



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRICOLAS

CAMPUS MONTECILLO  
POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

CALIDAD DE LAS AGUAS DEL RÍO LERMA EN RELACIÓN CON EL  
RIEGO AGRÍCOLA

JOSÉ MARÍA LOMELÍ MEZA

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2009

La presente tesis, titulada: Calidad de las aguas del río Lerma en relación con el riego agrícola, realizada por el alumno: José María Lomelí Meza, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR



CONSEJERO:

Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar



ASESOR:

Dra. Amada Laura Reyes Ortigoza



ASESOR:

Dr. Josué Kohashi Shibata



ASESOR:

Dra. Norma Eugenia García Calderón

Montecillo, Texcoco, Estado de México, octubre de 2009.

# CALIDAD DE LAS AGUAS DEL RÍO LERMA EN RELACIÓN CON EL RIEGO AGRÍCOLA

José María Lomelí Meza, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2009

El río Lerma nace en el estado de México desde una altitud cercana a 2600 m, y desemboca en el Lago de Chapala a 1525 m, y tiene una longitud de 700 km. Debido principalmente a la gran cantidad de aguas residuales de origen urbano, industrial y agropecuario que este río recibe, se hizo necesario determinar la calidad de estas aguas desde el punto de vista del riego agrícola en puntos distribuidos a lo largo de su curso. Se hicieron dos colectas: una en 29 sitios a finales de julio de 2006, y otra en los mismos sitios, a finales de mayo de 2007. Utilizando los métodos de APHA (1989), se determinaron: pH, CE,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . La inexistencia de  $\text{CO}_3^{2-}$  en las aguas de uno de los muestreos está relacionada con un pH menor a 8.4. Cerca del 82% de estas aguas tienen una conductividad eléctrica menor a  $1.0 \text{ mS cm}^{-1}$ . Si únicamente se considerara la conductividad eléctrica, se podría decir que la calidad del agua para riego es excelente en la mayoría de los casos, y es necesario tener más cuidado en épocas de escasas lluvias cuando puede haber algunos sitios del río, en donde la salinidad sea tan alta, que pueda causar serios problemas para cultivos poco tolerantes a salinidad alta. Esta información puede utilizarse junto con datos agronómicos (cultivo, tipo de suelo, clima) para determinar la bondad de la calidad del agua para sus uso particular.

Palabras clave: *CE, CSR, SE, RAS.*

## LERMA RIVER WATER QUALITY IN RELATION WITH AGRICULTURAL IRRIGATION

José María Lomelí Meza, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2009

The Lerma River originates in the state of Mexico from at an altitude of 2600 m, and flows into Lake Chapala at 1525 m with a course of 700 km.

Due to the large amount of urban, industrial and agricultural wastewater that this river receives, it became necessary to determine the quality of these waters from the standpoint of agricultural irrigation in distributed points along its course.

There were two groups: one in 29 sites in late July 2006 and another in the same sites in late May 2007.

Using the methods of APHA (1989), were determined: pH, EC,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

The absence of  $\text{CO}_3^{2-}$  in the water of one of the samples is related to a lower pH to 8.4.

About 82% of these waters have electrical conductivity less than  $1.0 \text{ mS cm}^{-1}$ . If only the electrical conductivity is considered, one could say that the quality of irrigation water is excellent in most cases, and they need more care. In low rainfall season, when there might be sites on the river, with high salinity, which can cause serious problems to crops with low tolerance to high salinity.

This information can be used together with agronomic data (crop, soil type, climate) for determining the value of water quality for a particular use.

**Key words:** EC, RSC, ES, SAR.

Con todo mi amor y respeto, dedico este trabajo a mis padres:

Gloria Raquel Meza Jiménez y Jorge Lomelí Zepeda,

y a mis hermanos:

Rafael,

Josefina,

Jesús,

Alejandro,

Jorge,

Mario,

Juan Manuel,

que siempre me han apoyado.

## AGRADECIMIENTO

A Dios nuestro creador, que me ha permitido cumplir con este compromiso.

Al pueblo de México, que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), me otorgó las facilidades para poder llevar a cabo estos estudios de Maestría.

A la Dra. Norma Eugenia García Calderón y a la Dra. Amada Laura Reyes Ortigoza, que a pesar de que ambas tienen que llevar a cabo su trabajo en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), me asesoraron en la medida de sus posibilidades para poder realizar este trabajo.

Al Dr. Josué Kohashi Shibata, por sus útiles consejos y apoyo para poder cumplir con este compromiso en el Colegio de Postgraduados.

Al Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar y al Dr. Carlos Ramírez Ayala, que desde que llegué al Colegio de Postgraduados me brindaron su amistad y apoyo para salir adelante.

A todos aquellos profesores y trabajadores del Colegio de Postgraduados que me brindaron su apoyo durante mi estancia en la Institución.

# CONTENIDO

	Página
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos particulares.....	3
3 HIPÓTESIS.....	3
4 REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
4.1 Generalidades.....	4
4.2 Geoquímica de los elementos de la solución del suelo.....	6
4.2.1 Algunos rasgos de importancia.....	6
4.2.2 Calcio.....	7
4.2.3 Magnesio (Mg).....	8
4.2.4 Sodio (Na).....	8
4.2.5 Potasio (K).....	9
4.2.6 Cloro (Cl).....	9
4.2.7 Azufre (S).....	10
4.2.8 Carbono (C).....	10
4.3 Propiedades de los contaminantes del agua residual.....	11
4.3.1 Aspectos generales.....	11
4.3.2 Enfermedades humanas relacionadas con elementos químicos en el agua.....	12
4.4 Solubilidad de las sales nocivas para las plantas.....	12
4.5 Calidad de las aguas para riego.....	13
4.5.1 Índice de Carbonato de Sodio Residual (CSR).....	13
4.5.2 Índice de Salinidad Efectiva (SE).....	14
4.5.3 Índice de Salinidad Potencial (SP).....	15
4.5.4 Peligro de salinidad (CE) y sodio (RAS). Diagrama correspondiente para la clasificación de las aguas para riego en función de estos parámetros.....	17
4.5.5 Problemas de infiltración en los suelos agrícolas bajo riego.....	22
4.5.6 Boro (B) en las aguas para riego.....	25
4.5.7 Fósforo (P) en las aguas para riego.....	27
4.5.8 Clasificación de aguas por salinidad en riego por goteo.....	27

## ..... CONTENIDO

	Página
5 MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
5.1 Descripción general de la zona de estudio.....	30
5.2 Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas del río Lerma.....	33
5.3 Métodos utilizados para caracterizar las aguas del río Lerma.....	36
5.4 Criterios utilizados para la verificación de la validez de los resultados obtenidos en los análisis de las aguas del río Lerma.....	36
5.4.1 Suma de aniones y cationes.....	36
5.4.2 Relación de la Conductividad Eléctrica (CE) con algunos parámetros.....	37
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
6.1 Boro en las aguas del río Lerma.....	40
6.2 Fósforo en las aguas del río Lerma.....	43
6.3 Residuo Seco Evaporado (RSE) y Residuo Seco Calcinado (RSC) de las aguas del río Lerma.....	46
6.4 pH, Conductividad Eléctrica y composición iónica de las aguas del río Lerma.....	48
6.5 Casificación, desde el punto de vista de riego agrícola, de las aguas del río Lerma conforme a los índices de: CSR, SE, SP y RAS-CE.....	52
6.6 Reducción relativa de la infiltración en suelos que sean regados con aguas del río Lerma.....	56
7 CONCLUSIONES.....	60
8 RECOMENDACIONES.....	61
9 LITERATURA CITADA.....	62

## LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Clasificación de las aguas para riego con base en el índice de Carbonato de Sodio Residual (CSR).....	14
Cuadro 2. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de Salinidad Efectiva (SE).....	15
Cuadro 3. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad Potencial (SP) y algunos parámetros del suelo.....	16
Cuadro 4. Tolerancia relativa de los cultivos agrícolas al boro (Traducido de: Ayers y Wescot, 1985).....	26
Cuadro 5. Elementos físicos, químicos y/o biológicos que provocan obstrucciones en los sistemas de riego localizado.....	28
Cuadro 6. Clasificación de aguas por salinidad en riego por goteo (Domínguez, 1996).....	29
Cuadro 7. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas del río Lerma.....	33
Cuadro 8. Métodos utilizados para caracterizar las aguas del río Lerma.....	36
Cuadro 9. Porcentajes de diferencia aceptable entre la suma de cationes y aniones en el agua.....	37
Cuadro 10. Boro en las aguas del río Lerma (muestreo 1 y 2).....	40
Cuadro 11. Tolerancia de los cultivos al Boro contenido en las aguas del río Lerma suponiendo inexistencia de este elemento en el suelo (muestreo 1 y 2).....	42
Cuadro 12. Fósforo en las aguas del río Lerma (muestreo 1 y 2).....	43
Cuadro 13. Fósforo en las aguas del río Lerma, distribución de frecuencias (muestreo 1 y 2).....	44

## ..... LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 14. Residuo Seco Evaporado (RSE) y Residuo Seco Calcinado (RSC) de las aguas del río Lerma(muestreo 1).....	46
Cuadro 15. Residuo Seco Evaporado (RSE) y Residuo Seco Calcinado (RSC) de las aguas del río Lerma (muestreo 2).....	47
Cuadro 16. pH, Conductividad Eléctrica y composición iónica de las aguas del río Lerma (muestreo 1).....	48
Cuadro 17. pH, Conductividad Eléctrica y composición iónica de las aguas del río Lerma (muestreo 2).....	49
Cuadro 18. R. Lerma, Clasificación de las aguas por salinidad en riego por goteo (muestreo 1 y 2).....	50
Cuadro 19. Clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a los índices de CSR, SE y SP(muestreo 1).....	52
Cuadro 20. Resumen de clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a los índices de CSR, SE y SP (muestreo 1).....	52
Cuadro 21. Clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a los índices de CSR, SE y SP (muestreo 2).....	53
Cuadro 22. Resumen de clasif. de las aguas del río Lerma de acuerdo a los índices de CSR, SE y SP (muestreo 2).....	53
Cuadro 23. Resumen de clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a RAS y CE (muestreo 1).....	58
Cuadro 24. Resumen de clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a RAS y CE (muestreo 2).....	58
Cuadro 25. Reducción relativa de la infiltración en suelos que sean regados con aguas del río Lerma (muestreo 1).....	59

## ..... LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 26. Reducción relativa de la infiltración en suelos que sean regados con aguas del río Lerma (muestreo 2).....	59

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. La cuenca Lerma-Chapala y los estados que la conforman.....	5
Figura 2. La cuenca Lerma-Chapala.....	5
Figura 3. El lago de Chapala y su región.....	6
Figura 4. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego.....	21
Figura 5. Reducción relativa de la infiltración, provocada por la CE y la RAS (Rhoades 1977; Oster y Schroer 1979).....	24
Figura 6. Altitud de los sitios de muestreo de las aguas del río Lerma.....	34
Figura 7. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas del río Lerma.....	35
Figura 8. Boro en las aguas del río Lerma.....	41
Figura 9. Fósforo en las aguas del río Lerma.....	44
Figura 10. Composición iónica de las aguas del río Lerma (muestreo 1).....	51
Figura 11. Composición iónica de las aguas del río Lerma (muestreo 2).....	51
Figura 12. Diagrama para la clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a RAS y CE (muestreo 1).....	54

## ..... LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 13. Diagrama para la clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a RAS y CE (muestreo 2).....	55
Figura 14. Reducción relativa de la infiltración en suelos que sean regados con aguas del río Lerma (muestreo 1), provocada por la CE y la RAS.....	56
Figura 15. Reducción relativa de la infiltración en suelos que sean regados con aguas del río Lerma (muestreo 2), provocada por la CE y la RAS.....	57

# 1 INTRODUCCIÓN

La interdependencia de los siguientes factores determina la posibilidad de uso del agua para el riego agrícola: composición química del agua; las particularidades de los cultivos agrícolas; el clima de la zona agrícola bajo riego; las propiedades físicas y químicas de los suelos bajo riego; y los métodos agronómicos que se utilizan en la explotación de los diferentes cultivos agrícolas (Kovda, *et. al.*, 1967; Oster y Rhoades, 1989).

La calidad del agua de riego puede variar significativamente según el tipo y cantidad de sales disueltas. Las sales disueltas se encuentran en concentraciones relativamente pequeñas pero significativas, y por lo general tienen su origen en la disolución e intemperización de las rocas de la corteza terrestre, además de la disolución lenta de calizas, de yeso y de otros minerales. Los diferentes tipos de sales se transportan disueltas en el agua, y son depositadas en los suelos de zonas bajas y en aquellos de zonas de riego. A medida que el agua se evapora, o es absorbida por los cultivos agrícolas, las sales se acumulan en los espesores de los suelos (Bernstein y Francois, 1973).

En el caso de las aguas residuales, además de lo que logran reunir con los procesos de disolución e intemperización, estas contienen una cantidad extra de sales y otros elementos químicos. Es por eso que las aguas residuales pueden estar tan contaminadas por las actividades humanas que podrían, por ejemplo si se usan para el riego agrícola, causar problemas de: salinidad e infiltración en los suelos; toxicidad a las plantas por parte de iones específicos tales como el boro (B), cloro (Cl) o sodio (Na); exceso de nutrientes como nitratos y fosfatos (Ramalho, 1998); incluso metales pesados como plomo (Pb), Zinc (Zn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), entre otros.

Otro ejemplo, de los daños que estas aguas residuales pueden provocar, es cuando se vierten en un río o en algún cuerpo de agua en donde existen diversos tipos de vida que conforman a un ecosistema, y de esta forma, ir destruyéndolo.

En México existe una superficie aproximada a  $6.5 \times 10^6$  ha bajo riego, en donde se cuenta con infraestructura hidroagrícola utilizada para almacenar, conducir y auxiliar trabajos de riego con agua que principalmente se obtiene de pozos y presas. No se debe perder de vista que el agua subterránea en México está siendo sobreexplotada, y que esto está generando otros problemas como: aumento de la profundidad de los niveles del agua subterránea; intrusión salina en los mantos acuíferos; así como hundimiento y agrietamiento en zonas localizadas de la corteza terrestre en donde existe la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos.

La agricultura consume cerca del 80% de los recursos globales de agua explotados, y las ciudades compiten cada vez más con la agricultura por el agua, por lo que es urgente hacer planes de reutilización adecuada de las aguas residuales debidamente tratadas y analizadas y llevar a cabo el uso de infraestructura hidroagrícola que haga más eficiente el almacenamiento, conducción y aplicación del agua en los terrenos bajo riego en general.

Derivado principalmente de la gran cantidad de aguas residuales de origen urbano, industrial y agropecuario que recibe el río Lerma, y tomando en cuenta que sobre este río, las entradas y salidas de agua poseen diferentes características en lo referente a la cantidad y calidad de las mismas; es necesario determinar la calidad de estas aguas desde el punto de vista del riego agrícola en puntos distribuidos a criterio a lo largo de su curso; aunque debe recalarse que no es posible proponer una clasificación única de aguas para riego que incluya una serie de índices y que pueda utilizarse como universal en cualquier tipo de condiciones, pero los datos que se obtengan podrán ser utilizados por las dependencias correspondientes para tomar decisiones de acuerdo a la magnitud del problema en cuanto a su uso para el riego agrícola.

Una “Buena Cultura en el uso del Agua” es difícil de adquirir, para ello se requiere que la humanidad en general se concientice de las necesidades cada vez mayores de cuidar el vital líquido.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general:

De acuerdo con Ayers R. S. y Wescot D. W. 1987, determinar para varios puntos distribuidos a criterio sobre el curso del río Lerma la calidad de sus aguas para riego agrícola en dos años consecutivos conforme a los índices de: CSR, SE, SP y RAS-CE, para que el usuario con la información agronómica (cultivo, suelo, clima) pueda decidir sobre la bondad de la calidad del agua para su uso particular.

### 2.2 Objetivos particulares:

Desde las cercanías de los orígenes del río Lerma y hasta el Lago de Chapala, y de acuerdo con las recomendaciones de Aceves N. E. y Palacios V. O. 1970: coleccionar, de 29 sitios distribuidos a criterio, muestras dobles de agua a finales de julio de 2006; y repetir la colecta para los mismos sitios a finales de mayo de 2007.

Utilizando los métodos de APHA (1989), determinar: pH, CE, RSE, RSC,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

## 3 HIPÓTESIS

Considerando que gran cantidad de aguas residuales de origen urbano, industrial y agropecuario son vertidas sobre el río Lerma; la calidad de las aguas de este río, en relación con su uso para el riego agrícola en puntos distribuidos a lo largo de su trayectoria, no es aceptable desde el punto de vista de su conductividad eléctrica.

## 4 REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 Generalidades

La corteza terrestre está constituida en un 90.03% por: oxígeno, silicio, aluminio, hierro y calcio; otro 9.26% lo constituyen: sodio, potasio, magnesio, hidrógeno, titanio, carbono y cloro; y el restante 0.71% de la corteza terrestre está constituido por los demás elementos químicos que aparecen en la tabla periódica.

En los lagos salados y en las minas salinas se encuentran sales formadas por la combinación de cloro, de bromo o de yodo con metales como potasio, sodio, magnesio o calcio.

El río Lerma se origina en los manantiales de Almoloya del Río, en el estado de México, y atraviesa hacia el NW del Valle de Toluca, formando parte del sistema Lerma-Chapala-Santiago (río Lerma, lago de Chapala y río Santiago).

Con el nombre de río Lerma cruza los estados de: México, Michoacán, Querétaro y Guanajuato; luego se dispersa en el Lago de Chapala (recorridos hasta aquí poco más de 700 km), y renace fortalecido con el nombre de río Santiago para continuar el camino, así cruza después los estados de: Jalisco y Nayarit, para desembocar finalmente en el Golfo de San Blas, Nayarit, donde sus aguas se pierden en la inmensidad del Océano Pacífico.



Figura 1. La cuenca Lerma-Chapala y los estados que la conforman.



Figura 2. La cuenca Lerma-Chapala.

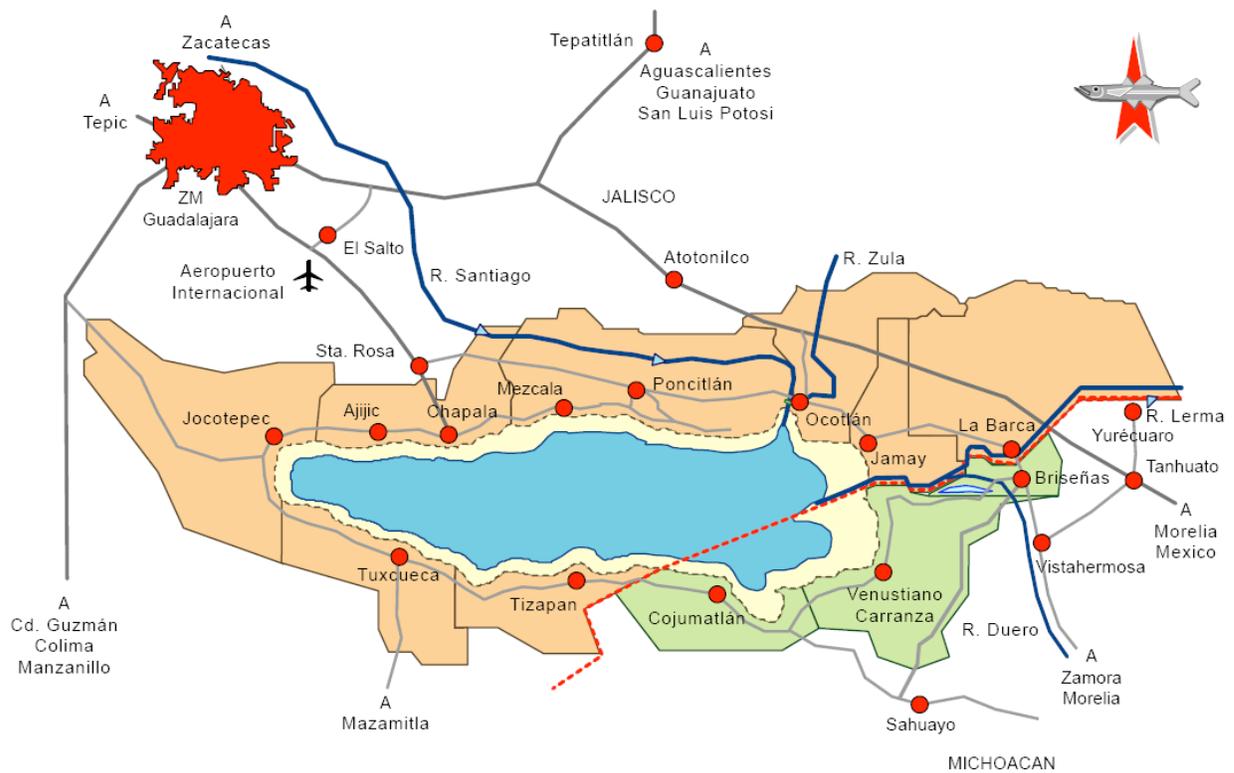


Figura 3. El lago de Chapala y su región.

