



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**

**PROGRAMA DE POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS**

**LA CALIDAD QUÍMICA DE LAS AGUAS  
RESIDUALES QUE RIEGAN EL VALLE DEL  
MEZQUITAL, HIDALGO**

**JAQUELINE JUÁREZ DE LA CRUZ**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

**2018**

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y  
DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

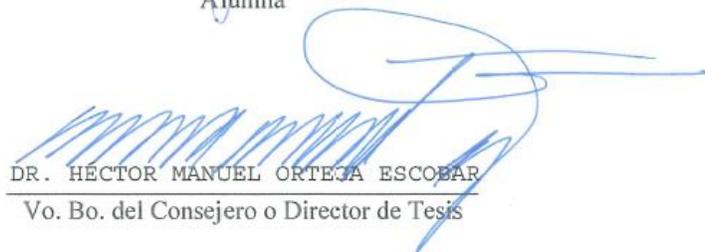
En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe JAQUELINE JUÁREZ DE LA CRUZ, Alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor DR. HÉCTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis

LA CALIDAD QUÍMICA DE LAS AGUAS RESIDUALES QUE RIEGAN EL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO

y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 27 de JULIO de 2018

  
Firma de la  
Alumna

  
DR. HÉCTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR  
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **La calidad química de las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo**, realizada por la alumna: **Jaqueline Juárez De la Cruz**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



---

DR. HÉCTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR

ASESOR



---

DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

ASESOR



---

DR. ÁLVARO CAN CHULIM

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2018.

# LA CALIDAD QUÍMICA DE LAS AGUAS RESIDUALES QUE RIEGAN EL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO

Jaqueline Juárez De la Cruz, MC.

Colegio de Postgraduados, 2018

## RESUMEN

Los distritos de riego 088 Chiconautla, Estado de México, 03 Tula y 100 Alfajayucán en el estado de Hidalgo, se riegan con aguas residuales, en su mayoría originadas en la Ciudad de México. Se realizó un muestreo de las aguas que riegan el Valle del Mezquital (mayo de 2017) y se determinó la calidad química de las aguas, consistió en: determinar los macrocomponentes y concentración total de las aguas residuales (CE, Ca, Mg, Na, K, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, Cl y SO<sub>4</sub>); Boro y la Relación de Adsorción de Sodio en diferentes conceptualizaciones (RAS<sub>original</sub>, RAS<sub>ajustado</sub> y RAS<sub>corregido</sub>). El sitio de muestreo “Drenaje agrícola entrada a Capula” reportó la concentración de sales más alta (CE = 3,468  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), con predominancia del ión sodio, seguido de cloruros y bicarbonatos. Al realizar la clasificación de las aguas residuales de acuerdo con la clasificación de Richards, se encontró que predomina la clase C3S2 para RAS<sub>original</sub> y RAS<sub>corregida</sub>, para la RAS<sub>ajustada</sub> la clasificación predominante es de C3S3. Para determinar la predicción de los valores del por ciento de sodio intercambiable (PSI) en los suelos del Valle del Mezquital que se riegan con aguas residuales (en distintas conceptualizaciones de RAS), se utilizaron los coeficientes de selectividad iónica de Gapon siguientes: 0.0072444, 0.011861 y 0.0168999 ( $\text{mmol L}^{-1}$ )<sup>-1/2</sup>. De acuerdo con el peligro de disminución de la infiltración de las aguas residuales muestreadas, la clasificación predominante fue sin reducción de infiltración para la RAS<sub>original</sub>, mientras que para la RAS<sub>corregida</sub> y RAS<sub>ajustada</sub> fue con reducción ligera o moderada.

**Palabras clave:** aguas residuales, calidad del agua, relación de adsorción de sodio, por ciento de sodio intercambiable.

# CHEMICAL QUALITY OF THE WATERS THAT RISE THE MEZQUITAL VALLEY, HIDALGO

Jaqueline Juárez De la Cruz, MC.

Colegio de Postgraduados, 2018

## ABSTRACT

The irrigation districts 088 Chiconautla, Estado de México, 03 Tula and 100 Alfajayucán in the state of Hidalgo, are irrigated with wastewater, mostly originating in Mexico City. Sampling was carried out of the waters that irrigate the Mezquital Valley (may 2017) and the chemical quality of the waters was determined, consisted of: to determine the subcomponents and total concentration of wastewater (EC, Ca, Mg, Na, K, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, Cl and SO<sub>4</sub>); and the relationship of sodium adsorption in different conceptualizations (SAR<sub>original</sub>, SAR<sub>adjusted</sub> and SAR<sub>corrected</sub>). In this study, the sampling site "agricultural drainage entrance to Capula" reported the highest concentration of salts (CE=3.468 μS cm<sup>-1</sup>), with predominance of sodium ion, followed by chlorides and bicarbonate. For the classification of wastewater according to the Richards classification, the class predominates C3S2 for SAR<sub>original</sub> and SAR<sub>corrected</sub>, for RAS<sub>adjusted</sub> the predominant classification is of C3S3. To determine the prediction of exchangeable sodium percentage (ESP) in the soils of the Mezquital Valley that are irrigated with wastewater (in different SAR conceptualizations), the following Gapon ionic selectivity coefficients were used: 0.0072444, 0.011861 and 0.0168999 (mmol L<sup>-1</sup>)<sup>-1/2</sup>. According to the danger of decreasing the infiltration of the sampled wastewater, the predominant classification was without reduction of infiltration for the SAR<sub>original</sub>, while for SAR<sub>corrected</sub> and SAR<sub>adjusted</sub> it was with slight or moderate reduction.

**Key words:** wastewater, water quality, sodium adsorption ratio, exchangeable sodium percentage

## DEDICATORIA

A LA SEÑORA:

CARMEN MARÍA DE LA CRUZ FIGUEROA

PORQUE EN NUESTRA VIDA SE QUEDAN  
AQUELLAS PERSONAS VALIOSAS.

A USTED, CON MUCHO CARIÑO Y AFECTO.

## **AGRADECIMIENTOS**

Manifiesto mi agradecimiento a las siguientes personas e instituciones, que contribuyeron a la realización del presente trabajo:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo otorgado para cursar la maestría en ciencias.

Al Colegio de Postgraduados por todas las facilidades otorgadas para llevar a cabo la investigación.

A los integrantes del Consejo Particular, Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar (consejero), Dr. Carlos Ramírez Ayala (asesor), Dr. Álvaro Can Chulim (asesor) y Dr. Carlos Trejo López (sinodal) por la revisión y corrección del presente trabajo.

A mis hermanos Jhonny Benito, Miguel Alejandro, Maricarmen, Alma Leticia, Lorenzo Antonio y Esmeralda Ofelia, por el placer de aceptarnos con todas nuestras particularidades.

A mi madre, gracias por la confianza depositada en mí, y por apoyar mis decisiones en la mayoría de los casos.

A los profesionistas que me alentaron en todo momento, Ing. Adriana Alejandra Medina Dávila, Ing. José Manuel Arango Maldonado, Ing. María Edith Damián Santiago, M.C. María de Lourdes Maldonado Méndez, M.C. Yadira Campos Franco, M.C. Alejandra García Vázquez, M.C. María del Rocío López Cruz, Lic. Irma Ramos Meléndez, Ing. Felipe Torrijos, Ing. Jorge Mota, Ing. María de Jesús Flández Hernández, Ing. Rosalva Alcántara B., Ing. Jocelyn Isabel Díaz, M.C. Betsy Stephani Pallares González, M.C. María Natividad Díaz, Ing. Abigail Gómez López, Ing. Adriana Camacho Ballesteros. Gracias por el apoyo moral que recibí de

Ustedes.

A las familias que aprecio mucho y que me confortaron en momentos difíciles: Sra. María del Carmen Ayala Mendoza y esposo; Sra. Juanita Díaz Zamora y Camilo Bernabé Arias; Sra. Lulú e Ing. Marcelo Carrillo García; Sra. Elida Damián Santiago y Víctor Euroza R.; M. C. María Lorenza Toledo Medrano e Ing. Felipe, gracias por los consejos.

A la Sra. Elvira Amalia Sosa Galán (asistente del postgrado de Hidrociencias), por todas las facilidades otorgadas y recomendaciones muy atinadas en cuanto a trámites institucionales, muchas gracias.

A las asistentes del postgrado de Hidrociencias y Edafología: Srita. Irene Osorio A., Srita. Laurita, y Srita. Patricia, por el apoyo desinteresado en los trámites necesarios para iniciar y terminar cada cuatrimestre.

Al personal de laboratorio: J. Santos de la Cruz Frutero Hernández y Doña Chuy, por el arduo apoyo en las actividades de laboratorio.

Al personal de bibliotecas: Sr. José Luis López D., Sr. Raymundo Flores Díaz, Sr. Miguel Vilchis Lagos, por las facilidades otorgadas para conseguir préstamos externos.

A todas aquellas personas que he tratado, y que no mencioné en los párrafos anteriores, gracias.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
LISTA DE CUADROS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE ANEXOS.....	xv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS .....	3
3. HIPÓTESIS .....	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
4.1 Origen de las sales solubles .....	4
4.2 Proceso de acumulación de sales.....	5
4.2.1 Ciclos continentales.....	5
4.2.2 Ciclos de acumulación en zonas limítrofes a los mares .....	5
4.2.3 Ciclos deltaicos .....	6
4.2.4 Ciclos artesianos .....	6
4.2.4 Ciclos antropogénicos .....	6
4.3 Aguas superficiales usadas para riego agrícola .....	7
4.4 Calidad del agua de riego .....	11
4.5 Criterios que deben evaluarse en las aguas de riego.....	12
4.5.1 Criterio de salinidad.....	14
4.5.2 Criterios de sodicidad .....	20
4.5.3 Criterios de toxicidad .....	41
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	45
5.1 Descripción del área de estudio .....	45
5.2 Muestreo.....	45
5.3 Métodos analíticos .....	48
5.4 Análisis estadístico.....	49
5.5 Comprobación de resultados de las determinaciones analíticas que se llevaron a cabo en el laboratorio .....	50
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	54
6.1 Estaciones de muestreo de las aguas residuales.....	54
6.2 Composición iónica de las aguas residuales.....	58
6.3 Distribución de cationes y aniones .....	67
6.4 Comprobación de la exactitud de las determinaciones analíticas .....	69
6.4.1 Conductividad eléctrica medida y la suma de iones.....	69
6.4.2 Conductividad eléctrica experimental y conductividad eléctrica teórica .....	71
6.4.3 Conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos.....	73
6.5 Distribución de frecuencias de los datos analíticos .....	76
6.6 Clasificación de las aguas residuales con base en la salinidad.....	78
6.6.1 Conductividad eléctrica.....	78
6.6.2 Presión osmótica .....	83
6.6.3 Índice de salinidad efectiva.....	85

6.6.4 Índice de salinidad potencial.....	86
6.7 Clasificación de las aguas residuales con base en la sodicidad.....	90
6.7.1 Relación de adsorción de sodio, y clasificación de las aguas residuales de acuerdo con Richards, 1973.....	90
6.7.2 Porcentaje de sodio intercambiable y la relación de adsorción de sodio (PSI – RAS).....	98
6.7.3 Clasificación de las aguas residuales con base en el peligro de disminución de la infiltración.....	102
6.7.4 Carbonato de sodio residual.....	109
6.8 Clasificación de las aguas residuales con base en la toxicidad específica de los iones .....	113
6.8.1 Contenido de boro en las aguas residuales .....	113
6.8.2 Sodio en % del total de cationes.....	119
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	121
7.1 Conclusiones .....	121
7.2 Recomendaciones .....	122
8. LITERATURA CITADA .....	123
ANEXOS .....	130
Residuo seco evaporado y residuo seco calcinado.....	130
Relación de los sólidos totales disueltos medidos con los calculados .....	137

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Calidad de las aguas superficiales (ríos), que son utilizadas para riego.....	10
Cuadro 2. Composición química de algunas aguas fluviales usadas para riego en el Oeste de los Estados Unidos.....	10
Cuadro 3. Lineamientos para evaluar la calidad del agua de riego.....	13
Cuadro 4. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con la salinidad efectiva.....	19
Cuadro 5. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con la salinidad potencial.....	19
Cuadro 6. Cálculo de los valores de pH teórico (pH <sub>c</sub> ) de las aguas de riego, de acuerdo a la ecuación de Langelier.....	32
Cuadro 7. Concentración de calcio (Ca <sup>o</sup> ) en el agua del suelo, contenido en el suelo cerca de la superficie, que resultaría de regar con aguas de determinado valor HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /Ca <sup>2+</sup> y conductividad eléctrica del agua de riego (CE) <sup>a,b</sup> .....	37
Cuadro 8. Influencia de los cationes adsorbidos en las diferentes propiedades físicas de los suelos.....	39
Cuadro 9. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con el carbonato de sodio residual.....	41
Cuadro 10. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con el contenido de boro.....	42
Cuadro 11. Marchas analíticas utilizadas en las determinaciones físico-químicas de las aguas residuales del Valle del Mezquital (red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale).....	48
Cuadro 12. Porcentaje de la diferencia de error aceptable, de acuerdo a la suma de aniones o cationes (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ).....	51
Cuadro 13. Factores de la conductividad eléctrica de los diferentes iones que se encuentran en las aguas.....	52
Cuadro 14. Identificación y descripción de las estaciones de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale, verano 2017.....	55
Cuadro 15. Composición iónica de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.....	59
Cuadro 16. Resumen de la clasificación de acuerdo con la conductividad eléctrica de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.....	79
Cuadro 17. Clasificación de acuerdo con la conductividad eléctrica de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.....	80

Cuadro 18. Resumen de la clasificación de acuerdo con la salinidad efectiva de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	85
Cuadro 19. Resumen de la clasificación de acuerdo con la salinidad potencial de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	86
Cuadro 20. Clasificación de acuerdo con la salinidad efectiva y salinidad potencial de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	87
Cuadro 21. Resumen de la clasificación de acuerdo con las diferentes formulaciones de la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	90
Cuadro 22. Valores de las distintas formulaciones de la relación de adsorción de sodio, de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	92
Cuadro 23. Resumen de la clasificación de acuerdo con el peligro de disminución de la infiltración de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	102
Cuadro 24. Clasificación del peligro de disminución de la infiltración para distintas formulaciones de la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	103
Cuadro 25. Resumen de la clasificación de acuerdo con el carbonato de sodio residual de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	109
Cuadro 26. Clasificación de acuerdo con el carbonato de sodio residual de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	110
Cuadro 27. Resumen de la clasificación de acuerdo con el contenido de boro de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	114
Cuadro 28. Clasificación de acuerdo con el contenido de boro de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	115
Cuadro 29. Resumen de la clasificación de acuerdo con el contenido de sodio (expresado en % del total de cationes) y la CE de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	119

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (U.S. Solid Salinity Laboratory) Richards, L. A. 1973. ....	22
Figura 2. Valores de los logaritmos negativos de las concentraciones molares de pCa y equivalentes de p(CO <sub>3</sub> + HCO <sub>3</sub> ) con respecto a las concentraciones totales de cationes expresados en mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> . ....	34
Figura 3. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> (Ayers y Westcot, 1987). ....	40
Figura 4. Diagrama de Wilcox usado para la clasificación del agua de riego en base al contenido del ion sodio, expresado en % del total de cationes, por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (1954). ....	43
Figura 5. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	47
Figura 6. Distribución iónica de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	68
Figura 7. Relación entre la conductividad eléctrica (μS cm <sup>-1</sup> ) y la concentración de cationes (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	70
Figura 8. Relación conjunta de la conductividad eléctrica experimental (μS cm <sup>-1</sup> ) y la concentración de aniones (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	71
Figura 9. Relación conjunta de la conductividad eléctrica experimental (μS cm <sup>-1</sup> ) y la conductividad eléctrica teórica (μS cm <sup>-1</sup> ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	72
Figura 10. Relación entre la conductividad eléctrica (μS cm <sup>-1</sup> ) y la concentración de STD calculados (mg L <sup>-1</sup> ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	74
Figura 11. Distribución de frecuencias con respecto a la conductividad eléctrica (μS cm <sup>-1</sup> ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	77
Figura 12. Relación entre la conductividad eléctrica (mS cm <sup>-1</sup> ) y la presión osmótica (atm) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	83
Figura 13. Relación entre la concentración de cationes (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) y la presión osmótica (atm) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	84
Figura 14. Diagrama de clasificación de acuerdo con la relación de adsorción de sodio original de las aguas residuales muestreadas, de la red	

hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. Relación entre $RAS_{original}$ y la conductividad eléctrica ( $\mu S\ cm^{-1}$ ). .....	95
Figura 15. Diagrama de clasificación de acuerdo con la relación de adsorción de sodio corregido de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. Relación entre $RAS_{corregido}$ y la conductividad eléctrica ( $\mu S\ cm^{-1}$ ). .....	96
Figura 16. Diagrama de clasificación de acuerdo con la relación de adsorción de sodio ajustado de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. Relación entre $RAS_{ajustado}$ y la conductividad eléctrica ( $\mu S\ cm^{-1}$ ). .....	97
Figura 17. Relación entre la relación de adsorción de sodio original y el porcentaje de sodio intercambiable de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.....	99
Figura 18. Relación entre la relación de adsorción de sodio ajustada y el porcentaje de sodio intercambiable de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	100
Figura 19. Relación entre la relación de adsorción de sodio corregida y el porcentaje de sodio intercambiable de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	101
Figura 20. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio original de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. $RAS_{original}$ -CE.....	106
Figura 21. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio corregida de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. $RAS_{corregido}$ -CE. ....	107
Figura 22. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio ajustada de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. $RAS_{ajustada}$ -CE. ....	108
Figura 23. Distribución de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual $Na_2CO_3$ ( $mmol_c\ L^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.....	113
Figura 24. Distribución de acuerdo con el contenido de boro ( $mg\ L^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	118
Figura 25. Diagrama de clasificación de acuerdo con la presencia del ión sodio expresada en % del total de cationes y la conductividad eléctrica ( $\mu S\ cm^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	120

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Composición del residuo seco evaporado y calcinado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	130
Anexo 2. Distribución de frecuencias con respecto al residuo seco evaporado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	133
Anexo 3. Distribución de frecuencias con respecto al residuo seco calcinado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	134
Anexo 4. Relación conjunta de la conductividad eléctrica experimental ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y el residuo seco evaporado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	135
Anexo 5. Relación conjunta de la conductividad eléctrica experimental ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y el residuo seco calcinado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	136
Anexo 6. Relación conjunta de los STD medidos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y STD calculados ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. ....	137

## 1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de agua que se utilizan en la agricultura bajo riego son: de escurrimientos superficiales, manantiales y yacimientos acuíferos. La superficie que se riega con aguas superficiales y subterráneas en el mundo representa 13% de total de la superficie que se dedica a la agricultura (Rhoades, 1992).

A causa de la disponibilidad limitada de agua para algunos suelos agrícolas, las aguas residuales son una importante fuente adicional para satisfacer la demanda del recurso. Sin embargo, el predominio del uso de aguas residuales crudas o diluidas con aguas superficiales y el bajo porcentaje de aguas residuales tratadas en países de América Latina, en general, generan riesgos en la salud pública, en especial cuando se utilizan para riego de cultivos para consumo directo (Silva, 2008).

Actualmente se estima que de los 72 millones de m<sup>3</sup> de agua que se utilizan en el país; el 78% se destina a la agricultura de riego, calculada en más de 6.0 millones de hectáreas que se subdividen en 38 distritos de riego y 39,500 unidades de riego.

Los distritos de riego 088 Chiconautla, Estado de México, 03 Tula y 100 Alfajayucán en el estado de Hidalgo, se riegan con aguas residuales urbano-industriales de la Ciudad de México. Se estima que el total del volumen (2553 Mm<sup>3</sup>) de esas aguas son emitidas al Valle del Mezquital (Espino, 1981).

A lo largo del tiempo, se ha monitoreado la composición química de las aguas residuales del Valle del Mezquital, información que se tiene en las numerosas tesis de maestría y doctorado del Colegio de Postgraduados sobre esta zona, y se concluye que la mayoría de estas aguas residuales son de tipo: sulfático-clorhídrico-bicarbonatada.

En un estudio reciente en el Valle del Mezquital, López (2016) encontró elevadas concentraciones de bicarbonatos de sodio y cloruros de sodio, por tanto, el uso del  $RAS_{aj}$  con fines de diagnóstico en el cultivo de alfalfa ha determinado que en condiciones de salinidad se reduce la producción de las semillas de alfalfa y es aún más acentuado en condiciones de alcalinidad.

Para establecer las características físico-químicas de las aguas residuales, se planteó una investigación de tipo Observacional, Prospectiva, Transversal y Descriptiva (Méndez, 1990). La determinación de la calidad química de las aguas que riegan el Valle del Mezquital consistió en: a) Determinar los macrocomponentes y concentración total de las aguas residuales: conductividad eléctrica (CE), Ca, Mg, Na, K,  $CO_3$ ,  $HCO_3$ , Cl y  $SO_4$  y temperatura; b) Determinar B y; c) Determinar la Relación de Adsorción de Sodio en diferentes conceptualizaciones ( $RAS_{original}$ ,  $RAS_{ajustado}$  y  $RAS_{corregido}$ ).

## **2. OBJETIVOS**

- 1.- Determinar los macrocomponentes y concentración total de las aguas residuales: CE, Ca, Mg, Na, K, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, Cl y SO<sub>4</sub>, y temperatura y pH.
- 2.- Determinar boro (B).
- 3.- Determinar la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) en diferentes conceptualizaciones (RAS<sub>original</sub>, RAS<sub>ajustado</sub> y RAS<sub>corregido</sub>).

## **3. HIPÓTESIS**

Los parámetros de medición físico-químicos de las aguas residuales permiten establecer índices de calidad agronómica del Valle del Mezquital, estado de Hidalgo.

## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 Origen de las sales solubles

El proceso de transformaciones físicas y químicas que sufren los minerales y rocas, recibe el nombre de intemperismo, este proceso lleva a cabo la desintegración de los minerales primarios y, como resultado, la formación de nuevos minerales llamados secundarios. El intemperismo geoquímico permanente durante toda la longitud del tiempo geológico, es la principal fuente de sales en el suelo y en las aguas. Este proceso de intemperismo representa un eslabón del intercambio geoquímico de materia entre continentes y océanos (Kovda *et al.*, 1967; James *et al.*, 1982; Jurinak y Suarez, 1990).

La mayoría de rocas que se encuentran en la corteza terrestre se han formado bajo condiciones de elevadas temperaturas y presiones. Los diversos cristales que constituyen estas rocas no son estables cuando estos minerales se encuentran expuestos a condiciones atmosféricas, por lo tanto, el intemperismo es un proceso espontáneo que transforma a los minerales primarios en otros minerales más estables en la superficie de la corteza terrestre. En general, por medio de los efectos de agentes del intemperismo geoquímico (lluvia, oxígeno, bióxido de carbono, metano y ácido sulfhídrico), los minerales primarios se transforman en especies solubles de acuerdo con el siguiente esquema (Malagon, 1975; Cepeda, 2009):

*Minerales → Especies solubles*

En todas las reacciones químicas de intemperismo se llevan a cabo procesos de reducción, y siempre se forman bicarbonatos, los cuales ocurren en suelos inundados o con altos niveles freáticos, siendo la materia orgánica necesaria como agente reductor y también una fuente de ácidos orgánicos que suscitan el intemperismo y la migración de cationes en forma de quelatos. Velázquez (2001) y Mendoza (2009), mencionan que estos procesos se presentan con mucha

intensidad en las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán que riegan los suelos del Valle del Mezquital, estado de Hidalgo, México.

## **4.2 Proceso de acumulación de sales**

Casi todos los ácidos conocidos forman diferentes sales. En los suelos se encuentran sales solubles en diferentes cantidades que varían de acuerdo con los diferentes procesos de acumulación de sales en suelos y en aguas (Kovda, 1963; Ortega, 1993). En la geografía y geoquímica de procesos de acumulación de sales solubles en suelos y aguas residuales es necesario diferenciar los siguientes ciclos de acumulación de sales.

