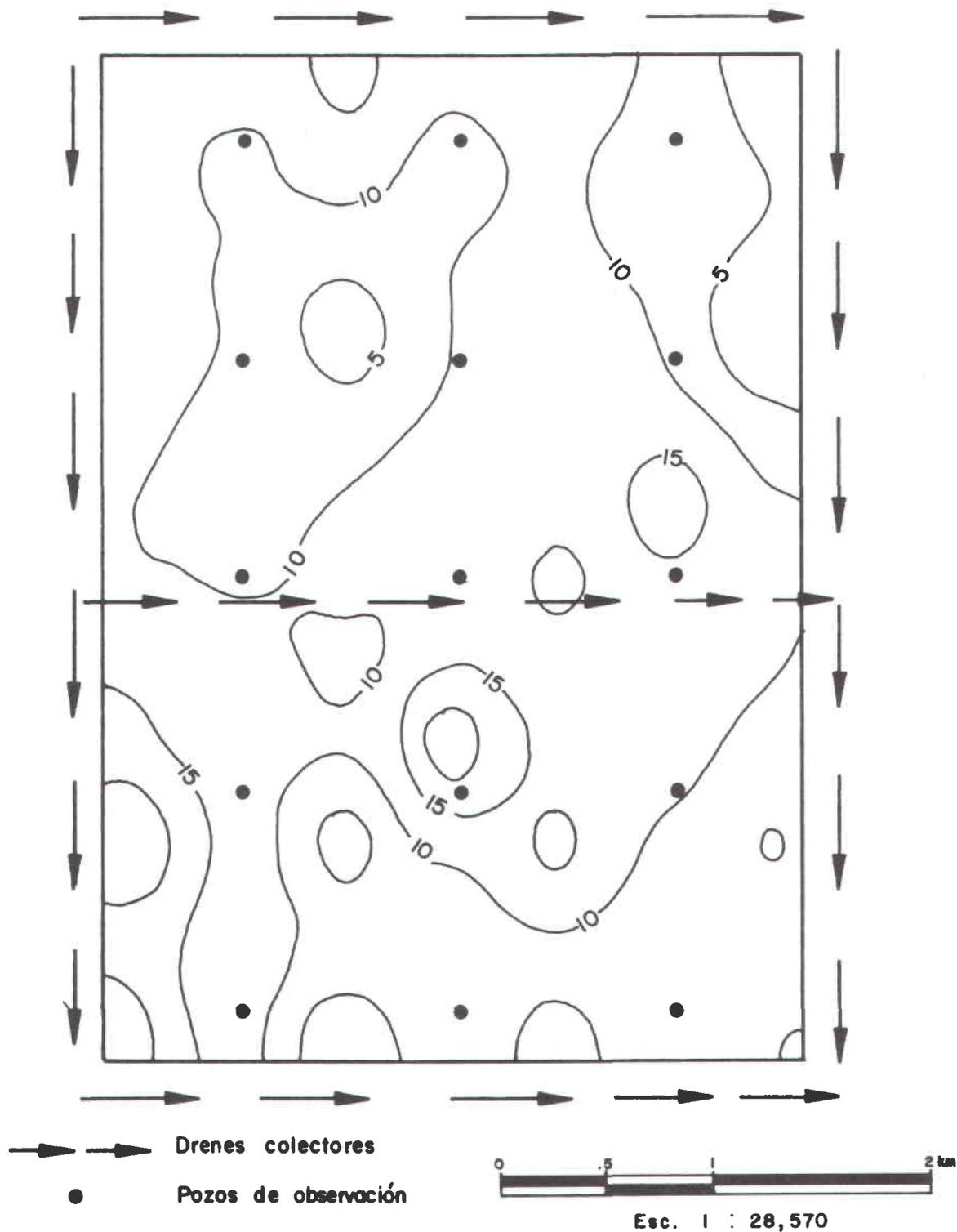
Plano 1 Plano de ISOCE 30 - 60 cm



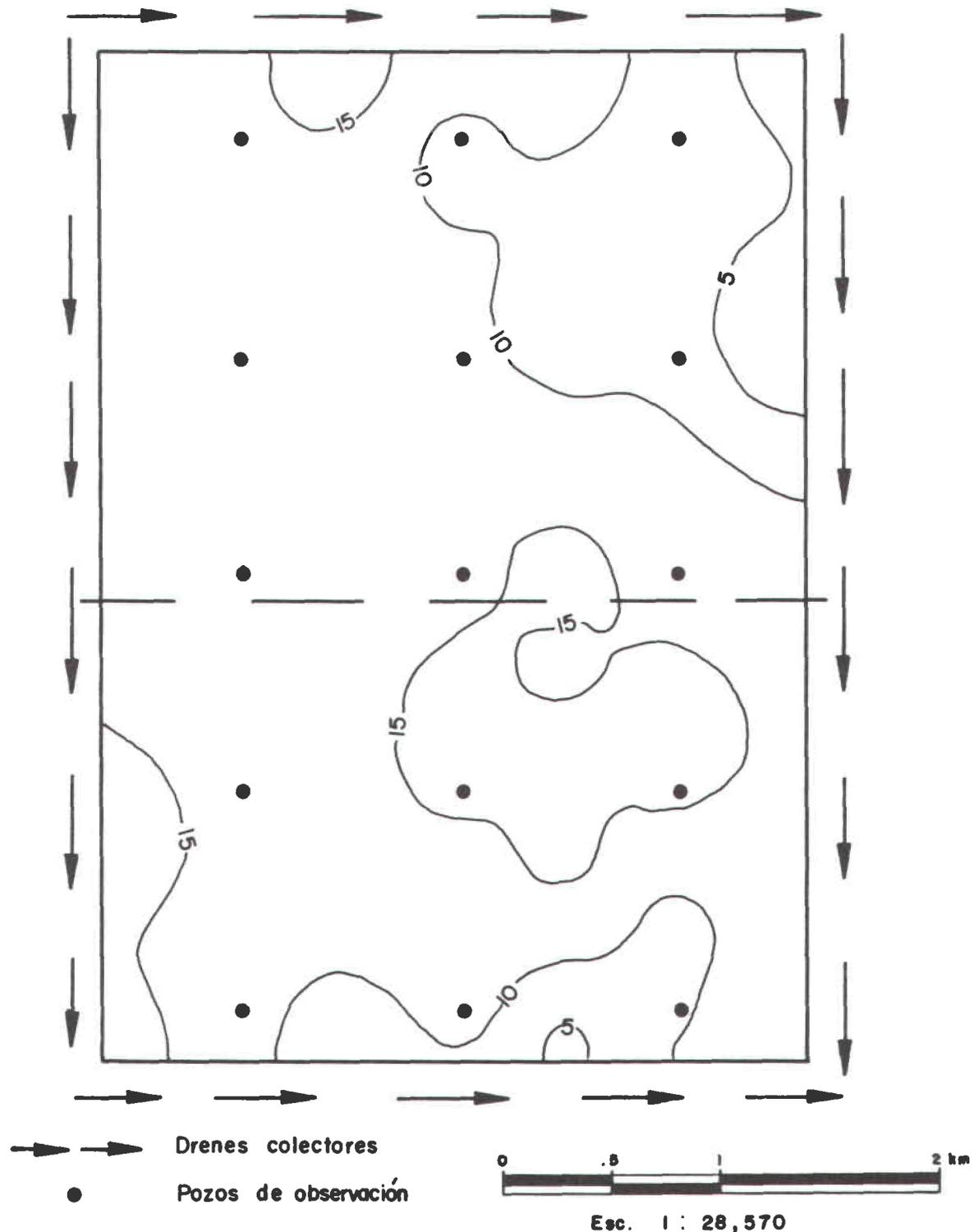
Plano 2 Plano de ISOCE 60 - 90 cm



Plano 3 Plano de ISOPSI 30 - 60 cm



Plano 4 Plano de ISOPSI > 60 cm



*Anexo Técnico. Estudio general de salinidad
analizada, se terminó de imprimir en el mes de
octubre de 1994. La edición consta de 500
ejemplares.*



**BIBLIOTECA DEL PROGRAMA DE MAESTRÍAS Y DOCTORADOS EN
INGENIERÍA DE LA UNAM CAMPUS MORELOS**

PAPELETA DE DEVOLUCIÓN

El lector se obliga a devolver este libro a la fecha del vencimiento del préstamo señalado en el último sello.

--	--	--

Biblioteca Bruno Levi de la UNAM Campus Morelia



0657