## 4.2 Geoquímica de los elementos de la solución del suelo

### 4.2.1 Algunos rasgos de importancia

En la actualidad no se encuentran disponibles investigaciones relacionadas directamente con la calidad de las aguas del río Lerma para riego agrícola. La publicación de Cotler *et al* 2006 aborda generalidades acerca de la contaminación del río Lerma y sus consecuencias sociales, económicas y ecológicas, pero no contiene la información suficiente para saber la calidad de las aguas del río en relación con su uso en el riego agrícola.

Las aguas superficiales, durante su escurrimiento hacia las depresiones, pasan a través de diferentes formaciones geológicas, y debido a los procesos de intemperismo de las rocas,

estas aguas se enriquecen con diferentes elementos químicos; sin embargo, se debe señalar también que cuando los diferentes compuestos salinos presentes en las mismas alcanzan concentraciones límite, estos comienzan a precipitarse.

Los elementos que participan en las soluciones de aguas superficiales, freáticas, de acuíferos, marinas y de los suelos, son: Ca, Mg, Na, K, O, Cl, S, C, N, B, y otros (Huez, 1985). En el caso de aguas residuales de industrias, de centros urbanos, y de zonas agrícolas y pecuarias, se debe tomar en cuenta una cantidad extra de sales y otros elementos químicos como plomo, zinc, cadmio, mercurio, entre muchos otros que forman parte de los desechos, producto de las diferentes actividades humanas y que son vertidos en las aguas sin consideración alguna en la mayoría de los casos en el mundo.

#### 4.2.2 Calcio (Ca)

La corteza terrestre contiene 3.2% de Ca; las rocas básicas contienen una cantidad importante de este elemento químico, en tanto que las rocas ácidas contienen una cantidad relativamente menor. El Ca se encuentra en la composición de las augitas, anfíboles, anortitas, y de las plagioclasas (Kovda *et. al.* 1967; Szabolcs, 1989).

El  $\text{CaCO}_3$  que se forma durante el intemperismo de los minerales que contienen calcio, en presencia de  $\text{CO}_2$ , pasa a una forma más soluble como el bicarbonato de calcio  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ .

Las sales solubles de calcio:  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , se acumulan en las aguas naturales superficiales y freáticas. Cuando estas aguas fluyen pueden llegar a depresiones internas, mares y océanos. Como resultado de la evaporación de las soluciones y de las reacciones de intercambio, una parte del calcio se precipita formando: calcita  $\text{CaCO}_3$ , yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , Anhidrita  $\text{CaSO}_4$ , gaylusita  $\text{CaCO}_3\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , y otras que forman parte de la composición de las rocas sedimentarias, rocas marinas y de los suelos.

### 4.2.3 Magnesio (Mg)

2.07 % de la corteza terrestre es magnesio; se encuentra en cantidades relativamente mayores en rocas básicas y ultrabásicas. En el basalto el contenido de Mg es cercano a 3.77% y en los piroxenos 10.9%.

En las rocas sedimentarias y en los suelos, el magnesio se acumula en forma de minerales salinos como: dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , magnesita  $\text{MgCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , epsomita  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , kieserita  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , astrakanita  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , carnalita  $\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , kainita  $\text{KClMgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  y otras (Kovda *et. al.*, 1967)

### 4.2.4 Sodio (Na)

2.35% de la corteza terrestre esta formada por sodio; rocas magmáticas alcalinas tienen entre el 15 y 20% de Na+K, en tanto que rocas basálticas contienen alrededor de 2.31%.

El sodio se encuentra en la albita, plagioclasas, leicita, nefelino, y en los minerales que contienen cloro como: sodolita y nosean.

Las sales de sodio se encuentran en grandes cantidades en las aguas freáticas de las regiones semidesérticas y desérticas. Cuando la concentración de sales es muy alta, predominan el NaCl y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Una fracción del sodio adsorbido puede pasar a la solución del suelo donde reacciona con el  $\text{CO}_3^{-2}$  y  $\text{HCO}_3^-$  para formar carbonato y bicarbonato de sodio.

Los suelos salinos pueden contener hasta 3% de sales de sodio, en tanto que las costras salinas de los suelos pueden contener hasta 20%.

Los siguientes minerales de sodio son los mas ampliamente distribuidos, y se precipitan durante la evaporación de las aguas de los suelos, de las aguas freáticas y de las aguas superficiales: halita NaCl, mirabilita  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , salitre sódico  $\text{NaNO}_3$ , termonatrita  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , soda  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , trona  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , glauberita  $2\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$  y gaylusita  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . (Antipov-Karataev, 1967; Szabolcs, 1989).

#### 4.2.5 Potasio (K)

2.27% de la corteza terrestre está constituida por potasio; se encuentra formando parte, tanto de rocas ácidas, como de rocas básicas. En rocas basálticas, 1.26% de estas está constituido por potasio.

Este elemento se encuentra en las plagioclasas y albita en cantidades traza, pero en mayor proporción se encuentra en la ortoclasa y la muscovita.

Cuando los carbonatos de potasio interactúan con los ácidos y con las sales se transforman en cloruros, sulfatos y nitratos.

En la hidrósfera es más abundante el sodio en comparación con el potasio, esto está relacionado con la mayor resistencia al intemperismo por parte de los minerales potásicos.

En los suelos salinos y sódicos, el potasio adsorbido es considerablemente menor que el sodio. Esto se debe a que el potasio se encuentra en proporción menor a la del sodio en las aguas superficiales y freáticas (Richards, 1973).

Las sales minerales del potasio son: silvita  $KCl$ , carnalita  $KClMgCl_2 \cdot 6H_2O$ , kainita  $KClMgSO_4 \cdot 4H_2O$  y salitre potásico  $KNO_3$ .

#### 4.2.6 Cloro (Cl)

El cloro en la corteza terrestre forma parte de esta en un 0.10%; una gran cantidad se encuentra en las rocas sedimentarias de origen marino, 0.05% del material de rocas extrusivas es cloro, y en rocas alcalinas el cloro es 0.7% del material que las constituye; pero es importante mencionar que la mayor cantidad de cloro se encuentra en la hidrósfera, alrededor de 60% de las reservas de este elemento están ahí. Debido a la evaporación que se da en golfos pequeños y lagunas limítrofes al mar, los cloruros de sodio, potasio y magnesio, forman yacimientos de gran potencial. En las aguas freáticas de los suelos de las zonas áridas y de regiones sin escurrimientos, se encuentran cantidades considerables de este ión.

Los minerales del cloro son: halita  $\text{NaCl}$ , silvita  $\text{KCl}$ , epsomita  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , carnalita  $\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , kainita  $\text{KClMgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , y cloruros de magnesio y calcio hidratados con hasta doce moléculas de agua en algunos casos.

#### 4.2.7 Azufre (S)

0.06% de la corteza terrestre está constituida por azufre; en el caso de las rocas cristalinas, el 0.05% de sus componentes es azufre; en tanto que para las rocas sedimentarias, un 0.22% de sus componentes lo es el azufre.

El azufre en las rocas extrusivas se encuentra en forma de piritita  $\text{FeS}_2$ , gayun  $3\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$ , y otros.

En las rocas sedimentarias predomina el azufre en forma de sales del ácido sulfúrico, tales como: yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , anhidrita  $\text{CaSO}_4$ , kiserita  $\text{MgSO}_4$ , mirabilita  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , glauberita  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$ , astrakanita  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  y kainita  $\text{KClMgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .

En la hidrósfera, 0.09% de sus componentes está constituido por azufre, es por eso que una cantidad considerable se encuentra en los océanos.

#### 4.2.8 Carbono (C)

En las profundidades del planeta, los compuestos de carbono forman yacimientos de carbón, petróleo y gas.

En la corteza terrestre los compuestos de carbono están distribuidos en forma de carbonatos de calcio que forman parte de las calizas y mármoles. Los carbonatos de calcio, uniéndose con el magnesio forman las dolomitas  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Una gran cantidad de carbonatos, fundamentalmente  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$  están contenidos en las rocas sedimentarias.

En las soluciones acuosas de los suelos sódicos y de los suelos salinos se encuentran carbonato y bicarbonato de sodio. Carbonatos de calcio y de magnesio se solubilizan débilmente en el agua, en tanto que los bicarbonatos de estos mismos elementos son mas solubles.

Los minerales que contienen carbono y que están ampliamente distribuidos son: calcita  $\text{CaCO}_3$ , dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , magnesita  $\text{MgCO}_3$ , soda  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , potasa  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , y trona  $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{NaHCO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

## 4.3 Propiedades de los contaminantes del agua residual.

### 4.3.1 Aspectos generales

Las aguas residuales pueden contener compuestos tóxicos que inhiben o destruyen la actividad biológica en el agua. Por ejemplo, las aguas residuales de origen industrial contienen como compuestos tóxicos metales pesados; en las aguas residuales que resultan de las actividades agropecuarias pueden encontrarse compuestos tóxicos derivados de insecticidas, fungicidas y otros agroquímicos.

El balance de oxígeno en el agua se ve afectado por sustancias que consumen oxígeno, tales como desechos orgánicos que se oxidan bioquímicamente o aquellos casos en que se da una reducción inorgánica.

Los aceites y detergentes que se encuentran en las aguas residuales son de las principales sustancias que entorpecen la transferencia de oxígeno a través de la interfase aire-agua.

A mayor temperatura del agua habrá menor concentración de oxígeno en el líquido. Es por eso que otra forma de contaminación del agua, además de los diferentes productos químicos, es cuando las aguas residuales fueron sometidas a situaciones que elevaron su temperatura.

Los sólidos inertes en suspensión o disueltos pueden causar problemas cuando existen en altas concentraciones. Por ejemplo, altas concentraciones de: arcillas en el agua para riego podrían modificar el crecimiento de los cultivos; residuos de la minería podrían afectar la posibilidad del uso del agua para consumo humano.

#### 4.3.2 Enfermedades humanas relacionadas con elementos químicos en el agua

Arsénico (As): produce defectos en el nacimiento; daños en el cerebro, hígado, riñones, y el sistema nervioso central. Ejemplo del origen de este contaminante: industria electrónica.

Cadmio (Cd): causa daños al hígado, testículos, sangre, sistema nervioso e inmunológico; inhalado provoca cáncer pulmonar. Ejemplo del origen de este contaminante: industria de pinturas y pigmentos.

Cromo (Cr): puede causar dermatitis y cáncer. Ejemplo del origen de este contaminante: industria del cromado y curtiduría de pieles.

Mercurio (Hg): es el más peligroso, provoca cambios en la personalidad, daños cerebrales, afección en los recién nacidos y muerte.

Níquel (Ni): combinado con monóxido de carbono produce delirio y muerte. Se encuentra en acumuladores y también es generado en la galvanización de metales.

Plomo (Pb): Afecta al cerebro y al sistema nervioso.

#### 4.4 Solubilidad de las sales nocivas para las plantas

El tipo de sales a que se hace referencia son: cloruros de Na, Ca y Mg; los sulfatos de Na y Mg y los bicarbonatos de Na, Ca y Mg.

En las rocas sedimentarias, capa del intemperismo, y suelos, una gran parte de las sales se encuentra en forma cristalina; durante el humedecimiento una parte de estas sales pasa a la fase líquida. A medida que aumenta la temperatura, la solubilidad aumenta en algunas sales como  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

En cuanto a la precipitación de las sales contenidas en las aguas, estudios han demostrado que en primer lugar se precipitan los hidróxidos de silicio y fierro, después los

carbonatos de calcio y de magnesio, enseguida el yeso y los sulfatos de magnesio, y por último cloruros de sodio, potasio y magnesio (Kovda *et. al.* 1967; Szabolcs, 1989).

Al principio los iones de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , son extraídos en sus orígenes de las mallas cristalinas de los minerales que conforman las rocas. Se puede señalar que la concentración relativa de los iones depende de los procesos específicos que se presentan en las soluciones de las aguas para riego (Ayers y Wescot, 1987).

## 4.5 Calidad de las aguas para riego

### 4.5.1 Índice de Carbonato de Sodio Residual (CSR)

Por lo general, las aguas para riego ricas en iones bicarbonato son las que provienen de acuíferos formados por basaltos, las provenientes de zonas urbano-industriales, y aguas subterráneas en las que se tienen procesos reductores de mucha intensidad (Antipov-Karataev, 1967). En estas aguas existe la tendencia de los iones calcio y magnesio a precipitarse en forma de carbonatos a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Las reacciones de precipitación de los iones de calcio y de magnesio no se completan en circunstancias ordinarias, pero a medida que van teniendo lugar, las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo, aumentando de esta manera la proporción relativa de iones de sodio.

Eaton (1950) propuso los siguientes parámetros de evaluación de las aguas de riego ricas en iones bicarbonato (Richards, 1973):

1. Porcentaje de sodio encontrado =  $\frac{\text{Na}}{(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na})} * 100$
2. Porcentaje de sodio posible =  $\frac{\text{Na}}{(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na}) - (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3)}$
3. Carbonato de Sodio Residual:  $\text{CSR} = (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3) - (\text{Ca} + \text{Mg})$

En estas relaciones, los constituyentes iónicos se expresan en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ . El cálculo de los valores de estas ecuaciones incluye la presuposición de que los iones  $\text{CO}_3$  y  $\text{HCO}_3$  son cuantitativamente precipitados en el suelo hasta el límite de las concentraciones presentes de calcio y de magnesio en las aguas de riego.

Con base en estos índices, se puede concluir que las aguas con mas de  $2.5 \text{ mmol}_c \text{L}^{-1}$  de CSR no son buenas para el riego; aguas que contienen de 1.25 a  $2.5 \text{ mmol}_c \text{L}^{-1}$  son dudosas; y aguas para riego que contienen menos de  $1.25 \text{ mmol}_c \text{L}^{-1}$ , con toda seguridad son buenas.

Cuadro 1. Clasificación de las aguas para riego con base en el índice de carbonato de sodio residual (CSR).

Clase	CSR
	$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$
Buena	<1.25
Condicionada	1.25 – 2.5
No recomendable	>2.5

Se considera que utilizando buenas prácticas de manejo de cultivos, y en combinación con la aplicación de mejoradores químicos, con éxito podrían ser utilizadas las aguas dudosas para el riego de cultivos (Ahmed, et. al., 1979; Oster y Rhoades, 1986).

Estas conclusiones formulan pensando en que las aguas para riego se van a usar bajo condiciones medias con respecto a textura del suelo, velocidad de infiltración, capacidad de drenaje, lámina de riego a aplicar, el clima, y la tolerancia de los cultivos a las condiciones salinas de los suelos. Desviaciones considerables del valor medio de estas variables puede hacer inseguro el uso de una determinada agua de riego que bajo condiciones medias sería de buena calidad, o al contrario.

#### 4.5.2 Índice de Salinidad Efectiva (SE)

Este índice, propuesto por Doneen en 1959, es útil para estimar el peligro que pueden producir las sales más solubles del agua para riego al formar parte de la solución del suelo; esto puede entenderse mejor si se toma en cuenta que al ser sustraídos los carbonatos de

calcio, carbonatos de magnesio, y sulfatos de calcio de la concentración total, cuando estos se precipitan en el momento en que el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo y dejan de participar en el ascenso de la presión osmótica de la solución del suelo; pero es entonces cuando aumenta la concentración relativa de otras sales en la solución del suelo, sales que pueden causar problemas para los cultivos por cambios físico-químicos en el suelo.

El cálculo de este índice está condicionado a lo siguiente:

- I) Si  $Ca > (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$ :  
 $SE = (\text{suma de cationes}) - (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$
- II) Si  $Ca < (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$ ; pero  $Ca > (CO_3 + HCO_3)$ :  
 $SE = (\text{suma de cationes}) - Ca$
- III) Si  $Ca < (CO_3 + HCO_3)$ ; pero  $(Ca + Mg) > (CO_3 + HCO_3)$ :  
 $SE = (\text{suma de cationes}) - (CO_3 + HCO_3)$
- IV) Si  $(Ca + Mg) < (CO_3 + HCO_3)$ :  
 $SE = (\text{suma de cationes}) - (Ca + Mg)$

en todas las anteriores expresiones los iones se expresan en  $mmol_c L^{-1}$ .

Cuadro 2. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad efectiva (SE).

Clase	SE
	$mmol_c L^{-1}$
Buena	<3
Condicionada	3 – 15
No recomendable	>15

#### 4.5.3 Índice de Salinidad Potencial (SP)

Este índice fue propuesto por Doneen en 1961, el objetivo de este índice es evaluar el efecto de las sales solubles de Cl, Na y  $MgSO_4$  cuando la humedad baja del 50% de la Humedad Aprovechable Residual (H.A.R.) y una alta concentración de estas sales en las aguas para riego puede causar daño a los cultivos, ya que esto da lugar a un incremento de la presión osmótica de la solución del suelo.

La expresión matemática utilizada para determinar la salinidad potencial es:

$$SP = Cl + \frac{1}{2} SO_4$$

en esta expresión los iones se expresan en  $mmol_c L^{-1}$ .

Cuadro 3. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad Potencial (SP) y algunos parámetros del suelo.

Condición de suelo	Clase 1 Buena	Clase 2 Condicionada	Clase 3 No recomendable
A.- poco lavado por baja permeabilidad.	<3	3-5	>5
B.- lavado restrictivo, drenaje lento y profundo.	<5	5-10	>10
C.- suelos profundos, percolación profunda y fácil.	<7	7-15	>15
C1.- suelos profundos, cultivos de tolerancia media.	<10	10-30	>30
C2.- suelos profundos, cultivos tolerantes.	<15	15-35	>35

#### 4.5.4 Peligro de salinidad (CE) y sodio (RAS). Diagrama correspondiente para la clasificación de las aguas para riego en función de estos parámetros

La concentración total de sales solubles en las aguas para riego, para fines de diagnóstico y clasificación, se pueden expresar en términos de conductividad eléctrica (C.E.); con base en esto, las aguas para riego se han dividido en 4 clases:

- ❖ Aguas de baja salinidad (C1):  $0 \text{ mS cm}^{-1} < \text{CE} < 0.25 \text{ mS cm}^{-1}$ , pueden usarse para riego en casi todos los cultivos y en casi todos los tipos de suelo, la salinización de los suelos es mínima. Pueden ser necesarios lavados de suelo después de practicar el riego durante mucho tiempo, pero eso solo si la permeabilidad de los terrenos es baja y los cultivos se ven afectados por la salinidad.
- ❖ Aguas de salinidad media (C2):  $0.25 \text{ mS cm}^{-1} < \text{CE} < 0.75 \text{ mS cm}^{-1}$ , pueden usarse siempre y cuando tengan un grado moderado de lavado de suelos. En casi todos los casos, y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, estas aguas pueden usarse en la producción de plantas moderadamente tolerantes a las sales.
- ❖ Aguas altamente salinas (C3):  $0.75 \text{ mS cm}^{-1} < \text{CE} < 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$ , no es conveniente usarlas para riego en suelos cuyo drenaje sea deficiente, y aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales para el control de la salinidad, además de que es necesario que las plantas a regar con estas aguas sean muy tolerantes a la salinidad.
- ❖ Aguas muy altamente salinas (C4):  $\text{CE} > 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$ , no son apropiadas para riego bajo condiciones ordinarias, pero pueden usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado, también es muy importante que los cultivos a regar con estas aguas sean altamente tolerantes a las sales.

Las aguas cuya  $CE \leq 0.75 \text{ mS cm}^{-1}$  son satisfactorias en cuanto a concentración de sales, aun cuando los cultivos sensibles pueden ser afectados de manera adversa cuando se usan aguas que presenten  $0.25 \text{ mS cm}^{-1} < CE \leq 0.75 \text{ mS cm}^{-1}$ .

Las aguas con  $0.75 \text{ mS cm}^{-1} < CE \leq 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$  son comúnmente utilizadas, obteniéndose un buen crecimiento de las plantas, siempre y cuando se haga un buen manejo del suelo y se cuente con drenaje eficiente (Richards, 1973; Oster y Rhoades, 1986).

El empleo de aguas con  $CE > 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$  es una excepción, y en escasas ocasiones se obtienen buenos resultados en las cosechas de los cultivos irrigados con este tipo de aguas.

La clasificación de las aguas para riego, de acuerdo con sus contenidos de sodio, se ha hecho con la intención de prever el efecto del ión sodio sobre los sistemas coloidales de los suelos, además de entender los problemas físico-químicos que se derivan de tener altas cantidades de sodio intercambiable en los suelos. Se sabe que los suelos que tienen altas cantidades de sodio intercambiable poseen un  $\text{pH} > 8.4$ , alta dispersión de los coloides orgánicos e inorgánicos, y altos contenidos de carbonatos y bicarbonatos de sodio (Antipov-Karataev, 1967).

Un parámetro muy importante, para clasificar las aguas en base a su contenido de sodio intercambiable, es la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la cual se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

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

donde:

RAS = Relación de Adsorción de Sodio

Na = concentración de los iones de sodio expresada en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$

Ca = concentración de los iones de calcio expresada en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$

Mg = concentración de los iones de magnesio expresada en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$

La subdivisión de las aguas de riego, con respecto a la RAS, se basa esencialmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre las condiciones físicas de los suelos (Bower *et al*, 1968). Sin embargo, puede darse el caso de que, aunque los contenidos de sodio intercambiable no afecten las condiciones físicas de los suelos, las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños a consecuencia de la acumulación del sodio en sus tejidos.