### **4.2.1 Ciclos continentales**

Estos ciclos están relacionados con el movimiento, redistribución y acumulación de sales (carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) en las regiones interiores sin drenaje de los continentes y cuencas endorreicas.

Los ciclos continentales se dividen en ciclos primarios y ciclos secundarios, en función de las sales que se acumulan en suelos y en aguas como producto del intemperismo, y durante la formación de los suelos en territorios que se han formado en rocas volcánicas o que están relacionadas con la redistribución de sales que se han acumulado en los espesores de rocas sedimentarias que contienen sales solubles.

### **4.2.2 Ciclos de acumulación en zonas limítrofes a los mares**

Estos ciclos están relacionados con la acumulación de sales, fundamentalmente de cloruros de sodio en las partes bajas del continente que limitan con el mar y en las orillas de pequeños golfos.

### **4.2.3 Ciclos deltaicos**

Estos numerosos ciclos tienen gran importancia para el hombre ya que desde tiempos muy antiguos los deltas de ríos se utilizan en el riego, como los de los ríos Tigris, Eufrates, Nilo, Ganges, Amu-darya, y río Colorado, entre otros.

Los ciclos deltaicos se caracterizan por conjugar procesos que involucran el movimiento, redistribución y acumulación de sales traídas desde el continente por los ríos y por el flujo de aguas freáticas, por sales que ingresan en diferentes tiempos geológicos de los mares.

### **4.2.4 Ciclos artesianos**

Estos ciclos se deben a la evaporación de aguas subterráneas que ascienden a la superficie a través de fallas tectónicas y estructuras destruidas. Son aguas sometidas a subpresión.

Un ejemplo de ciclo artesiano es el área deprimida de la región de San Salvador en el Valle del Mezquital, municipio de San Salvador, estado de Hidalgo, México.

### **4.2.4 Ciclos antropogénicos**

Estos ciclos de acumulación de sales se deben a errores del hombre en su actividad productiva por el desconocimiento de las leyes de acumulación (INIFAP, 1990). Como ejemplos de acumulación de sales solubles en suelos y aguas freáticas debido a la actividad productiva del hombre, están los siguientes: salinización de suelos bajo riego debido al ascenso de niveles freáticos, esto se observa cuando se aplica a los suelos grandes láminas de riego >1 m al año, como ha ocurrido en muchos distritos de riego de México; salinización de pastizales por su mala explotación; y al riego con aguas de elevada concentración salina sin

conocer y observar las concentraciones óptimas del agua y por desconocer los procesos involucrados en su utilización para regar cultivos agrícolas.

En particular en el Valle del Mezquital se aplican grandes láminas de riego, Mendoza (2009) menciona que en esa región se riega con láminas >10 m al año.

Desde el punto de vista hidrológico, la acumulación de sales ocurre en regiones de drenaje restringido, y cuando el balance de aguas freáticas es regulado por la evaporación y la transpiración y no por el ingreso de aguas freáticas a la zona de acumulación (Martínez, 1986).

#### **4.3 Aguas superficiales usadas para riego agrícola**

En las grandes superficies agrícolas bajo riego, la cantidad de agua de riego que se aplica a diferentes cultivos, casi siempre es un exceso en comparación con aquella cantidad que es necesaria para el uso consuntivo de los mismos.

De esa manera, el exceso de agua drena hacia fuera de la zona de riego a través de escurrimientos superficiales, infiltración y percolación hacia los horizontes subsuperficiales de los suelos.

Por lo general, estas percolaciones de agua de riego en exceso elevan los niveles freáticos de una determinada zona bajo riego, y además por otra parte, una cantidad considerable de aguas de riego que se ha aplicado en exceso drenan nuevamente hacia los cauces de ríos aguas abajo.

Mendoza (2009), indica que el fenómeno antes descrito se expresa considerablemente en el cauce del río Tula, el cual recibe todas las aguas que drenan por el área del Valle del Mezquital, hasta llegar al embalse de la presa Zimapán.

Las aguas residuales que derivan de la Ciudad de México riegan el Valle del Mezquital por gravedad, lo que implica un bajo costo en el sistema de conducción y distribución, has la entrega a nivel parcela.

Por otro lado, se debe mencionar que el ciclo de desviación del agua de un río para su almacenamiento, la aplicación de agua en zona agrícola, la percolación del agua hace las zonas profundas de suelos, el flujo de retorno hacia ríos aguas abajo se expresa en una cantidad grande de volúmenes de agua que pasa a través de una zona agrícola, ocasionando una pérdida de calidad del agua de riego. En las diferentes zonas de riego en cauces de escurrimiento de agua, en regiones agrícolas aguas abajo, la calidad del agua habrá variado.

Las aguas superficiales pueden ser clasificadas en dos grupos: aguas que fluyen (ríos) y aguas estancadas (lagos). Los lagos que se encuentran en cuencas endorreicas poseen un alto contenido de sales, y las aguas de lagos abiertos de las zonas húmedas poseen una baja salinidad (Kovda *et al.*, 1967).

Las aguas naturales, de acuerdo con las rocas que están en contacto poseen las siguientes características químicas (en unidades equivalentes):

- Aguas en contacto con rocas graníticas
  - $\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} + \text{Mg}$
  - $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$
- Aguas en contacto con rocas carbonatadas (calizas y dolomitas)
  - $\text{Ca} \geq \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$
  - $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$
- Aguas de acuíferos basálticos
  - $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$
  - $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$
- Aguas de mar
  - $\text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{K}$

- $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{HCO}_3$

En estudios de muchos años Kovda *et al.* (1967), estableció que existen ciertas relaciones específicas entre la cantidad de sales en aguas naturales y sus composiciones. Durante el proceso de aumento de concentración de diferentes aguas, ocurren diferentes etapas de cambio cuantitativo y cualitativo:

- Aguas naturales con ciertos contenidos de silicio. Estas aguas son de baja concentración 0.01 a 0.10 mg L<sup>-1</sup>, se localizan en los trópicos y en regiones forestales boreales. Contienen silicio y sustancias orgánicas.
- Aguas bicarbonatadas cálcicas. La concentración de sales de estas aguas es de 0.2 a 0.3 g L<sup>-1</sup>.
- Aguas bicarbonatadas sódicas. La concentración de sales de estas aguas es de 0.5 a 0.7 g L<sup>-1</sup>.
- Aguas bicarbonatadas y con carbonatos sódicos con concentraciones de soda Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. La concentración total de sales es de 0.5 a 3.0 g L<sup>-1</sup>. Contienen sulfatos y a veces en menor cantidad cloruros.
- Aguas clorhídrico sulfáticas con algunas cantidades de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. La concentración total de sales es de 2.5 a 5.0 g L<sup>-1</sup>.
- Aguas sulfático-clorhídricas. La concentración de sales de estas aguas es de 20 a 50 g L<sup>-1</sup>.
- Aguas clorhídricas. Son salmueras con concentraciones de sales de 100 a 300 g L<sup>-1</sup>.

La concentración y composiciones de las aguas naturales que se utilizan para riego varían considerablemente en diferentes regiones del mundo. En el Cuadro 1 y Cuadro 2 se presenta la composición de diferentes aguas que se utilizan en el riego (Hoffman *et al.*, 1990).

Cuadro 1. Calidad de las aguas superficiales (ríos), que son utilizadas para riego.

No.	Fuente de agua y localización	CE μS cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Total	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Total	mg L <sup>-1</sup>	B mg L <sup>-1</sup>	RAS mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>
Aguas de ríos														
01	San Joaquín, Biola, CA	60.0	0.20	0.10	0.20	0.10	0.60	0.40	0.10	0.10	0.60	53.0	0.06	0.10
02	Feather, Nicolaus, CA	90.0	0.40	0.30	0.10	0.10	0.90	0.70	0.10	0.10	0.90	70.0	0.01	0.10
03	Columbia, Canadian Border	150.0	1.10	0.40	0.10	0.00	1.60	1.30	0.00	0.30	1.60	87.0	-	0.20
04	Sacramento, Knights Landing, CA	150.0	0.70	0.50	0.40	0.00	1.60	1.20	0.20	0.20	1.60	11.0	0.05	0.60
05	Snake, King Hill, ID	500.0	2.30	1.60	1.30	0.10	5.30	3.50	0.70	1.10	5.30	312.0	0.04	2.00
06	Missouri, Williston, N. D.	650.0	2.90	1.60	2.30	0.10	6.90	2.80	0.30	3.80	6.90	426.0	0.11	2.80
07	Río Grande, Falcon Dam, TX	670.0	3.00	1.00	2.60	0.10	6.70	2.40	1.90	2.40	6.70	419.0	0.15	3.50
08	South Plate, Julesburg, CO	1200.0	6.60	2.80	4.50	0.30	14.20	3.80	1.00	9.40	14.20	910.0	0.23	5.00
09	Colorado, Yuma, AZ	1400.0	5.20	2.60	6.40	0.20	14.40	2.80	4.00	7.60	14.40	914.0	0.18	7.10
10	Salt, Stewart Mtn Dam, AZ	1400.0	1.20	4.30	8.90	0.20	12.90	2.80	9.10	1.00	12.90	755.0	0.14	12.00
11	Arkansas, John Martain Dam, CO	1400.0	7.10	6.20	5.10	0.10	16.60	2.90	0.90	12.80	16.60	1130.0	0.15	4.90
12	Pecos, Artesia, NM	3400.0	20.40	12.00	13.30	0.00	39.90	2.30	13.80	23.80	39.90	2530.0	-	9.10
13	Gila, Gillespie Dam, AZ	7400.0	17.00	-	53.10	1.20	83.30	5.50	49.70	28.10	83.30	5120.0	0.28	40.00
Aguas de pozos														
01	Indio, CA	300.0	1.40	0.30	1.30	0.00	3.00	2.20	0.20	0.60	3.00	205.0	0.02	2.00
02	Bakersfield, CA	790.0	0.20	0.00	7.30	0.00	7.50	2.50	2.50	2.50	7.50	500.0	6.93	12.00
03	Scottsdale, AZ	1200.0	3.20	2.70	6.80	-	12.50	3.20	6.20	3.10	12.50	718.0	-	8.30
04	Tolleson, AZ	4000.0	6.40	4.10	33.30	-	43.80	10.80	24.90	8.10	43.80	2878.0	-	38.00
05	Pecos, TX	4400.0	9.30	16.10	21.80	0.70	47.90	1.90	29.10	16.90	47.90	2793.0	-	14.00
06	Roll, AZ	7200.0	14.80	11.70	48.00	0.30	74.80	6.30	55.40	13.10	74.80	4535.0	1.28	36.90

Fuente: Hoffman *et al.*, 1990

Cuadro 2. Composición química de algunas aguas fluviales usadas para riego en el Oeste de los Estados Unidos.

No.	Ríos	CE μS cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Total	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Total	RSE mg L <sup>-1</sup>	RAS <sup>*</sup>	PSI <sup>**</sup>	
															mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>
01	Columbia	150.0	0.90	0.40	0.20	0.00	1.50	0.00	0.10	0.20	1.50	78	0.24	13.00	
	Winat chic		10.30	4.86	4.60	0.00		0.00	73.20	-	9.60				
	Washington		0.45	0.20	0.20	0.00		0.00	1.20	0.10	0.10				
02	Río Grande	340.0	1.90	0.70	0.80	0.00	3.40	0.00	1.80	1.50	0.10	3.40	2.27	0.70	24.00
	Otowi Ba, NM		38.07	8.50	18.40	0.00		0.00	109.80	53.17	4.80				
			0.95	0.35	0.80	0.00		0.00	1.80	1.50	0.05				
03	El Paso, Tex.	1160	4.20	1.40	6.00	0.00	11.60	0.00	3.60	3.10	5.00	11.70	754	3.58	52.00
			84.16	17.01	138.00	0.00		0.00	219.60	109.89	240.15				
			2.10	0.70	6.00	0.00		0.00	3.60	3.10	2.50				
04	Gila, Florence, AZ	1720	3.60	2.00	11.30	0.00	16.90	0.00	3.70	10	3.30	17.00	983	6.75	67.00
			72.14	24.30	259.90	0.00		0.00	225.70	354.50	158.49				
			1.80	1.00	11.30	0.00		0.00	3.70	10	1.65				
05	Pecos, Carlsbad, NM	3210	17.30	9.20	11.50	0.00	38.00	0.00	3.20	12	23.00	38.20	2380	3.15	30.00
			346.69	111.78	264.50	0.00		0.00	195.20	425.40	1104.69				
			8.65	4.60	11.50	0.00		0.00	3.20	12.00	11.50				
06	Humboldt Rye Patch, NM	1170	1.70	1.90	7.90	0.00		0.00	5.20	4.50	42.20	11.90	658	5.88	68.00
			34.06	23.08	181.70	0.00		0.00	317.20	159.52	105.66				
			0.85	0.95	7.90	0.00		0.00	5.20	4.50	1.10				

Fuente: Hoffman *et al.*, 1990

\*RAS = relación de adsorción de sodio. Las concentraciones están expresadas en mmol<sub>e</sub> L<sup>-1</sup>.

\*\*PSS = porcentaje de sodio soluble (como porcentaje total de cationes solubles).

#### **4.4 Calidad del agua de riego**

La calidad de las aguas para riego está determinada por la concentración y la composición de los constituyentes disueltos que ésta contenga (Doneen, 1975). En este sentido, Cifuentes *et al.* (1994) menciona que la calidad del agua se encuentra definida por sus características físicas, químicas y biológicas, siendo los factores físicos y químicos de mayor importancia en aguas utilizadas para riego.

Por tanto, la calidad del agua de riego es una consideración de uso agronómico, y tiene un carácter importante para comprender como se pueden salinizar los suelos agrícolas y como se puede saturar el complejo de intercambio catiónico con sodio intercambiable (Ayers y Westcot, 1987).

En la actualidad, muchas partes del mundo, así como en las áreas desérticas y semidesérticas de Estados Unidos de América, Asia Central, África, la India, Pakistán, México y otros países, en donde las aguas subterráneas se pueden obtener con relativa facilidad, no siempre tienen la calidad adecuada para uso agrícola. De igual manera, donde se están utilizando aguas superficiales para riego, la calidad de las mismas está causando problemas debido a las inadecuadas prácticas de manejo de los cultivos y a los distintos métodos de aplicación de las aguas de riego (Bernstein y Francois, 1973).

Durante la evaluación del uso de agua de riego en las actividades agrícolas es indispensable tomar en cuenta el riesgo de: a) salinización o bien b) el incremento de las concentraciones de algunos de los siguientes iones: sulfato de calcio, boro y/o carbonatos (Ayers y Westcot, 1987; Coras, 2000).

Es importante señalar que los peligros de las altas concentraciones de iones bicarbonatados y carbonatados; se deben analizar con respecto a las concentraciones de los iones de calcio y magnesio (Eaton, 1950).

#### **4.5 Criterios que deben evaluarse en las aguas de riego**

La calidad del agua de riego toma en cuenta tres criterios: salinidad, sodicidad y toxicidad. El criterio de salinidad evalúa el riesgo de que el uso del agua de mala calidad ocasione altas concentraciones de sales, con el correspondiente efecto osmótico y disminución del rendimiento de cultivos. El criterio de sodicidad analiza el riesgo de que se induzca un elevado porcentaje de sodio intercambiable (PSI), con el consiguiente deterioro de la estructura del suelo. El criterio de toxicidad estudia los problemas que pueden crear determinados iones (Pizarro, 1985).

El establecimiento de ciertos parámetros de calidad de agua de riego, para la utilización de estas aguas en las actividades agrícolas, siempre ha sido una preocupación de los productores agrícolas. Las autoridades estatales han propuesto distintos estándares de calidad para diferentes usos del agua; ya sean urbanos, domésticos, industriales o agrícolas, por lo que se requieren distintas exigencias de la evaluación de la calidad del agua.

Las perspectivas de uso de agua en la agricultura deben encaminarse, hacia la evaluación de ciertos parámetros que pueden desarrollar problemas potenciales en los suelos bajo riego, y en el desarrollo y crecimiento de diferentes cultivos que se explotan en la agricultura.

Las directrices para evaluar la calidad del agua de riego, que se presentan en el Cuadro 3, se refieren a los efectos a largo plazo de la calidad del agua sobre la producción de cultivos, las condiciones de suelo y el manejo agrícola.

Las directrices técnicas tienen un carácter práctico y han sido utilizadas con éxito en agricultura de riego para evaluar los componentes del agua superficial, agua subterránea, agua de drenaje, efluentes de desagües y otras aguas residuales (Ayers y Westcot, 1987). Estas directrices señalan las restricciones de calidad de

una determinada fuente de agua, y permiten adaptarse a cierto manejo del suelo agrícola, para aprovechar al máximo las aguas de riego de baja calidad.

Cuadro 3. Lineamientos para evaluar la calidad del agua de riego.

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción sobre el uso del agua de riego			
		Ninguno	Ligero o Moderado	Severo	
Salinidad (afecta disponibilidad de agua para el cultivo)					
CE	mS cm <sup>-1</sup>	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0	
TSS	mg L <sup>-1</sup>	< 450	450 – 2000	> 2000	
Infiltración (reduce infiltración: evaluar usando a la vez la CE y el RAS)					
RAS = 0 – 3	y	CE =	> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
= 3 – 6	y	=	> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
= 6 – 12	y	=	> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
= 12 – 20	y	=	> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
= 20 – 40	y	=	> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
Toxicidad de iones específicos (afecta cultivos sensibles)					
Sodio (Na <sup>+</sup> )					
Riego por superficie	RAS	< 3.0	3.0 – 9.0	> 9.0	
Riego por aspersión	mol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	< 3.0	> 3.0		
Cloro (Cl <sup>-</sup> )					
Riego por superficie	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	< 4.0	4.0 – 10.0	> 10.0	
Riego por aspersión	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	< 3.0	> 3.0		
Boro (B)	mg L <sup>-1</sup>	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0	
Oligoelementos varios (afecta cultivos sensibles)					
Nitrógeno (NO <sub>3</sub> -N)	mg L <sup>-1</sup>	< 5.0	5.0 – 30.0	> 30.0	
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (aspersión foliar únicamente)	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5	
pH Amplitud normal 6.5 – 8.4					
*Cl/SO <sub>4</sub> >	Halofitismo Suculencia				
*Cl/SO <sub>4</sub> <	Leñosidad Xerofitismo				
*HCO <sub>3</sub> /Cl+SO <sub>4</sub> > Viscosidad de las paredes celulares en raíces					

Fuente: Ayers y Westcot, 1987

\*Velásquez, 2001

#### **4.5.1 Criterio de salinidad.**

Los criterios de salinidad se pueden expresar en términos de CE, presión osmótica, salinidad efectiva y salinidad potencial.

##### **4.5.1.1 Conductividad eléctrica**

El personal de laboratorio de salinidad de los estados Unidos de Norteamérica (Diagnostic and Rehabilitation of Salinity and Sodic Soils), ha establecido las exigencias para las aguas de riego a fin de prevenir la salinización de los suelos (Richards, 1973). La concentración total de sales solubles en las aguas de riego, para fines de diagnóstico y clasificación se pueden expresar en términos de conductividad eléctrica (CE). Casi todas las aguas para riego que se han utilizado por mucho tiempo tienen una CE menor a  $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Ocasionalmente se han usado aguas de mayor conductividad; pero las cosechas que se obtienen no han sido satisfactorias, excepto en muy raras ocasiones.

Con base en la CE las aguas para riego se han clasificado en:

- Aguas de baja salinidad (C1): La CE es  $< 250 \mu\text{S cm}^{-1}$ , pueden usarse para riego en la mayoría de los cultivos y en casi cualquier tipo de suelo con poca probabilidad de que se desarrolle la salinidad. Se necesita algún lavado, pero este se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.
- Aguas de salinidad media (C2): La CE es de  $250$  a  $750 \mu\text{S cm}^{-1}$ , puede usarse siempre y cuando se tenga un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, se pueden producir las plantas moderadamente tolerantes a las sales.
- Aguas altamente salinas (C3): La CE es de  $750$  a  $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$ , no pueden usarse en los suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado

se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad. Consecuentemente si se utiliza para riego, se deben seleccionar especies vegetales muy tolerantes a las sales.

- Aguas muy altamente salinas (C4): Con  $CE > 2250 \mu S \text{ cm}^{-1}$ , no es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias, pero puede 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, en este caso, se deben seleccionar cultivos altamente tolerantes a las sales.

#### **4.5.1.2 Presión osmótica (PO)**

El efecto general que tienen las sales solubles de las soluciones acuosas de suelos es la presión osmótica. El efecto osmótico de las soluciones acuosas está relacionado con la concentración total de sales, y no tanto con concentraciones específicas de uno u otro componente. Estos efectos son evidenciados de manera general con retardos en el crecimiento de cultivos; presentándose plantas con pocas y pequeñas hojas (Munns y Tester, 2008).

Muchos procesos químicos y biológicos dependen del paso selectivo de las moléculas del disolvente a través de una membrana porosa, desde una disolución diluida a una de mayor concentración. Una membrana semipermeable permite el paso de moléculas del disolvente, pero impide el paso de moléculas del soluto.

El movimiento neto de las moléculas del disolvente a través de las membranas semipermeables; desde el disolvente puro, o desde la disolución diluida hasta la disolución más concentrada, recibe el nombre de ósmosis (Läuchli y Epstein, 1990). La presión osmótica ( $\pi$ ) de una disolución es la presión que se requiere para detener la ósmosis, se expresa en atmósferas y está dada por:

$$\pi = M R T$$

Donde:  $\pi$ , es la presión osmótica (atm); M, es la molaridad de la disolución ( $M L^{-1}$ ); R, es la constante de los gases ( $0.082037 L atm / K mol$ ); T, es la temperatura absoluta ( $^{\circ}K$ ).

Debido a que las mediciones de la presión osmótica se llevan a cabo a temperaturas constantes, la concentración se expresa en unidades de molaridad, más conveniente que las de molalidad. Al igual que la elevación del punto de ebullición y la disminución del punto de congelación, la relación es directamente proporcional a la concentración de la disolución. Esto es lo que deberá esperarse, ya que todas las propiedades coligativas dependen solo del número de partículas de soluto disueltas en la disolución (Maas y Hoffman, 1977).

La disponibilidad del agua en el suelo está relacionada con la suma del potencial mátrico y del potencial osmótico. Como el contenido de agua en el suelo disminuye, el potencial mátrico y su potencial osmótico disminuyen, es decir, estos se hacen más negativos. La evaporación y la transpiración de las plantas disminuyen el contenido de humedad en el suelo, quedándose las sales solubles en la solución del suelo, de tal manera, que el potencial mátrico y el potencial osmótico disminuyen paulatinamente a medida que el contenido de agua en el suelo también disminuye (Maas y Hoffman, 1977).

### **Efectos osmóticos en los cultivos**

El potencial osmótico es el componente del potencial del agua, que resulta de la presencia de partículas de soluto y es equivalente a la presión osmótica en concepto, pero de signo opuesto.

El potencial osmótico puede ser expresado en términos de energía, mientras que la presión osmótica siempre se expresa en términos de presión (Maas y Hoffman, 1977).

Si el potencial osmótico de un medio se hace más bajo que el de las células de las plantas, estas plantas por consiguiente sufrirán una desecación osmótica o el fenómeno conocido como “sequía fisiológica”, y para sobrevivir las plantas deben ajustarse osmóticamente, por ejemplo, en un medio dado de alta salinidad, las plantas deben aumentar sus concentraciones internas de solutos. Estos aumentos pueden ser ajustados por una absorción de iones de la solución del medio, o por síntesis de compuestos orgánicos, o por ambos.

Las glicófitas, que generalmente están expuestas a salinidades moderadas, tienden a excluir y apartar la sal que estas plantas pueden absorber de las hojas y por consiguiente, también evitar una exposición directa del aparato fotosintético a la sal (Maas y Hoffman, 1977; Munns y Tester, 2008).