- ❖ Aguas bajas en sodio (S1):  $0 < \text{RAS} < 10$ , son aguas que pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos y dar como resultado pocas probabilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Pero cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.
- ❖ Aguas medias en sodio (S2):  $10 < \text{RAS} < 18$ , estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.
- ❖ Aguas altas en sodio (S3):  $18 < \text{RAS} < 26$ , pueden provocar niveles altos de sodio intercambiable casi en todos los tipos de suelo, por tal razón será necesario prácticas especiales de manejo, buen drenaje, facilidad de lavado del suelo e incorporaciones adicionales de materia orgánica. El riego con estas aguas, sobre suelos con alto contenido de yeso, difícilmente dará lugar al desarrollo de niveles perjudiciales de sodio intercambiable.
- ❖ Aguas muy altas en sodio (S4):  $\text{RAS} > 26$ , esta agua es inadecuada para el riego de cultivos agrícolas, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio de los suelos y la aplicación de yeso u otros mejoradores en combinación con el uso de este tipo de aguas permite que aun siga siendo rentable el cultivo que se este manejando.

El riesgo de sodificación de los suelos irrigados depende principalmente de la concentración absoluta y relativa en que se encuentren en el agua de riego los iones de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ . Si la proporción de  $\text{Na}^+$  es alta, será mayor el riesgo de sodificación, y al

contrario, si predomina el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$ , el riesgo de sodificación es menor (Bower y Wilcox, 1965).

El diagrama para la clasificación de las aguas para riego está basado en la Conductividad Eléctrica (CE) y en la relación de Adsorción de Sodio (RAS). Las tres curvas que aparecen en el diagrama se construyen a partir de las ecuaciones:

$$\text{Curva superior: } S = 18.87 - 4.44(\log C)$$

$$\text{Curva intermedia: } S = 31.31 - 6.66(\log C)$$

$$\text{Curva inferior: } S = 43.75 - 8.87(\log C)$$

donde:

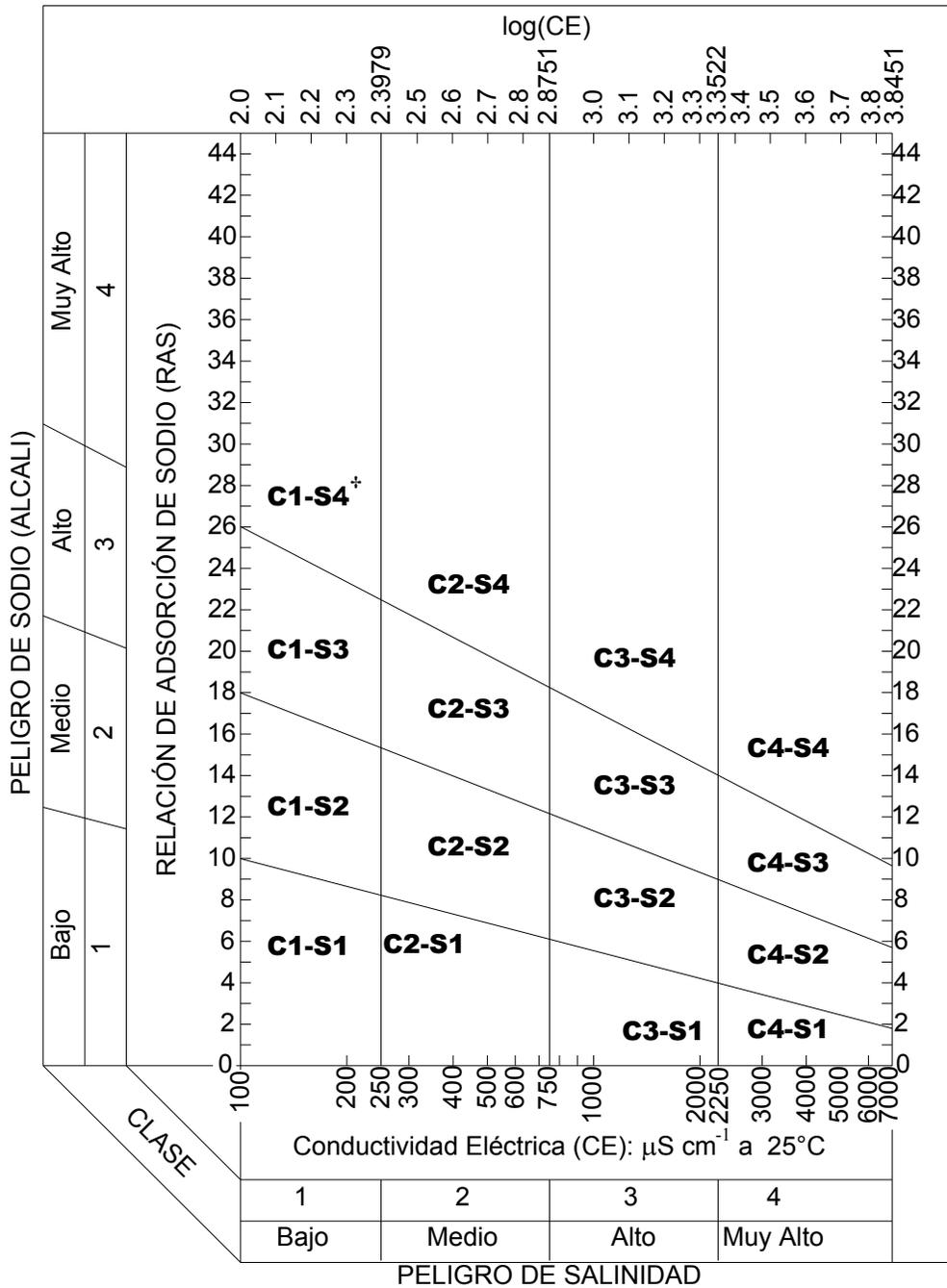
$S = \text{RAS}$

$C = \text{Conductividad Eléctrica (CE) en } \text{mS cm}^{-1}$

Estas son las ecuaciones empíricas de la ley de acción de masas entre los cationes solubles y los intercambiables, y delimitan las diferentes clases de sodio.

Los constituyentes inorgánicos solubles en forma iónica de las aguas para riego reaccionan con los suelos, y los principales cationes son:  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ , y pequeñas cantidades de  $\text{K}^{+}$ ; en tanto que los aniones principales son:  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ ,  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ , y en menor cantidad  $\text{NO}_3^{-}$ .

En el caso particular de las aguas residuales, el contenido de  $\text{NO}_3^{-}$  y de  $\text{PO}_4^{-3}$  es considerable (Castro *et. al.*, 1971; Hernández y Durán, 1993).



†El significado de esta nomenclatura aparece en las páginas: 17 y 19.

Figura 4. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego.

#### 4.5.5 Problemas de infiltración en los suelos agrícolas bajo riego

Este tipo de problemas existe cuando la infiltración del agua en el suelo es muy lenta, y como consecuencia de esto no se humedece el suelo lo suficiente en toda la zona de raíces de los cultivos; ya que antes de que esto último ocurra, el agua se escurre y/o se evapora. Esta disminución de la velocidad de infiltración del agua en el suelo se debe a modificaciones del medio poroso de los suelos, lo que está directamente relacionado con la magnitud de la concentración de sodio intercambiable, es decir, se debe a los altos contenidos de iones de sodio intercambiable en las soluciones de los suelos y de las aguas de riego.

Se ha establecido que cuando los iones de calcio se encuentran adsorbidos en cantidad suficiente en los suelos, los suelos tienen condiciones favorables para el desarrollo de los cultivos agrícolas (Peterson, 1947). Por otro lado, cuando los iones de sodio intercambiable se encuentran adsorbidos en exceso en los suelos, los suelos presentan dispersión coloidal y mayor viscosidad, y en estas condiciones los suelos poseen baja o muy baja velocidad de infiltración del agua.

La dispersión de los suelos y la pérdida de permeabilidad o modificaciones de la geometría del medio poroso se producen únicamente cuando la concentración de sodio sobrepasa la concentración de calcio en una proporción por encima de 3:1 (Ortega, 1993).

El manejo agronómico de los cultivos agrícolas se puede dificultar debido a los efectos de dispersión que producen los iones sodio, lo cual conduce, por ejemplo, a falta de aireación para las raíces de la planta y formación de costras en el suelo que dificultan la germinación de las semillas y emergencia de las nuevas plantas.

Es posible que la solución del suelo se reconcentre por la extracción de agua de las plantas; o bien se diluya por los efectos del riego o de la lixiviación del ión sodio fuera de la zona radical. En lo que se refiere a los iones de calcio, estos no se mantienen completamente en solución o en cantidades constantes, si no que su concentración cambia de manera continua hasta alcanzar un equilibrio. Estas variaciones en su concentración se deben a la disolución de micronutrientes de yeso y de carbonato de calcio, aumentando con esto las concentraciones de

calcio en las soluciones del suelo. La precipitación de los iones de calcio, que generalmente ocurren en forma de carbonato de calcio, influye directamente en los valores relativos de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), ya que la concentración relativa del ión sodio en las soluciones del suelo se ve aumentada debido a que se precipita parcialmente una fracción de calcio en forma de carbonato de calcio (Bower y Goertzen, 1958; Wilcox *et. al.*, 1954).

La disolución del calcio se promueve por la dilución de la solución o por el bióxido de carbono disuelto en el agua del suelo, mientras que su precipitación ocurre debido a la presencia de suficiente calcio conjuntamente con carbonatos, bicarbonatos y sulfatos en cantidades suficientes como para exceder la solubilidad de carbonato de calcio o la solubilidad del sulfato de calcio. Por tal motivo, la calidad de las aguas depende de los procesos de solubilización de los iones de calcio y de la precipitación de los mismos en presencia de iones carbonato y bicarbonato. En consecuencia, el índice de RAS adquiere gran importancia para la evaluación de la calidad agronómica de las aguas superficiales y subterráneas para riego (Rhoades, 1968; Richards, 1973; Ayers y Wescot, 1987).

En el riego por gravedad, la aplicación de grandes láminas de riego acelera más la salinización y/o sodificación de los suelos en comparación con la aplicación del agua al suelo mediante sistemas de riego presurizados.

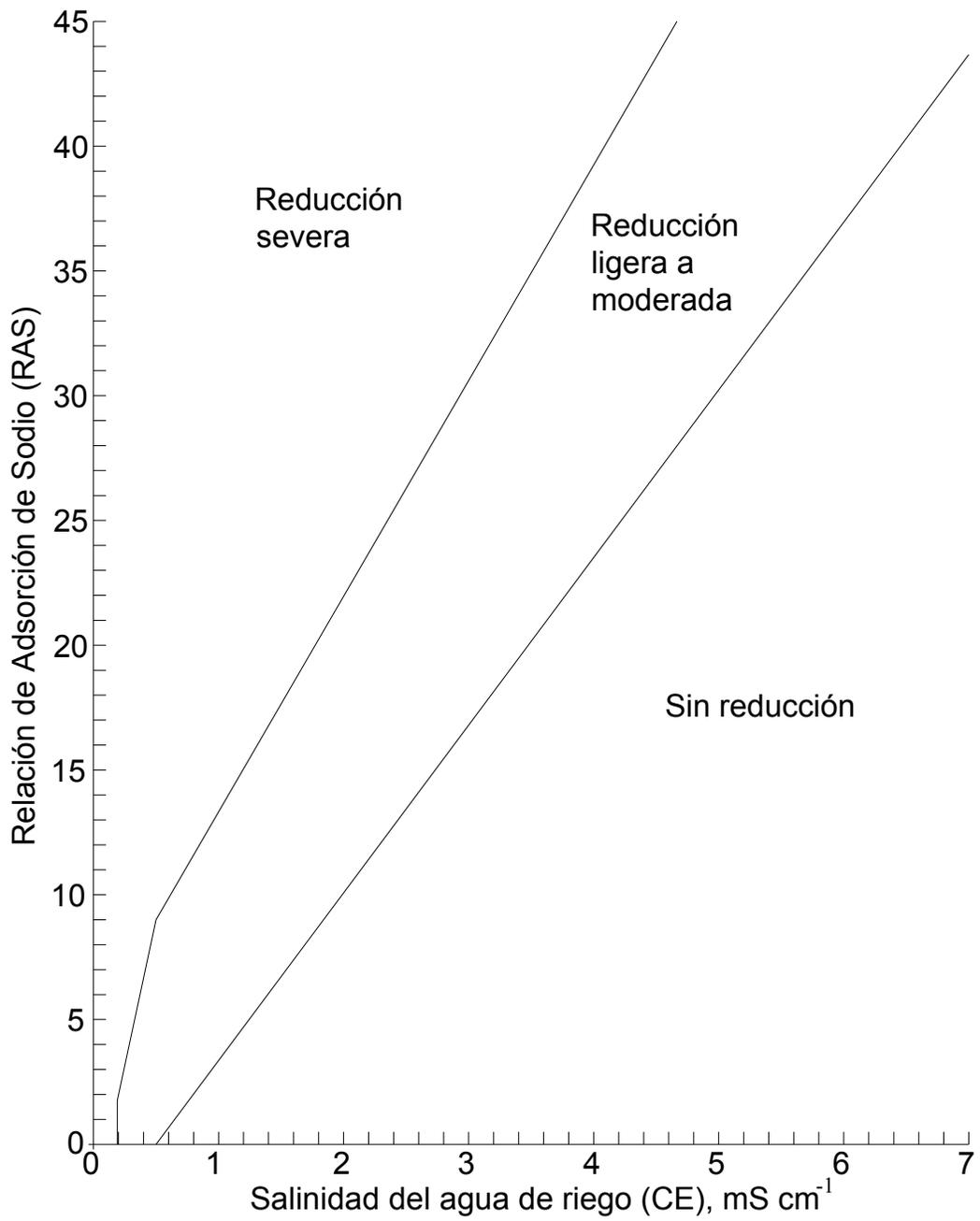


Figura 5. Reducción relativa de la infiltración, provocada por la CE y la RAS (Rhoades 1977; Oster y Schroer 1979).

#### 4.5.6 Boro (B) en las aguas para riego

Desde principios del siglo XX se han realizado un gran número de investigaciones que demostraron que el boro es un elemento esencial para el desarrollo de todas las especies vegetales. Un grupo de trabajos como los de Scofield C. y Wilcox L. en 1935, Eaton en 1935, Eaton y Wilcox en 1939, González O. R. en 1969, Gauch y Dugger en 1954, Skok en 1958, Richards L. A. en 1954, y otros más, constituyen fuentes de referencia que describen con suficiente amplitud este tema, y de ellas se puede sintetizar que:

El contenido mínimo de boro en la solución del suelo debe ser cercana a 0.5 ppm para que existan condiciones normales de crecimiento, y entre 1 y 5 ppm puede ser tóxico, dependiendo de la tolerancia de cada planta, de las características del suelo, del grado de lavado que ocurra natural o artificialmente, y del programa específico de fertilización.

El boro interviene de manera fundamental en los procesos de división celular. Los síntomas de toxicidad causada por boro, son en general: necrosis y clorosis, así como quemaduras, generalmente en los bordes de las hojas.

De acuerdo a la recopilación de Richards L. A., los cítricos, el aguacate y el níspero, muestran quemaduras marginales o apicales en las hojas maduras, acompañadas por clorosis del tejido intervenal. El daño por boro a las hojas de nogal se caracteriza por quemaduras marginales y áreas necróticas entre las venas. Varios árboles frutales, entre ellos el manzano y el peral, son sensibles al boro, pero no acumulan altas concentraciones en sus hojas ni desarrollan en estos los síntomas típicos. El algodón, la vid, la papa, el frijol, el chícharo y otras plantas, muestran quemaduras marginales y enrollamiento, el cual resulta de una restricción en el crecimiento.

En la mayoría de los casos de toxicidad de boro para las plantas, se ha comprobado que esto se debe al exceso de boro en las aguas para riego y una existencia casi nula de este elemento en el suelo (Ayers y Wescot, 1987).

Cuadro 4. Tolerancia relativa de los cultivos agrícolas al boro (Traducido de: Ayers y Wescot, 1985).

<u>Muy Sensibles</u> (<0.50 mg L <sup>-1</sup> )	<u>Moderadamente Sensibles</u> (1.00 mg L <sup>-1</sup> – 2.00 mg L <sup>-1</sup> )
Limón <i>Citrus limon</i> Zarzamora <i>Rubus spp.</i>	Chile <i>Capsicum annuum</i> Chícharo <i>Pisum sativa</i> Zanahoria <i>Daucus carota</i> Rábano <i>Raphanus sativus</i> Papa <i>Solanum tuberosum</i> Pepino <i>Cucumis sativus</i>
<u>Sensibles</u> (0.50 mg L <sup>-1</sup> – 0.75 mg L <sup>-1</sup> )	<u>Moderadamente Tolerantes</u> (2.00 mg L <sup>-1</sup> – 4.00 mg L <sup>-1</sup> )
Aguacate <i>Persea americana</i> Pomelo <i>Citrus X Paradisi</i> Naranja <i>Citrus sinensis</i> Albaricoque <i>Prunus armeniaca</i> Melocotón <i>Prunus persica</i> Cerezo <i>Prunus avium</i> Ciruelo <i>Prunus domestica</i> Caqui <i>Diospyros kaki</i> Higo <i>Ficus carica</i> Vid <i>Vitis vinifera</i> Nuez de Castilla <i>Juglans regia</i> Nuez Americana <i>Carya illinoensis</i> Chícharo salvaje <i>Vigna unguiculata</i> Cebolla <i>Allium cepa</i>	Lechuga orejona <i>Lactuca sativa</i> Col <i>Brassica oleracea capitata</i> Apio <i>Apium graveolens</i> Nabo <i>Brassica rapa</i> Pasto azul de Kentucky <i>Poa pratensis</i> Avena <i>Avena sativa</i> Maíz <i>Zea Mays</i> Alcachofa <i>Cynara scolymus</i> Tabaco <i>Nicotiana tabacum</i> Mostaza <i>Brassica juncea</i> Trebol <i>Melilotus indica</i> Calabaza <i>Cucurbita pepo</i> Melón <i>Cucumis melo</i>
<u>Sensibles</u> (0.75 mg L <sup>-1</sup> – 1.00 mg L <sup>-1</sup> )	<u>Tolerantes</u> (4.00 mg L <sup>-1</sup> – 6.00 mg L <sup>-1</sup> )
Ajo <i>Allium sativum</i> Camote <i>Ipomea batatas</i> Trigo <i>Triticum eastivum</i> Cebada <i>Hordeum vulgare</i> Girasol <i>Helianthus annuus</i> Frijol Chino <i>Vigna radiata</i> Ajonjolí <i>Sesamum indicum</i> Lupino <i>Lupinus hartwegii</i> Fresa <i>Fragaria spp.</i> Papa de Jerusalén <i>Helianthus tuberosus</i> Frijol <i>Phaseolus vulgaris</i> Frijol lima <i>Phaseolus lunatus</i> Cacahuete <i>Arachis hypogaea</i>	Sorgo <i>Sorghum bicolor</i> Tomate <i>Lycopersicon Lycopersicum</i> Alfalfa <i>Medicago sativa</i> Chicharilla india <i>Vicia benghalensis</i> Perejil <i>Petroselinum crispum</i> Remolacha <i>Beta vulgaris</i>
	<u>Muy Tolerantes</u> (6.00 mg L <sup>-1</sup> – 15.00 mg L <sup>-1</sup> )
	Algodón <i>Gossypium hirsutum</i> Espárrago <i>Asparagus officinalis</i>

#### 4.5.7 Fósforo (P) en las aguas para riego

Normalmente las aguas residuales contienen cantidades importantes de este elemento, derivado de los detergentes utilizados en las actividades domésticas; de los excesos utilizados en la agricultura y que luego son drenados natural o artificialmente; y muy probablemente también se deriven de las actividades industriales.

Los problemas asociados al mal uso del fósforo en la agricultura son de tres tipos: agronómicos, económicos y ambientales. Desde el punto de vista agronómico: existen bajos rendimientos, desbalances nutrimentales, deficiencias de Fe, Zn y S; así como inhibición de micorrizas, hongos que ayudan en el proceso de absorción de nutrientes por parte de las plantas. En lo económico: el cultivo solo consume entre 3% y 10% del fertilizante aplicado, el resto son pérdidas. Los problemas ambientales causados por excesos de fósforo en los suelos ocurren cuando, a través de los drenes superficiales y subsuperficiales, el fósforo llega a los cuerpos de agua, en los que puede producirse el problema de eutrofización, que consiste en el enriquecimiento masivo de nutrientes inorgánicos de un ecosistema acuático, con lo cual se promueve el crecimiento excesivo de algunas plantas acuáticas (principalmente el lirio de agua: *Eichhornia crassipes*) que evaporan grandes cantidades de agua, luego, cuando esas plantas mueren, para su descomposición consumen el oxígeno disuelto en el agua provocando condiciones anaeróbicas, todo esto conduce a un aumento de la concentración de contaminantes en las aguas y se agota el oxígeno necesario para otras formas de vida acuática. El nitrógeno, carbono y fósforo son los nutrientes requeridos por el agua dulce para provocar la eutrofización, sin embargo, ha recibido más atención la contaminación por fósforo porque el aire y el agua intercambian nitrógeno y el carbono se fija en la atmósfera (Sharpley y Wither, 1994).

#### 4.5.8 Clasificación de aguas por salinidad en riego por goteo

Normalmente, en suelos con una cantidad de sales relativamente baja, el riego por goteo ofrece la ventaja, simultánea con el ahorro de agua, de mantener constante una cantidad de humedad en el suelo (“en el bulbo de mojado del suelo que envuelve al volumen radical de

la planta”) que permite una presión osmótica de la solución del suelo relativamente baja, de tal modo que esto facilita a las plantas la absorción del agua y nutrientes. Sin embargo, la acumulación de sales en el suelo se sigue dando, y dependiendo del grado de salinidad de las aguas usadas para el riego, puede llegar el momento en que la cantidad de sales en el suelo sea tan grande que ya no permita obtener cosechas redituables en los terrenos de cultivo. Es por eso que deben considerarse algunos detalles como los citados en el cuadro 6.

También es importante señalar que en estos sistemas de riego localizado, el agua utilizada para el riego puede contener elementos físicos, químicos y/o biológicos que provoquen obstrucciones en los goteros (cuadro 5).

Cuadro 5. Elementos físicos, químicos y/o biológicos que provocan obstrucciones en los sistemas de riego localizado.

Físicos	Químicos	Biológicos
Sólidos en suspensión	Precipitación	Bacterias y algas
1. Arena	1. Carbonatos de Ca o Mg	1. Filamentos
2. Limo	2. Sulfato de Ca	2. Mucílagos
3. Arcilla	3. Metales pesados: óxidos, Hidróxidos, carbonatos, Silicatos y sulfuros	3. Depósitos microbianos: a) Fosfatos b) Azufre c) Manganeseo
4. Materia orgánica	4. Fertilizantes: a) Hierro b) Amonio líquido c) Fe, Cu, Zn y Mn	4. Bacterias 5. Organismos acuáticos: a) Huevos de caracoles b) Larvas

Cuadro 6. Clasificación de aguas por salinidad en riego por goteo (Domínguez, 1996).

CE	Clasificación	Consideraciones
$\text{mS cm}^{-1}$		
0.00 0– 1.000	Excelente	No necesita lixiviación.
1.001 – 2.000	Buena	Se requiere del 10% de agua de lixiviación.
2.001 – 3.000	Regular	Se requiere del 14.5% de agua de lixiviación. Pérdidas de Cosecha no mayores al 10%.
3.001 – 4.000	Mediocre	Se requiere del 25% de agua de lixiviación. Fertilización adecuada, y buen manejo en general, permitirán pérdidas en la cosecha dentro del intervalo de 10 – 20%.
4.001 – 5.000	Mala	Puede utilizarse esporádicamente y nunca como agua de riego definitivo, con buena fertirrigación puede haber pérdidas de cosecha del orden de 20 – 30%.
>5000	Muy mala	En caso de utilizarse deberá ser como caso extremo y de ser posible en tierras sueltas.

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Descripción general de la zona de estudio

El río Lerma es el cauce principal de la cuenca Lerma-Chapala, tiene una longitud aproximada de 700 km. Esta cuenca se localiza en la parte central de México (19° 03' a 21° 34' N y 99° 16' a 103° 31' W), donde se extiende desde los orígenes del río Lerma hasta su desembocadura en el lago de Chapala, abarcando una extensión de 53,591.3 km<sup>2</sup>, lo que representa el 2.73 % del territorio nacional; también es importante señalar que el territorio de esta cuenca se distribuye en forma desigual a 5 estados de la República Mexicana: Guanajuato (43.7 %), Michoacán (30.26 %), Jalisco (13.42 %), México (9.85 %) y Querétaro (2.77 %). Asentada principalmente en un medio de origen volcánico extrusivo, su amplio gradiente altitudinal se refleja en variaciones climáticas que influyen en la presencia de numerosas comunidades vegetales dispuestas en tipos de suelo contrastantes. Como resultado, la biodiversidad de la cuenca es extensa, ofreciendo numerosos servicios ambientales a la población. Después de siglos de ocupación y manejo de los recursos naturales, son evidentes las alteraciones de sus condiciones originales; sin embargo, aun quedan remanentes cuyo estudio es indispensable en la búsqueda de su rehabilitación ambiental (Cotler *et al.*, 2006).

Las obras de exportación de agua de la cuenca del río Lerma, para completar la dotación a la ciudad de México, significaron la construcción de 234 pozos y un acueducto desde la localidad de Almoloya del Río. Esta obra, inaugurada en 1951, inició la afectación del ciclo hidrológico de la cuenca. Otro de los componentes del ciclo hidrológico, que también fue afectado, fue el escurrimiento subterráneo, el cual aparece en la superficie en forma de manantiales. Los manantiales que alimentaban al lago Almoloya del Río, y daban origen al río Lerma, desaparecieron. El sistema lacustre conformado por los tres lagos se convirtió en un conjunto de ciénagas unidas por un canal, el cual se considera como el origen del colector general del río Lerma. Estos lagos solo vierten agua en forma escalonada en épocas de lluvia abundante. En la estación Atenco, que mide el volumen del lago Almoloya del Río, el promedio de los caudales mensuales para el período 1945-1950, antes de la puesta en funcionamiento de las obras de exportación de agua, variaba entre 1.5 y 2.1 m<sup>3</sup>/s,

escurriendo durante todos los meses del año. En tanto, para el período 1951-1980, con obras de exportación de agua funcionando, el promedio disminuyó, reportándose de 0.1 a 0.2 m<sup>3</sup>/s; escurriendo solo al final de la época de lluvia, cuando la laguna se llenaba al máximo. De esta manera, el nacimiento del río Lerma se fija actualmente en las corrientes que se forman en la vertiente noreste del Nevado de Toluca, donde destacan el río Santiaguito y el río Verdiguél, colectados por el canal mencionado. Otro efecto al ciclo hidrológico es la pérdida de los escurrimientos superficiales; este es el caso del río Verdiguél, que se aprovecha casi en su totalidad para el abastecimiento de la ciudad de Toluca, por lo que su aportación al río Lerma es casi nula y compuesta por aguas residuales (Cotler *et al.*, 2006).

Río abajo, el Lerma recibe varios afluentes, siendo los más importantes los ríos: La Gavia, Jaltepec, La Laja, Silao-Guanajuato, Turbio, Angulo y Duero.

En condiciones promedio, los escurrimientos superficiales son aprovechados casi en su totalidad (para generación de energía, riego agrícola y abastecimiento a zonas urbanas, entre otros), por lo que el flujo de agua en el río Lerma desaparece en algunos tramos.

El río Lerma desemboca en el lago de Chapala, que tiene una longitud de 77 km y un ancho de 23 km, aportando un caudal medio anual de 2,150 millones de m<sup>3</sup>. Debido a la desecación de la parte este del lago con fines de uso agrícola, el río Duero, que anteriormente desembocaba en el lago, fue desviado hacia el Lerma. Por la intensa utilización de sus aguas, el lago se convirtió en lo que se denomina la ciénaga de Chapala, hasta que las intensas lluvias del 2003 permitieron una recuperación del almacenamiento, del 19 % que tenía en el 2000, al 37% en dicho año lluvioso de 2003. Este lago, el de mayor dimensión en el país y el tercero en América Latina, junto con el río Lerma, conforma uno de los principales elementos del ciclo hidrológico de la cuenca.

En la cuenca Lerma-Chapala se reportan 47 acuíferos, de los que se extraen 96.7 millones de m<sup>3</sup>/año de agua subterránea, 79.2 millones de m<sup>3</sup> (81.9 %) se utilizan en la zona urbana y 17.5 millones de m<sup>3</sup> (18.1 %) en el medio rural.

La intensa extracción de agua subterránea que se realiza en los valles condujo a la desaparición de manantiales y el descenso del nivel del agua subterránea de hasta 7 m/año en el Valle de Querétaro, de 2 a 3 m/año en el estado de Guanajuato y de 2 m/año en promedio en el acuífero de Morelia.

Otros efectos de la extracción intensiva de agua subterránea han sido: el hundimiento del terreno y formación de fallas, producto de la pérdida de presión de los sedimentos poco consolidados ante la extracción del agua subterránea; y la inducción de flujos de agua subterránea provenientes de sistemas regionales que se caracterizan por la elevada temperatura y presencia de iones como flúor, litio, sílice en solución y arsénico, lo cual ha representado problemas en la potabilización para los sistemas municipales de agua potable.

Esta cuenca concentra una población urbana, industrial y agrícola de las más importantes de México. Las más de 3500 industrias de diversos giros (química, petroquímica, destiladora, textil, peletera, alimenticia, maderera, metalúrgica, metal-mecánica, electromecánica, minera y cantera); los más de ocho millones de habitantes; y aproximadamente 750,000 ha de tierras cultivadas, generan importantes descargas de agua residual, en su mayoría sin tratamiento, las cuales contaminan la mayor parte de las aguas superficiales de la cuenca, y simultáneamente estas aguas se infiltran en el subsuelo y contaminan los acuíferos.

Los meses más lluviosos se presentan a partir de mayo, con lluvias máximas en el mes de julio, y disminuyen hasta cubrir seis meses de estación lluviosa en octubre. Los seis meses restantes son los de menor precipitación o estiaje. Se aprecia también una relación directa entre la precipitación y la temperatura, de forma tal que los meses de máxima precipitación son también los de máximas temperaturas.

## 5.2 Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas del río Lerma

Las fechas de colecta fueron elegidas considerando que habría mayor precipitación pluvial en una época con respecto a la otra. De esta forma se podría identificar la magnitud del efecto de la precipitación pluvial sobre la concentración de B, P, cationes y aniones en las aguas del río Lerma.

Cuadro 7. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas del río Lerma.

N° de sitio	Sitio	Latitud N			Longitud W			Altitud m
		°	'	"	°	'	"	
1	Lago Huixquilucan, Camino Méx.-Toluca †	19	18	12.0	99	23	12.4	2997
2	R. Lerma, Camino Santiago Tianguistenco-Chapultepec, Edo. de Méx.	19	11	0.2	99	30	49.8	2576
3	R. Lerma, San Pedro Tlaltizapan, Edo. de Méx.	19	12	12.6	99	30	53.0	2572
4	R. Lerma, San Pedro Tultepec, Edo. de Méx.	19	16	18.1	99	31	15.7	2572
5	R. Lerma, Camino Toluca-Naucalpan, Edo. de Méx.	19	22	36.3	99	33	18.1	2570
6	R. Lerma, Camino Toluca-Atlaconulco, Edo. de Méx.	19	28	7.2	99	44	12.9	2549
7	R. Lerma, Atlaconulco, Edo. de Méx.	19	46	56.2	99	53	41.7	2512
8	R. Lerma, Camino Atlaconulco-Temascalcingo, Edo. de Méx.	19	54	5.0	100	1	24.5	2377
9	R. Lerma, Tungareo, Mich.	19	54	26.9	100	22	4.3	2010
10	R. Lerma, Aguas abajo de la cortina de la Presa Solís, Gto.	20	3	5.0	100	40	14.6	1875
11	R. Lerma, Puente de Salvatierra, Gto.	20	13	17.3	100	53	9.7	1744
12	R. Lerma, Camino Sn. Agustín-El Capulín, Gto.	20	16	13.5	100	59	0.2	1738
13	R. Laja, Gto. †	20	29	27.1	100	57	42.1	1725
14	Antes de Salamanca (afluente del Lerma), Gto. †	20	33	19.3	101	10	18.5	1706
15	R. Lerma antes de Salamanca, Gto.	20	33	20.5	101	10	21.7	1706
16	R. Lerma después de Salamanca, Gto.	20	33	46.9	101	13	24.4	1700
17	R. Lerma, Pastor Ortiz, Mich.	20	18	1.0	101	36	1.0	1677
18	R. Turbio, Gto. †	20	19	31.2	101	37	19.9	1678
19	R. Lerma, entrada a La Piedad, límites Gto.-Mich.	20	21	17.8	102	0	16.4	1676
20	R. Lerma, salida de La Piedad, límites Gto.-Mich.	20	22	44.2	102	7	10.1	1620
21	R. Lerma, entrada a Yurécuaro, límites Jal.-Mich.	20	20	9.4	102	15	8.4	1561
22	R. Lerma, después de Yurécuaro, límites Jal.-Mich.	20	20	49.6	102	19	45.5	1530
23	R. Lerma, Briseñas, límites Jal.-Mich.	20	16	29.8	102	33	32.6	1527
24	R. Lerma antes de recibir al R. Duero, límites Jal.-Mich.	20	14	4.3	102	37	29.0	1525
25	R. Duero, límites Jal.-Mich. †	20	14	1.1	102	37	26.7	1525
26	Orilla L. de Chapala, Límites Jamay-Ocotlán, Jal. †	20	17	52.3	102	46	11.8	1525
27	R. Zula, Ocotlán, Jal. †	20	20	38.8	102	46	33.1	1525
28	Orilla L. de Chapala, entre "El Zapote", Jal. y salida al R. Santiago †	20	19	11.5	102	47	21.3	1525
29	Orilla L. de Chapala, "El Zapote", Jal. †	20	18	35.3	102	48	29.6	1525

† Sitio que no está sobre el cauce del río Lerma

En la figura 6 se pueden apreciar los valores de altitud para cada uno de los sitios en donde se colectaron las muestras de agua.

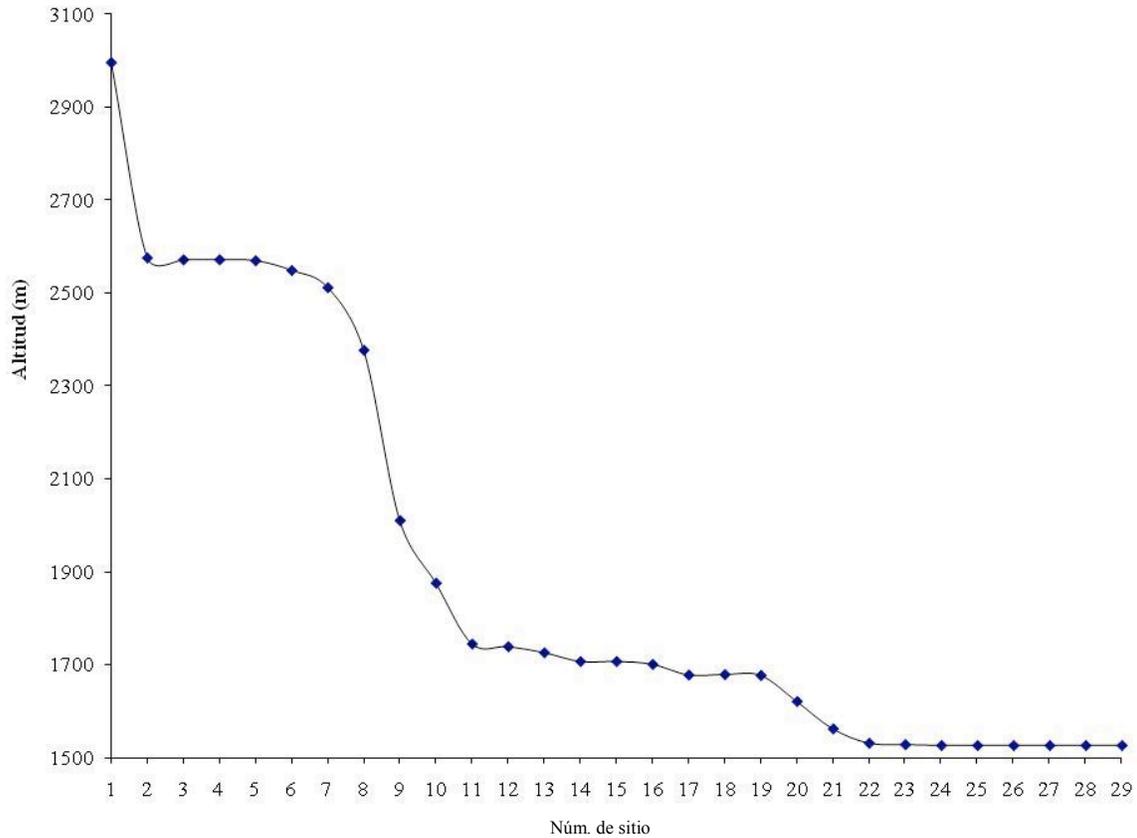


Figura 6. Altitud de los sitios de muestreo de las aguas del río Lerma.

A pesar de que el río Lerma nace en el estado de México desde una altitud cercana a 2600 m, y desemboca en el Lago de Chapala a una altitud cercana a 1525 m, en la figura 6 se observa que la altitud del primer punto es muy por arriba de 2600 m, esto es porque ese punto es uno de los escasos puntos que no están sobre el cauce del río Lerma. Pero cabe señalar que los otros escasos puntos, que no están sobre el río Lerma, están más cercanos planimétrica y altimétricamente al río Lerma.



### 5.3 Métodos utilizados para caracterizar las aguas del río Lerma

En esta tesis están los resultados de la colecta y análisis químico de 58 muestras dobles de agua que en su mayoría son del río Lerma. Se hicieron 2 muestreos: el primero en 29 sitios a finales de julio de 2006; y el segundo en los mismos 29 sitios, pero a finales de mayo de 2007. A estas muestras de agua se les determinó: pH; Conductividad Eléctrica (CE); Residuo Seco Evaporado (RSE); Residuo Seco Calcinado (RSC); contenido de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , B, y P. Luego se determinaron los siguientes índices salinos: Relación de Adsorción de Sodio (RAS), Salinidad Efectiva (SE), Salinidad Potencial (SP) y Carbonato de Sodio Residual (CSR), que pueden ser de utilidad para conocer en forma general la calidad de las aguas para riego agrícola.

Cuadro 8. Métodos utilizados para caracterizar las aguas del río Lerma.

Parámetro(s)	Método
pH	Potenciómetro
Conductividad Eléctrica	Conductímetro
Residuo Seco Evaporado	Gravimetría
Residuo Seco Calcinado	Gravimetría
$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{CO}_3^{2-}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$	Volumétrico (titulación)
$\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$	Flamometría
$\text{SO}_4^{2-}$ , B, P	Espectrofotometría

### 5.4 Criterios utilizados para la verificación de la validez de los resultados obtenidos en los análisis de las aguas del río Lerma

#### 5.4.1 Suma de aniones y cationes

Las soluciones salinas son eléctricamente neutras, por lo tanto la suma de cationes debe ser igual a la suma de aniones. En esta tesis se determinaron solo los principales cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) y aniones ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) responsables del pH y

Conductividad Eléctrica de cada muestra de agua, esto justifica la validez de una ligera diferencia al comparar la suma de aniones con la suma de cationes, y de no haber errores grandes en los análisis de laboratorio, los resultados obtenidos en los análisis de aguas deben cumplir con lo establecido en la literatura en cuanto a los porcentajes de diferencia aceptables (APHA, 1989).

Cuadro 9. Porcentajes de diferencia aceptable entre la suma de cationes y aniones en el agua.

SUMA DE CATIONES (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	% DIF. ACEPTABLE
0.0 – 3.0	±0.2
3.0 – 10.0	±2.0
10 – 800	±2.5

El porcentaje de diferencia aceptable se calcula de la forma que a continuación se detalla:

$$\%DIF = \left[ \frac{\Sigma c - \Sigma a}{\Sigma c + \Sigma a} \right] * 100$$

donde:

% DIF=diferencia de la suma de cationes y la suma de aniones, %,

$\Sigma a$ =Suma de cationes, mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>,

$\Sigma c$ =Suma de aniones, mmol<sub>a</sub> L<sup>-1</sup>.

#### 5.4.2 Relación de la Conductividad Eléctrica (CE) con algunos parámetros

Como resultado de la innumerable cantidad de veces que se han realizado (por parte de instituciones agronómicas de investigación) análisis de aguas parecidos a los que se han hecho para este trabajo de tesis, han sido establecidos algunos “coeficientes empíricos” para la Conductividad Eléctrica (CE) del agua:

$$RSC = 640(CE) \dots\dots\dots(1)$$

$$I = 20(CE) \dots\dots\dots(2)$$

donde:

$RSC$  = Residuo Seco Calcinado, ppm,

$I$  = Iones = ( $\Sigma$ Cationes +  $\Sigma$ Aniones), mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>,

$CE$  = Conductividad Eléctrica, mS cm<sup>-1</sup>.

Estas expresiones permiten, en la mayoría de los casos comunes, a partir de la Conductividad Eléctrica del agua, darse una idea general del contenido de iones (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>) y/o Sólidos Totales Inorgánicos (RSC: STI) en el agua.

En caso de llevarse a cabo la determinación de iones y cationes, y RSC, debe obtenerse un valor aproximado al de estos coeficientes de la Conductividad Eléctrica al hacer la regresión lineal correspondiente con los datos en conjunto de varias muestras de agua que hayan sido analizadas.

Al comparar, los coeficientes señalados en las expresiones matemáticas anteriores, con los obtenidos a partir de los datos en conjunto de varias muestras de agua, quizás no serán idénticos, pero si muy parecidos en caso de que el error en los análisis de las aguas en estudio haya sido mínimo. Aunque esto no puede ser una regla general, ya que puede haber ocasiones en que las muestras de agua contengan elementos químicos que no provoquen variación en la Conductividad Eléctrica (por ejemplo el Silicio), y será entonces cuando el coeficiente de la Conductividad Eléctrica en la expresión matemática número (1) tendrá un valor diferente al obtenido con los datos de dichas muestras, y la magnitud de tal diferencia dependerá de la cantidad del o los elementos químicos que no provoquen variación en la Conductividad Eléctrica. Es por eso que esta no es la única manera en que puede ser verificada la validez de los datos obtenidos en análisis de aguas, pero en la mayoría de los casos más comunes es útil.