Los osmolitos de las plantas superiores son: aminoácidos (prolina), monosacáridos y disacáridos (sacarosa, glucosa y fructosa), metilaminas (glynfetaina y prolinebeticina), alcoholes polyhidricos (D-sorbitol y D-manitol) y otros.

### **Efectos por iones específicos**

Las concentraciones de los iones específicos también contribuyen a una disminución del potencial osmótico. Es decir, altas concentraciones de un solo ion, pueden causar desordenes en la nutrición mineral.

Por ejemplo, altas concentraciones del ion sodio pueden causar deficiencias de otros elementos, tales como potasio y calcio. Ciertos iones como los cloruros, pueden tener efectos tóxicos y que, por lo general, no siempre estos efectos se pueden distinguir claramente de las deficiencias de otros tipos de iones. Por último, algunos iones pueden tener efectos específicos, que promueven el desarrollo de aspectos cualitativos de las plantas (Maas y Hoffman, 1977)

### 4.5.1.3 Índice de salinidad efectiva (SE)

Este índice de clasificación estima el peligro que pueden producir las sales más solubles del agua al formar parte de la solución del suelo, es decir, que al sustraerse de la concentración total, los carbonatos de calcio, carbonatos de magnesio y los sulfatos de calcio; 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 (Doneen, 1975). Este proceso es más notable cuando las aguas tienen un contenido alto de carbonatos y bicarbonatos (Coras, 2000).

La salinidad efectiva se calcula de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$$

Entonces:

$$\text{SE} = \text{suma de cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$$

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}); \text{ pero } \text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

Entonces:

$$\text{SE} = \text{suma de cationes} - \text{Ca}^{2+}$$

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-); \text{ pero } (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

Entonces:

$$\text{SE} = \text{suma de cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

$$\text{Si } (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

Entonces:

$$\text{SE} = \text{suma de cationes} - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Donde: Todos los iones están expresados en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

Los valores de clasificación recomendados de acuerdo al índice de salinidad efectiva (Coras, 2000) se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con la salinidad efectiva.

<b>Clase</b>	<b>Salinidad efectiva (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>)</b>
Buena	< 3
Condicionada	3 a 15
No recomendable	> 15

Fuente: Coras, 2000

#### 4.5.1.4 Índice de salinidad potencial (SP)

Este índice de clasificación determina la cantidad de cloruros y sulfatos que puede ser perjudicial a los cultivos debido al incremento de la presión osmótica de la solución del suelo. Los cloruros y sulfatos son sales que se quedan en la solución del suelo, cuando la humedad aprovechable por las plantas es <50% (Coras, 2000). La fórmula para determinar la salinidad potencial es la siguiente:

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

Donde: Todos los iones están expresados en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

Los valores de clasificación recomendados de acuerdo al índice de salinidad potencial (Coras, 2000) se presentan en el Cuadro 5, que indica tres clases de aguas de riego.

Cuadro 5. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con la salinidad potencial.

<b>Clase</b>	<b>Salinidad potencial (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>)</b>
Buena	< 3
Condicionada	3 a 15
No recomendable	> 15

Fuente: Coras, 2000

#### 4.5.2 Criterios de sodicidad

La clasificación de aguas de riego, de acuerdo con los contenidos de sodio en las mismas, se ha hecho con la intención de prever el efecto del ion sodio sobre los sistemas coloidales de los suelos, además de entender los problemas físico-químicos que derivan de tener altas cantidades de sodio intercambiable en los suelos; ya que es conocido que los suelos que tienen altas cantidades de sodio intercambiable poseen un pH > 8.4, alta dispersión de los coloides orgánicos e inorgánicos y altos contenidos de carbonatos y bicarbonatos de sodio (Antipov-Karataev, 1967).

Cuando se tienen altos valores de sodio intercambiable en los suelos, en estos se presentan disminuciones en la permeabilidad, alteraciones en el medio poroso y efectos tóxicos del sodio, que se encuentra adsorbido en las plantas sensibles a este elemento (Pizarro, 1985).

Los efectos del sodio intercambiable en suelos son evidentes debido al encharcamiento y a la disminución de la velocidad de infiltración del agua de riego. La toxicidad del ion sodio se manifiesta generalmente mediante coloraciones cafés en las hojas y por la caída simultánea de las hojas.

En relación al contenido de sodio en las aguas de riego; las aguas se clasifican utilizando la relación de adsorción de sodio (RAS) de la Figura 1, que se basa primordialmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre las condiciones físicas de los suelos (Richards, 1973; Bower *et al.*, 1968):

- Aguas bajas en sodio (S1): RAS < 10. Pueden usarse para el riego agrícola en la mayoría de los suelos, con pocas probabilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates pueden acumular cantidades perjudiciales de este elemento.

- Aguas medias en sodio (S2): RAS de 10 - 18. En suelos de textura fina, el ion sodio representa un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio catiónico, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos con buena permeabilidad.
- Aguas altas en sodio (S3): RAS de 18 – 26. Pueden producir niveles altos de sodio Intercambiable en la mayoría de los suelos, por lo que éstos entonces necesitan prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado e incorporaciones adicionales de materia orgánica.
- Aguas muy altas en sodio (S4): 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 del suelo y la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de esta clase de aguas.

En el diagrama siguiente (Figura 1) se presenta la forma en la que podemos clasificar las aguas, tomando en cuenta el riesgo de salinidad y sodicidad de acuerdo a Richards (1973).

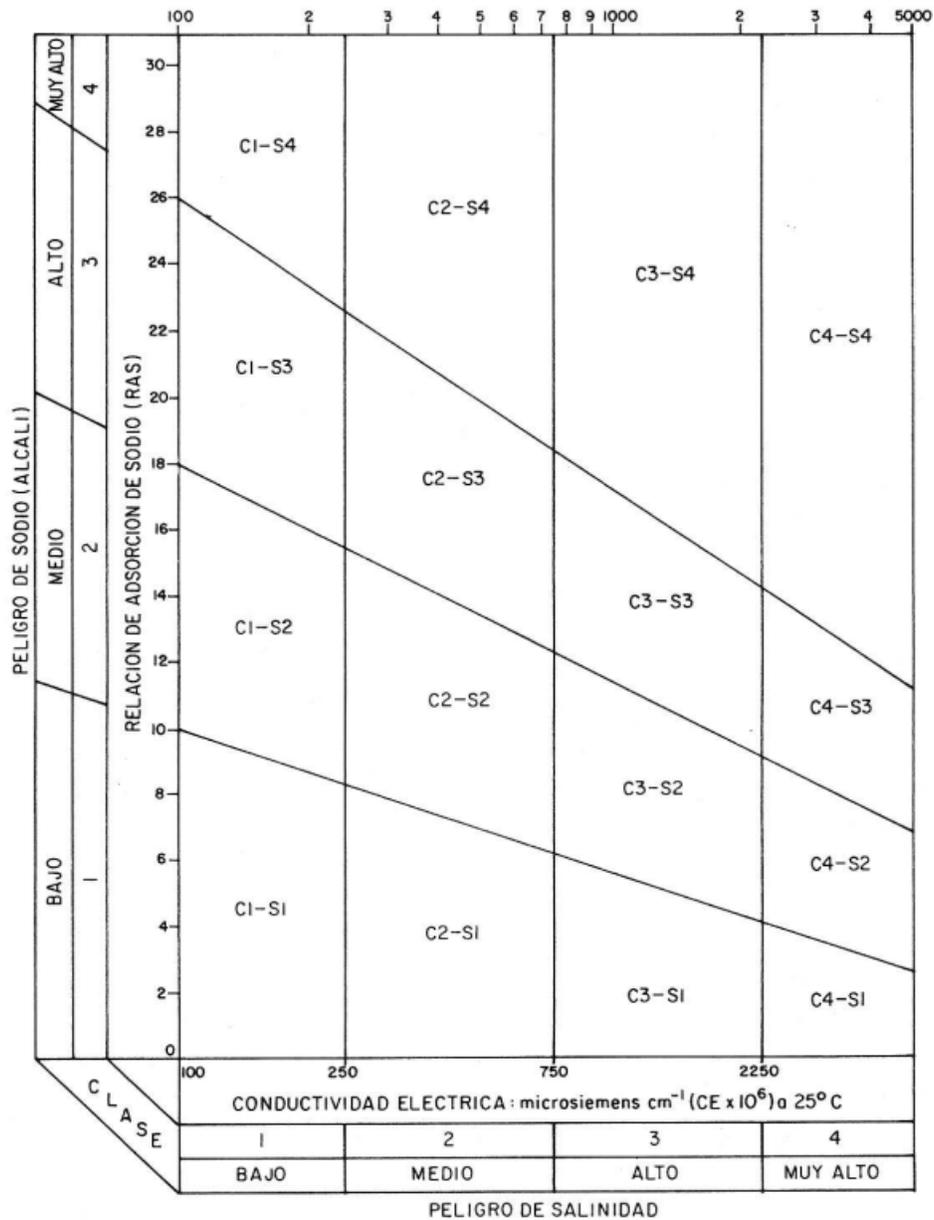


Figura 1. Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (U.S. Solid Salinity Laboratory) Richards, L. A. 1973.

#### 4.5.2.1 Relación funcional PSI – RAS

La posibilidad de predecir la distribución de iones en la solución del suelo y los iones adsorbidos en los sistemas coloidales de los suelos, es de mucha importancia para el manejo se suelos con problemas de salinidad y de sodicidad

(Kaledhonkar *et al.*, 2006). La complejidad de la fracción arcillosa y la naturaleza multiiónica de la solución del suelo hacen difícil una definición rigurosa de una distribución de iones en el complejo de intercambio catiónico. Un parámetro de evaluación de la posibilidad de uso de una determinada agua de riego es el nivel en que el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se encontrará en el suelo debido a procesos de adsorción del sodio de las aguas de riego en el complejo de intercambio catiónico de suelos.

El porcentaje de sodio intercambiable es la propiedad con la cual disminuye la permeabilidad de los suelos, además de las manifestaciones tóxicas del ion sodio en los cultivos (Tedeschi y Aquila, 2005). Estos efectos del ion sodio están bien correlacionados (Bhardwaj *et al.*, 2008). Por consiguiente, cualquier posible evaluación del peligro potencial de la sodicidad de un agua de riego, deberá relacionarse con el porcentaje de sodio intercambiable, que tendrá que encontrarse en el suelo derivado del uso de una determinada agua de riego.

Como ya se ha mencionado, el peligro de sodicidad de las aguas de riego puede afectar la producción de cultivos. El peligro potencial de la sodicidad de un agua es a veces evaluado con los valores de la relación de adsorción de sodio y con los valores de la salinidad. La sodicidad de un suelo está dada por el porcentaje de sodio intercambiable, esto significa el porcentaje de cargas negativas utilizadas con iones de sodio (Velásquez, 2001; Velásquez *et al.*, 2002).

El porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de un suelo puede ser estimado de la relación de adsorción de sodio (RAS) del agua, cuando el agua está en equilibrio con el suelo y en condiciones de saturación (Frenkel y Alperovitch, 1984). La ecuación para calcular el PSI a partir de la relación de adsorción de sodio se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{XNa}{CIC - XNa} = kg \text{ RAS} \quad y \quad PSI = \frac{XNa}{CIC} 100$$

Después de hacer los arreglos correspondientes la ecuación final es:

$$\frac{PSI}{100 PSI} = kg RAS$$

Y despejando PSI, nos queda como resultado:

$$PSI = \frac{kg RAS}{1 + kg RAS} 100$$

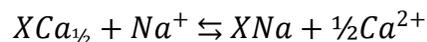
Esta es la ecuación para calcular el porcentaje de sodio intercambiable de un suelo conociendo la relación de adsorción de sodio de un agua de riego determinada, en condiciones de equilibrio y saturación del suelo con esa agua.

#### 4.5.2.2 Ecuación de intercambio catiónico de Gapon

Una aproximación común del intercambio de iones es aplicar el principio de la ley de acción de masas.

La reacción de intercambio catiónico de Gapon, ha sido ampliamente utilizada en los estudios de salinidad y sodicidad (Laboratorio de Salinidad de los E. U., 1954; Brower, 1959; Pratt *et al*, 1962; Sposito, 1977; Oster y Sposito, 1980; James *et al.*, 1982; Evangelou y Coale, 1987; Evangelou y Phillips, 1987; Endo *et al.*, 2002; Velásquez *et al.*, 2002; Evangelou y Marsi, 2003; Ould Ahmed *et al.*, 2007)

La expresión original de intercambio de iones Na-Ca se expresa como sigue:



Donde: las concentraciones de los iones en solución se expresan en (mol L<sup>-1</sup>), las concentraciones de los iones en el complejo de intercambio de cationes están expresadas en meq 100g<sup>-1</sup>.

En condiciones de equilibrio esta ecuación (Jurinak y Suarez, 1990) se describe como sigue:

$$kg = \frac{XNa (C_{Ca^{2+}})^{1/2}}{XCa_{1/2} (C_{Na^+})}$$

Donde:  $kg$ , es el coeficiente de selectividad iónica de Gapon, y se asume como constante, para cada suelo en particular.

La relación de iones adsorbidos y en solución, por consiguiente, se expresa como:

$$\frac{XNa}{Ca_{1/2} X} = kg \frac{(C_{Na^+})}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}}$$

Jurinak (1984) menciona que el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (1954) consideró que el ion magnesio  $Mg^{2+}$  se comporta similarmente al ion calcio  $Ca^{2+}$ , en la fase adsorbida del complejo de intercambio catiónico. Si se toma en cuenta la modificación introducida a la ecuación de Gapon, entonces, esta se expresa como sigue:

$$\frac{XNa}{XCa + XMg} = kg' = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{(C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}})}} = kg' RAS$$

Donde:  $kg'$ , es el coeficiente de selectividad iónica de Gapon para cada suelo en particular expresado en  $(mmol L^{-1})^{-1/2}$  y RAS es la relación de adsorción de sodio que se encuentra definida como sigue:

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

Donde: las concentraciones totales analíticas están expresadas en  $mmol L^{-1}$ .

Y por consiguiente, debido a que el  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y el  $Na^+$  son los cationes intercambiables más comunes en el suelo de las zonas áridas, la ecuación se puede simplificar como sigue:

$$\frac{XNa}{CIC - XNa} = kg' RAS = RSI$$

Donde: RSI, se conoce como la relación de sodio intercambiable.

En términos del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) la ecuación se expresa como:

$$\frac{PSI}{100 PSI} = kg' RAS = RSI$$

Donde:  $PSI$ , es  $\frac{XNa}{CIC} 100$

Y puesto que es difícil obtener datos confiables de los cationes intercambiables, de aquí que entonces, la relación de sodio intercambiable RAS de la solución del suelo o de los diferentes extractos de saturación y de las aguas de riego, ha sido utilizada como parámetro fundamental para el diagnóstico de los peligros de sodicidad de los suelos, cuando estos se encuentran en condiciones de equilibrio con las aguas de riego.

El valor de la constante de selectividad iónica de Gapon (kg) se determina al graficar la relación funcional RSI-RAS.

El valor del coeficiente de selectividad iónica de  $kg' = (0.015 \text{ mmol L}^{-1})^{-1/2}$  es constante en estudios de campo cuando la relación de sodio intercambiable  $RSI \leq 30$ . Y entonces, de manera correspondiente, como una buena aproximación de los niveles de sodicidad en los suelos (o sea los valores de sodio intercambiable), los valores de la relación de adsorción de sodio y el porcentaje de sodio intercambiable se pueden asumir como iguales o equivalentes (Laboratorio de Salinidad U. S. A., 1954). Sin embargo, en recientes estudios que se han llevado a cabo, señalan que diferentes factores influyen en la relación funcional RSI-RAS.

En diversas investigaciones, tales como las de Pratt *et al.* (1962), Rhoades y Krueger (1968), Levy *et al.* (1972), Arora y Singh (1980), y Rhue y Mansell (1988) se han determinado diferentes valores del coeficiente de selectividad iónica de Gapon (kg) obteniéndose un rango de valores de 0.016 a 0.008  $(\text{mmol L}^{-1})^{-1/2}$ . El laboratorio de salinidad de los Estados Unidos, para los suelos de zonas áridas y semiáridas del Oeste de Estados Unidos recomienda un valor del coeficiente de

selectividad iónica de Gapon de  $0.015 \text{ (mmol L}^{-1}\text{)}^{-1/2}$ .

Estas observaciones nos indican que para determinar con exactitud el valor del coeficiente de selectividad iónica de Gapon ( $k_g$ ), es necesario evaluar este coeficiente experimentalmente, con los suelos en los que se requiere estimar el coeficiente de Gapon (Doering y O Willis, 1980; Jurinak *et al.*, 1984). Las variaciones del coeficiente de selectividad iónica del Gapon dependen de la mineralogía de los cristales arcillosos y de los grupos funcionales de las moléculas orgánicas (Bower y Goertzen, 1955; Evangelou y Phillips, 1987; Frenkel y Alperovitch, 1984; Frenkel y Hadas, 1978; Harron *et al.*, 1983; Harwad y Coleman, 1953; Levy *et al.*, 1972; Nadler y Magaritz, 1981; Rao *et al.*, 1968).

#### **4.5.2.3 Relación de adsorción de sodio original o explícita (RAS)**

El RAS de una determinada agua de Riego ( $RAS_{AR}$ ), puede ser usada como medida del peligro de sodicidad de esta agua, dado que este  $RAS_{AR}$  está relacionado con el RAS que se tendrá como resultante en el agua del suelo ( $RAS_{AS}$ ) cuando se tuvieran condiciones ideales de equilibrio. Sin embargo, uno de los mayores factores que afectan los valores del RAS final del agua del suelo, es la pérdida o ganancia en contenidos del calcio y magnesio debido a la precipitación o disolución de carbonatos alcalino-térreos. Un factor adicional es la introducción del calcio y magnesio, además de los bicarbonatos en la solución del suelo debido al intemperismo de ciertos minerales del suelo (Amrhein y Suarez, 1991; Paliwai y Gandi, 1976).

Los efectos de estos procesos, han limitado la aplicabilidad de los valores de  $RAS_{AR}$  por sí mismos como índices apropiados de estimación de la sodicidad del agua para los casos de aguas de salinidad relativamente alta y bajas en carbonatos (Zuo *et al.*, 2007). En el caso de aguas de riego que tienen concentraciones apreciables de carbonatos, se tiene una tendencia de que el  $CO_3^{2-}$  y el  $HCO_3^-$  precipitan en el suelo como  $CaCO_3$ . Debido a estos procesos el  $RAS_{AR}$

se incrementa.

De ahí que, la determinación de la relación de adsorción de sodio de un agua del suelo en equilibrio con el agua de riego, es de gran importancia, porque de acuerdo con la ley de acción de masas, existe una proporcionalidad entre los valores del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y los valores que pueden tenerse en aguas de riego del parámetro relación de adsorción de sodio (RAS).

Suarez (1981), Pal y Tripathi (1982), Singh *et al.* (1992), Sharma y Minhas (1998), Kopittke *et al.* (2006), Minhas *et al.* (2006), y Suarez *et al.* (2006) indican que el parámetro denominado RAS se ha utilizado con muchas ventajas para hacer un excelente diagnóstico de problemas de sodicidad en suelos, en lugar de la determinación directa del porcentaje de sodio intercambiable.

Para poder inferir sobre los contenidos de sodio intercambiable en suelos, como resultado de un estado de equilibrio entre el RAS de las aguas residuales de suelos y el porcentaje de sodio intercambiable de los mismos, se calcula el valor de la relación de adsorción de sodio de aguas de riego en sus valores originales o explícitos, es decir, sin considerar variaciones en las concentraciones de calcio y de magnesio. Estos valores de RAS son explícitos y son considerados por la siguiente ecuación:

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

Donde: RAS, es la relación de adsorción de sodio explícita  $[\text{mmol}_c \text{L}^{-1}]^{1/2}$ ;  $C_{Na}$ ,  $C_{Ca}$ ,  $C_{Mg}$ , son las concentraciones de iones expresados en  $(\text{mmol}_c \text{L}^{-1})$ .

#### 4.5.2.4 Relación de adsorción de sodio ajustado (RAS<sub>aj</sub>)

Otro valor de RAS, es aquel que considera variaciones en la composición de aguas de riego, en lo que concierne a la cuantificación de efectos de precipitación o disolución del carbonato de calcio (Bower *et al.*, 1965; Bower *et al.*, 1968).

$$RAS_{aj} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 - pH_c)]$$

Donde: RAS<sub>aj</sub>, son los valores que se obtienen al modificar los valores del RAS original o explícito de las aguas de riego, expresados en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>; RAS, son los valores que se obtienen de manera explícita de las determinaciones químicas del Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> de las aguas de riego expresadas en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>; 8.4, es el valor del pH de un suelo calcáreo no sódico en equilibrio con el CO<sub>2</sub> con la atmósfera; pH<sub>c</sub>, son los valores teóricos del agua de riego que tendrá cuando esta agua esté en equilibrio con el CaCO<sub>3</sub>.

El termino (8.4-pH<sub>c</sub>) refleja la tendencia del agua de riego que se aplica a los suelos de precipitar o disolver la calcita CaCO<sub>3</sub>. Cuando (8.4-pH<sub>c</sub>)>0 para una agua de riego, el carbonato de calcio precipita en el suelo y cuando (8.4-pH<sub>c</sub>)<0, entonces, el agua de riego que se aplica a los suelos solubiliza el carbonato de calcio CaCO<sub>3</sub> que se encuentra en el suelo (Bower *et al.*, 1965).

#### La precipitación de bicarbonatos en el agua de riego

Aunque el contenido de bicarbonatos en las aguas de riego no se ha incorporado en ningún diagrama de clasificación de las aguas de riego, estos deben tomarse en cuenta en cualquier esquema de clasificación de las aguas de riego.

Cuando las aguas residuales de riego poseen concentraciones apreciables de iones bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>); como son las aguas residuales que riegan las áreas agrícolas del Valle del Mezquital, es necesario considerar que una determinada

fracción de los contenidos de calcio precipita de acuerdo con la siguiente ecuación:



La precipitación de la calcita causa una disminución en la salinidad del suelo, sin embargo, también a su vez, aumenta la proporción de sodio en la solución del suelo, por consiguiente, se aumenta el sodio intercambiable en el complejo de intercambio catiónico de los suelos.

Y aunque la magnitud de la precipitación de los bicarbonatos de las aguas de riego depende de una variedad de condiciones tales como: prácticas de manejo del agua de riego, condiciones y tipos de suelos, así como de las composiciones iónicas de las aguas de riego, es entonces necesario contar con un índice que nos muestre la tendencia de la precipitación del carbonato de calcio o calcita ( $CaCO_3$ ) de las aguas de riego (Mendoza, 2009).

Langelier (1936) propuso un índice denominado “índice de saturación” que señala con qué magnitud, en las aguas que fluyen en un sistema cerrado (sin pérdida de  $CO_2$ ), se precipita o se disuelve la calcita  $CaCO_3$ .

El índice de saturación está definido como el pH actual de un agua ( $pH_a$ ) menos el pH teórico ( $pH_c$ ) que el agua deberá tener, si esta agua está en equilibrio con la calcita  $CaCO_3$  (Langelier, 1936; Bower *et al.*, 1965). Este índice de saturación se define como sigue:

$$\text{Índice de saturación (SI)} = pH_a - pH_c$$

Los valores positivos (+) de este índice indicarán que la calcita  $CaCO_3$  se precipitará del agua de riego. Los valores negativos (-) de este índice, indicarán que la calcita  $CaCO_3$  se disolverá en el agua de riego, es decir, el carbonato de calcio  $CaCO_3$ , en el agua de riego se encontrará en forma disociada formando iones de calcio  $Ca^{2+}$  e iones bicarbonato  $HCO_3^-$ . La ecuación de Langelier (Bower *et al.*, 1965; Bower *et al.*, 1968) para calcular el  $pH_c$  de los análisis químicos de las aguas de riego es:

$$pH_c = (pk_2' - pk_c') + pCa + pAlk$$

Donde: pCa+pAlk, son los logaritmos negativos de la concentración molar del Ca<sup>2+</sup> y de la concentración equivalente de las bases titulables (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) respectivamente; pk<sub>2</sub>'-pk<sub>c</sub>', con los logaritmos negativos de la segunda constante de disociación del ácido carbónico H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y la constante de solubilidad del carbonato de calcio CaCO<sub>3</sub> respectivamente, ambos corregidos por su fuerza iónica (I).