En una muestra de agua, los Sólidos Totales Disueltos (STD) son el Residuo Seco Evaporado (RSE); este RSE contiene a los Sólidos Totales Orgánicos (STO) y a los Sólidos Totales Inorgánicos (STI). El Residuo Seco Calcinado (RSC) solo representa a los STI. En resumen:

$$STO = STD - STI$$

ó

$$STO = RSE - RSC$$

Para una muestra de agua determinada, los STD se pueden obtener directamente mediante el RSE (STD medidos  $\rightarrow$  STD<sub>m</sub>), o indirectamente a partir de la conversión de los iones en meq•L<sup>-1</sup> a iones en ppm (STD calculados  $\rightarrow$  STD<sub>c</sub>).

La validez de los resultados obtenidos en los análisis de las aguas se puede verificar si se determinan los STD de ambas formas, y debe cumplirse:

$$1.0 < \frac{STD_m}{STD_c} < 1.2$$

donde:

$$STD_m = \text{STD medidos, mg L}^{-1},$$

$$STD_c = \text{STD calculados, mg L}^{-1},$$

Aunque cabe señalar que cuando solo se determinan los principales cationes (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y Na<sup>+</sup>) y aniones (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) responsables del pH y Conductividad Eléctrica de cada muestra de agua, pero que también existan en las muestras de agua elementos químicos que no provoquen variación en la Conductividad Eléctrica (por ejemplo el Silicio) y que no se haya determinado químicamente la cantidad de estos, quizás no se cumpla el requisito anterior. Pero eso no es común que ocurra.

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Boro en las aguas del río Lerma

Cuadro 10. Boro en las aguas del río Lerma (muestreo 1 y 2).

N° de sitio	Sitio	BORO	
		Muestreo 1	Muestreo 2
		----- mg L <sup>-1</sup> -----	
1	Lago Huixquilucan, Camino Méx.-Toluca †	0.268	0.124
2	R. Lerma, Camino Santiago Tianguistenco-Chapultepec, Edo.	0.261	0.087
3	R. Lerma, San Pedro Tlaltizapan, Edo. de Méx.	0.331	0.402
4	R. Lerma, San Pedro Tultepec, Edo. de Méx.	0.321	0.208
5	R. Lerma, Camino Toluca-Naucalpan, Edo. de Méx.	0.428	0.492
6	R. Lerma, Camino Toluca-Atlacomulco, Edo. de Méx.	0.291	0.335
7	R. Lerma, Atlacomulco, Edo. de Méx.	0.365	0.325
8	R. Lerma, Camino Atlacomulco-Temascalcingo, Edo. de Méx.	0.361	0.365
9	R. Lerma, Tungareo, Mich.	0.378	0.482
10	R. Lerma, Aguas abajo de la cortina de la Presa Solís, Gto.	0.385	0.435
11	R. Lerma, Puente de Salvatierra, Gto.	0.315	0.331
12	R. Lerma, Camino Sn. Agustín-El Capulín, Gto.	0.435	0.301
13	R. Laja, Gto. †	0.833	1.058
14	Antes de Salamanca (afluente del Lerma), Gto. †	2.768	0.559
15	R. Lerma antes de Salamanca, Gto.	2.802	0.422
16	R. Lerma después de Salamanca, Gto.	1.238	0.485
17	R. Lerma, Pastor Ortiz, Mich.	0.361	0.261
18	R. Turbio, Gto. †	0.428	1.121
19	R. Lerma, entrada a La Piedad, límites Gto.-Mich.	0.194	0.084
20	R. Lerma, salida de La Piedad, límites Gto.-Mich.	0.208	0.094
21	R. Lerma, entrada a Yurécuaro, límites Jal.-Mich.	0.251	0.214
22	R. Lerma, después de Yurécuaro, límites Jal.-Mich.	0.442	0.686
23	R. Lerma, Briseñas, límites Jal.-Mich.	0.348	0.910
24	R. Lerma antes de recibir al R. Duero, límites Jal.-Mich.	0.589	0.790
25	R. Duero, límites Jal.-Mich. †	0.251	0.870
26	Orilla L. de Chapala, Límites Jamay-Ocotlán, Jal. †	0.569	0.656
27	R. Zula, Ocotlán, Jal. †	0.700	2.453
28	Orilla L. de Chapala, entre "El Zapote", Jal. y salida al R. Sant	0.613	0.847
29	Orilla L. de Chapala. "El Zapote", Jal. †	0.646	0.646

† Sitio que no está sobre el cauce del río Lerma

MIN.:	0.194	0.084
MAX.:	2.802	2.453
MEDIA	0.599	0.553
DESV. EST.:	0.643	0.465
C.V.:	1.073	0.841

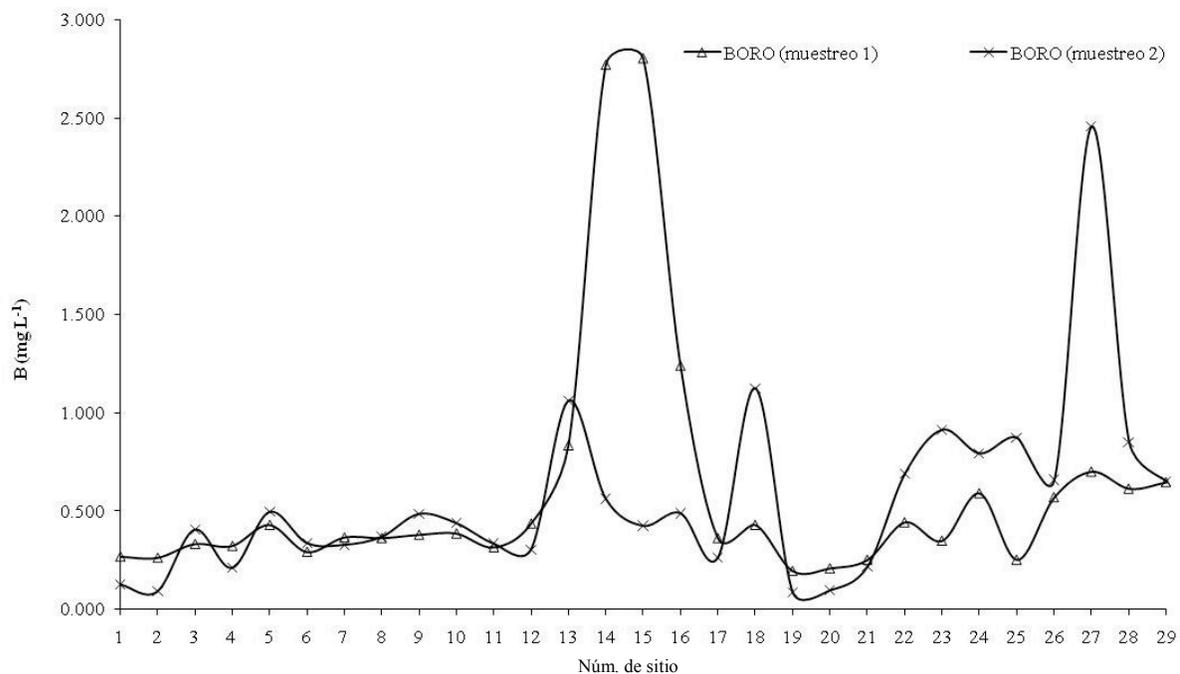


Figura 8. Boro en las aguas del río Lerma.

Los sitios con menor contaminación por boro fueron: el río Lerma, entrada a La Piedad, límites Gto.-Mich., con  $0.194 \text{ mg L}^{-1}$ , dato del muestreo 1, a finales de julio de 2006; y siguió siendo ese sitio el que presentó menor contaminación por boro con  $0.084 \text{ mg L}^{-1}$  en el muestreo 2, a finales de mayo de 2007.

El sitio con mayor contaminación por boro fue el río Lerma antes de Salamanca, Gto., con  $2.802 \text{ mg L}^{-1}$ , dato del muestreo 1, a finales de julio de 2006; además, también se observó en datos del muestreo 1 que las concentraciones por boro solo se dispararon por arriba de  $1.2 \text{ mg L}^{-1}$  en los tres sitios cercanos a Salamanca, Gto., en tanto que para todos los otros 26 sitios la concentración fue menor a  $0.85 \text{ mg L}^{-1}$ . Al observar los datos del muestreo 2, de finales de mayo de 2007, el sitio con mayor contaminación por boro fue el río Zula, Ocotlán, Jal., con  $2.453 \text{ mg L}^{-1}$ , siguiéndole los ríos Turbio ( $1.121 \text{ mg L}^{-1}$ ) y Laja ( $1.058 \text{ mg L}^{-1}$ ); también se observa que los primeros 19 sitios (no contando a los ríos Laja y Turbio) tenían concentraciones de boro menores a  $0.6 \text{ mg L}^{-1}$ , y en adelante (no contando al sitio "R. Zula, Ocotlán, Jal.") restan otros 7 sitios con una concentración menor a  $0.92 \text{ mg L}^{-1}$ .

La media indica que fue mayor la concentración de boro en las aguas del río Lerma durante el muestreo 1. Quizás esto se debió a que en la época del muestreo 1 hubo menos precipitación y por consiguiente una mayor concentración de algunos de los contaminantes en las aguas. Sin embargo se observa que existen 16 sitios (la mayoría) del segundo muestreo en los cuales fue mayor el boro en comparación con el primer muestreo. La razón de esto requiere de un estudio adicional.

El coeficiente de variación (C. V.) indica que los datos se alejaban más de la media en el caso del muestreo 1, situación que también se puede apreciar en la gráfica de “Boro en las aguas del río Lerma”. Esto también está relacionado con la menor precipitación durante el muestreo 1, de tal forma que los sitios donde las aguas residuales son vertidas al río Lerma mantienen su concentración con poca dilución en tramos relativamente cortos del río, y es entonces cuando se puede identificar aquellas zonas en que mas contaminación se vierte al río.

Cuadro 11. Tolerancia de los cultivos al Boro contenido en las aguas del río Lerma suponiendo inexistencia de este elemento en el suelo (muestreo 1 y 2).

Intervalos de B mg L <sup>-1</sup>	Frecuencia			
	---Muestreo 1---		---Muestreo 2---	
	casos	%	casos	%
Muy sensibles (<0.50)	20	68.97%	18	62.07%
Sensibles (0.50-0.75)	5	17.24%	4	13.79%
Sensibles (0.75-1.00)	1	3.45%	4	13.79%
Moderadamente sensibles (1.00-2.00)	1	3.45%	2	6.90%
Moderadamente tolerantes (2.00-4.00)	2	6.90%	1	3.45%
Tolerantes (4.00-6.00)	0	0.00%	0	0.00%
Muy tolerantes (6.00-15.00)	0	0.00%	0	0.00%
TOTAL:	29	100.00%	29	100.00%

En la mayoría de los casos, las aguas del río Lerma no causan problemas por exceso de boro.

## 6.2 Fósforo en las aguas del río Lerma

Cuadro 12. Fósforo en las aguas del río Lerma (muestreo 1 y 2).

N° de sitio	Sitio	FÓSFORO	
		Muestreo 1	Muestreo 2
		----- mg L <sup>-1</sup> -----	
1	Lago Huixquilucan, Camino Méx.-Toluca †	0.000	0.059
2	R. Lerma, Camino Santiago Tianguistenco-Chapultepec, Edo. de Méx.	0.151	9.852
3	R. Lerma, San Pedro Tlaltizapan, Edo. de Méx.	0.430	12.865
4	R. Lerma, San Pedro Tultepec, Edo. de Méx.	0.692	13.975
5	R. Lerma, Camino Toluca-Naucalpan, Edo. de Méx.	4.220	19.458
6	R. Lerma, Camino Toluca-Atlacomulco, Edo. de Méx.	4.129	7.544
7	R. Lerma, Atlacomulco, Edo. de Méx.	3.589	4.917
8	R. Lerma, Camino Atlacomulco-Temascalcingo, Edo. de Méx.	1.788	4.288
9	R. Lerma, Tungareo, Mich.	0.918	1.953
10	R. Lerma, Aguas abajo de la cortina de la Presa Solís, Gto.	0.140	0.400
11	R. Lerma, Puente de Salvatierra, Gto.	0.235	0.611
12	R. Lerma, Camino Sn. Agustín-El Capulín, Gto.	0.115	0.425
13	R. Laja, Gto. †	2.343	33.124
14	Antes de Salamanca (afluente del Lerma), Gto. †	2.668	1.556
15	R. Lerma antes de Salamanca, Gto.	4.711	0.502
16	R. Lerma después de Salamanca, Gto.	24.518	0.794
17	R. Lerma, Pastor Ortiz, Mich.	1.869	3.218
18	R. Turbio, Gto. †	2.402	10.761
19	R. Lerma, entrada a La Piedad, límites Gto.-Mich.	0.028	0.344
20	R. Lerma, salida de La Piedad, límites Gto.-Mich.	1.467	0.936
21	R. Lerma, entrada a Yurécuaro, límites Jal.-Mich.	1.833	1.716
22	R. Lerma, después de Yurécuaro, límites Jal.-Mich.	2.993	3.544
23	R. Lerma, Briseñas, límites Jal.-Mich.	0.919	4.919
24	R. Lerma antes de recibir al R. Duero, límites Jal.-Mich.	0.932	1.823
25	R. Duero, límites Jal.-Mich. †	1.461	1.786
26	Orilla L. de Chapala, Límites Jamay-Ocotlán, Jal. †	0.308	0.829
27	R. Zula, Ocotlán, Jal. †	10.691	21.149
28	Orilla L. de Chapala, entre "El Zapote", Jal. y salida al R. Santiago †	4.652	5.513
29	Orilla L. de Chapala, "El Zapote", Jal. †	0.585	0.875

† Sitio que no está sobre el cauce del río Lerma

MIN.:	0.000	0.059
MAX.:	24.518	33.124
MEDIA	2.786	5.853
DESV. EST.:	4.734	7.792
C. V.:	1.699	1.331

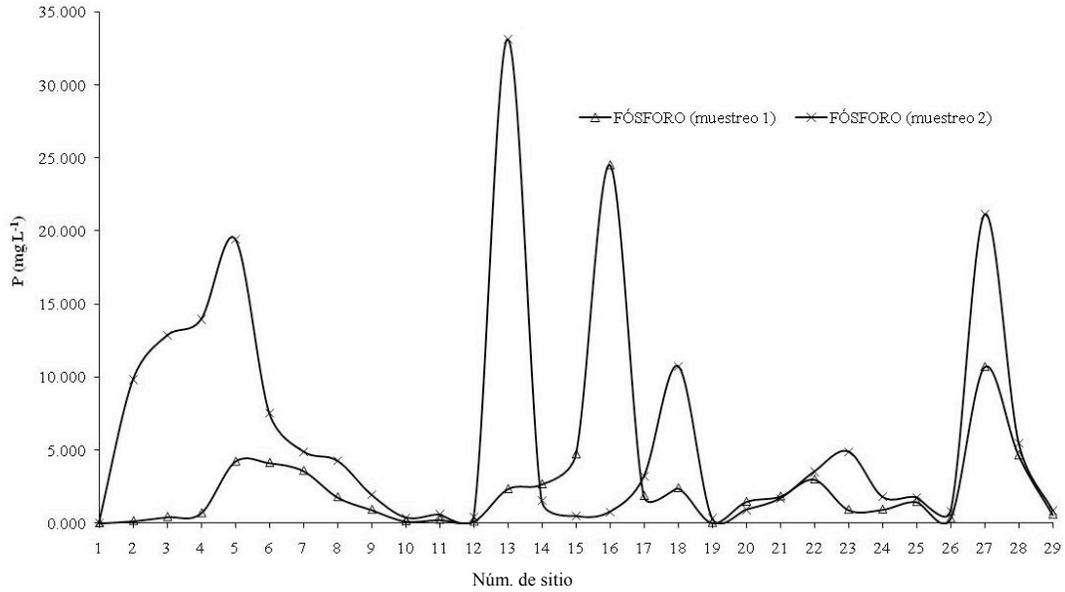


Figura 9. Fósforo en las aguas del río Lerma.

Cuadro 13. Fósforo en las aguas del río Lerma, distribución de frecuencias (muestreo 1 y 2).

Intervalos de P mg L <sup>-1</sup>	Frecuencia			
	---Muestreo 1---		---Muestreo 2---	
	casos	%	casos	%
0.000-2.000	18	62.07%	15	51.72%
2.001-4.000	5	17.24%	2	6.90%
4.001-6.000	4	13.79%	4	13.79%
6.001-8.000	0	0.00%	1	3.45%
8.001-10.000	0	0.00%	1	3.45%
10.001-12.000	1	3.45%	1	3.45%
12.001-14.000	0	0.00%	2	6.90%
14.001-16.000	0	0.00%	0	0.00%
16.001-18.000	0	0.00%	0	0.00%
18.001-20.000	0	0.00%	1	3.45%
20.001-22.000	0	0.00%	1	3.45%
22.001-24.000	0	0.00%	0	0.00%
24.001-26.000	1	3.45%	0	0.00%
26.001-28.000	0	0.00%	0	0.00%
28.001-30.000	0	0.00%	0	0.00%
30.001-32.000	0	0.00%	0	0.00%
32.001-34.00	0	0.00%	1	3.45%
<b>TOTAL</b>	<b>29</b>	<b>100.00%</b>	<b>29</b>	<b>100.00%</b>

Los sitios con menor contaminación por fósforo fueron: el lago Huixquilucan, Camino Méx.-Toluca, con  $0.000 \text{ mg L}^{-1}$ , a finales de julio de 2006; y siguió siendo ese sitio el que presentó menor contaminación por fósforo con  $0.059 \text{ mg L}^{-1}$  a finales de mayo de 2007.

El sitio con mayor contaminación por fósforo fue el río Lerma después de Salamanca, Gto., con  $24.518 \text{ mg L}^{-1}$ , dato del muestreo 1, a finales de julio de 2006, y en segundo lugar el sitio del río Zula ( $10.691 \text{ mg L}^{-1}$ ), los otros 27 sitios tienen una concentración menor a  $4.8 \text{ mg L}^{-1}$ . En los datos del muestreo 2, a finales de mayo de 2007, el sitio con mayor contaminación por fósforo fue el río Laja, en Gto, con  $33.124 \text{ mg L}^{-1}$ .

Con base en la media, se puede afirmar que fue mayor la concentración de fósforo en las aguas del río Lerma durante el muestreo 2 a pesar de que la precipitación pluvial fue mayor en comparación con la precipitación pluvial durante el muestreo 1. Lo mas probable es que, por haber ocurrido una mayor precipitación cuando se hizo el muestreo 2, las aguas hayan podido arrastrar buena parte de los excesos de fósforo de la gran cantidad de terrenos agrícolas de la cuenca Lerma-Chapala, que quizás fue esa la fuente principal del fósforo que enriqueció la concentración con este elemento en las aguas del río Lerma.

Según el coeficiente de variación (C. V.), los datos se alejaban más de la media en el caso del muestreo 1, situación que también se puede apreciar en la gráfica de “Fósforo en las aguas del río Lerma”. Esto se debe a la menor precipitación que hubo durante el muestreo 1, de tal forma que los sitios donde las aguas residuales son vertidas al río Lerma mantienen su concentración con poca dilución en tramos relativamente cortos del río, y de esta forma se pueden identificar las zonas en que mas contaminación (con algunos contaminantes, como el fósforo) llega al río.

También cabe señalar que, además de considerar análisis de los suelos, estos datos pueden ser tomados en cuenta cuando se desee hacer una aplicación de fósforo a tierras de cultivo, y de este modo no aplicar excesos de fósforo.

## 6.3 Residuo Seco Evaporado (RSE) y Residuo Seco Calcinado (RSC) de las aguas del río Lerma

Cuadro 14. Residuo Seco Evaporado (RSE) y Residuo Seco Calcinado (RSC) de las aguas del río Lerma (muestreo 1).

N° de sitio	CE	IONES								STD <sub>c</sub> <sup>†</sup>	STD <sub>m</sub> <sup>‡</sup>	STI <sup>§</sup>	STO <sup>¶</sup>	STD <sub>m</sub> STD <sub>c</sub>
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>					
	mS cm <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>												
1	0.120	8.02	8.39	2.30	0.39	0.00	29.90	21.27	3.84	74.10	76	16	60	1.0
2	0.265	31.26	7.29	4.60	10.17	3.00	44.54	35.45	34.58	170.90	198	138	60	1.2
3	0.290	22.85	7.90	16.09	15.25	3.60	46.98	37.23	41.79	191.68	220	156	64	1.1
4	0.150	13.83	6.68	4.14	2.74	1.80	33.56	17.73	16.33	96.80	110	70	40	1.1
5	0.690	46.69	7.90	71.27	29.33	3.00	142.17	95.72	74.93	471.01	530	382	148	1.1
6	0.540	33.07	8.51	57.47	19.16	2.40	129.36	83.31	31.70	364.98	418	300	118	1.1
7	0.350	24.05	7.90	29.89	12.12	1.50	64.07	56.72	33.14	229.39	280	202	78	1.2
8	0.340	16.03	11.54	30.35	10.95	4.50	118.98	20.21	28.82	241.38	250	164	86	1.0
9	0.440	27.05	9.72	43.22	12.51	3.00	152.54	30.14	37.94	316.13	336	250	86	1.1
10	0.390	28.06	12.15	27.82	9.38	3.60	137.29	26.24	31.22	275.76	284	208	76	1.0
11	0.410	30.06	10.94	31.73	10.95	4.50	171.46	21.27	19.21	300.12	286	210	76	1.0
12	0.400	22.04	13.98	32.88	10.95	3.60	162.92	24.82	18.25	289.43	292	208	84	1.0
13	1.235	29.06	35.85	160.70	31.67	0.00	423.46	131.18	60.04	871.95	868	664	204	1.0
14	5.880	51.10	16.41	1220.76	47.70	0.00	810.31	255.26	1742.56	4144.10	4792	4384	408	1.2
15	6.460	52.10	15.19	1350.42	47.31	0.00	1239.87	241.08	1682.52	4628.50	4876	4338	538	1.1
16	2.000	28.06	15.19	381.63	19.94	9.00	413.70	131.18	407.78	1406.48	1450	1320	130	1.0
17	0.710	26.05	17.01	93.80	8.99	0.00	190.37	58.50	98.94	493.67	514	428	86	1.0
18	0.740	47.09	13.37	79.31	16.03	0.00	227.59	46.09	100.86	530.36	562	464	98	1.1
19	0.305	18.04	9.11	28.74	4.30	3.00	105.56	24.82	19.69	213.26	214	170	44	1.0
20	0.370	21.04	13.37	29.89	7.82	0.00	134.85	33.68	19.21	259.86	274	214	60	1.1
21	0.430	23.85	15.80	33.34	12.12	0.00	147.05	37.23	32.66	302.04	316	214	102	1.0
22	0.560	30.46	14.58	56.33	14.08	0.00	198.92	46.09	40.83	401.28	428	300	128	1.1
23	0.520	24.25	13.98	52.88	13.69	0.00	190.37	46.09	34.58	375.83	370	262	108	1.0
24	0.480	19.44	13.37	55.18	11.34	0.00	188.54	39.00	21.61	348.48	362	262	100	1.0
25	0.330	21.44	11.54	25.29	5.47	0.00	123.87	28.36	16.81	232.79	252	182	70	1.1
26	0.810	23.65	14.58	113.80	26.20	0.00	264.20	76.22	64.36	583.02	588	424	164	1.0
27	0.980	34.27	25.52	113.80	26.59	0.00	303.26	115.22	70.12	688.78	746	564	182	1.1
28	0.980	45.09	28.80	101.16	25.81	0.00	310.58	92.18	85.49	689.10	710	534	176	1.0
29	0.825	31.06	21.87	95.41	25.42	0.00	280.07	76.22	58.12	588.17	596	412	184	1.0
MIN.:	0.120	8.02	6.68	2.30	0.39	0.00	29.90	17.73	3.84	74.10	76	16	40	1.0
MAX.:	6.460	52.10	35.85	1350.42	47.70	9.00	1239.87	255.26	1742.56	4628.50	4876	4384	538	1.2
MEDIA	0.966	28.59	14.08	149.80	16.84	1.60	234.01	67.19	169.93	682.05	731	601	130	1.1
DESV. EST.:	1.492	10.93	6.69	323.08	11.69	2.18	247.71	60.13	433.42	1062.06	1169	1069.22	106.30	
C. V.:	1.545	0.38	0.47	2.16	0.69	1.36	1.06	0.89	2.55	1.56	1.60	1.78	0.82	

<sup>†</sup> Sólidos Totales Disueltos calculados a partir de los iones.

<sup>‡</sup> Sólidos Totales Disueltos medidos = RSE medido.

<sup>§</sup> Sólidos Totales Inorgánicos = RSC.

<sup>¶</sup> Sólidos Totales Orgánicos = RSE-RSC = STD-STI.

Cuadro 15. Residuo Seco Evaporado (RSE) y Residuo Seco Calcinado (RSC) de las aguas del río Lerma (muestreo 2).

N° de sitio	CE	IONES								STD <sub>c</sub> <sup>†</sup>	STD <sub>m</sub> <sup>‡</sup>	STI <sup>§</sup>	STO <sup>¶</sup>	STD <sub>m</sub> STD <sub>c</sub>
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>					
	mS cm <sup>-1</sup>	-mg L <sup>-1</sup>												
1	0.160	13.03	7.90	2.76	2.35	0.00	42.10	17.73	15.85	101.71	126	56	70	1.2
2	0.610	39.08	31.60	22.30	17.60	0.00	222.71	51.41	34.58	419.27	442	284	158	1.1
3	1.010	73.15	42.90	43.22	32.06	0.00	356.34	93.95	54.76	696.38	778	498	280	1.1
4	0.710	47.09	29.17	38.62	20.33	0.00	264.20	58.14	38.90	496.47	482	310	172	1.0
5	1.300	57.72	51.41	98.40	51.61	0.00	387.46	118.77	132.08	897.44	932	628	304	1.0
6	0.790	33.07	28.56	66.21	33.24	0.00	212.34	83.31	81.65	538.38	594	418	176	1.1
7	0.650	25.05	12.76	76.79	28.15	0.00	190.37	69.13	54.27	456.53	454	314	140	1.0
8	0.600	23.05	14.58	68.97	20.33	0.00	173.90	62.04	53.79	416.67	420	300	120	1.0
9	0.430	18.24	10.69	49.43	11.73	0.00	133.02	51.41	24.02	298.53	400	312	88	1.3
10	0.350	14.43	7.78	42.76	9.38	0.00	101.90	46.80	18.25	241.30	278	114	164	1.2
11	0.370	13.83	8.26	46.90	9.38	0.00	114.71	45.38	19.21	257.68	288	184	104	1.1
12	0.360	14.83	8.75	42.30	10.17	0.00	118.98	41.13	17.29	253.45	278	192	86	1.1
13	1.450	60.52	41.44	155.87	36.76	0.00	524.14	136.49	66.28	1021.50	1128	710	418	1.1
14	0.630	30.46	22.60	53.80	17.20	0.00	208.68	68.78	30.74	432.26	436	296	140	1.0
15	0.460	18.84	13.00	49.66	14.08	0.00	153.76	51.05	22.57	322.97	350	218	132	1.1
16	0.520	27.05	12.76	54.26	12.51	0.00	144.00	58.50	46.11	355.19	360	246	114	1.0
17	0.870	42.48	26.25	74.26	38.32	0.00	246.51	87.92	84.53	600.28	628	454	174	1.0
18	1.360	57.31	38.64	137.02	50.05	0.00	402.71	135.43	122.00	943.17	1116	790	326	1.2
19	0.370	15.63	8.51	42.99	10.17	0.00	119.59	43.96	15.37	256.22	256	134	122	1.0
20	0.390	19.44	8.75	43.22	10.95	0.00	123.87	45.03	22.09	273.34	256	142	114	0.9
21	0.540	21.64	12.40	67.59	11.34	0.00	156.81	59.92	46.11	375.81	380	238	142	1.0
22	0.760	34.87	27.10	64.37	28.94	0.00	212.34	78.71	77.81	524.13	554	400	154	1.1
23	0.850	41.28	25.28	74.49	36.76	0.00	245.90	85.09	81.17	589.96	612	432	180	1.0
24	0.890	44.89	26.37	77.25	39.88	0.00	267.26	90.76	83.57	629.98	618	448	170	1.0
25	0.890	43.69	26.98	76.56	40.67	0.00	262.37	93.24	79.73	623.23	614	420	194	1.0
26	0.920	46.29	26.61	78.63	42.23	0.00	262.98	95.01	82.13	633.89	690	496	194	1.1
27	1.290	50.50	37.92	134.72	43.79	0.00	446.04	111.68	88.38	913.02	882	604	278	1.0
28	1.190	49.70	35.97	121.62	39.88	0.00	412.48	104.94	83.57	848.16	868	646	222	1.0
29	0.920	37.27	23.33	104.37	26.59	0.00	333.76	75.16	56.68	657.17	660	466	194	1.0
MIN.:	0.160	13.03	7.78	2.76	2.35		42.10	17.73	15.37	101.71	126	56	70	0.9
MAX.:	1.450	73.15	51.41	155.87	51.61		524.14	136.49	132.08	1021.50	1128	790	418	1.3
MEDIA	0.746	34.98	23.04	69.29	25.74		235.91	74.51	56.33	519.80	548	371	177	1.1
DESV. EST.:	0.342	16.44	12.44	35.02	14.26		117.51	29.25	32.22	240.86	258	187	79	
C. V.:	0.458	0.47	0.54	0.51	0.55		0.50	0.39	0.57	0.46	0.47	0.50	0.45	

<sup>†</sup> Sólidos Totales Disueltos calculados a partir de los iones.

<sup>‡</sup> Sólidos Totales Disueltos medidos = RSE medido.

<sup>§</sup> Sólidos Totales Inorgánicos = RSC.

<sup>¶</sup> Sólidos Totales Orgánicos = RSE-RSC = STD-STI.

En los cuadros 14 y 15 se observa que es aceptable la validez de los resultados obtenidos en el laboratorio, ya que para la mayoría de los casos se cumple:

$$1.0 < \frac{STD_m}{STD_c} < 1.2$$

## 6.4 pH, Conductividad Eléctrica y composición iónica de las aguas del río Lerma

Los datos de pH, Conductividad Eléctrica y Composición Iónica aparecen en el cuadro 16 para el muestreo 1, y en el cuadro 17 para el muestreo 2; y sus gráficas de Composición Iónica correspondientes, en la figura 10 para el muestreo 1, y en la figura 11 para el muestreo 2.

Cuadro 16. pH, Conductividad Eléctrica y composición iónica de las aguas del río Lerma (muestreo 1).

Nº de sitio	pH	CE mS cm <sup>-1</sup>	CATIONES				ANIONES				Σ <sub>a</sub>	% DIF [(Σ <sub>c</sub> -Σ <sub>a</sub> )/(Σ <sub>c</sub> +Σ <sub>a</sub> )]*100	
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ <sub>c</sub>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>			SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
1	8.00	0.120	0.40	0.69	0.10	0.01	1.20	0.00	0.49	0.60	0.08	1.17	1.3
2	8.40	0.265	1.56	0.60	0.20	0.26	2.62	0.10	0.73	1.00	0.72	2.55	1.4
3	8.70	0.290	1.14	0.65	0.70	0.39	2.88	0.12	0.77	1.05	0.87	2.81	1.2
4	9.10	0.150	0.69	0.55	0.18	0.07	1.49	0.06	0.55	0.50	0.34	1.45	1.4
5	9.30	0.690	2.33	0.65	3.10	0.75	6.83	0.10	2.33	2.70	1.56	6.69	1.0
6	9.30	0.540	1.65	0.70	2.50	0.49	5.34	0.08	2.12	2.35	0.66	5.21	1.2
7	9.40	0.350	1.20	0.65	1.30	0.31	3.46	0.05	1.05	1.60	0.69	3.39	1.0
8	8.95	0.340	0.80	0.95	1.32	0.28	3.35	0.15	1.95	0.57	0.60	3.27	1.2
9	9.00	0.440	1.35	0.80	1.88	0.32	4.35	0.10	2.50	0.85	0.79	4.24	1.3
10	8.70	0.390	1.40	1.00	1.21	0.24	3.85	0.12	2.25	0.74	0.65	3.76	1.2
11	8.95	0.410	1.50	0.90	1.38	0.28	4.06	0.15	2.81	0.60	0.40	3.96	1.2
12	8.70	0.400	1.10	1.15	1.43	0.28	3.96	0.12	2.67	0.70	0.38	3.87	1.1
13	7.35	1.235	1.45	2.95	6.99	0.81	12.20	0.00	6.94	3.70	1.25	11.89	1.3
14	7.45	5.880	2.55	1.35	53.10	1.22	58.22	0.00	13.28	7.20	36.28	56.76	1.3
15	7.55	6.460	2.60	1.25	58.74	1.21	63.80	0.00	20.32	6.80	35.03	62.15	1.3
16	8.55	2.000	1.40	1.25	16.60	0.51	19.76	0.30	6.78	3.70	8.49	19.27	1.3
17	8.05	0.710	1.30	1.40	4.08	0.23	7.01	0.00	3.12	1.65	2.06	6.83	1.3
18	7.95	0.740	2.35	1.10	3.45	0.41	7.31	0.00	3.73	1.30	2.10	7.13	1.2
19	8.35	0.305	0.90	0.75	1.25	0.11	3.01	0.10	1.73	0.70	0.41	2.94	1.2
20	7.60	0.370	1.05	1.10	1.30	0.20	3.65	0.00	2.21	0.95	0.40	3.56	1.2
21	7.55	0.430	1.19	1.30	1.45	0.31	4.25	0.00	2.41	1.05	0.68	4.14	1.3
22	7.45	0.560	1.52	1.20	2.45	0.36	5.53	0.00	3.26	1.30	0.85	5.41	1.1
23	7.50	0.520	1.21	1.15	2.30	0.35	5.01	0.00	3.12	1.30	0.72	5.14	1.3
24	7.55	0.480	0.97	1.10	2.40	0.29	4.76	0.00	3.09	1.10	0.45	4.64	1.3
25	7.55	0.330	1.07	0.95	1.10	0.14	3.26	0.00	2.03	0.80	0.35	3.18	1.2
26	7.70	0.810	1.18	1.20	4.95	0.67	8.00	0.00	4.33	2.15	1.34	7.82	1.1
27	7.50	0.980	1.71	2.10	4.95	0.68	9.44	0.00	4.97	3.25	1.46	9.68	1.3
28	7.45	0.980	2.25	2.37	4.40	0.66	9.68	0.00	5.09	2.60	1.78	9.47	1.1
29	7.45	0.825	1.55	1.80	4.15	0.65	8.15	0.00	4.59	2.15	1.21	7.95	1.2
MIN.:	7.35	0.120	0.40	0.55	0.10	0.01	1.20	0.00	0.49	0.50	0.08	1.17	1.0
MAX.:	9.40	6.460	2.60	2.95	58.74	1.22	63.80	0.30	20.32	7.20	36.28	62.15	1.4
MEDIA	8.17	0.966	1.43	1.16	6.52	0.43	9.53	0.05	3.84	1.90	3.54	9.32	1.2
DESV. EST.:	0.70	1.492	0.55	0.55	14.05	0.30	14.75	0.07	4.06	1.70	9.02	14.37	
C.V.:	0.09	1.55	0.38	0.47	2.16	0.69	1.55	1.36	1.06	0.89	2.55	1.54	

Cuadro 17. pH, Conductividad Eléctrica y composición iónica de las aguas del río Lerma (muestreo 2).

N° de sitio	pH	CE mS cm <sup>-1</sup> -----	C A T I O N E S				A N I O N E S					Σ <sub>a</sub>	% DIF [(Σ <sub>c</sub> -Σ <sub>a</sub> )/(Σ <sub>c</sub> +Σ <sub>a</sub> )]*100
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ <sub>c</sub>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
1	6.40	0.160	0.65	0.65	0.12	0.06	1.48	0.00	0.69	0.50	0.33	1.52	1.3
2	6.50	0.610	1.95	2.60	0.97	0.45	5.97	0.00	3.65	1.45	0.72	5.82	1.3
3	6.68	1.010	3.65	3.53	1.88	0.82	9.88	0.00	5.84	2.65	1.14	9.63	1.3
4	6.68	0.710	2.35	2.40	1.68	0.52	6.95	0.00	4.33	1.64	0.81	6.78	1.2
5	7.13	1.300	2.88	4.23	4.28	1.32	12.71	0.00	6.35	3.35	2.75	12.45	1.0
6	6.88	0.790	1.65	2.35	2.88	0.85	7.73	0.00	3.48	2.35	1.70	7.53	1.3
7	7.03	0.650	1.25	1.05	3.34	0.72	6.36	0.00	3.12	1.95	1.13	6.20	1.3
8	6.98	0.600	1.15	1.20	3.00	0.52	5.87	0.00	2.85	1.75	1.12	5.72	1.3
9	7.58	0.430	0.91	0.88	2.15	0.30	4.24	0.00	2.18	1.45	0.50	4.13	1.3
10	7.43	0.350	0.72	0.64	1.86	0.24	3.46	0.00	1.67	1.32	0.38	3.37	1.3
11	7.18	0.370	0.69	0.68	2.04	0.24	3.65	0.00	1.88	1.28	0.40	3.56	1.2
12	7.25	0.360	0.74	0.72	1.84	0.26	3.56	0.00	1.95	1.16	0.36	3.47	1.3
13	7.23	1.450	3.02	3.41	6.78	0.94	14.15	0.00	8.59	3.85	1.38	13.82	1.2
14	7.10	0.630	1.52	1.86	2.34	0.44	6.16	0.00	3.42	1.94	0.64	6.00	1.3
15	7.08	0.460	0.94	1.07	2.16	0.36	4.53	0.00	2.52	1.44	0.47	4.43	1.1
16	7.40	0.520	1.35	1.05	2.36	0.32	5.08	0.00	2.36	1.65	0.96	4.97	1.1
17	8.05	0.870	2.12	2.16	3.23	0.98	8.49	0.00	4.04	2.48	1.76	8.28	1.3
18	8.00	1.360	2.86	3.18	5.96	1.28	13.28	0.00	6.60	3.82	2.54	12.96	1.2
19	6.65	0.370	0.78	0.70	1.87	0.26	3.61	0.00	1.96	1.24	0.32	3.52	1.3
20	6.68	0.390	0.97	0.72	1.88	0.28	3.85	0.00	2.03	1.27	0.46	3.76	1.2
21	7.30	0.540	1.08	1.02	2.94	0.29	5.33	0.00	2.57	1.69	0.96	5.22	1.0
22	6.85	0.760	1.74	2.23	2.80	0.74	7.51	0.00	3.48	2.22	1.62	7.32	1.3
23	7.08	0.850	2.06	2.08	3.24	0.94	8.32	0.00	4.03	2.40	1.69	8.12	1.2
24	7.28	0.890	2.24	2.17	3.36	1.02	8.79	0.00	4.38	2.56	1.74	8.68	0.6
25	7.00	0.890	2.18	2.22	3.33	1.04	8.77	0.00	4.30	2.63	1.66	8.59	1.0
26	7.90	0.920	2.31	2.19	3.42	1.08	9.00	0.00	4.31	2.68	1.71	8.70	1.7
27	7.10	1.290	2.52	3.12	5.86	1.12	12.62	0.00	7.31	3.15	1.84	12.30	1.3
28	7.03	1.190	2.48	2.96	5.29	1.02	11.75	0.00	6.76	2.96	1.74	11.46	1.2
29	7.13	0.920	1.86	1.92	4.54	0.68	9.00	0.00	5.47	2.12	1.18	8.77	1.3
MIN.:	6.40	0.160	0.65	0.64	0.12	0.06	1.48		0.69	0.50	0.32	1.52	0.6
MAX.:	8.05	1.450	3.65	4.23	6.78	1.32	14.15		8.59	3.85	2.75	13.82	1.7
MEDIA	7.12	0.746	1.75	1.90	3.01	0.66	7.31		3.87	2.10	1.17	7.14	1.2
DESV. EST.:	0.41	0.342	0.82	1.02	1.52	0.36	3.34		1.93	0.82	0.67	3.26	
C.V.:	0.06	0.458	0.47	0.54	0.51	0.55	0.46		0.50	0.39	0.57	0.46	

Se observa en los cuadros 16 y 17 que %DIF está dentro del rango de 0.6 a 1.7, por lo tanto son aceptables los resultados de laboratorio que están tales tablas.

En el cuadro 18 está la clasificación de las aguas del río Lerma (para ambos muestreos simultáneamente) tomando en cuenta la salinidad que a grandes rasgos indica la Conductividad eléctrica.

Cuadro 18. R. Lerma, Clasificación de las aguas por salinidad en riego por goteo (muestreo 1 y 2).

Intervalos de CE mS cm <sup>-1</sup>	Frecuencia			
	Muestreo 1		Muestreo 2	
	Casos	%	Casos	%
Excelente (0.000– 1.000)	25	86.2%	23	79.3%
Buena (1.001 – 2.000)	2	6.9%	6	20.7%
Regular (2.001 – 3.000)	0	0.0%	0	0.0%
Mediocre (3.001 – 4.000)	0	0.0%	0	0.0%
Mala (4.001 – 5.000)	0	0.0%	0	0.0%
Muy mala (>5000)	2	6.9%	0	0.0%
TOTAL	29	100.0%	29	100.0%

De acuerdo al cuadro 18, alrededor del 80% de los sitios muestreados en el río Lerma (para ambos muestreos) son de calidad excelente para el riego por goteo. Pero debe considerarse que también es necesario conocer las condiciones agronómicas (cultivo, suelo y clima) en que se usará el agua para el riego agrícola, y de este modo poder tomar una decisión más acertada.

Debe tomarse en cuenta que para usar el agua en riego por goteo es necesario, además de una clasificación como la del cuadro 18, considerar que el agua puede contener elementos físicos, químicos y/o biológicos que provoquen obstrucciones en los goteros, por lo que deberán tomarse las medidas preventivas apropiadas.