### **Cálculo de los valores del pH teórico (pH<sub>c</sub>) de las aguas residuales**

Para el cálculo del pH<sub>c</sub> de las aguas, el primer paso a seguir es calcular los parámetros (pk<sub>2</sub>'-pk<sub>c</sub>'), pCa y pAlk para las diferentes concentraciones expresadas en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

Las concentraciones de iones expresadas en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> que se utilizan en estos cálculos son de 0.1 a 100 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>. En el Cuadro 6 se presentan los valores de las diferentes variables para construir una gráfica y así facilitar el cálculo del pH teórico (pH<sub>c</sub>) derivado de los análisis químicos de las aguas (Bower *et al.*, 1965). Es importante señalar que Mendoza (2009) incluyó los puntos intermedios de uno en uno hasta llegar a 100 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

La construcción de esta grafica teórica (Figura 2) se realiza en papel en papel semilogarítmico, colocando en el eje logarítmico (y) las concentraciones molares de calcio y las concentraciones de las bases titulables (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) expresadas en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, y en el eje las (x), la escala aritmética en el sistema decimal, se colocan las concentraciones totales de cationes de las aguas de riego expresadas en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

Cuadro 6. Cálculo de los valores de pH teórico (pH<sub>c</sub>) de las aguas de riego, de acuerdo a la ecuación de Langelier.

Concentración (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	pH <sub>c</sub> = (pk <sub>2</sub> -pk <sub>c</sub> ) + pCa + (pAlk)*		
	pk <sub>2</sub> -pk <sub>c</sub>	pCa	pAlk
0.10	2.0897	4.3010	4.0000
0.20	2.0955	4.0000	3.6990
0.30	2.1007	3.8239	3.5229
0.40	2.1055	3.6990	3.3979
0.50	2.1100	3.6021	3.3010
0.60	2.1142	3.5223	3.2218
0.70	2.1182	3.4559	3.1549
0.80	2.1220	3.3979	3.0969
0.90	2.1256	3.4668	3.0458
1.00	2.1290	3.3010	3.0000
2.00	2.1576	3.0000	2.6990
3.00	2.1797	2.8239	2.5229
4.00	2.1980	2.6990	2.3979
5.00	2.2139	2.6021	2.3010
6.00	2.2281	2.5229	2.2218
7.00	2.2408	2.4559	2.1549
8.00	2.2525	2.3979	2.0969
9.00	2.2633	2.3468	2.0458
10.00	2.2733	2.3010	2.0000
11.00	2.2827	2.2596	1.9586
12.00	2.2915	2.2218	1.9208
13.00	2.2999	2.1871	1.8861
14.00	2.3078	2.1549	1.8539
15.00	2.3154	2.1249	1.8239
16.00	2.3226	2.0969	1.7959
17.00	2.3295	2.0706	1.7696
18.00	2.3361	2.0458	1.7447
19.00	2.3424	2.0223	1.7212
20.00	2.3486	2.0000	1.6990
21.00	2.3545	1.9788	1.6778
22.00	2.3602	1.9586	1.6576
23.00	2.3657	1.9393	1.6383
24.00	2.3710	1.9208	1.6198
25.00	2.3762	1.9031	1.6021
26.00	2.3813	1.8861	1.5850
27.00	2.3861	1.8697	1.5686
28.00	2.3909	1.8539	1.5528
29.00	2.3955	1.8386	1.5376
30.00	2.4000	1.8239	1.5229
31.00	2.4044	1.8097	1.5086
32.00	2.4087	1.7959	1.4949
33.00	2.4129	1.7825	1.4815
34.00	2.4170	1.7696	1.4685
35.00	2.4210	1.7570	1.4559
36.00	2.4249	1.7447	1.4437
37.00	2.4287	1.7328	1.4318
38.00	2.4325	1.7212	1.4202
39.00	2.4361	1.7100	1.4089
40.00	2.4397	1.6990	1.3979
41.00	2.4432	1.6882	1.3872
42.00	2.4467	1.6778	1.3768

... Cuadro 6.

Concentración (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	pH <sub>c</sub> = (pk <sub>2</sub> - pk <sub>c</sub> ) + pCa + (pAlk)*		
	pk <sub>2</sub> - pk <sub>c</sub>	pCa	pAlk
43.00	2.4501	1.6676	1.3665
44.00	2.4534	1.6576	1.3565
45.00	2.4567	1.6478	1.3468
46.00	2.4599	1.6383	1.3372
47.00	2.4630	1.6289	1.3279
48.00	2.4661	1.6198	1.3188
49.00	2.4692	1.6108	1.3098
50.00	2.4722	1.6021	1.3010
51.00	2.4751	1.5935	1.2924
52.00	2.4780	1.5850	1.2840
53.00	2.4808	1.5768	1.2757
54.00	2.4837	1.5686	1.2676
55.00	2.4864	1.5607	1.2596
56.00	2.4891	1.5528	1.2518
57.00	2.4918	1.5452	1.2441
58.00	2.4945	1.5376	1.2366
59.00	2.4971	1.5302	1.2291
60.00	2.4997	1.5229	1.2218
61.00	2.5022	1.5157	1.2147
62.00	2.5047	1.5086	1.2076
63.00	2.5072	1.5017	1.2007
64.00	2.5096	1.4949	1.1938
65.00	2.5120	1.4881	1.1871
66.00	2.5144	1.4815	1.1805
67.00	2.5167	1.4750	1.1739
68.00	2.5190	1.4685	1.1675
69.00	2.5213	1.4622	1.1612
70.00	2.5235	1.4559	1.1549
71.00	2.5258	1.4498	1.1487
72.00	2.5280	1.4437	1.1427
73.00	2.5301	1.4377	1.1367
74.00	2.5323	1.4318	1.1308
75.00	2.5344	1.4260	1.1249
76.00	2.5365	1.4202	1.1192
77.00	2.5386	1.4145	1.1135
78.00	2.5406	1.4089	1.1079
79.00	2.5426	1.4034	1.1024
80.00	2.5446	1.3979	1.0969
81.00	2.5466	1.3925	1.0915
82.00	2.5486	1.3872	1.0862
83.00	2.5505	1.3820	1.0809
84.00	2.5525	1.3768	1.0757
85.00	2.5544	1.3716	1.0706
86.00	2.5562	1.3665	1.0655
87.00	2.5581	1.3615	1.0605
88.00	2.5589	1.3565	1.0555
89.00	2.5618	1.3516	1.0506
90.00	2.5636	1.3468	1.0458
91.00	2.5654	1.3420	1.0410
92.00	2.5671	1.3372	1.0362
93.00	2.5689	1.3325	1.0315
94.00	2.5706	1.3279	1.0269

... Cuadro 6.

Concentración (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	pH <sub>c</sub> = (pk <sub>2</sub> - pk <sub>c</sub> ) + pCa + (pAlk)*		
	pk <sub>2</sub> - pk <sub>c</sub>	pCa	pAlk
95.00	2.5723	1.3233	1.0223
96.00	2.5740	1.3188	1.0177
97.00	2.5757	1.3143	1.0132
98.00	2.5774	1.3098	1.0088
99.00	2.5791	1.3054	1.0044
100.00	2.5807	1.3010	1.0000

Fuente: Bower *et al.*, 1965; Mendoza, 2009

\*Entrando en la primera columna con las concentraciones en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>: a. Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + Na<sup>+</sup>; b. Ca<sup>2+</sup>; y c. CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, se obtienen los valores de (pk<sub>2</sub> - pk<sub>c</sub>), pCa y pAlk respectivamente.

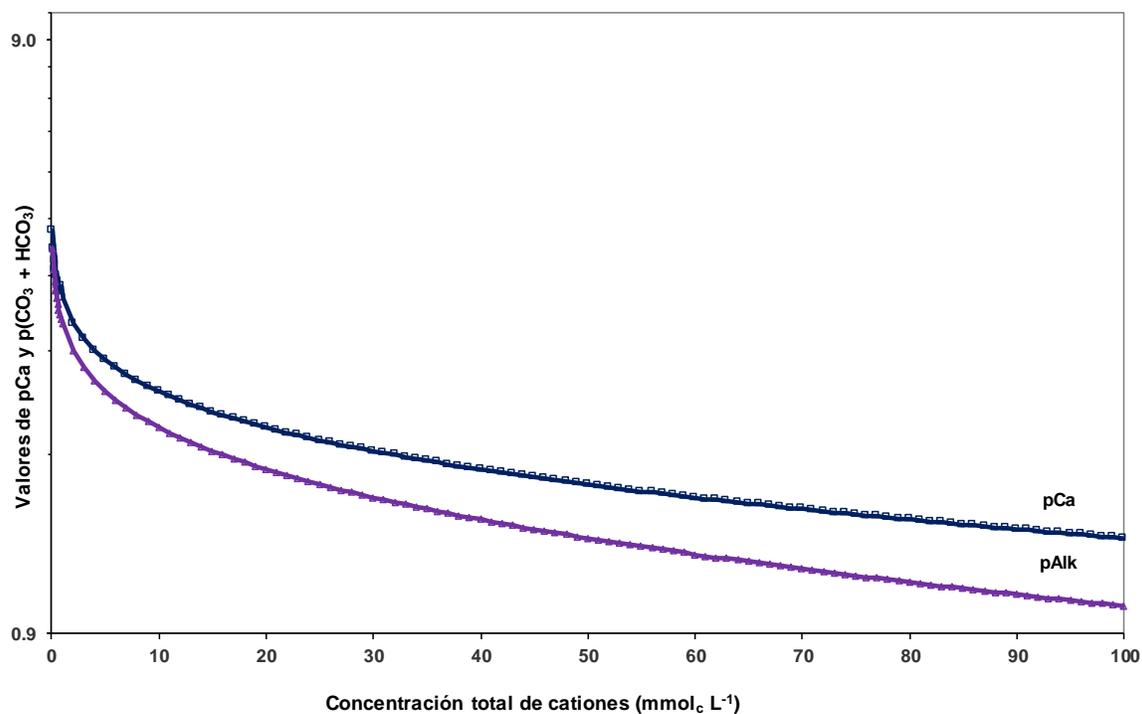


Figura 2. Valores de los logaritmos negativos de las concentraciones molares de pCa y equivalentes de p(CO<sub>3</sub> + HCO<sub>3</sub>) con respecto a las concentraciones totales de cationes expresados en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

La fuerza iónica y la concentración total de las aguas naturales están ampliamente correlacionadas (Bower *et al.*, 1965). Un estudio estadístico de estas variables derivó en la siguiente ecuación de regresión:

$$1000(I) = 1.3477 C + 0.5355$$

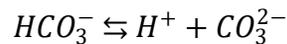
Donde: C, es la concentración total de cationes de un agua de riego determinada expresada en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ; I, es la fuerza iónica de un agua expresada en  $\text{M L}^{-1}$ .

Los valores de la fuerza iónica (I) que se obtuvieron de esta ecuación, fueron introducidos en la ecuación expuesta arriba ( $\text{pk}_2' - \text{pk}_c'$ ).

Las constantes de disociación del ácido carbónico  $\text{H}_2\text{CO}_3$  son las siguientes:



$$K_1 = \frac{(\text{H}^+)(\text{HCO}_3^-)}{(\text{H}_2\text{CO}_3)} = 4.2 \times 10^{-7}$$



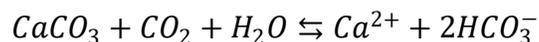
$$K_2 = \frac{(\text{H}^+)(\text{CO}_3^{2-})}{(\text{HCO}_3^-)} = 4.2 \times 10^{-11}$$

La segunda constante de disociación del ácido carbónico  $\text{H}_2\text{CO}_3$  es la que nos importa, porque es la que representa la disociación del bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$  para formar carbonato  $\text{CO}_3^{2-}$ , que posteriormente este se asocia con el  $\text{Ca}^{2+}$  para formar el carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$ . La constante de solubilidad de la calcita ( $k_c$ ) es:



$$k_c = [\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = 5.0 \times 10^{-9}$$

La ecuación de equilibrio en soluciones acuosas en sistemas abiertos que contienen calcita es la siguiente:



#### 4.5.2.5 Relación de adsorción de sodio corregido (RAS°)

Como la relación de adsorción de sodio RAS sigue siendo el único parámetro para predecir los niveles de sodio intercambiable en los suelos, y si se toman en cuenta, las consideraciones que han sugerido diferentes autores para señalar las variaciones de las cantidades de los iones de calcio en las soluciones acuosas y de los suelos, Suarez (1981) propuso una corrección a la forma de tomar en cuenta la concentración de los iones de calcio que llamó relación de adsorción corregida  $RAS_{corr}=RAS^{\circ}$ , corrección que introdujo en la fórmula de RAS explícito. Este autor señala que la presión parcial del bióxido de carbono  $CO_2$  del aire en los primeros milímetros del suelo debe tomarse en cuenta, y propone que la presión parcial del bióxido de carbono  $CO_2$  debe ser de 0.0007 atmosferas ó 0.07 kPa.

La fórmula de la relación de adsorción de sodio  $RAS_{corr}$  que toma en cuenta la presión parcial del bióxido de carbono  $CO_2$  se representa como sigue

$$RAS^{\circ} = \frac{C_{Na^{+}}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}$$

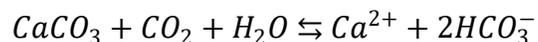
Donde:  $RAS^{\circ}$  es el valor del RAS de un agua de riego que toma en cuenta la presión parcial del bióxido de carbono  $CO_2$  igual a 0.0007 atmósferas y una relación determinada de  $HCO_3^-/Ca$ ;  $C_{Na^{+}}$ ,  $C_{Ca^{2+}}$ ,  $C_{Mg^{2+}}$  son las concentraciones de estos iones expresadas en  $mmol_c L^{-1}$ .

Para calcular la concentración de calcio ( $Ca^{\circ}$ ) que debe introducirse en la fórmula de la relación de adsorción de sodios corregida, se toma en cuenta la relación  $HCO_3^-/Ca^{2+}$ , expresada en  $mmol_c L^{-1}$  y la conductividad eléctrica, expresada en  $mS cm^{-1}$  de las aguas de riego que se aplican a los suelos (Ayers y Westcot, 1987) de acuerdo al Cuadro 7.

La solubilidad del bióxido de carbono  $CO_2$  en el agua de riego se representa como sigue:



Y el sistema carbonato-bicarbonato de disolución o precipitación de la calcita se representa como sigue:



Cuadro 7. Concentración de calcio ( $Ca^{2+}$ ) en el agua del suelo, contenido en el suelo cerca de la superficie, que resultaría de regar con aguas de determinado valor  $HCO_3^-/Ca^{2+}$  y conductividad eléctrica del agua de riego (CE)<sup>a,b</sup>.

		Salinidad del agua de riego aplicada CE mS cm <sup>-1</sup>											
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0
Valor de $\frac{HCO_3^-}{Ca^{2+}}$	0.05	13.20	13.61	13.92	14.40	14.79	15.26	15.91	16.43	17.28	17.97	19.07	19.94
	0.10	8.30	8.57	8.77	9.07	9.31	9.62	10.02	10.35	10.89	11.32	12.01	12.56
	0.15	6.34	6.54	6.69	6.92	7.11	7.34	7.65	7.90	8.31	8.64	9.17	9.58
	0.20	5.24	5.40	5.52	5.52	5.87	6.06	6.31	6.52	6.68	7.13	9.57	7.91
	0.25	4.51	4.65	4.76	7.92	5.06	5.22	5.44	5.62	5.91	6.15	6.52	6.82
	0.30	4.00	4.12	4.21	4.36	4.48	4.62	4.82	4.98	5.24	5.44	5.77	6.04
	0.35	3.61	3.72	3.80	3.94	4.04	4.17	4.35	4.49	4.72	4.91	5.21	5.45
	0.40	3.30	3.40	3.48	3.60	3.70	3.82	3.98	4.11	4.32	4.49	4.77	4.98
	0.45	3.05	3.14	3.22	3.33	3.42	3.53	3.68	3.80	4.00	4.15	4.41	4.61
	0.50	2.84	2.93	3.00	3.10	3.19	3.29	3.43	3.54	3.72	3.87	4.11	4.30
	0.75	2.17	2.24	2.29	2.37	2.43	2.51	2.62	2.70	2.84	2.95	3.14	3.28
	1.00	1.79	1.85	1.89	1.96	2.01	2.09	2.16	2.23	2.35	2.44	2.59	2.71
	1.25	1.54	1.59	1.63	1.68	1.73	1.78	1.86	1.92	2.02	2.10	2.23	2.33
	1.50	1.37	1.41	1.44	1.49	1.53	1.58	1.65	1.70	1.79	1.86	1.97	2.07
	1.75	1.23	1.27	1.30	1.35	1.38	1.43	1.49	1.54	1.62	1.68	1.78	1.86
	2.00	1.13	1.16	1.19	1.23	1.26	1.31	1.36	1.40	1.48	1.58	1.63	1.70
	2.25	1.04	1.08	1.10	1.14	1.17	1.21	1.26	1.30	1.37	1.42	1.51	1.58
	2.50	0.97	1.00	1.02	1.06	1.09	1.12	1.17	1.21	1.27	1.32	1.40	1.47
	3.00	0.85	0.89	0.91	0.94	0.96	1.00	1.04	1.07	1.13	1.17	1.24	1.30
	3.50	0.78	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	0.94	0.97	1.02	1.06	1.12	1.17
4.00	0.71	0.73	0.75	0.78	0.80	0.82	0.86	0.88	0.93	0.97	1.03	1.07	
4.50	0.66	0.68	0.69	0.72	0.74	0.76	0.79	0.82	0.86	0.90	0.95	0.99	
5.00	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.76	0.80	0.83	0.88	0.93	
7.00	0.49	0.50	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.64	0.67	0.71	0.74	
10.00	0.39	0.40	0.41	0.42	1.00	0.45	0.47	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58	
20.00	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.35	0.37	
30.00	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27	0.28	

Fuente: Suarez, 1981

<sup>a</sup>. Supone: a. Una fuente calcio proveniente de silicatos o calizas de  $CaCO_3$ , b. no existe precipitación del magnesio y, c. la presión relativa del  $CO_2$  de la superficie del suelo es de 0.0007 atmosferas.

<sup>b</sup>.  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-/Ca^{2+}$  están expresados en mmol/L y la CE está expresada en mS cm<sup>-1</sup>.

#### **4.5.2.6 Problemas de infiltración en suelos bajo riego**

Los criterios de calidad del agua que suelen influir en la infiltración son el contenido total de sales (salinidad) y el contenido de sodio en relación a los contenidos de calcio y magnesio (sodicidad). Una alta salinidad aumenta la velocidad de infiltración, mientras que una baja salinidad, o una proporción alta de sodio sobre el calcio, la disminuyen. En algunas ocasiones ambos factores (salinidad y proporción de sodio) pueden actuar al mismo tiempo.

El problema de infiltración en los suelos se presenta cuando el agua de riego no atraviesa la superficie del suelo a una velocidad lo suficientemente rápida, como para no permitir que se restituya el agua que se ha consumido por los cultivos agrícolas en diferentes riegos. Esta disminución en la velocidad del paso del agua a través del suelo se debe a modificaciones del medio poroso de los suelos (McNeal, 1968).

Los problemas de infiltración ocasionados por la deficiente calidad del agua de riego, ocurren por lo general en los primeros centímetros del suelo y están ligados con la estabilidad estructural del suelo y con el contenido de sodio en relación al calcio (Ayers y Westcot, 1987).

La dispersión de los suelos y la destrucción de su estructura se producen únicamente cuando el contenido de sodio supera al del calcio en una proporción por encima de 3:1. Este contenido relativo de sodio provoca serios problemas de infiltración de la misma manera que una salinidad muy baja del agua. Esto se debe a la falta de suficiente calcio para contrarrestar los efectos dispersantes del sodio. La Figura 3 es utilizada para mostrar que tanto la salinidad del agua (CE) como su relación de adsorción de sodio (RAS) afectan la velocidad de infiltración (Ayers y Westcot, 1987; Kumar *et al.*, 2008; Wienhold y Trooien, 1998).

El tipo y la cantidad de cationes adsorbidos influyen en las propiedades físicas y químicas de los suelos (Cuadro 8), por citar algunos, el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Na}^+$  tienen una influencia directa en la estructura de los suelos.

Cuadro 8. Influencia de los cationes adsorbidos en las diferentes propiedades físicas de los suelos.

<b>Propiedades de los suelos</b>		<b>Actividad relativa</b>
1	Dispersión	Na>K>Mg>Ca>Al
2	Máxima higroscopicidad	Na>K>Mg>Ca>Al
3	Velocidad de infiltración	Na<K<Mg<Ca<Al
4	Ascensión capilar	Na>K>Mg>Ca>Al
5	Plasticidad	Na>K>Mg>Ca>Al
6	Resistencia de los agregados	Na<K<Mg<Ca<Al
7	Reacción de la solución (pH)	Na>K>Mg>Ca>Al
8	Hinchamiento	Na>K>Mg>Ca>Al
9	Velocidad de absorción del agua	Na<K<Mg<Ca<Al
10	Adherencia	Na>K>Mg>Ca>Al
11	Disociación de coloides	Na>K>Mg>Ca>Al
12	Compresibilidad cuando se tiene deshidratación	Na>K>Mg>Ca>Al

Fuente: Gorbunov (1967) citado por Mendoza, 2009

La actividad relativa de los iones se puede explicar como sigue: al analizar la velocidad de infiltración, cuando el complejo de intercambio catiónico está saturado con un solo tipo de catión se observa que el suelo saturado con sodio tiene una velocidad menor que el suelo que está saturado con potasio, y el suelo saturado con potasio tendrá una velocidad menor que el suelo saturado con magnesio, y así sucesivamente. De esta misma forma se comportan las otras propiedades del suelo.

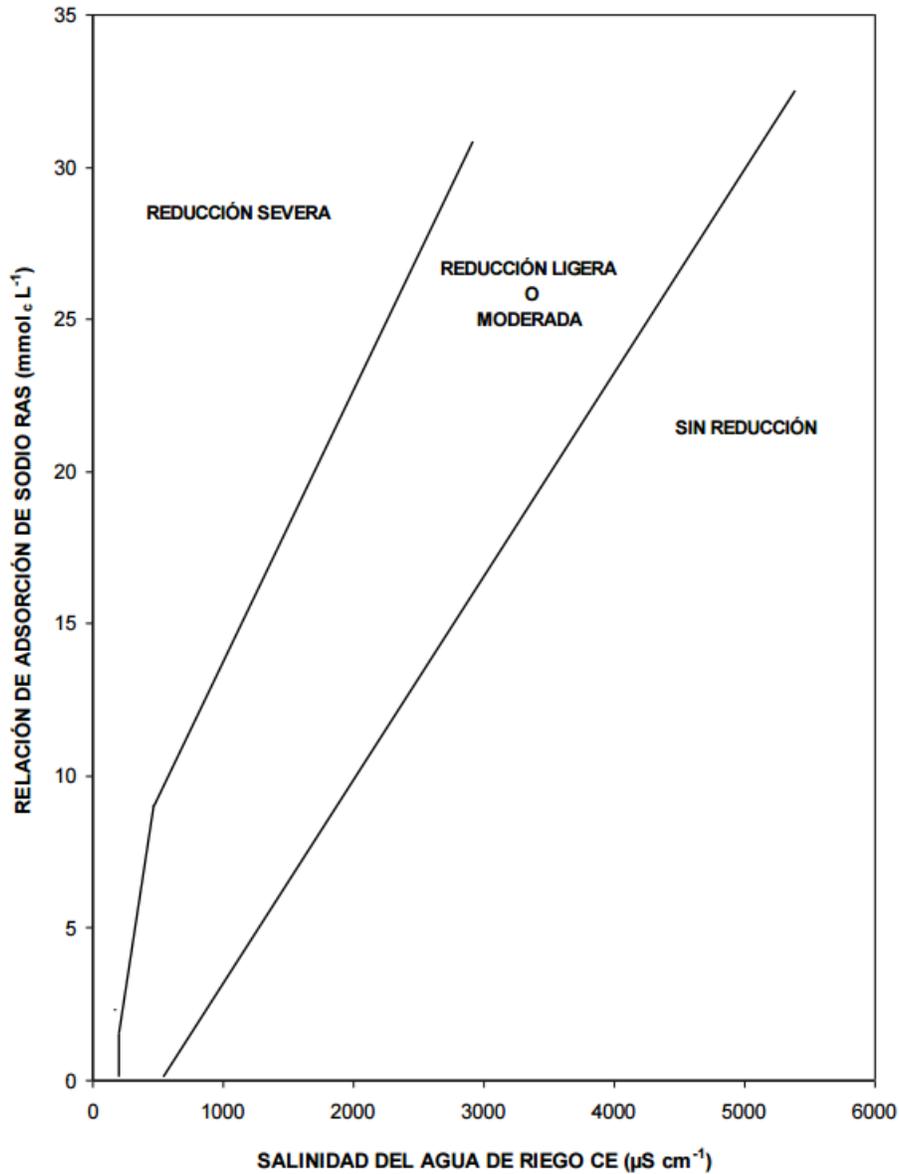


Figura 3. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  (Ayers y Westcot, 1987).

#### 4.5.2.7 Carbonato de sodio residual (CRS)

Eaton (1950) propuso el concepto de carbonato de sodio residual (CSR), para evaluar las aguas de riego que tienen cantidades considerables de carbonatos y bicarbonatos.

Con el fin de establecer con que intensidad se adsorbe el ion sodio en aguas de riego, que tienen diferentes cantidades de CSR; Wilcox *et al.* (1954) diseñaron un experimento que incluyó el crecimiento del pasto Rhodes en macetas de suelo franco Hanford, de acuerdo con datos que obtuvieron y utilizando el término CSR, establecieron algunos umbrales de contenidos de carbonatos y de bicarbonatos en las aguas de riego (Cuadro 9).

El CSR se calcula de acuerdo con la siguiente relación:

$$CSR = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

Donde: Los iones estan expresados en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

Cuadro 9. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con el carbonato de sodio residual.

Clase	Carbonato de sodio residual ( mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )
Buena	< 1.25
Condicionada	1.25 a 2.5
No recomendable	> 2.5

Fuente: Wilcox *et al.*, 1954

### 4.5.3 Criterios de toxicidad

Pescod (1992) y Verma (1983) consideran que los iones que con más frecuencia ocasionan toxicidad son boro, sodio y cloro.

Los problemas de toxicidad surgen cuando ciertos elementos (iones) del suelo o del agua, son absorbidos por las plantas y acumulados en sus tejidos, en concentraciones lo suficientemente altas como para provocar daños y reducir sus rendimientos. La magnitud de estos daños depende de la cantidad de iones absorbidos y de la sensibilidad de las plantas (Munns, 2008), por lo tanto, los problemas de toxicidad pueden ocurrir aun cuando dichos iones se encuentren en concentraciones bajas.

### 4.5.3.3 Boro

El boro es un elemento esencial y potencialmente tóxico para las plantas cuando excede ligeramente el nivel óptimo, se encuentra en casi todas las aguas naturales y por tanto es uno de los constituyentes más tóxicos de agua de riego, su concentración varía desde trazas hasta varios  $\text{mg L}^{-1}$  (SRH, 1971; Verma, 1983; Gupta *et al.*, 1985).

Las plantas pueden crecer normalmente en cultivos de arena con trazas de boro ( $0.03\text{-}0.04 \text{ mg L}^{-1}$ ) y se presenta toxicidad cuando la concentración llega a  $1 \text{ mg L}^{-1}$  de boro (Richards, 1973), y es suficiente para ocasionar sensibilidad a plantas de limón y naranjo, en tanto que la alfalfa logra desarrollo máximo si el agua de riego posee de  $1 \text{ a } 2 \text{ mg L}^{-1}$  de boro (Kelley, 1963).

Para llegar a los rangos de toxicidad en las plantas, la cantidad de boro que estará en la solución del suelo deberá ser superior a aquel boro que se encuentra adsorbido en las partículas del suelo (Munns y Tester, 2008).

En el Cuadro 10 se presenta la clasificación de las aguas para riego con base en el contenido de boro (Aceves y Palacios, 1970).

Cuadro 10. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con el contenido de boro.

Clase	Contenido de boro ( $\text{mg L}^{-1}$ )
Buena	< 0.3
Condicionada	0.3 a 4.0
No recomendable	> 4.0

Fuente: Aceves y Palacios, 1970

### 4.5.3.1 Sodio

Las plantas absorben sodio del suelo junto con el agua; a medida que el agua es transpirada, el sodio se va concentrando en las hojas y cuando alcanza

determinadas concentraciones produce efectos tóxicos.

El límite de tolerancia de cada cultivo es diferente, pero para muchas especies arbóreas la toxicidad se presenta cuando el sodio presenta un porcentaje superior al 0.25-0.50 % respecto al peso seco de la hoja. El efecto tóxico del sodio no depende de la concentración absoluta de este catión en el suelo, sino de su proporción respecto al calcio. Por tal razón la tolerancia de los cultivos se relaciona con el PSI del suelo (Pizarro, 1985).

Para determinar cuánto representa el ion sodio en el agua de riego, se puede utilizar el porcentaje de sodio soluble (PSS), que se expresa como porcentaje del total de cationes solubles, y tomando en cuenta la CE las aguas pueden ser clasificadas de acuerdo a la Figura 4.

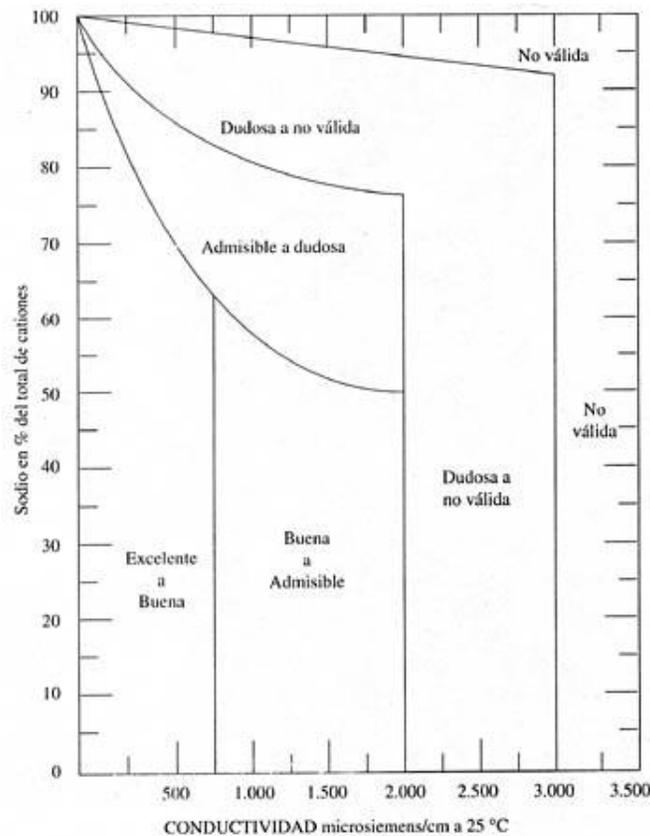


Figura 4. Diagrama de Wilcox usado para la clasificación del agua de riego en base al contenido del ion sodio, expresado en % del total de cationes, por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (1954).

#### **4.5.3.2 Cloro**

El cloro se encuentra disuelto en la solución del suelo, de donde puede ser absorbido por las raíces y transportado a las hojas, donde se puede acumular hasta niveles perjudiciales. Estos son generalmente de 0.30 a 0.50 % respecto a la hoja en peso seco (Pizarro, 1985).

La acumulación del ion cloruro en los tejidos de plantas que manifiestan síntomas de toxicidad, no necesariamente se refiere a la toxicidad específica del cloruro (Richards, 1973), debido a que muchas especies de plantas son menos sensibles a cloruros que a concentraciones isosmóticas de sulfatos.

#### **4.5.3.4 Fosfatos**

En los criterios para la interpretación de la calidad del agua de riego, Ayers y Westcot (1987) señalan que el contenido de fosforo en aguas de riego regularmente es de 0 a 2 mg L<sup>-1</sup>.

El fosforo puede existir en aguas en solución o suspensión, en estado mineral y orgánico, y formando diferentes compuestos. La interacción del fosforo con la salinidad es altamente dependiente de la especie y etapa de desarrollo de la planta, concentración y tipo de salinidad, así como de la concentración de fosforo en el sustrato (Pal y Singh, 1985).

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1 Descripción del área de estudio**

La zona de estudio está referida a las aguas residuales que circulan por la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Valle del Mezquital, estado de Hidalgo. Y se incluye un área aledaña a Tamazunchale, estado de San Luis Potosí.

El valle, geográficamente se encuentra en los siguientes municipios del estado: Actopan, Ajacuba, Alfajayucán, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Cardonal, Chapantongo, Chilcuautla, Francisco I. Madero, Ixmiquilpan, Mixquiahuala, Progreso, San Salvador, Santiago Anaya, Tasquillo, Tepeji de Ocampo, Villa de Tezontepec, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan, Tula de Allende y Zimapán (Comisión Nacional del Agua, 1995). Las coordenadas geográficas del área de estudio son 19°30´ hasta 20°45´ de latitud norte y 99°00´ hasta 99°30´ de longitud oeste.

El Valle del Mezquital se riega con aguas residuales que proceden de la zona urbana del Valle de México (INEGI, 1992). Las aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son enviadas al valle a través de tres conductos: El Emisor Poniente, El Gran Canal de Desagüe y El Emisor Central.

### **5.2 Muestreo**

Para conocer las dimensiones de las diferentes zonas del Valle del Mezquital que son regadas con esas aguas, se hizo un recorrido preliminar para poder delimitar la zona de muestreo de las aguas residuales que circulan por la red hidrográfica.

El muestreo de las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale se realizó en el periodo de verano 2017, para

un total de 130 sitios de muestreo (Figura 5), que se encuentran ubicados geográficamente en un plano cartográfico, de acuerdo a las coordenadas registradas con un GPS marca Garmin Map60.

La recolección de muestras, a lo largo del recorrido de la red hidrográfica del Valle del Mezquital durante el mes de mayo de 2017; se basó en la toma de muestras de agua a recolectar en campo, en recipientes de plástico de 0.5 L, tomando dos muestras por sitio, mismas que de inmediato fueron trasladadas al Laboratorio de Ciencias Ambientales, del área de Hidrociencias, en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillos; para su posterior análisis. Así mismo, se registró la etiqueta con fecha de recolección, nombre y localización de sitio. Para el muestreo de aguas se tomaron en cuenta las recomendaciones de Richards (1973), APHA (1995).

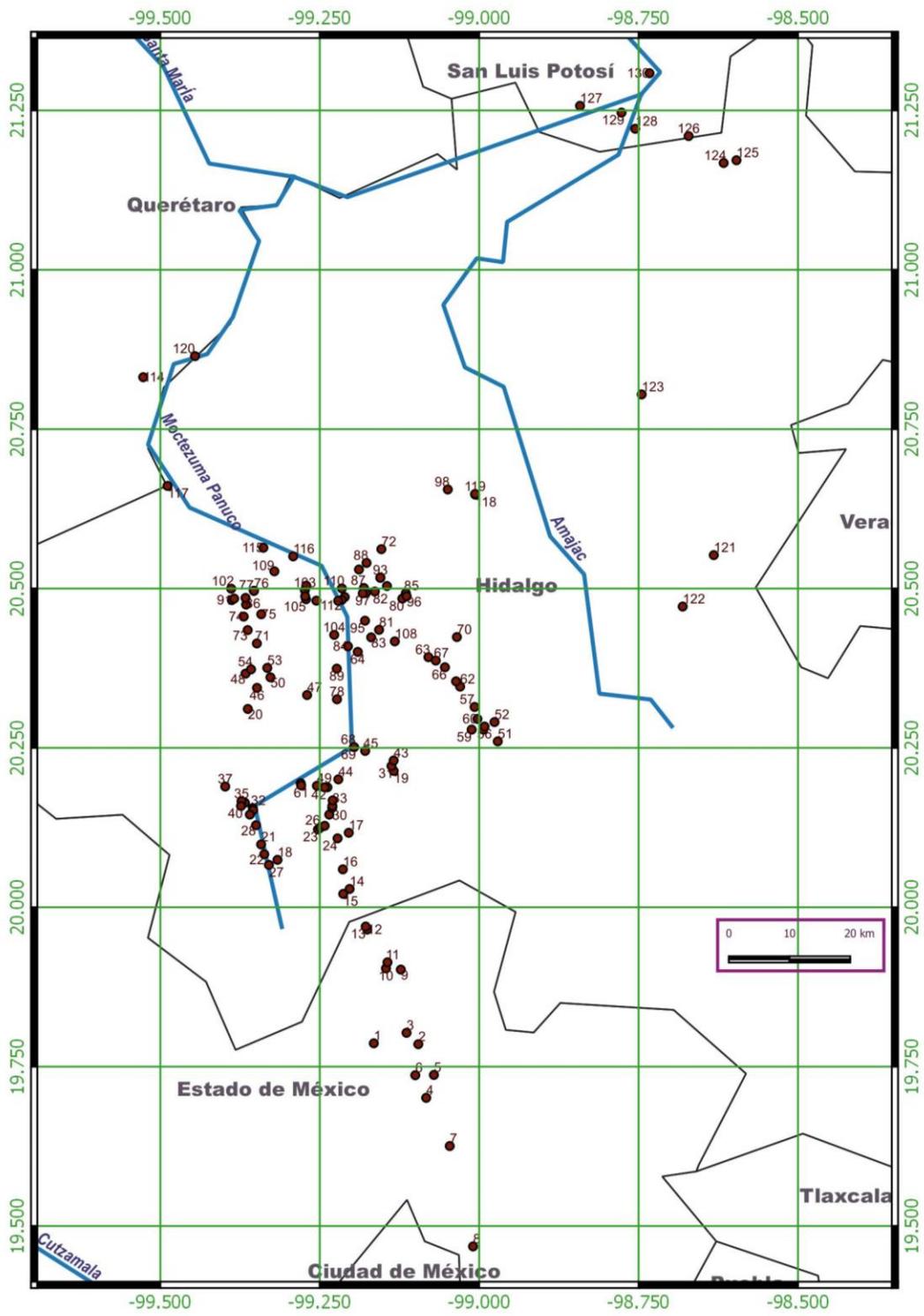


Figura 5. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

### 5.3 Métodos analíticos

Con el objetivo de establecer como varían las concentraciones totales iónicas en las aguas residuales, en el Cuadro 11 se presentan los métodos analíticos para la determinación de los parámetros físico-químicos realizados en cada una de las muestras colectadas.

Cuadro 11. Marchas analíticas utilizadas en las determinaciones físico-químicas de las aguas residuales del Valle del Mezquital (red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale).

Determinación	Método	Referencia
pH	Potenciométrico, con Potenciómetro marca Beckman, modelo Hoffman Pinther Boswork	Eaton <i>et al.</i> , 1995
Conductividad Eléctrica	Conductimetría, mediante puente de Wheastone con celda de vidrio	Conductímetro con Richards, 1990
Residuo Evaporado	Seco Gravimetría, mediante parrilla modelo 2200 Thermolyne	marca Hot-Plate Eaton <i>et al.</i> , 1995
Sodio y potasio	Flamometría, mediante Flame Photometer 643, L =589 nm, calibrado con soluciones estándar de 145 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> para Na y de 5 mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> para K	Flamómetro IL Autocal APHA, 1995 3500-Na <sup>+</sup> y K <sup>+</sup> , D
Calcio y magnesio	Volumétrico, mediante titulación con Eriocromo Negro T como indicador, para Ca + Mg y Murexida para Ca	EDTA y APHA, 1995 3500 Ca <sup>2+</sup> , D
Carbonatos	Volumétrico, mediante titulación con ácido sulfúrico y Fenolftaleína como indicador	APHA, 1995 2320 B
Bicarbonatos	Volumétrico, mediante titulación con ácido sulfúrico y Anaranjado de Metilo como indicador	APHA, 1995 2320 B
Cloruros	Titulación con Nitrato de Plata y Cromato de Potasio al 5% como indicador	APHA, 1995 4500-C-IB
Sulfatos	Turbidimetría, mediante el modelo Perkin Elmer 35, L=420 nm	Espectrofotómetro APHA, 1995 4500-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> E
Boro	Espectrofotometría, mediante el modelo Perkin Elmer 35, L=690 nm, Azomethina-H	Espectrofotómetro Rodier, 1978; Page, 1982; Rhoades <i>et al.</i> , 1970

## 5.4 Análisis estadístico

Para establecer la dependencia funcional entre la concentración total electrolítica  $\text{mg L}^{-1}$ , los  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$  de los cationes y de los aniones y la presión osmótica MPa con respecto a la conductividad eléctrica  $\mu\text{S cm}^{-1}$  de las soluciones acuosas del Valle del Mezquital, estado de Hidalgo, para este efecto se calibró un modelo lineal ajustado por el origen, mediante la técnica del análisis de regresión lineal, el cual relaciona la concentración de las soluciones acuosas expresadas en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$  o  $\text{mg L}^{-1}$  así como la presión osmótica MPa con respecto a la conductividad eléctrica de las soluciones acuosas expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

El modelo en su forma general tiene la estructura siguiente:

$$Y=B_1X$$

Dónde:

- Y: Representa la concentración de la solución en  $\text{mgL}^{-1}$ , en un primer caso; la concentración de la solución en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ; en un segundo caso, y la presión osmótica en MPa desarrollada por las soluciones acuosas en un tercer caso.
- B<sub>1</sub>: Es la pendiente de la recta, o sea, el número de unidades en ( $\text{mgL}^{-1}$ ,  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$  o MPa) que aumenta la solución (Y) por cada unidad de concentración que incrementa la solución expresada a través de la conductividad eléctrica expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .
- X: Es la conductividad eléctrica de la solución expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

El ajuste de este modelo lineal se llevó a cabo relacionando primero la concentración de las soluciones acuosas en  $\text{mg L}^{-1}$ , en segundo lugar, se relacionaron los  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ , y en tercer lugar se relacionó la presión osmótica MPa con respecto a la conductividad eléctrica expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , empleando el método de mínimos cuadrados.

## 5.5 Comprobación de resultados de las determinaciones analíticas que se llevaron a cabo en el laboratorio

Los macro componentes de las soluciones acuosas electrolíticas son: Ca, Mg, Na, K, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, además, en aguas residuales es necesario determinar adicionalmente: B, P-PO<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub> y Si. Estos últimos elementos se encuentran en pequeñas cantidades en las aguas que se utilizan para riego, y en esta ocasión solo se determinó B.

En todas las muestras de agua se determinó el pH y la conductividad eléctrica expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

### Establecimiento del balance cationes – aniones

Todas las soluciones electrolíticas acuosas son electroneutrales, es decir, la suma de cargas positivas debe ser aproximadamente igual a la suma de cargas negativas ( $\Sigma n^+ = \Sigma n^-$ ). Las soluciones acuosas son electro-neutrales.

El porcentaje de error admisible (%), se presenta en el Cuadro 12, es decir, el porcentaje de la diferencia entre la suma de cationes ( $\Sigma n^+$ ) y la suma de aniones ( $\Sigma n^-$ ) se expresa como sigue (APHA, 1995):

$$\% \text{ de la diferencia} = \frac{|\Sigma \text{ cationes} - \Sigma \text{ aniones}|}{|\Sigma \text{ cationes} + \Sigma \text{ aniones}|} * 100$$

Donde: % de la diferencia, es la diferencia del error en porcentaje aceptable. La suma de cationes y aniones deben expresarse en  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ .

Cuadro 12. Porcentaje de la diferencia de error aceptable, de acuerdo a la suma de aniones o cationes (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>).

Suma de aniones o cationes, en mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	% diferencia aceptable
0.0 – 3.0	± 0.2
3.0 – 10.0	± 2.0
10.0 – 800.0	±2.0 – 5.0

Fuente: APHA, 1995

### Conductividad eléctrica medida y la suma de iones

Ambas sumas de cationes y de aniones, una u otra (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>), debe ser aproximada a 1/100 del valor de la CE medida (μS cm<sup>-1</sup>). Si una u otra suma no mantiene este criterio, entonces se debe reanalizar la muestra de agua, un criterio aceptable es el siguiente (APHA, 1995):

$$\sum cationes = \frac{\langle 0.9 - 1.1 \rangle \times CE}{100}$$

$$\sum aniones = \frac{\langle 0.9 - 1.1 \rangle \times CE}{100}$$

Donde: Suma de cationes o de aniones debe expresarse en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>. CE, es la conductividad eléctrica medida y debe expresarse μS cm<sup>-1</sup>.

### Conductividad eléctrica experimental = Conductividad eléctrica calculada

Se denomina conductividad eléctrica experimental a la conductividad eléctrica medida. Y la conductividad eléctrica teórica se le denomina conductividad eléctrica calculada.

Si la CE calculada es más alta que el valor de la CE medida, entonces se debe reanalizar la suma de iones más alta. Si la CE calculada es menor que el valor de la CE medida, entonces, se debe reanalizar la suma de iones más baja.

De acuerdo con APHA (1995) una relación aceptable de estos dos valores se

establece como sigue:

$$0.9 < \frac{CE_{experimental}}{CE_{teórica}} < 1.1$$

Donde:  $CE_{experimental}$  debe expresarse en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .  $CE_{teórica}$  debe expresarse en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Los valores de CE deben estar expresados en las mismas unidades y múltiplos.

En el Cuadro 13 se presentan los valores de la CE de los diferentes iones que comúnmente se encuentran en las soluciones acuosas electrolíticas.

Cuadro 13. Factores de la conductividad eléctrica de los diferentes iones que se encuentran en las aguas.

Ión	Conductividad eléctrica a 25 °C ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	
	Por $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$	Por $\text{mg L}^{-1}$
Calcio	52.00	2.60
Magnesio	46.60	3.82
Sodio	48.90	2.13
potasio	72.00	1.84
Carbonato	84.60	2.82
Bicarbonato	43.60	0.72
Cloruro	75.90	2.14
Sulfato	73.90	1.54

Fuente: APHA, 1995

### **Sólidos totales disueltos calculados (STD) referidos en su relación con la conductividad eléctrica (CE)**

Si la relación de los sólidos totales disueltos (STD) calculados referidos a la conductividad eléctrica se coloca debajo de 0.55, entonces, la suma más baja de iones es dudosa, por lo que se debe reanalizar a la muestra de agua.

En el caso de las aguas que se están analizando contengan iones pocos disociados de calcio y de iones sulfato, entonces, los sólidos totales disueltos (STD) pueden ser altos, por ejemplo 0.8 veces la conductividad eléctrica (CE), un criterio aceptable es el siguiente:

$$\frac{\text{Sólidos totales disueltos (STD) calculados}}{\text{Conductividad eléctrica } \mu\text{S cm}^{-1}} = 0.55 - 0.70$$

### **Sólidos totales disueltos (STD) medidos relacionados con respecto a la conductividad eléctrica (CE)**

Los sólidos totales disueltos medidos, se obtienen experimentalmente. Un criterio aceptable para esta relación es 0.55 – 0.70

$$\frac{\text{Sólidos totales disueltos (STD) medidos}}{\text{Conductividad eléctrica } \mu\text{S cm}^{-1}} = 0.55 - 0.70$$

### **Concentración de los sólidos totales disueltos medidos y calculados**

Si la medición de la concentración de los sólidos totales disueltos es más alta que la medición de los sólidos disueltos calculados, esto significa que no se ha incluido en el cálculo un determinado compuesto o elemento.