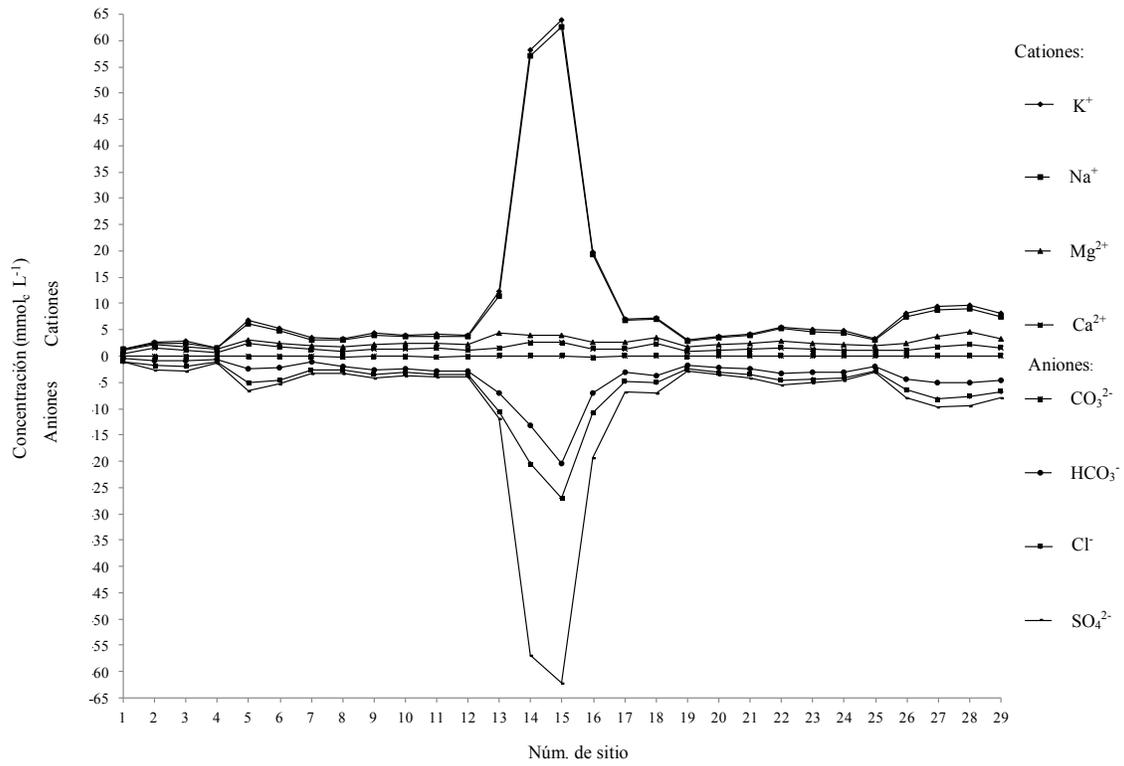


Figura 10. Composición iónica de las aguas del río Lerma (muestreo 1).

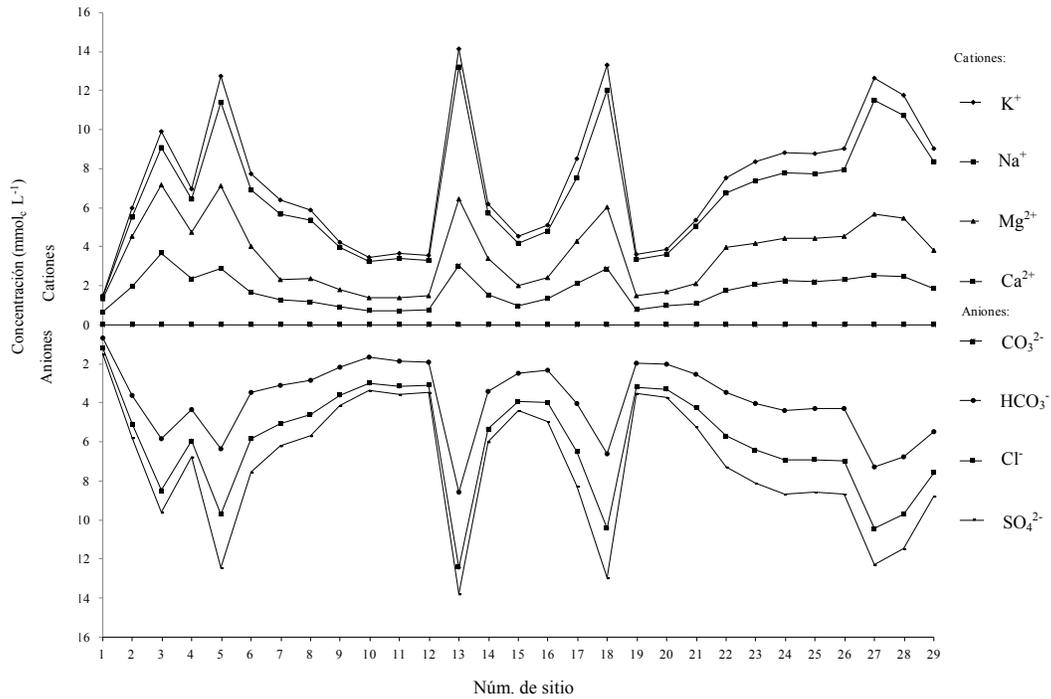


Figura 11. Composición iónica de las aguas del río Lerma (muestreo 2).

## 6.5 Clasificación, desde el punto de vista de riego agrícola, de las aguas del río Lerma conforme a los índices de: CSR, SE, SP y RAS-CE

Cuadro 19. Clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a los índices de CSR, SE y SP (muestreo 1).

N° de sitio	CLASIF. CSR <sup>††</sup> (CSR)		CLASIF. SE <sup>§§</sup> (SE)		CLASIF. EN FUNCIÓN DE SP Y TIPO DE SUELO					
	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>		mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>		SP <sup>¶¶</sup> mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	SUELO A <sup>†</sup>	SUELO B <sup>‡</sup>	SUELO C <sup>§</sup>	SUELO C1 <sup>¶</sup>	SUELO C2 <sup>‡</sup>
1	-0.60	B <sup>††</sup>	0.71	B <sup>††</sup>	0.64	B <sup>††</sup>	B <sup>††</sup>	B <sup>††</sup>	B <sup>††</sup>	B <sup>††</sup>
2	-1.33	B	1.07	B	1.36	B	B	B	B	B
3	-0.90	B	1.74	B	1.49	B	B	B	B	B
4	-0.63	B	0.80	B	0.67	B	B	B	B	B
5	-0.55	B	4.40	C	3.48	C	B	B	B	B
6	-0.15	B	3.14	C	2.68	B	B	B	B	B
7	-0.75	B	2.26	B	1.95	B	B	B	B	B
8	0.35	B	1.60	B	0.87	B	B	B	B	B
9	0.45	B	2.20	B	1.25	B	B	B	B	B
10	-0.03	B	1.48	B	1.07	B	B	B	B	B
11	0.56	B	1.66	B	0.80	B	B	B	B	B
12	0.54	B	1.71	B	0.89	B	B	B	B	B
13	2.54	NR	7.80	C	4.33	C	B	B	B	B
14	9.38	NR	54.32	NR	25.34	NR	NR	NR	C	C
15	16.47	NR	59.95	NR	24.32	NR	NR	NR	C	C
16	4.43	NR	17.11	NR	7.95	NR	C	C	B	B
17	0.42	B	4.31	C	2.68	B	B	B	B	B
18	0.28	B	3.86	C	2.35	B	B	B	B	B
19	0.18	B	1.36	B	0.91	B	B	B	B	B
20	0.06	B	1.50	B	1.15	B	B	B	B	B
21	-0.08	B	1.84	B	1.39	B	B	B	B	B
22	0.54	B	2.81	B	1.73	B	B	B	B	B
23	0.76	B	2.65	B	1.66	B	B	B	B	B
24	1.02	B	2.69	B	1.33	B	B	B	B	B
25	0.01	B	1.24	B	0.98	B	B	B	B	B
26	1.95	C	5.62	C	2.82	B	B	B	B	B
27	1.16	B	5.63	C	3.98	C	B	B	B	B
28	0.47	B	5.06	C	3.49	C	B	B	B	B
29	1.24	B	4.80	C	2.76	B	B	B	B	B

<sup>†</sup> Poco lavado por baja permeabilidad; <sup>‡</sup> Lavado restrictivo, drenaje lento y profundo; <sup>§</sup> Profundos, percolación profunda y fácil; <sup>¶</sup> profundos, cultivos de tolerancia media;

<sup>#</sup> profundos, cultivos tolerantes; <sup>††</sup> B, C y NR, quieren decir Buena, Condicionada y No Recomendable, respectivamente; <sup>‡‡</sup> Carbonato de sodio residual;

<sup>§§</sup> Salinidad efectiva; <sup>¶¶</sup> Salinidad potencial.

Cuadro 20. Resumen de clasif. de las aguas del río Lerma de acuerdo a los índices de CSR, SE y SP (muestreo 1).

	CSR <sup>†</sup>	SE <sup>‡</sup>	CLASIF. EN FUNCIÓN DE SP <sup>§</sup> Y TIPO DE SUELO				
			SUELO A	SUELO B	SUELO C	SUELO C1	SUELO C2
Buena ( B )	82.76%	58.62%	75.86%	89.66%	89.66%	93.10%	93.10%
Condicionada ( C )	3.45%	31.03%	13.79%	3.45%	3.45%	6.90%	6.90%
No Recomendable ( NR )	13.79%	10.34%	10.34%	6.90%	6.90%	0.00%	0.00%

<sup>†</sup> Carbonato de sodio residual; <sup>‡</sup> Salinidad efectiva; <sup>§</sup> Salinidad potencial.

Cuadro 21. Clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a los índices de CSR, SE y SP  
(muestreo 2).

N° de sitio	CLASIF.		CLASIF.		CLASIF. EN FUNCIÓN DE SP Y TIPO DE SUELO					
	CSR <sup>†‡</sup>	(CSR)	SE <sup>§§</sup>	(SE)	SP <sup>¶¶</sup>	SUELO A <sup>†</sup>	SUELO B <sup>‡</sup>	SUELO C <sup>§</sup>	SUELO C1 <sup>¶</sup>	SUELO C2 <sup>¶</sup>
	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>		mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>		mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>					
1	-0.61	B <sup>††</sup>	0.79	B <sup>††</sup>	0.67	B <sup>††</sup>	B <sup>††</sup>	B <sup>††</sup>	B <sup>††</sup>	B <sup>††</sup>
2	-0.90	B	2.32	B	1.81	B	B	B	B	B
3	-1.34	B	4.04	C	3.22	C	B	B	B	B
4	-0.42	B	2.62	B	2.05	B	B	B	B	B
5	-0.76	B	6.36	C	4.73	C	B	B	B	B
6	-0.52	B	4.25	C	3.20	C	B	B	B	B
7	0.82	B	4.06	C	2.52	B	B	B	B	B
8	0.50	B	3.52	C	2.31	B	B	B	B	B
9	0.39	B	2.45	B	1.70	B	B	B	B	B
10	0.31	B	2.10	B	1.51	B	B	B	B	B
11	0.51	B	2.28	B	1.48	B	B	B	B	B
12	0.49	B	2.10	B	1.34	B	B	B	B	B
13	2.16	C	7.72	C	4.54	C	B	B	B	B
14	0.04	B	2.78	B	2.26	B	B	B	B	B
15	0.51	B	2.52	B	1.68	B	B	B	B	B
16	-0.04	B	2.72	B	2.13	B	B	B	B	B
17	-0.24	B	4.45	C	3.36	C	B	B	B	B
18	0.56	B	7.24	C	5.09	NR	C	B	B	B
19	0.48	B	2.13	B	1.40	B	B	B	B	B
20	0.34	B	2.16	B	1.50	B	B	B	B	B
21	0.47	B	3.23	C	2.17	B	B	B	B	B
22	-0.49	B	4.03	C	3.03	C	B	B	B	B
23	-0.11	B	4.29	C	3.25	C	B	B	B	B
24	-0.03	B	4.41	C	3.43	C	B	B	B	B
25	-0.10	B	4.47	C	3.46	C	B	B	B	B
26	-0.19	B	4.69	C	3.54	C	B	B	B	B
27	1.67	C	6.98	C	4.07	C	B	B	B	B
28	1.32	C	6.31	C	3.83	C	B	B	B	B
29	1.69	C	5.22	C	2.71	B	B	B	B	B

<sup>†</sup> Poco lavado por baja permeabilidad; <sup>‡</sup> Lavado restrictivo, drenaje lento y profundo; <sup>§</sup> Profundos, percolación profunda y fácil; <sup>¶</sup> profundos, cultivos de tolerancia media;

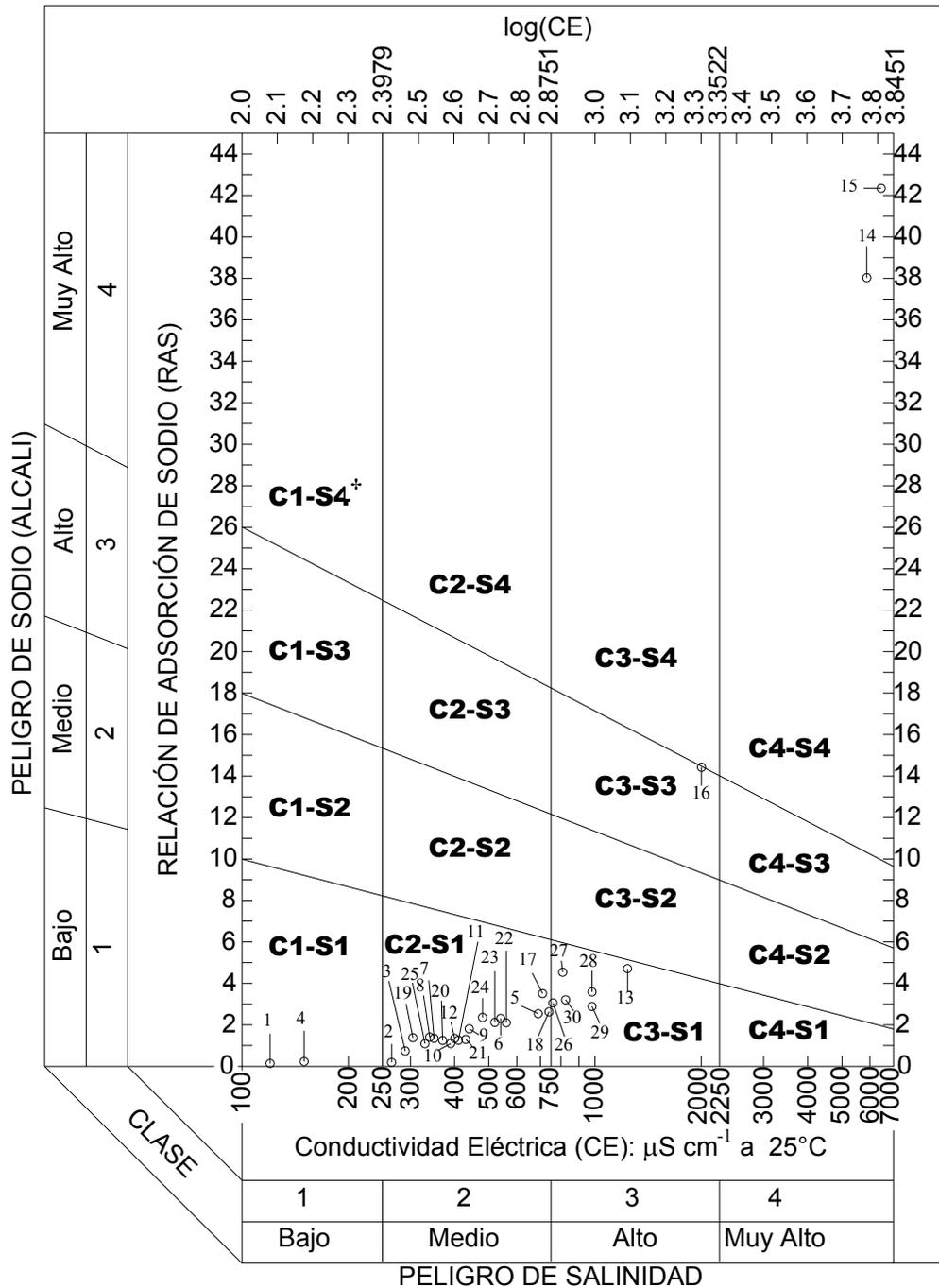
<sup>#</sup> profundos, cultivos tolerantes; <sup>††</sup> B, C y NR, quieren decir Buena, Condicionada y No Recomendable, respectivamente; <sup>‡‡</sup> Carbonato de sodio residual;

<sup>§§</sup> Salinidad efectiva; <sup>¶¶</sup> Salinidad potencial.

Cuadro 22. Resumen de clasif. de las aguas del río Lerma de acuerdo a los índices de CSR, SE y SP  
(muestreo 2).

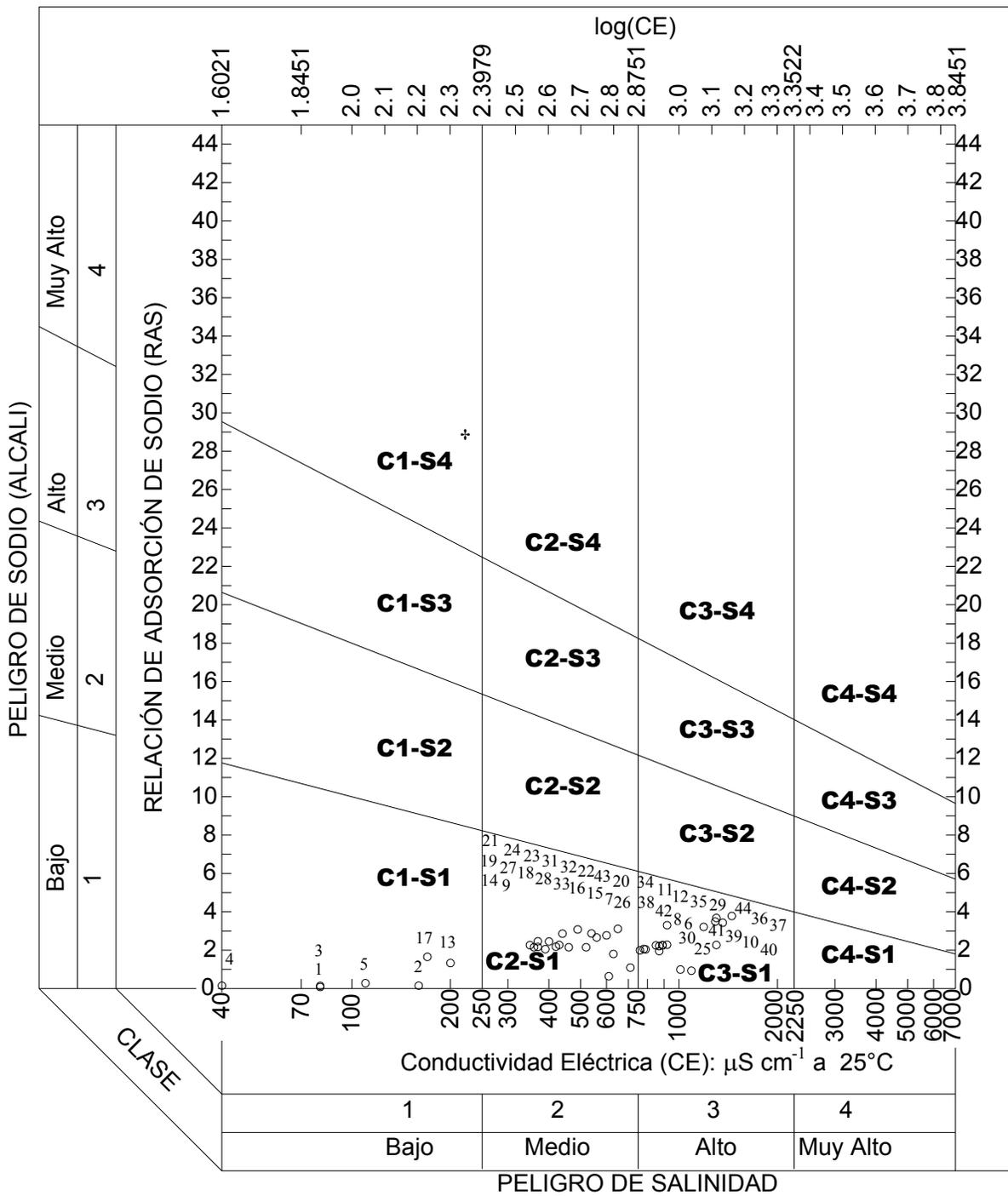
	CSR <sup>†</sup>	SE <sup>‡</sup>	CLASIF. EN FUNCIÓN DE SP <sup>§</sup> Y TIPO DE SUELO				
			SUELO A	SUELO B	SUELO C	SUELO C1	SUELO C2
Buena ( B )	86.21%	41.38%	55.17%	96.55%	100.00%	100.00%	100.00%
Condicionada ( C )	13.79%	58.62%	41.38%	3.45%	0.00%	0.00%	0.00%
No Recomendable ( NR )	0.00%	0.00%	3.45%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

<sup>†</sup> Carbonato de sodio residual; <sup>‡</sup> Salinidad efectiva; <sup>§</sup> Salinidad potencial.



†El significado del resultado de la clasificación aparece en las páginas 58 y 59.

Figura 12. Diagrama para la clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a RAS y CE (muestreo 1).



†El significado del resultado de la clasificación aparece en las páginas 58 y 59.

Figura 13. Diagrama para la clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a RAS y CE (muestreo 2).