Si el valor medido de la concentración de los sólidos totales disueltos es menor que la medición de los sólidos totales disueltos calculados, entonces el valor medido de la suma de iones está en duda, por lo que a esto se refiere, la muestra de agua tendrá que ser reanalizada.

Si la medición de la concentración de sólidos es más alta en un 20 % que la calculada, entonces, la suma de iones está en duda. Y por lo que a esto respecta, se debe reanalizar la muestra de agua.

De acuerdo con APHA (1995) una relación aceptable respecto a esto es la siguiente:

$$1.0 < \frac{\text{STD medidos}}{\text{STD calculados}} < 1.2$$

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estrategia utilizada permitió que los sitios de muestreo abarcaran la mayor parte de la superficie agrícola que se riega con aguas residuales que provienen del Valle de México.

La información se presenta considerando el gradiente altitudinal, debido a que, en esta zona el desplazamiento de las aguas residuales a través del Valle del Mezquital es, en su mayoría, por gravedad. También se identificaron dos zonas: Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán (aguas residuales) y Tamazunchale.

### 6.1 Estaciones de muestreo de las aguas residuales

La identificación y una breve descripción de los 130 sitios de muestreo se presentan en el Cuadro 14, que incluye temperatura, latitud norte y longitud oeste en coordenadas geográficas, así como la altura en metros sobre el nivel del mar.

Uno de los cauces superficiales importantes para la agricultura en el Valle del Mezquital es el río Tula, que en su trayecto conduce aguas residuales y también recibe aguas que drenan de los suelos ubicados en las partes altas. Estos últimos regados con aguas de manantiales.

El gradiente altitudinal general de la zona muestreada se encuentra entre las siguientes variaciones de altitud, de los 83 m hasta los 2252 m, que corresponden al Río Moctezuma (hidroeléctrica, en Tamazunchale) y al Emisor norte (Laguna de Zumpango), respectivamente. El promedio es de 1801 m de altitud.

En el caso de las aguas residuales el gradiente altitudinal se encuentra entre las siguientes variaciones de altitud, de los 921 m hasta los 2252 m, que corresponden a La Mora (puente La Mora) y al Emisor norte (Laguna de Zumpango), respectivamente.

Cuadro 14. Identificación y descripción de las estaciones de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale, verano 2017.

No. muestra	Nombre	Temperatura (° C)	Longitud W (°, ', ")	Latitud N (°, ', ")	Altitud (m)
<b>Red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán</b>					
1	Emisor norte, Laguna de Zumpango	22.0	99° 09' 54.6"	19° 47' 11.3"	2252
2	Canal la Laminadora, Zumpango	25.0	99° 05' 43.3"	19° 47' 06.2"	2249
3	Laguna de Zumpango	25.5	99° 06' 49.7"	19° 48' 10.6"	2249
4	Gran canal, lumbrera Santa Inés	22.0	99° 04' 58.7"	19° 42' 03.2"	2240
5	Canal revestido Santa Ana Nextlalpan	28.0	99° 04' 15.2"	19° 44' 12.6"	2237
6	Gran canal, Puente Santa Ana Nextlalpan	22.5	99° 06' 00.4"	19° 44' 10.9"	2234
7	Puente PEMEX (Héroes de Tecámac)	22.5	99° 02' 45.7"	19° 37' 31.0"	2233
8	Gran canal carretera Peñón - Texcoco	21.5	99° 00' 34.2"	19° 28' 04.0"	2227
9	Salida segundo túnel	22.0	99° 07' 22.0"	19° 54' 07.5"	2213
10	Salida Gran Canal Tequixquiac	22.0	99° 08' 45.9"	19° 54' 14.3"	2208
11	Canal de tierra Tequixquiac (canal del puerco)	22.0	99° 08' 37.3"	19° 54' 48.7"	2204
12	Río Tula-Apaxco	22.0	99° 10' 31.9"	19° 57' 53.6"	2172
13	Canal de tierra cementera Apaxco	22.5	99° 10' 40.3"	19° 58' 10.8"	2167
14	Canal revestido Texas	22.5	99° 12' 11.2"	20° 01' 43.1"	2149
15	Río Tula, Atotonilco	22.0	99° 12' 47.3"	20° 01' 15.3"	2108
16	Canal de tierra Atitalaquía	23.0	99° 12' 49.4"	20° 03' 33.8"	2095
17	Canal de tierra Teteltipán (Tlahuelilpan)	23.0	99° 12' 15.9"	20° 07' 00.3"	2089
18	Canal principal revestido Dendhó, Tula, Hidalgo	22.0	99° 18' 58.4"	20° 04' 27.5"	2082
19	Canal revestido-3 Colonia Morelos	23.5	99° 08' 02.3"	20° 12' 49.7"	2077
20	Manantial Chapantongo	18.0	99° 21' 45.8"	20° 18' 39.6"	2074
21	Canal revestido (alimentador presa Endhó), calle José María Morelos y Pavón, localidad Villagrán, Tula	23.5	99° 20' 30.9"	20° 05' 54.3"	2072
22	Canal revestido autopista Tula (Santa Ana Ahuehuepan)	24.0	99° 20' 13.0"	20° 04' 59.1"	2071
23	Canal revestido-1 Tlahuelilpan	22.0	99° 15' 10.0"	20° 07' 19.2"	2060
24	Dren perimetral Atitalaquía	21.0	99° 13' 19.2"	20° 06' 28.8"	2060
25	Canal revestido salida de Tlahuelilpan (La Lomita)	21.5	99° 14' 06.0"	20° 08' 42.9"	2057
26	Canal revestido-2 Tlahuelilpan	23.5	99° 14' 57.2"	20° 07' 28.7"	2056
27	Puente verde Tula, Hidalgo (por cementeras)	21.0	99° 19' 46.9"	20° 03' 58.9"	2053
28	Santa Ana Ahuehuepan, canal de tierra (alimentador presa Endhó)	24.0	99° 20' 59.9"	20° 07' 42.6"	2046
29	Canal revestido-3 Tlahuelilpan	21.5	99° 14' 31.9"	20° 07' 39.6"	2043
30	Canal revestido Requena	22.0	99° 13' 49.7"	20° 09' 21.0"	2041
31	Canal revestido-2 Colonia Morelos	21.5	99° 08' 14.6"	20° 13' 17.4"	2039
32	Canal revestido frente a CONAGUA (alimentador presa Endhó)	22.5	99° 21' 18.0"	20° 09' 19.8"	2035
33	Canal revestido El Tinaco	22.0	99° 13' 48.7"	20° 09' 32.2"	2035
34	Canal de tierra Las Vías (presa Endhó)	21.0	99° 22' 02.7"	20° 09' 50.0"	2032
35	Canal de tierra Tepetitlán (vías de ferrocarril)	21.0	99° 22' 21.5"	20° 09' 58.8"	2029
36	Canal revestido chico salida de El Tinaco	21.5	99° 13' 46.9"	20° 10' 03.1"	2028
37	Canal chico Tepetitlán	20.5	99° 23' 53.5"	20° 11' 21.4"	2025

... Cuadro 14.

No. muestra	Nombre	Temperatura (° C)	Longitud W (°, ', ")	Latitud N (°, ', ")	Altitud (m)
38	Canal de tierra junto a presa Endhó (aguas arriba)	23.5	99° 21' 15.8"	20° 09' 7.7"	2024
39	Presa Endhó	25.0	99° 21' 34.2"	20° 08' 43.1"	2016
40	Canal principal revestido presa Endhó	20.0	99° 22' 24.5"	20° 09' 31.6"	2010
41	Canal revestido-1 cuadrado Las Mangas (entrada a Tezontepec)	22.5	99° 14' 16.6"	20° 11' 17.2"	2009
42	Canal revestido-2 Las Mangas	21.0	99° 14' 33.1"	20° 11' 16.8"	2006
43	Canal revestido-1 Colonia Morelos	21.5	99° 08' 02.4"	20° 13' 48.5"	2005
44	Canal revestido Tezontepec	21.0	99° 13' 14.9"	20° 12' 02.0"	2000
45	Canal revestido Xochitlán	21.0	99° 10' 43.3"	20° 14' 42.6"	1997
46	Presa Dolores	20.0	99° 20' 54.0"	20° 20' 38.7"	1990
47	Túnel Chilcuautla	24.0	99° 16' 11.2"	20° 19' 58.3"	1989
48	Canal revestido-2 Xamaje, Alfajayucán	20.0	99° 21' 58.9"	20° 21' 58.9"	1985
49	Canal sobre basalto (Tezontepec, entrada a delegación Panuaya)	21.0	99° 15' 15.9"	20° 11' 25.4"	1977
50	Canal de piedra presa Rojo Gómez	28.5	99° 19' 38.2"	20° 21' 38.3"	1974
51	Canal revestido "Dren Boxthá"	22.0	98° 58' 14.7"	20° 15' 36.5"	1963
52	Canal revestido El Daxthá (caxuxi, km 38.0 carretera Actopán-Ixmiquilpan)	20.0	98° 58' 33.1"	20° 17' 25.5"	1955
53	Canal revestido Xamajé	23.5	99° 19' 56.1"	20° 22' 31.3"	1949
54	Canal revestido-1 Xamaje, Alfajayucán	20.0	99° 21' 27.7"	20° 22' 23.3"	1949
55	Canal de tierra-1 meseta El Salvador (a un costado del CECyTE plantel Poxindejé)	19.0	98° 59' 36.5"	20° 16' 43.1"	1946
56	Canal de tierra-2 entrada a El Salvador	20.0	98° 59' 29.3"	20° 17' 00.4"	1946
57	Canal revestido Francisco Villa (a un costado de CONAFE)	23.0	99° 00' 25.5"	20° 18' 51.0"	1945
58	Tezontepec, río Tula	21.0	99° 16' 47.4"	20° 11' 40.6"	1945
59	Pozo artesiano El Salvador (CAAMSSH)	22.0	99° 00' 42.0"	20° 16' 50.6"	1944
60	Canal de tierra-3 El Salvador	19.5	99° 00' 09.7"	20° 17' 43.4"	1942
61	Nacimiento Tezontepec "Aguas frías" (núcleo ejidal Tezontepec)	20.5	99° 16' 44.9"	20° 11' 27.7"	1935
62	Canal de tierra Boxaxní	21.5	99° 01' 47.2"	20° 20' 45.7"	1926
63	Canal revestido-1 Yolotepec	21.0	99° 04' 46.2"	20° 23' 32.0"	1918
64	Canal revestido, entrada ECOALBERTO (canal grasoso)	26.0	99° 11' 25.1"	20° 24' 01.8"	1913
65	Canal revestido-3 Yolotepec	21.0	99° 02' 10.2"	20° 21' 15.6"	1912
66	Canal revestido carretera Actopán-Ixmiquilpan (cruce vía corta El Cardonal)	21.5	99° 03' 12.9"	20° 22' 35.0"	1912
67	Canal revestido-2 Yolotepec	21.5	99° 04' 04.6"	20° 23' 12.9"	1908
68	Río Tula (El Progreso)	20.5	99° 11' 46.8"	20° 15' 04.5"	1897
69	Nacimiento El Progreso, a un costado del río Tula	22.0	99° 11' 45.7"	20° 15' 04.2"	1896
70	Canal revestido distribuidor Zozea, Alfajayucán	20.0	99° 02' 05.4"	20° 25' 25.7"	1889
71	Río Alfajayucán	23.0	99° 20' 54.8"	20° 24' 49.6"	1866
72	Canal revestido Quixpedhé	23.5	99° 09' 11.8"	20° 33' 42.0"	1857
73	Presa Vicente Aguirre	23.0	99° 21' 46.8"	20° 26' 05.0"	1850
74	Canal revestido San Francisco, km 1	24.0	99° 22' 09.1"	20° 27' 21.3"	1845
75	Santa María Xigüí	24.0	99° 20' 30.1"	20° 27' 34.4"	1836

... Cuadro 14.

No. muestra	Nombre	Temperatura (° C)	Longitud W (°, ', ")	Latitud N (°, ', ")	Altitud (m)
76	Canal cuadrado revestido, Tasquillo	20.5	99° 21' 11.3"	20° 29' 46.9"	1829
77	Canal revestido cruce a presa Madhó Corrales	20.5	99° 21' 11.6"	20° 29' 46.7"	1829
78	Río Tula-Chilcuautla	21.0	99° 13' 22.6"	20° 19' 34.2"	1815
79	Canal revestido la Hacienda Yonthé Grande	24.0	99° 21' 55.7"	20° 28' 29.3"	1804
80	Presa Debodhé	23.0	99° 07' 13.6"	20° 29' 02.7"	1803
81	Canal revestido entrada a La Jungla	22.0	99° 09' 24.8"	20° 26' 06.4"	1793
82	Canal revestido "la estación" Capula	21.0	99° 09' 49.0"	20° 29' 42.9"	1789
83	Canal revestido entrada a Maguey Blanco	23.0	99° 10' 09.3"	20° 25' 23.9"	1789
84	Canal revestido El Alberto	21.0	99° 12' 20.7"	20° 24' 33.3"	1786
85	Canal revestido, entrada a presa Debodhé	22.0	99° 06' 53.6"	20° 29' 33.0"	1785
86	Lagunita Hacienda Yonthé Grande	21.0	99° 21' 58.7"	20° 29' 06.7"	1784
87	Canal revestido entrada a clínica ISSSTE Capula (General Guadalupe Victoria)	24.0	99° 10' 50.5"	20° 30' 03.0"	1780
88	Canal revestido a un costado de iglesia Bethel (cerritos, entrada a Vázquez)	25.0	99° 10' 35.6"	20° 32' 24.3"	1775
89	Puente Tlacotalpilco, río Tula	20.6	99° 13' 23.7"	20° 22' 27.4"	1773
90	Canal de drenaje parte alta Capula	23.5	99° 08' 40.3"	20° 30' 13.9"	1770
91	Canal de tierra San Francisco	22.5	99° 23' 16.1"	20° 28' 54.5"	1762
92	Puente canal San Pedro Capula (El Rosario)	23.0	99° 09' 17.6"	20° 31' 00.0"	1754
93	Cauce de río San Pedro Capula (El Rosario)	22.0	99° 09' 17.7"	20° 31' 01.5"	1752
94	Drenaje agrícola entrada a Capula	22.0	99° 10' 39.5"	20° 29' 34.6"	1751
95	Canal de tierra junto a escuela secundaria general "David Alfaro Siqueiros"	31.0	99° 10' 44.2"	20° 26' 58.0"	1748
96	Vertedor de presa Debodhé	19.0	99° 06' 49.0"	20° 29' 15.5"	1746
97	Canal de tierra La Joya	18.5	99° 10' 56.9"	20° 29' 32.6"	1744
98	Río el Arenalito	23.0	99° 02' 56.8"	20° 39' 19.2"	1742
99	Cascada Xigatzá	21.0	99° 23' 03.1"	20° 29' 03.0"	1741
100	Canal de piedra, salida de Ixmiquilpan	22.0	99° 15' 19.1"	20° 28' 51.3"	1736
101	Canal principal revestido "El Tecolote", San Pedro Capula, Ixmiquilpan	24.0	99° 11' 18.5"	20° 31' 47.1"	1736
102	Presa Madhó Corrales	21.0	99° 23' 19.8"	20° 29' 58.9"	1733
103	Canal-2 López Rayón (Dexthó)	22.5	99° 16' 23.8"	20° 29' 50.2"	1732
104	Río Tula, EL Alberto	21.0	99° 13' 38.2"	20° 25' 38.1"	1732
105	Canal-1 López Rayón	22.0	99° 16' 17.5"	20° 28' 59.2"	1731
106	Canal de drenaje López Rayón	21.0	99° 16' 22.0"	20° 29' 16.0"	1730
107	Canal-3 López Rayón	23.0	99° 16' 15.8"	20° 30' 15.8"	1727
108	Canal de piedra (frente a El Mexicano)	20.0	99° 07' 56.0"	20° 25' 01.3"	1726
109	Canal revestido de piedra, entrada a Tasquillo	21.0	99° 19' 15.9"	20° 31' 37.0"	1699
110	Canal revestido entrada a Ixmiquilpan (El Cardonal)	24.0	99° 12' 55.0"	20° 30' 00.4"	1698
111	Canal cuadrado, calle Miguel Hidalgo, Ixmiquilpan (barrio San Miguel)	20.0	99° 12' 38.8"	20° 29' 11.6"	1697
112	Río Ixmiquilpan	20.0	99° 12' 55.3"	20° 28' 55.7"	1692
113	Río Tula-Ixmiquilpan	19.0	99° 13' 15.7"	20° 28' 50.3"	1687
114	Río Maconí	18.5	99° 31' 36.7"	20° 49' 53.3"	1655

... Cuadro 14.

No. muestra	Nombre	Temperatura (° C)	Longitud W (°, ', ")	Latitud N (°, ', ")	Altitud (m)
115	Tasquillo, río Tula (puente 1885)	21.0	99° 20' 18.1"	20° 33' 50.1"	1652
116	Río Tula, balneario Xindejé	20.0	99° 17' 29.7"	20° 33' 01.4"	1627
117	Presa Zimapán	21.0	99° 29' 19.4"	20° 39' 39.4"	1541
118	La Gloria, nacimiento	29.0	99° 00' 22.0"	20° 38' 50.0"	1393
119	La Gloria, río	34.5	99° 00' 22.8"	20° 38' 53.9"	1300
120	La Mora (puente La Mora)	19.0	99° 26' 44.0"	20° 51' 52.2"	921
<b>Red hidrográfica Tamazunchale</b>					
121	Cascada antes de río Venado (cerca de Zacualtipán)	21.0	98° 37' 55.0"	20° 33' 08.5"	1763
122	Río Venado (Metztitlán)	30.0	98° 40' 50.5"	20° 28' 18.0"	1299
123	Molango, Laguna Atezca	27.5	98° 44' 42.2"	20° 48' 16.1"	1270
124	Río Tultitlán	25.0	98° 36' 59.2"	21° 10' 03.1"	177
125	Río San Felipe Orizatlán, Hidalgo	26.0	98° 35' 46.9"	21° 10' 18.6"	168
126	Río Capulhuacanito	26.0	98° 40' 17.1"	21° 12' 35.2"	136
127	Vega Larga-río Moctezuma	26.5	98° 50' 30.2"	21° 15' 26.1"	124
128	Río Claro (Tamazunchale)	28.5	98° 45' 18.5"	21° 13' 16.5"	111
129	Río Amajac (Tamazunchale)	28.5	98° 46' 35.8"	21° 14' 47.8"	101
130	Río Moctezuma, hidroeléctrica (Tamazunchale)	28.0	98° 43' 58.0"	21° 18' 30.2"	83
MEDIANA		22.0			1912
MEDIA		22.5			1801.4
MODA		21.0			2249
DESV. EST.		2.6			450.6
MÍNIMO		18.0			83
MÁXIMO		34.5			2252

## 6.2 Composición iónica de las aguas residuales

La composición iónica de las aguas residuales de cada uno de los sitios de muestreo se observa en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Composición iónica de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

No. muestra	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca $\text{meq L}^{-1}$	Mg $\text{meq L}^{-1}$	Na $\text{meq L}^{-1}$	K $\text{meq L}^{-1}$	Suma cationes	CO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	HCO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Cl $\text{meq L}^{-1}$	SO <sub>4</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Suma aniones	Error (%)	Suma $\text{mg L}^{-1}$ $\text{mmol L}^{-1}$
1	6.97	1,145.00	1.02	1.34	8.34	0.5	11.2	0	2.66	7.8	0.42	10.88	1.45	
			20.44	16.29	191.74	19.55	0	162.31	276.53	20.17		707.03		
			0.51	0.67	8.34	0.5	0	2.66	7.8	0.21		20.69		
2	7.77	1,806.00	1.84	2.27	12.81	0.74	17.66	0	6.28	9.98	0.96	17.22	1.26	
			36.87	27.59	294.5	28.94	0	383.19	353.82	46.11		1,171.02		
			0.92	1.14	12.81	0.74	0	6.28	9.98	0.48		32.35		
3	8.85	561	0.57	0.7	4.04	0.18	5.49	0.12	1.95	3.08	0.3	5.45	0.37	
			11.42	8.51	92.88	7.04	3.6	118.98	109.2	14.41		366.04		
			0.29	0.35	4.04	0.18	0.06	1.95	3.08	0.15		10.1		
4	7.14	2,024.00	1.86	2.78	14.22	0.93	19.79	0	5.75	11.94	1.56	19.25	1.38	
			37.27	33.79	326.92	36.36	0	350.85	423.31	74.93		1,283.43		
			0.93	1.39	14.22	0.93	0	5.75	11.94	0.78		35.94		
5	7.35	2,806.00	2.86	3.49	19.87	1.22	27.44	0	9.92	14.44	2.32	26.68	1.4	
			57.31	42.41	456.81	47.7	0	605.29	511.94	111.43		1,832.91		
			1.43	1.75	19.87	1.22	0	9.92	14.44	1.16		49.79		
6	7.66	1,855.00	1.78	2.46	12.97	0.83	18.04	0	5.61	10.4	1.43	17.44	1.69	
			35.67	29.9	298.18	32.45	0	342.31	368.71	68.68		1,175.90		
			0.89	1.23	12.97	0.83	0	5.61	10.4	0.72		32.65		
7	7.55	2,036.00	1.9	2.85	14.02	1.04	19.81	0	6.1	11.82	1.46	19.38	1.1	
			38.08	34.64	322.32	40.67	0	372.2	419.05	70.13		1,297.08		
			0.95	1.43	14.02	1.04	0	6.1	11.82	0.73		36.09		
8	7.47	2,041.00	1.5	2.55	15.02	0.89	19.96	0	5.7	12.32	1.32	19.34	1.58	
			30.06	30.99	345.31	34.8	0	347.8	436.78	63.4		1,289.14		
			0.75	1.28	15.02	0.89	0	5.7	12.32	0.66		36.62		
9	7.42	1,986.00	2.1	3.35	13.03	0.94	19.42	0	7.04	9.93	1.89	18.86	1.46	
			42.08	40.71	299.56	36.76	0	429.56	352.05	90.78		1,291.50		
			1.05	1.68	13.03	0.94	0	7.04	9.93	0.95		34.61		
10	7.41	1,956.00	1.84	2.39	14.06	0.84	19.13	0	4.55	13.16	0.96	18.67	1.22	
			36.87	29.05	323.24	32.85	0	277.63	466.56	46.11		1,212.30		
			0.92	1.2	14.06	0.84	0	4.55	13.16	0.48		35.21		
11	7.36	1,986.00	2.2	3.25	12.91	0.94	19.3	0	6.82	10.25	1.7	18.77	1.39	
			44.09	39.5	296.8	36.76	0	416.14	363.39	81.65		1,278.32		
			1.1	1.63	12.91	0.94	0	6.82	10.25	0.85		34.5		
12	7.44	1543	1.42	3.1	9.66	0.91	15.09	0	6.18	7.6	0.92	14.7	1.31	
			28.46	37.67	222.08	35.58	0	377.09	269.44	44.19		1,014.51		
			0.71	1.55	9.66	0.91	0	6.18	7.6	0.46		27.07		
13	7.52	1713	1.66	3.4	10.61	1.08	16.75	0	6.95	8.29	1.06	16.3	1.36	
			33.27	41.32	243.92	42.23	0	424.07	293.91	50.91		1,129.63		
			0.83	1.7	10.61	1.08	0	6.95	8.29	0.53		29.99		
14	7.38	1864	1.82	3.86	11.43	1.12	18.23	0	7.36	9.64	0.7	17.7	1.48	
			36.47	46.91	262.78	43.79	0	449.09	341.77	33.62		1,214.43		
			0.91	1.93	11.43	1.12	0	7.36	9.64	0.35		32.74		
15	7.52	1831	1.76	3.78	11.27	1.09	17.9	0	7.18	9.37	0.82	17.37	1.5	
			35.27	45.94	259.1	42.62	0	438.1	332.19	39.39		1,192.61		
			0.88	1.89	11.27	1.09	0	7.18	9.37	0.41		32.09		
16	7.26	1474	1.36	2.96	9.22	0.87	14.41	0	5.72	7.14	1.12	13.98	1.51	
			27.25	35.97	211.97	34.02	0	349.02	253.13	53.79		965.16		
			0.68	1.48	9.22	0.87	0	5.72	7.14	0.56		25.67		

... Cuadro 15.

No. muestra	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca $\text{meq L}^{-1}$	Mg $\text{meq L}^{-1}$	Na $\text{meq L}^{-1}$	K $\text{meq L}^{-1}$	Suma cationes	CO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	HCO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Cl $\text{meq L}^{-1}$	SO <sub>4</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Suma aniones	Error (%)	Suma $\text{mg L}^{-1}$ $\text{mmol L}^{-1}$
17	7.18	1370	1.2	2.46	8.88	0.86	13.4	0	5.15	6.57	1.32	13.04	1.36	
			24.05	29.9	204.15	33.63		0	314.24	232.93	63.4			902.29
			0.6	1.23	8.88	0.86		0	5.15	6.57	0.66			23.95
18	7.54	1,541.00	1.64	2.64	9.78	0.96	15.02	0	5.3	7.86	1.46	14.62	1.35	
			32.87	32.08	224.84	37.54		0	323.39	278.66	70.13			999.51
			0.82	1.32	9.78	0.96		0	5.3	7.86	0.73			26.77
19	7.28	1,528.00	1.68	2.86	9.43	0.97	14.94	0	5.98	6.89	1.62	14.49	1.53	
			33.67	34.76	216.8	37.93		0	364.88	244.27	77.81			1,010.11
			0.84	1.43	9.43	0.97		0	5.98	6.89	0.81			26.35
20	7.98	370	0.65	1.6	1.11	0.26	3.62	0	1.32	2.1	0.12	3.54	1.12	
			13.03	19.44	25.52	10.17		0	80.54	74.45	5.76			228.91
			0.33	0.8	1.11	0.26		0	1.32	2.1	0.06			5.98
21	7.46	1,619.00	1.6	2.74	10.54	0.95	15.83	0	6.03	7.96	1.36	15.35	1.54	
			32.06	33.3	242.31	37.15		0	367.93	282.21	65.32			1,060.29
			0.8	1.37	10.54	0.95		0	6.03	7.96	0.68			28.33
22	8	1,478.00	1.58	2.64	9.33	0.9	14.45	0	5.96	6.68	1.4	14.04	1.44	
			31.66	32.08	214.5	35.19		0	363.66	236.83	67.24			981.17
			0.79	1.32	9.33	0.9		0	5.96	6.68	0.7			25.68
23	7.42	1,453.00	1.56	2.29	9.46	0.9	14.21	0	5.47	6.86	1.42	13.75	1.65	
			31.26	27.83	217.49	35.19		0	333.76	243.21	68.2			956.94
			0.78	1.15	9.46	0.9		0	5.47	6.86	0.71			25.33
24	7.4	1893	1.92	3.96	11.43	1.2	18.51	0	7.86	9	1.1	17.96	1.51	
			38.48	48.13	262.78	46.92		0	479.59	319.08	52.83			1,247.81
			0.96	1.98	11.43	1.2		0	7.86	9	0.55			32.98
25	7.54	1,499.00	1.53	1.98	10.01	0.94	14.46	0	5.36	7.48	1.25	14.09	1.3	
			30.66	24.06	230.13	36.76		0	327.05	265.19	60.04			973.89
			0.77	0.99	10.01	0.94		0	5.36	7.48	0.63			26.17
26	7.84	1,411.00	1.5	2.25	9.14	0.91	13.8	0	5.33	6.78	1.31	13.42	1.4	
			30.06	27.34	210.13	35.58		0	325.22	240.37	62.92			931.63
			0.75	1.13	9.14	0.91		0	5.33	6.78	0.66			24.69
27	7.36	1,842.00	2.98	3.4	10.76	0.87	18.01	0	6.45	7.59	3.41	17.45	1.58	
			59.72	41.32	247.37	34.02		0	393.56	269.09	163.79			1,208.86
			1.49	1.7	10.76	0.87		0	6.45	7.59	1.71			30.57
28	7.99	1,482.00	1.57	2.52	9.62	0.78	14.49	0	5.63	7.16	1.32	14.11	1.33	
			31.46	30.63	221.16	30.5		0	343.53	253.84	63.4			974.52
			0.79	1.26	9.62	0.78		0	5.63	7.16	0.66			25.9
29	7.4	1,705.00	1.86	2.82	11.02	0.97	16.67	0	6.38	8.86	1.06	16.3	1.12	
			37.27	34.27	253.35	37.93		0	389.29	314.11	50.91			1,117.14
			0.93	1.41	11.02	0.97		0	6.38	8.86	0.53			30.1
30	7.8	1,590.00	1.46	2.24	10.91	0.94	15.55	0	5.42	8.4	1.28	15.1	1.47	
			29.26	27.22	250.82	36.76		0	330.71	297.81	61.48			1,034.05
			0.73	1.12	10.91	0.94		0	5.42	8.4	0.64			28.16
31	7.53	1,390.00	1.46	2.55	8.7	0.88	13.59	0	5.42	6.31	1.47	13.2	1.46	
			29.26	30.99	200.01	34.41		0	330.71	223.71	70.61			919.7
			0.73	1.28	8.7	0.88		0	5.42	6.31	0.74			24.05
32	7.79	1,497.00	1.52	2.65	9.61	0.86	14.64	0	5.32	7.59	1.36	14.27	1.28	
			30.46	32.21	220.93	33.63		0	324.61	269.09	65.32			976.25
			0.76	1.33	9.61	0.86		0	5.32	7.59	0.68			26.15

... Cuadro 15.

No. muestra	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca $\text{meq L}^{-1}$	Mg $\text{meq L}^{-1}$	Na $\text{meq L}^{-1}$	K $\text{meq L}^{-1}$	Suma cationes	CO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	HCO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Cl $\text{meq L}^{-1}$	SO <sub>4</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Suma aniones	Error (%)	Suma $\text{mg L}^{-1}$ $\text{mmol L}^{-1}$
33	7.58	1,604.00	1.49	2.32	10.83	0.94	15.58	0	5.68	8.25	1.18	15.11	1.53	
			29.86	28.19	248.98	36.76		0	346.58	292.49	56.68			1,039.53
			0.75	1.16	10.83	0.94		0	5.68	8.25	0.59			28.2
34	7.56	1,511.00	1.66	2.6	9.66	0.86	14.78	0	5.48	7.5	1.42	14.4	1.3	
			33.27	31.6	222.08	33.63		0	334.37	265.9	68.2			989.05
			0.83	1.3	9.66	0.86		0	5.48	7.5	0.71			26.34
35	7.92	1,462.00	1.64	2.56	9.32	0.78	14.3	0	5.3	7.25	1.36	13.91	1.38	
			32.87	31.11	214.27	30.5		0	323.39	257.03	65.32			954.49
			0.82	1.28	9.32	0.78		0	5.3	7.25	0.68			25.43
36	7.6	1,613.00	1.52	2.36	10.97	0.92	15.77	0	5.48	8.6	1.21	15.29	1.55	
			30.46	28.68	252.2	35.97		0	334.37	304.9	58.12			1,044.70
			0.76	1.18	10.97	0.92		0	5.48	8.6	0.61			28.52
37	7.66	1,312.00	1.42	2.31	8.43	0.67	12.83	0	4.35	6.93	1.15	12.43	1.58	
			28.46	28.07	193.81	26.2		0	265.42	245.69	55.24			842.88
			0.71	1.16	8.43	0.67		0	4.35	6.93	0.58			22.82
38	8	1,466.00	1.46	2.51	9.53	0.84	14.34	0	5.2	7.35	1.33	13.88	1.63	
			29.26	30.5	219.09	32.85		0	317.29	260.58	63.88			953.45
			0.73	1.26	9.53	0.84		0	5.2	7.35	0.67			25.57
39	7.48	1,430.00	1.47	2.57	9.14	0.8	13.98	0	5.06	7.26	1.28	13.6	1.38	
			29.46	31.23	210.13	31.28		0	308.75	257.39	61.48			929.72
			0.74	1.29	9.14	0.8		0	5.06	7.26	0.64			24.92
40	7.98	1,421.00	1.45	2.55	9.09	0.8	13.89	0	5.12	7.09	1.26	13.47	1.54	
			29.06	30.99	208.98	31.28		0	312.41	251.36	60.52			924.6
			0.73	1.28	9.09	0.8		0	5.12	7.09	0.63			24.73
41	7.2	1,576.00	1.4	2.88	10.18	0.95	15.41	0	6.24	7.21	1.52	14.97	1.45	
			28.06	35	234.04	37.15		0	380.75	255.62	73.01			1,043.61
			0.7	1.44	10.18	0.95		0	6.24	7.21	0.76			27.48
42	7.65	1539	1.36	2.82	9.96	0.91	15.05	0	6.08	7.09	1.48	14.65	1.35	
			27.25	34.27	228.98	35.58		0	370.98	251.36	71.09			1,019.52
			0.68	1.41	9.96	0.91		0	6.08	7.09	0.74			26.87
43	7.44	1,685.00	1.76	3.16	10.82	0.74	16.48	0	6.46	7.93	1.62	16.01	1.45	
			35.27	38.4	248.75	28.94		0	394.17	281.14	77.81			1,104.48
			0.88	1.58	10.82	0.74		0	6.46	7.93	0.81			29.22
44	7.68	1,500.00	1.42	2.19	10.01	0.94	14.56	0	5.12	7.82	1.26	14.2	1.25	
			28.46	26.62	230.13	36.76		0	312.41	277.24	60.52			972.13
			0.71	1.1	10.01	0.94		0	5.12	7.82	0.63			26.33
45	8	1,444.00	1.38	3.4	8.48	0.86	14.12	0	5.34	7.25	1.18	13.77	1.25	
			27.66	41.32	194.96	33.63		0	325.83	257.03	56.68			937.1
			0.69	1.7	8.48	0.86		0	5.34	7.25	0.59			24.91
46	7.6	365	0.8	1.25	1.12	0.4	3.57	0	0.87	1.85	0.76	3.48	1.28	
			16.03	15.19	25.75	15.64		0	53.08	65.59	36.5			227.79
			0.4	0.63	1.12	0.4		0	0.87	1.85	0.38			5.65
47	7.81	1,513.00	1.42	2.06	10.66	0.66	14.8	0	3.56	9.61	1.21	14.38	1.44	
			28.46	25.04	245.07	25.81		0	217.22	340.7	58.12			940.41
			0.71	1.03	10.66	0.66		0	3.56	9.61	0.61			26.84
48	7.44	1,468.00	1.6	2.6	9.4	0.76	14.36	0	5.28	7.42	1.3	14	1.27	
			32.06	31.6	216.11	29.72		0	322.17	263.06	62.44			957.16
			0.8	1.3	9.4	0.76		0	5.28	7.42	0.65			25.61

... Cuadro 15.

No. muestra	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca $\text{meq L}^{-1}$	Mg $\text{meq L}^{-1}$	Na $\text{meq L}^{-1}$	K $\text{meq L}^{-1}$	Suma cationes	CO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	HCO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Cl $\text{meq L}^{-1}$	SO <sub>4</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Suma aniones	Error (%)	Suma $\text{mg L}^{-1}$ $\text{mmol L}^{-1}$
49	7.32	1897	1.94	3.56	12.03	1.02	18.55	0	7.12	9.14	1.78	18.04	1.39	
			38.88	43.26	276.57	39.88		0	434.44	324.04	85.5		1,242.57	
			0.97	1.78	12.03	1.02		0	7.12	9.14	0.89		32.95	
50	8.7	1,368.00	0.96	2.98	8.46	0.98	13.38	1.06	4.58	6.14	1.16	12.94	1.67	
			19.24	36.22	194.5	38.32		31.81	279.46	217.68	55.72		872.93	
			0.48	1.49	8.46	0.98		0.53	4.58	6.14	0.58		23.24	
51	7.74	1,556.00	1.46	2.8	10.02	0.94	15.22	0	5.58	8.02	1.2	14.8	1.4	
			29.26	34.03	230.36	36.76		0	340.47	284.33	57.64		1,012.85	
			0.73	1.4	10.02	0.94		0	5.58	8.02	0.6		27.29	
52	7.36	1,506.00	1.36	2.72	9.69	0.96	14.73	0	5.76	7.08	1.44	14.28	1.55	
			27.25	33.06	222.77	37.54		0	351.46	251.01	69.16		992.25	
			0.68	1.36	9.69	0.96		0	5.76	7.08	0.72		26.25	
53	7.08	1,112.00	1.34	2.81	6.08	0.64	10.87	0	4.15	5.06	1.38	10.59	1.3	
			26.85	34.15	139.78	25.03		0	253.22	179.39	66.28		724.7	
			0.67	1.41	6.08	0.64		0	4.15	5.06	0.69		18.7	
54	7.5	1,473.00	1.59	2.4	9.69	0.72	14.4	0	5.37	7.41	1.27	14.05	1.23	
			31.86	29.17	222.77	28.15		0	327.66	262.71	61		963.32	
			0.8	1.2	9.69	0.72		0	5.37	7.41	0.64		25.82	
55	7.72	2,151.00	2.06	3.89	14.3	0.78	21.03	0	8.46	9.91	2.08	20.45	1.4	
			41.28	47.28	328.76	30.5		0	516.2	351.34	99.9		1,415.26	
			1.03	1.95	14.3	0.78		0	8.46	9.91	1.04		37.47	
56	7.61	2,067.00	1.98	3.76	13.67	0.8	20.21	0	8.16	9.41	2.06	19.63	1.46	
			39.68	45.7	314.27	31.28		0	497.9	333.61	98.94		1,361.38	
			0.99	1.88	13.67	0.8		0	8.16	9.41	1.03		35.94	
57	7.65	1,384.00	1.2	2.45	9.02	0.86	13.53	0	5.2	6.62	1.32	13.14	1.46	
			24.05	29.77	207.37	33.63		0	317.29	234.7	63.4		910.21	
			0.6	1.23	9.02	0.86		0	5.2	6.62	0.66		24.19	
58	7.55	1569	1.46	2.86	10.05	0.97	15.34	0	5.92	7.48	1.52	14.92	1.39	
			29.26	34.76	231.05	37.93		0	361.22	265.19	73.01		1,032.41	
			0.73	1.43	10.05	0.97		0	5.92	7.48	0.76		27.34	
59	7.52	1,650.00	1.72	3.1	10.72	0.6	16.14	0	6.53	7.46	1.65	15.64	1.57	
			34.47	37.67	246.45	23.46		0	398.44	264.48	79.25		1,084.23	
			0.86	1.55	10.72	0.6		0	6.53	7.46	0.83		28.55	
60	7.63	2,129.00	2.08	3.42	14.5	0.82	20.82	0	6.56	11.64	2.04	20.24	1.41	
			41.68	41.56	333.36	32.06		0	400.27	412.67	97.98		1,359.59	
			1.04	1.71	14.5	0.82		0	6.56	11.64	1.02		37.29	
61	7.47	1866	1.9	3.46	11.91	0.98	18.25	0	6.96	9.06	1.74	17.76	1.36	
			38.08	42.05	273.81	38.32		0	424.68	321.2	83.57		1,221.71	
			0.95	1.73	11.91	0.98		0	6.96	9.06	0.87		32.46	
62	8	2,159.00	2.12	3.88	14.05	1.06	21.11	0	8.02	10.78	1.76	20.56	1.32	
			42.48	47.15	323.01	41.45		0	489.36	382.18	84.53		1,410.17	
			1.06	1.94	14.05	1.06		0	8.02	10.78	0.88		37.79	
63	7.68	2,044.00	2.21	3.7	13.23	0.84	19.98	0	6.59	10.43	2.29	19.31	1.71	
			44.29	44.97	304.16	32.85		0	402.1	369.77	109.99		1,308.13	
			1.11	1.85	13.23	0.84		0	6.59	10.43	1.15		35.19	
64	7.73	1,473.00	2.08	3.2	8.16	0.96	14.4	0	5.62	6.2	2.2	14.02	1.34	
			41.68	38.89	187.6	37.54		0	342.92	219.81	105.67		974.1	
			1.04	1.6	8.16	0.96		0	5.62	6.2	1.1		24.68	

... Cuadro 15.

No. muestra	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca $\text{meq L}^{-1}$	Mg $\text{meq L}^{-1}$	Na $\text{meq L}^{-1}$	K $\text{meq L}^{-1}$	Suma cationes	CO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	HCO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Cl $\text{meq L}^{-1}$	SO <sub>4</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Suma aniones	Error (%)	Suma $\text{mg L}^{-1}$ $\text{mmol L}^{-1}$
65	7.42	2,066.00	2.24	3.74	13.37	0.85	20.2	0	6.68	10.64	2.36	19.68	1.3	
			44.89	45.45	307.38	33.24	0	407.59	377.22	113.35		1,329.12		
			1.12	1.87	13.37	0.85	0	6.68	10.64	1.18		35.71		
66	7.52	2,027.00	1.91	3.54	13.43	0.94	19.82	0	7.52	10.13	1.64	19.29	1.36	
			38.28	43.02	308.76	36.76	0	458.85	359.14	78.77		1,323.57		
			0.96	1.77	13.43	0.94	0	7.52	10.13	0.82		35.57		
67	7.59	2,045.00	2.26	3.8	13.04	0.86	19.96	0	6.58	10.73	1.96	19.27	1.76	
			45.29	46.18	299.79	33.63	0	401.49	380.41	94.14		1,300.93		
			1.13	1.9	13.04	0.86	0	6.58	10.73	0.98		35.22		
68	7.55	1,722.00	1.94	3.02	10.92	0.86	16.74	0	6.34	8.12	1.78	16.24	1.52	
			38.88	36.7	251.05	33.63	0	386.85	287.88	85.5		1,120.48		
			0.97	1.51	10.92	0.86	0	6.34	8.12	0.89		29.61		
69	7.98	1,904.00	2.16	3.54	11.96	0.96	18.62	0	7.38	8.7	1.98	18.06	1.53	
			43.29	43.02	274.96	37.54	0	450.31	308.44	95.1		1,252.65		
			1.08	1.77	11.96	0.96	0	7.38	8.7	0.99		32.84		
70	7.68	1,148.00	0.98	2.5	7.04	0.71	11.23	0	4.2	6.03	0.71	10.94	1.31	
			19.64	30.38	161.85	27.76	0	256.27	213.78	34.1		743.79		
			0.49	1.25	7.04	0.71	0	4.2	6.03	0.36		20.08		
71	8	1,331.00	1.52	2.34	8.43	0.73	13.02	0	4.72	6.38	1.56	12.66	1.4	
			30.46	28.44	193.81	28.54	0	288	226.19	74.93		870.37		
			0.76	1.17	8.43	0.73	0	4.72	6.38	0.78		22.97		
72	7.9	1,872.00	1.64	3.36	12.53	0.78	18.31	0	6.7	8.92	2.2	17.82	1.36	
			32.87	40.83	288.06	30.5	0	408.81	316.24	105.67		1,222.99		
			0.82	1.68	12.53	0.78	0	6.7	8.92	1.1		32.53		
73	8.71	1,112.00	0.82	2.42	6.86	0.78	10.88	0.74	3.72	5.92	0.92	11.3	1.89	
			16.43	29.41	157.71	30.5	22.2	226.98	209.88	44.19		737.31		
			0.41	1.21	6.86	0.78	0.37	3.72	5.92	0.46		19.73		
74	8.6	1,112.00	0.78	2.36	6.94	0.72	10.8	0.8	3.36	5.38	0.98	10.52	1.31	
			15.63	28.68	159.55	28.15	24	205.02	190.74	47.07		698.84		
			0.39	1.18	6.94	0.72	0.4	3.36	5.38	0.49		18.86		
75	8.9	1,107.00	1.2	1.95	7.1	0.58	10.83	0.86	3.43	5.32	0.96	10.57	1.21	
			24.05	23.7	163.23	22.68	25.8	209.29	188.61	46.11		703.47		
			0.6	0.98	7.1	0.58	0.43	3.43	5.32	0.48		18.92		
76	8.12	1,573.00	1.7	2.68	10.2	0.8	15.38	0	5.23	8.42	1.33	14.98	1.32	
			34.07	32.57	234.5	31.28	0	319.12	298.51	63.88		1,013.93		
			0.85	1.34	10.2	0.8	0	5.23	8.42	0.67		27.51		
77	7.66	975	1.05	1.66	6.3	0.52	9.53	0	3.24	5.18	0.86	9.28	1.33	
			21.04	20.17	144.84	20.33	0	197.7	183.65	41.31		629.03		
			0.53	0.83	6.3	0.52	0	3.24	5.18	0.43		17.03		
78	7.9	1,690.00	1.72	2.22	11.77	0.82	16.53	0	6.12	8.88	1.46	16.46	0.21	
			34.47	26.98	270.59	32.06	0	373.42	314.82	70.13		1,122.48		
			0.86	1.11	11.77	0.82	0	6.12	8.88	0.73		30.29		
79	8.64	1,112.00	1.36	2.37	6.4	0.74	10.87	0.76	3.18	5.61	0.96	10.51	1.68	
			27.25	28.8	147.14	28.94	22.8	194.03	198.89	46.11		693.97		
			0.68	1.19	6.4	0.74	0.38	3.18	5.61	0.48		18.66		
80	7.69	1,989.00	2.12	3.16	13.49	0.68	19.45	0	6.1	9.94	2.87	18.91	1.41	
			42.48	38.4	310.14	26.59	0	372.2	352.4	137.85		1,280.07		
			1.06	1.58	13.49	0.68	0	6.1	9.94	1.44		34.29		

... Cuadro 15.