## 6.6 Reducción relativa de la infiltración en suelos que sean regados con aguas del río Lerma

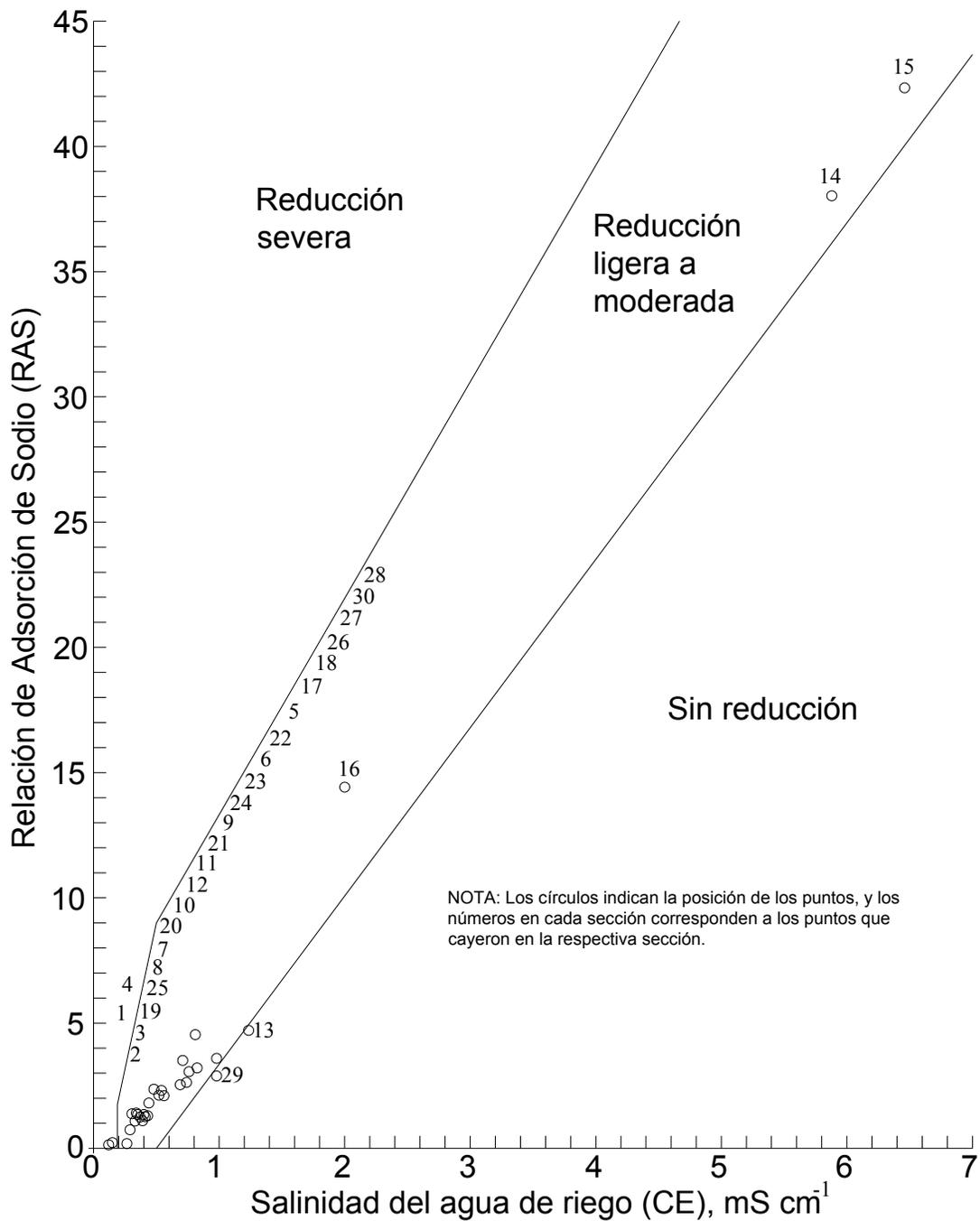


Figura 14. Reducción relativa de la infiltración en suelos que sean regados con aguas del río Lerma (muestreo 1), provocada por la CE y la RAS.

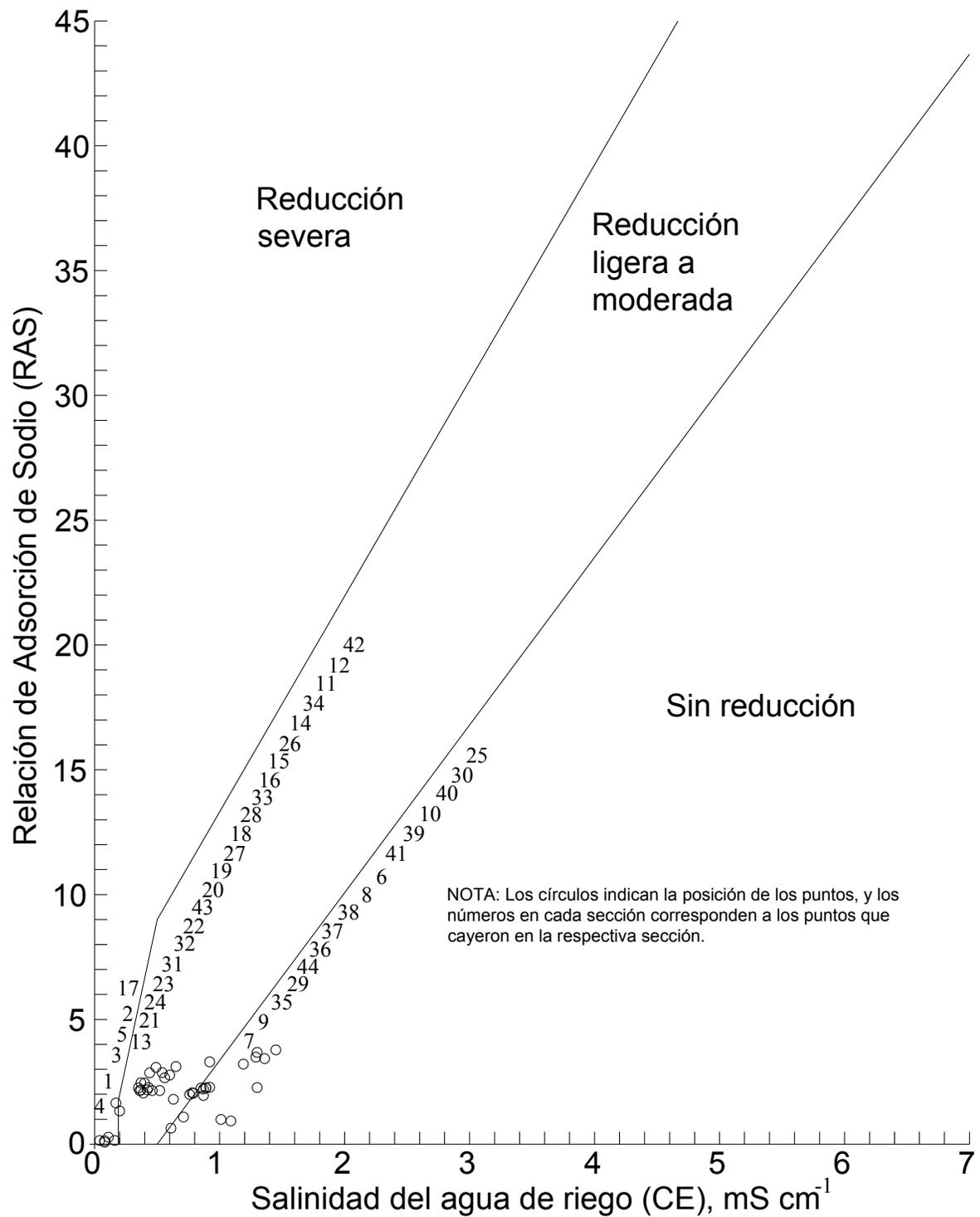


Figura 15. Reducción relativa de la infiltración en suelos que sean regados con aguas del río Lerma (muestreo 2), provocada por la CE y la RAS.

Cuadro 23. Resumen de clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a RAS y CE (muestreo 1).

C1-S1	C2-S1	C3-S1	C3-S3	C4-S4
6.90%	65.52%	17.24%	3.45%	6.90%

Cuadro 24. Resumen de clasificación de las aguas del río Lerma de acuerdo a RAS y CE (muestreo 2).

C1-S1	C2-S1	C3-S1
3.45%	48.28%	48.28%

Aguas C1-S1:  $0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1} < \text{CE} < 0.25 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , pueden usarse para riego en casi todos los cultivos y en casi todos los tipos de suelo, la salinización de los suelos es mínima. Pueden ser necesarios lavados de suelo después de practicar el riego durante mucho tiempo, pero eso solo si la permeabilidad de los terrenos es baja y los cultivos se ven afectados por la salinidad.  $0 < \text{RAS} < 10$ , son aguas que pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos y dar como resultado pocas probabilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Pero cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

Aguas C2-S1:  $0.25 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1} < \text{CE} < 0.75 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , pueden usarse siempre y cuando tengan un grado moderado de lavado de suelos. En casi todos los casos, y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, estas aguas pueden usarse en la producción de plantas moderadamente tolerantes a las sales.  $0 < \text{RAS} < 10$ , son aguas que pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos y dar como resultado pocas probabilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Pero cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

Aguas C3-S1:  $0.75 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1} < \text{CE} < 2.25 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , no es conveniente usarlas para riego en suelos cuyo drenaje sea deficiente, y aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales para el control de la salinidad, además de que es necesario que las plantas a regar con estas aguas sean muy tolerantes a la salinidad.  $0 < \text{RAS} < 10$ , son aguas que pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos y dar como resultado pocas probabilidades de

alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Pero cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

Aguas C3-S3:  $0.75\text{dS}\cdot\text{m}^{-1} < \text{CE} < 2.25\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , no es conveniente usarlas para riego en suelos cuyo drenaje sea deficiente, y aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales para el control de la salinidad, además de que es necesario que las plantas a regar con estas aguas sean muy tolerantes a la salinidad.  $18 < \text{RAS} < 26$ , pueden provocar niveles altos de sodio intercambiable casi en todos los tipos de suelo, por tal razón será necesario prácticas especiales de manejo, buen drenaje, facilidad de lavado del suelo e incorporaciones adicionales de materia orgánica. El riego con estas aguas, sobre suelos con alto contenido de yeso, difícilmente dará lugar al desarrollo de niveles perjudiciales de sodio intercambiable.

Aguas C4-S4:  $\text{CE} > 2.25\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , no son apropiadas para riego bajo condiciones ordinarias, pero pueden usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado, también es muy importante que los cultivos a regar con estas aguas sean altamente tolerantes a las sales.  $\text{RAS} > 26$ , esta agua es inadecuada para el riego de cultivos agrícolas, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio de los suelos y la aplicación de yeso u otros mejoradores en combinación con el uso de este tipo de aguas permite que aun siga siendo rentable el cultivo que se este manejando.

Cuadro 25. Reducción relativa de la infiltración en suelos que sean regados con aguas del río Lerma (muestreo 1).

Reducción	Reducción	Sin
severa	ligera a moderada	reducción
6.90%	86.21%	6.90%

Cuadro 26. Reducción relativa de la infiltración en suelos que sean regados con aguas del río Lerma (muestreo 2).

Reducción	Reducción	Sin
severa	ligera a moderada	reducción
3.45%	51.72%	44.83%

## 7 CONCLUSIONES

Alrededor del 65% de las aguas del río Lerma tienen un contenido de boro menor a 0.500 ppm. Y también alrededor del 70% tienen un contenido de fósforo menor a 2.000 ppm.

Cerca del 82% de estas aguas tienen una Conductividad Eléctrica menor a 1.000  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ . Si únicamente se considerara la Conductividad Eléctrica, se podría decir que la calidad del agua para riego es excelente en la mayoría de los casos; y es necesario tener mas cuidado cuando es época de escasas lluvias, porque es entonces cuando puede haber algunos cuantos sitios del río Lerma en donde la salinidad sea tan alta como se observa en los dos sitios cercanos a Salamanca, para el muestreo 1.

La variación en la concentración de Ca, Mg, Na, K,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ , Cl,  $\text{SO}_4$ , B, y P en puntos distribuidos a lo largo de todo el río Lerma se debe a que este recibe las aguas residuales en diferente cantidad y calidad de industrias, centros urbanos, y de zonas agropecuarias a lo largo de toda su trayectoria; de una temporada a otra las actividades de la población son mayores o menores, lo que provoca una variación en la cantidad y calidad de las entradas y salidas de agua en el cauce del río; *en temporada de lluvias la precipitación pluvial reduce la concentración de la mayoría de los contaminantes en las aguas superficiales*; algunas formas de salida en diferente cantidad y calidad ocurre cuando parte del agua del río Lerma se pierde por infiltración, evaporación, transpiración de diversas plantas que existen en el río, extracciones que se hacen para utilizar el agua para riego en algunos sitios.

Con base en lo observado en el contenido iónico promedio de las aguas del Río Lerma, se puede decir que el catión más prevalente en las aguas del río Lerma es el  $\text{Na}^+$ , en tanto que el anión en mayor cantidad es el  $\text{HCO}_3^-$ .

La inexistencia de  $\text{CO}_3^-$  en las aguas del segundo muestreo está relacionada con el valor de pH menor a 8.4 en todos los casos con esta situación.

Los resultados de los análisis de las aguas del primer muestreo indican que inmediatamente antes de Salamanca, Gto., la concentración de sales en las aguas del río Lerma fue mayor en comparación con los demás sitios de ambos muestreos.

Más del 50% de las aguas del río Lerma son buenas para el riego cuando se clasifican en función del CSR y SP. Pero cuando se toma en cuenta para la clasificación el índice de SE no se cumple que más de la mitad de las aguas sean buenas.

De acuerdo a RAS y CE de las aguas del río Lerma, alrededor del 50% de las aguas caen dentro de la clasificación C2-S1.

En cuanto a la reducción de la infiltración de los suelos que se rieguen con aguas del río Lerma, más del 50% de las aguas pueden causar una reducción de la infiltración de ligera a moderada.

Esta información puede utilizarse junto con datos agronómicos (cultivo, tipo de suelo, clima) para determinar la bondad de la calidad del agua para sus uso particular.

## 8 RECOMENDACIONES

Es necesario reducir al máximo el uso de materiales químicos en las diversas actividades humanas. Por ejemplo, la aplicación de agroquímicos debe evitarse al máximo, y cuando se tengan que usar debe ser en la cantidad y en la época adecuada, para lo cual debe haber un asesoramiento por parte de agrónomos especializados. Otro ejemplo es que se debe evitar al máximo el uso de detergentes para lavar la ropa, ya que esto es un ejemplo de contaminación del agua con materiales no biodegradables; en lugar de los detergentes pueden ser usados algunos jabones de pasta que si son biodegradables.

Independientemente del origen de las aguas residuales, estas deben recibir un tratamiento que reduzca la concentración de contaminantes en las mismas hasta el grado en

que no sean dañinas a la ecología; y además, para que puedan ser reutilizadas sin riesgo alguno en sectores como el agropecuario, pesquero, entre otros.

Llevar a cabo las recomendaciones anteriores quizás se logre a largo plazo, es por eso que por el momento es conveniente realizar periódicamente un análisis del agua de riego utilizada en cada sitio para tomar las medidas adecuadas en cuanto a su uso de acuerdo a las condiciones de suelo, clima y cultivos convenientes en la zona de riego.

## 9 LITERATURA CITADA

- Aceves, N. E. y Palacios, V. O. 1970. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Adams, V. Dean. 1990. Water and wastewater examination manual. Lewis Publishers. U.S.A. 247 p.p.
- Ahmed, B.; Kemper, W.D.; Haiden, G.; y Niazi, M.A. 1979. Use of gypsum stones to lower the sodium adsorption ratio of irrigation water. Soil Science.
- Antipov-Karataev, I.N. 1967. Reclamation of Soloretz soils in the USSR. Israel Program for Scientific Translation. Jerusalén.
- APHA, American Public Health Association. 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th Edition. Port City Press. Baltimore, MD, USA.
- Apuntes del curso: La calidad de las aguas y su uso en la agricultura. Impartido por el Dr. Carlos Ramírez Ayala, en el Colegio de Postgraduados, Área de Hidrociencias, Montecillo, Texcoco, México, durante el primer cuatrimestre enero-abril de 2006.
- Ayers, R.S. and Wescot, D.W. 1985. Water quality for agriculture. FAO. Roma. 174 p.p.
- Ayers, R.S. y Wescot, D.W. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO Riego y drenaje 29. Roma, Italia. 174 p.p.

- Bernstein, L. and Francois, L.E. 1973. Leaching requirement studies: sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. Soil Science.
- Bower, C.A. y Goertzen J.O. 1958. Replacement of adsorbed sodium in soils by hydrolysis of calcium carbonate. Soil Science.
- Bower, C.A. y Wilcox, L.V. 1965. Precipitation and solution of calcium carbonate in irrigation operations. Soil Science.
- Bower, C.A.; Ogata, G. y Tuckson, J.M. 1968. Sodium hazard of irrigation water as influenced by leaching fraction and by precipitation of solution of calcium carbonate. Soil Science.
- Can-Chulim, Alvaro. 2005. Tesis de maestría en ciencias: Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del cauce del río Tulancingo, estado de Hidalgo, México. Colegio de Postgraduados, Área de Hidrociencias. Montecillo, Texcoco, México. 198 p.p.
- Carrera-Villacres, David Vinicio. 2007. Tesis de maestría en ciencias: Calidad de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. Colegio de Postgraduados, Área de Hidrociencias. Montecillo, Texcoco, México. 243 p.p.
- Castro, D.L.; Bondurant, A. y Robbins C.W. 1971. Water soluble NO<sub>3</sub>- nitrogen, PO<sub>4</sub>-phosphorus, and total salt balances on a large irrigation triad. Soil Science.
- Cíntora-García, María de Jesús Sofía y Ortega-Mikolaev, Ygor Manuel. 2005. Tesis: Boro, fósforo e índices de salinidad en las aguas residuales para riego agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo. UNAM, F.E.S. Zaragoza. México, D.F. 106 p.p.
- Cotler-Ávalos, Helena; Mazari-Hiriart, Marisa; De Anda-Sánchez, José. 2006. Atlas de la cuenca Lerma-Chapala. SEMARNAT, I.N.E., UNAM. México, D.F. 196 p.p.
- Doneen, L.D. 1975. Water quality for irrigated agriculture. Springer Verlag. New York, USA.
- Eaton, F. M. 1935. Boron in soils and irrigation waters and its effect on plants with particular reference to the San Joaquin Valley of California. U.S.D.A. Tech. Bull. No. 448.
- Eaton, F. M. y Wilcox, L. V. 1939. The behavior of boron in soils. U.S.D.A. Tech. Bull. No. 696.

- Gauch, H. G. y Dugger, W. M. 1953. The role of boron in the traslocation of sucrose. *Plant Physiol.* No. 91.
- González, O. R. 1969. Tesis profesional: Toxicidad de boro sobre varios cultivos en diferentes suelos. Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas.
- Hernández, G.R. y Durán, C.R. 1993. Efecto de las aguas residuales en la agricultura con énfasis en la horticultura. UACH, Departamento de Irrigación. Chapingo, México.
- Huez-López, M.A. 1985. Tesis de maestría en ciencias: Características de algunas propiedades físico-químicas de los suelos y espesores adyacentes del predio Montecillo. Colegio de Postgraduados, México. 245 p.p.
- Kovda, V.A.; Vanden, Berg C. y Hogan, R.M. 1967. International source book on irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity. FAO/UNESCO.
- Olguín-Palacios, Carlos. 1974. Tesis de maestría en ciencias: Características de adsorción y lavado del boro en suelos regados con aguas negras del Distrito de Riego n° 03 de Tula, Hidalgo. E.N.A., Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 100 p.p.
- Ortega-Escobar, H.M. 1993. Causas de ensalitramiento y su efecto sobre los suelos. Colegio de Postgraduados, Área de Hidrociencias. Montecillo, Texcoco, México.
- Oster, J.D. y Rhoades, J.D. 1986. Water management for salinity and sodicity control. Chapter 7. Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater. Davis, California, U.S.A.
- Peterson, J.B. 1947. Calcium linkage a mechanism in soil granulation. *Soil Science*.
- Ramalho, R.S. 1998. Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverte, S.A. de C.V. México. 88 p.p.
- Rhoades, J.D. 1968. Quality of water for irrigation. *Soil Science*.
- Richards, L. A. 1954. Diagnóstico y recuperación de suelos salinos y sódicos. U.S.D.A. Traducción INIA, México.
- Richards, L.A. (editor) 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual n° 60. Editorial LIMUSA.
- Scofield, L y Wilcox, L. V. 1935. Boron in irrigation waters. U.S.D.A. Tech. Bull. No. 264.

- Sharpley, A. N. y Withers, P. 1994. The enviromental-sound management of agricultural phosphorus. Fertilizer Research. Netherlands.
- Skok, J. 1958. The role of boron in the plant cell. In Trace Elements, Academic Press Inc. New York.
- Szabolcs, I. 1989. Salt-affected soils. Boca Ratón, Florida, U.S.A.
- Vázquez-Arceo, Esperanza. 1984. Tesis profesional: Evaluación de la reserva de sales en los suelos salinos. UNAM, F.E.S. Cuautitlán. México. 186 p.p.
- Wilcox, L.V.; Blair, G.Y.; y Bower, C.A. 1954. Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation. Soil Science.