No. muestra	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca $\text{meq L}^{-1}$	Mg $\text{meq L}^{-1}$	Na $\text{meq L}^{-1}$	K $\text{meq L}^{-1}$	Suma cationes	CO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	HCO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Cl $\text{meq L}^{-1}$	SO <sub>4</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Suma aniones	Error (%)	Suma $\text{mg L}^{-1}$ $\text{mmol L}^{-1}$	
81	8.15	1,652.00	1.42	2.92	10.88	0.94	16.16	0.82	6.16	8.05	1.5	16.53	1.13		
			28.46	35.49	250.13	36.76			24.6	375.93	285.4	72.05			1,108.80
			0.71	1.46	10.88	0.94			0.41	6.16	8.05	0.75			29.36
82	7.95	1,682.00	2.25	3.85	9.49	0.86	16.45	0	6.65	7.34	2.02	16.01	1.36		
			45.09	46.79	218.18	33.63			0	405.76	260.23	97.02			1,106.69
			1.13	1.93	9.49	0.86			0	6.65	7.34	1.01			28.4
83	7.53	1,653.00	2.14	3.72	9.47	0.83	16.16	0	5.96	7.59	2.09	15.64	1.64		
			42.89	45.21	217.72	32.45			0	363.66	269.09	100.38			1,071.40
			1.07	1.86	9.47	0.83			0	5.96	7.59	1.05			27.83
84	8.1	1,692.00	1.74	2.48	11.53	0.8	16.55	0	5.22	9.69	1.12	16.03	1.6		
			34.87	30.14	265.07	31.28			0	318.51	343.54	53.79			1,077.21
			0.87	1.24	11.53	0.8			0	5.22	9.69	0.56			29.91
85	8	1,664.00	1.88	2.96	10.6	0.83	16.27	0	5.35	8.02	2.46	15.83	1.37		
			37.68	35.97	243.69	32.45			0	326.44	284.33	118.16			1,078.73
			0.94	1.48	10.6	0.83			0	5.35	8.02	1.23			28.45
86	7.41	1,197.00	1.32	2.04	7.71	0.64	11.71	0	4.21	6.08	1.08	11.37	1.47		
			26.45	24.79	177.25	25.03			0	256.88	215.55	51.87			777.83
			0.66	1.02	7.71	0.64			0	4.21	6.08	0.54			20.86
87	8	1,657.00	2.12	3.77	9.47	0.84	16.2	0	6.52	7.3	1.98	15.8	1.25		
			42.48	45.82	217.72	32.85			0	397.83	258.81	95.1			1,090.60
			1.06	1.89	9.47	0.84			0	6.52	7.3	0.99			28.07
88	8.3	1,634.00	1.43	2.98	10.67	0.89	15.97	0.7	5.86	7.03	1.9	15.49	1.53		
			28.66	36.22	245.3	34.8			21	357.56	249.23	91.26			1,064.03
			0.72	1.49	10.67	0.89			0.35	5.86	7.03	0.95			27.96
89	8.2	1,667.00	1.58	2.06	11.85	0.81	16.3	0.62	5.02	9.97	0.87	16.48	0.55		
			31.66	25.04	272.43	31.67			18.6	306.31	353.47	41.79			1,080.96
			0.79	1.03	11.85	0.81			0.31	5.02	9.97	0.44			30.22
90	8	2,864.00	1.26	2.55	23.24	0.96	28.01	0	8.47	15.68	3.12	27.27	1.34		
			25.25	30.99	534.29	37.54			0	516.81	555.9	149.86			1,850.64
			0.63	1.28	23.24	0.96			0	8.47	15.68	1.56			51.82
91	8.7	1,112.00	0.84	2.34	6.93	0.76	10.87	0.82	3.22	5.55	0.94	10.53	1.59		
			16.83	28.44	159.32	29.72			24.6	196.47	196.76	45.15			697.3
			0.42	1.17	6.93	0.76			0.41	3.22	5.55	0.47			18.93
92	8.55	1,908.00	1.86	2.68	13.48	0.64	18.66	0.84	7.61	8.24	2.33	19.02	0.96		
			37.27	32.57	309.91	25.03			25.2	464.34	292.13	111.91			1,298.36
			0.93	1.34	13.48	0.64			0.42	7.61	8.24	1.17			33.83
93	7.68	2,160.00	2.22	3.04	15.13	0.73	21.12	0	6.94	10.82	2.65	20.41	1.71		
			44.49	36.95	347.84	28.54			0	423.46	383.6	127.28			1,392.16
			1.11	1.52	15.13	0.73			0	6.94	10.82	1.33			37.58
94	8.47	3,468.00	1.35	2.55	29.14	0.87	33.91	3.6	10.2	21.14	3.73	38.67	6.56		
			27.05	30.99	669.93	34.02			108.02	622.37	749.48	179.16			2,421.01
			0.68	1.28	29.14	0.87			1.8	10.2	21.14	1.87			66.97
95	7.98	1,736.00	2.25	3.92	9.93	0.88	16.98	0	6.78	7.64	2.08	16.5	1.43		
			45.09	47.64	228.29	34.41			0	413.7	270.86	99.9			1,139.89
			1.13	1.96	9.93	0.88			0	6.78	7.64	1.04			29.36
96	7.68	1,984.00	2.04	3.24	13.45	0.67	19.4	0	6.37	10.09	2.45	18.91	1.28		
			40.88	39.38	309.22	26.2			0	388.68	357.72	117.68			1,279.75
			1.02	1.62	13.45	0.67			0	6.37	10.09	1.23			34.45

... Cuadro 15.

No. muestra	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca $\text{meq L}^{-1}$	Mg $\text{meq L}^{-1}$	Na $\text{meq L}^{-1}$	K $\text{meq L}^{-1}$	Suma cationes	CO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	HCO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Cl $\text{meq L}^{-1}$	SO <sub>4</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Suma aniones	Error (%)	Suma $\text{mg L}^{-1}$ $\text{mmol L}^{-1}$
97	7.9	2,103.00	2.12	3.24	14.25	0.96	20.57	0	6.16	11.63	2.26	20.05	1.28	
			42.48	39.38	327.61	37.54	0	375.86	412.32	108.55		1,343.74		
			1.06	1.62	14.25	0.96	0	6.16	11.63	1.13		36.81		
98	7.59	590	1.04	1.34	3.27	0.12	5.77	0	2.4	2.58	0.64	5.62	1.32	
			20.84	16.29	75.18	4.69	0	146.44	91.47	30.74		385.65		
			0.52	0.67	3.27	0.12	0	2.4	2.58	0.32		9.88		
99	7.8	936	1.02	1.59	6.03	0.51	9.15	0	3.68	4.26	0.94	8.88	1.5	
			20.44	19.32	138.63	19.94	0	224.54	151.03	45.15		619.06		
			0.51	0.8	6.03	0.51	0	3.68	4.26	0.47		16.26		
100	7.98	1,686.00	1.92	2.96	10.69	0.92	16.49	0	5.98	8.13	1.86	15.97	1.6	
			38.48	35.97	245.76	35.97	0	364.88	288.23	89.34		1,098.64		
			0.96	1.48	10.69	0.92	0	5.98	8.13	0.93		29.09		
101	8.3	1,635.00	1.38	2.86	10.84	0.91	15.99	0.8	5.96	7.26	1.48	15.5	1.56	
			27.66	34.76	249.21	35.58	24	363.66	257.39	71.09		1,063.35		
			0.69	1.43	10.84	0.91	0.4	5.96	7.26	0.74		28.23		
102	7.86	1,031.00	1.14	1.76	6.63	0.55	10.08	0	3.53	5.3	0.96	9.79	1.46	
			22.85	21.39	152.42	21.51	0	215.39	187.9	46.11		667.57		
			0.57	0.88	6.63	0.55	0	3.53	5.3	0.48		17.94		
103	8.01	1,681.00	2.9	4.05	8.65	0.83	16.43	0	5.96	7.82	2.2	15.98	1.39	
			58.12	49.22	198.86	32.45	0	363.66	277.24	105.67		1,085.23		
			1.45	2.03	8.65	0.83	0	5.96	7.82	1.1		27.84		
104	7.8	1,626.00	1.94	2.86	10.28	0.82	15.9	0	5.16	8.17	2.16	15.49	1.31	
			38.88	34.76	236.34	32.06	0	314.85	289.65	103.75		1,050.28		
			0.97	1.43	10.28	0.82	0	5.16	8.17	1.08		27.91		
105	7.98	1,686.00	2.35	3.86	9.48	0.79	16.48	0	5.96	8.19	1.88	16.03	1.38	
			47.09	46.91	217.95	30.89	0	363.66	290.36	90.3		1,087.16		
			1.18	1.93	9.48	0.79	0	5.96	8.19	0.94		28.47		
106	7.69	1,690.00	2.46	3.96	9.25	0.86	16.53	0	5.98	8.11	1.96	16.05	1.47	
			49.3	48.13	212.66	33.63	0	364.88	287.52	94.14		1,090.26		
			1.23	1.98	9.25	0.86	0	5.98	8.11	0.98		28.39		
107	8.02	1,695.00	3.12	4.3	8.36	0.8	16.58	0	5.8	8.21	2.12	16.13	1.38	
			62.52	52.26	192.2	31.28	0	353.9	291.07	101.83		1,085.05		
			1.56	2.15	8.36	0.8	0	5.8	8.21	1.06		27.94		
108	8.04	1,646.00	1.96	2.98	10.32	0.83	16.09	0	5.2	8.65	1.82	15.67	1.32	
			39.28	36.22	237.26	32.45	0	317.29	306.67	87.42		1,056.58		
			0.98	1.49	10.32	0.83	0	5.2	8.65	0.91		28.38		
109	7.98	1,602.00	1.74	2.64	10.5	0.79	15.67	0	5.22	8.61	1.34	15.17	1.62	
			34.87	32.08	241.4	30.89	0	318.51	305.25	64.36		1,027.36		
			0.87	1.32	10.5	0.79	0	5.22	8.61	0.67		27.98		
110	7.98	2,403.00	2.26	4.2	15.92	1.12	23.5	0	8.96	11.7	2.2	22.86	1.38	
			45.29	51.04	366	43.79	0	546.71	414.8	105.67		1,573.31		
			1.13	2.1	15.92	1.12	0	8.96	11.7	1.1		42.03		
111	7.97	2,541.00	2.46	3.79	17.44	1.16	24.85	0	7.31	14.05	2.68	24.04	1.66	
			49.3	46.06	400.95	45.36	0	446.03	498.11	128.72		1,614.53		
			1.23	1.9	17.44	1.16	0	7.31	14.05	1.34		44.43		
112	7.49	2,494.00	2.32	3.62	17.3	1.14	24.38	0	7.17	14.36	2.06	23.59	1.65	
			46.49	43.99	397.73	44.58	0	437.49	509.11	98.94		1,578.33		
			1.16	1.81	17.3	1.14	0	7.17	14.36	1.03		43.97		

... Cuadro 15.

No. muestra	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca $\text{meq L}^{-1}$	Mg $\text{meq L}^{-1}$	Na $\text{meq L}^{-1}$	K $\text{meq L}^{-1}$	Suma cationes	CO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	HCO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Cl $\text{meq L}^{-1}$	SO <sub>4</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Suma aniones	Error (%)	Suma $\text{mg L}^{-1}$ $\text{mmol L}^{-1}$
113	8	1,646.00	1.92	2.86	10.49	0.83	16.1	0	5.36	8.36	1.96	15.68	1.32	
			38.48	34.76	241.17	32.45		0	327.05	296.39	94.14		1,064.43	
			0.96	1.43	10.49	0.83		0	5.36	8.36	0.98		28.41	
114	7.79	598	1.65	3.05	0.53	0.13	5.36	0	3.02	1.33	0.86	5.21	1.42	
			33.07	37.07	12.18	5.08		0	184.27	47.15	41.31		360.13	
			0.83	1.53	0.53	0.13		0	3.02	1.33	0.43		7.79	
115	8	1,779.00	1.92	2.89	11.67	0.86	17.34	0	5.86	9.47	1.54	16.87	1.37	
			38.48	35.12	268.29	33.63		0	357.56	335.74	73.97		1,142.79	
			0.96	1.45	11.67	0.86		0	5.86	9.47	0.77		31.04	
116	8.02	1,783.00	1.93	2.93	11.7	0.88	17.44	0	5.43	10.03	1.56	17.02	1.22	
			38.68	35.61	268.98	34.41		0	331.32	355.59	74.93		1,139.52	
			0.97	1.47	11.7	0.88		0	5.43	10.03	0.78		31.25	
117	8.33	1,522.00	1.64	2.47	10.05	0.72	14.88	0.84	4.7	8.46	1.31	15.31	1.42	
			32.87	30.02	231.05	28.15		25.2	286.78	299.93	62.92		996.92	
			0.82	1.24	10.05	0.72		0.42	4.7	8.46	0.66		27.06	
118	8	1,139.00	2.83	2.68	5.15	0.48	11.14	0	3.3	5.67	1.86	10.83	1.41	
			56.71	32.57	118.4	18.77		0	201.36	201.02	89.34		718.16	
			1.42	1.34	5.15	0.48		0	3.3	5.67	0.93		18.29	
119	7.77	1,124.00	1.96	2.58	5.94	0.48	10.96	0	4.32	4.98	1.46	10.76	0.92	
			39.28	31.35	136.56	18.77		0	263.59	176.56	70.13		736.24	
			0.98	1.29	5.94	0.48		0	4.32	4.98	0.73		18.72	
120	7.98	1,494.00	1.61	2.41	9.91	0.68	14.61	0	5.02	7.92	1.28	14.22	1.35	
			32.26	29.29	227.83	26.59		0	306.31	280.79	61.48		964.55	
			0.81	1.21	9.91	0.68		0	5.02	7.92	0.64		26.18	
121	7.94	122	0.23	0.62	0.29	0.05	1.19	0	0.9	0.21	0.05	1.16	1.28	
			4.61	7.53	6.67	1.96		0	54.92	7.45	2.4		85.53	
			0.12	0.31	0.29	0.05		0	0.9	0.21	0.03		1.9	
122	8.3	447	0.84	2.19	1.55	0.23	4.81	0.24	1.38	2.86	0.19	4.67	1.48	
			16.83	26.62	35.63	8.99		7.2	84.2	101.4	9.13		290	
			0.42	1.1	1.55	0.23		0.12	1.38	2.86	0.1		7.75	
123	9.02	107	0.2	0.25	0.52	0.08	1.05	0.16	0.55	0.25	0.06	1.02	1.45	
			4.01	3.04	11.95	3.13		4.8	33.56	8.86	2.88		72.23	
			0.1	0.13	0.52	0.08		0.08	0.55	0.25	0.03		1.74	
124	7.88	291	0.53	1.1	0.82	0.14	2.59	0	1.68	0.75	0.09	2.52	1.37	
			10.62	13.37	18.85	5.47		0	102.51	26.59	4.32		181.74	
			0.27	0.55	0.82	0.14		0	1.68	0.75	0.05		4.25	
125	7.96	326	0.61	1.6	0.81	0.17	3.19	0	2.42	0.55	0.14	3.11	1.27	
			12.22	19.44	18.62	6.65		0	147.66	19.5	6.72		230.82	
			0.31	0.8	0.81	0.17		0	2.42	0.55	0.07		5.13	
126	7.6	554	1.96	2.3	0.9	0.26	5.42	0	4.44	0.7	0.18	5.32	0.93	
			39.28	27.95	20.69	10.17		0	270.92	24.82	8.65		402.47	
			0.98	1.15	0.9	0.26		0	4.44	0.7	0.09		8.52	
127	8.2	1200	1.21	2.48	7.28	0.76	11.73	0.46	4.98	5.54	0.86	11.84	0.47	
			24.25	30.14	167.37	29.72		13.8	303.86	196.41	41.31		806.86	
			0.61	1.24	7.28	0.76		0.23	4.98	5.54	0.43		21.07	
128	7.96	351	0.61	1.26	1.3	0.26	3.43	0	1.91	1.18	0.26	3.35	1.18	
			12.22	15.31	29.89	10.17		0	116.54	41.83	12.49		238.46	
			0.31	0.63	1.3	0.26		0	1.91	1.18	0.13		5.72	

... Cuadro 15.

No. muestra	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca $\text{meq L}^{-1}$	Mg $\text{meq L}^{-1}$	Na $\text{meq L}^{-1}$	K $\text{meq L}^{-1}$	Suma cationes	CO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	HCO <sub>3</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Cl $\text{meq L}^{-1}$	SO <sub>4</sub> $\text{meq L}^{-1}$	Suma aniones	Error (%)	Suma $\text{mg L}^{-1}$ $\text{mmol L}^{-1}$
129	7.92	552	0.9	1.4	2.8	0.3	5.4	0	1.78	2.28	1.2	5.26	1.31	
			18.04	17.01	64.37	11.73	0	108.61	80.83	57.64	358.23			
			0.45	0.7	2.8	0.3	0	1.78	2.28	0.6	8.91			
130	8.3	1157	1.16	2.38	7.21	0.56	11.31	0.4	4.8	5.3	0.83	11.33	0.09	
			23.25	28.92	165.76	21.9	12	292.88	187.9	39.87	772.48			
			0.58	1.19	7.21	0.56	0.2	4.8	5.3	0.42	20.26			
Mediana	7.77	1,596.0	1.64	2.70	10.01	0.84	15.57	0.00	5.60	7.81	1.39	15.14	1.39	
			32.87	32.81	230.13	32.65	0.00	341.39	276.89	66.76	1036.79			
			0.82	1.35	10.01	0.84	0.00	5.60	7.81	0.70	27.83			
Media	7.80	1,541.2	1.64	2.74	9.90	0.78	15.06	0.11	5.41	7.75	1.46	14.72	1.41	
			32.81	33.33	227.65	30.47	3.38	329.81	274.60	70.09	1002.13			
			0.82	1.37	9.90	0.78	0.06	5.41	7.75	0.73	26.81			
Moda	8.00	1,112.0	1.42	2.55	10.05	0.86	10.87	0.00	5.96	7.59	0.96	16.01	1.28	
			28.46	30.99	231.05	33.63	0.00	363.66	269.09	46.11	#N/A			
			0.71	1.28	10.05	0.86	0.00	5.96	7.59	0.48	35.94			
Desv. Est.	0.38	532.4	0.53	0.76	4.21	0.24	5.21	0.39	1.74	3.11	0.66	5.24	0.52	
			10.60	9.23	96.75	9.40	11.67	106.46	110.17	31.61	349.05			
			0.26	0.38	4.21	0.24	0.19	1.74	3.11	0.33	9.70			
Mínimo	6.97	107.0	0.20	0.25	0.29	0.05	1.05	0.00	0.55	0.21	0.05	1.02	0.09	
			4.01	3.04	6.67	1.96	0.00	33.56	7.45	2.40	72.23			
			0.10	0.13	0.29	0.05	0.00	0.55	0.21	0.03	1.74			
Máximo	9.02	3,468.0	3.12	4.30	29.14	1.22	33.91	3.60	10.20	21.14	3.73	38.67	6.56	
			62.52	52.26	669.93	47.70	108.02	622.37	749.48	179.16	2421.01			
			1.56	2.15	29.14	1.22	1.80	10.20	21.14	1.87	66.97			

### 6.3 Distribución de cationes y aniones

La distribución de los iones predominantes en las muestras de las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale se presentan en la Figura 6, donde es posible identificar el ion dominante, y cómo se concentra en cada uno de los sitios muestreados.

En el caso de las aguas residuales, se deberá tomar en cuenta desde el sitio de muestreo No. 1 al 120, que corresponden al Valle del Mezquital. En este sentido, el contenido más alto del ion sodio se encontró en el sitio de muestreo No. 94, identificado como canal de “Drenaje agrícola entrada a Capula”, así mismo este mismo sitio reportó el contenido más alto del ion cloruro.

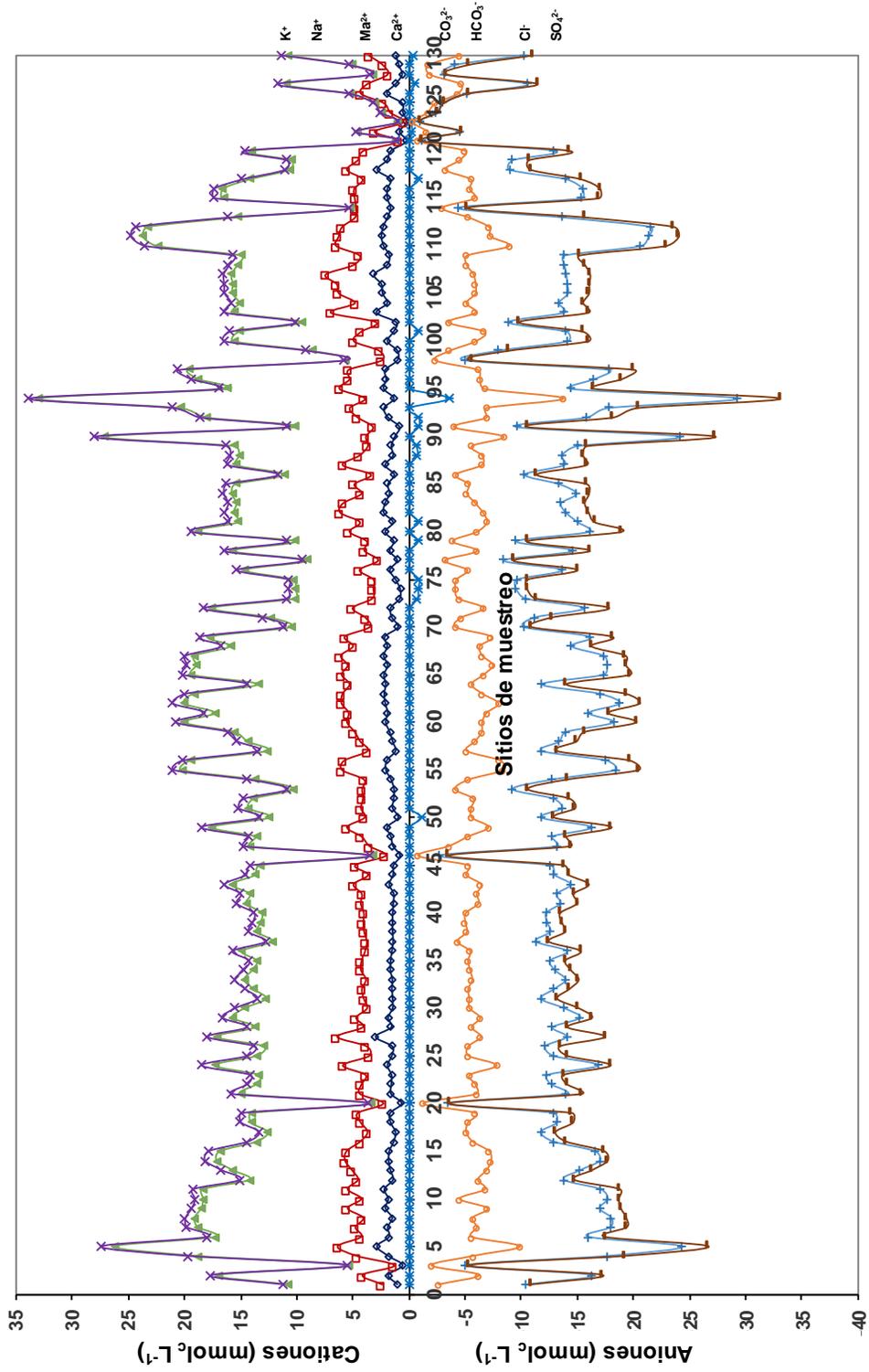


Figura 6. Distribución iónica de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

## 6.4 Comprobación de la exactitud de las determinaciones analíticas

El porcentaje de error que se obtuvo en los resultados del balance de aniones-cationes cumple con lo establecido por APHA (1995), y se encuentran registrados en el cuadro “composición iónica de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale”.

Se analizó el balance entre CE y cationes, CE y aniones, CE experimental y CE teórica, CE y STD calculados, CE y STD medidos, STD medidos y STD calculados, en las que se incluyó el total de las muestras. Con el fin de confirmar que las mediciones de diferentes parámetros de contenidos de sales solubles en aguas y soluciones acuosas, son directamente proporcionales con respecto a la conductividad eléctrica CE ( $\text{mS cm}^{-1}$ ), sólidos totales disueltos, cationes solubles totales y aniones solubles totales.

### 6.4.1 Conductividad eléctrica medida y la suma de iones

Para obtener la cantidad de cationes solubles totales o total de aniones solubles totales, la CE expresada en  $\text{mS cm}^{-1}$  se multiplica por lo general, por un factor de 10, cuando las concentraciones de los iones son expresados en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ . Las mediciones de salinidad en aguas para la conductividad eléctrica, cationes solubles totales y aniones solubles totales, sólidos totales disueltos tienen una tendencia de una línea recta, de acuerdo con la ecuación  $y=a(x)$

En las Figuras 7 y 8, ambas sumas de cationes y de aniones ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ), se encuentran de forma aproximada a una centésima parte del valor de la CE medida ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), por lo que se cumple con el criterio establecido en APHA (1995).

Se obtuvo 0.0098 para cationes y 0.0095 para aniones, son valores que se encuentran entre 0.9/100 y 1.1/100, por lo tanto, los datos se consideran correctos.

La ecuación obtenida de la regresión, para cationes y su relación con la CE, es la siguiente:

$$y = 0.0098x$$

Donde: y, es la suma de cationes, expresada  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ; x, es la CE medida, expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

$$\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = 0.0098 \times CE \ (\mu\text{S cm}^{-1})$$

$$\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = \frac{0.98 \times CE \ (\mu\text{S cm}^{-1})}{100}$$

Para aniones y su relación con la CE, la expresión es la siguiente:

$$y = 0.0095x$$

Donde: y, es la suma de aniones, expresada  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ; x, es la CE medida, expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

$$\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = 0.0095 \times CE \ (\mu\text{S cm}^{-1})$$

$$\text{mmol}_c \text{L}^{-1} = \frac{0.95 \times CE \ (\mu\text{S cm}^{-1})}{100}$$

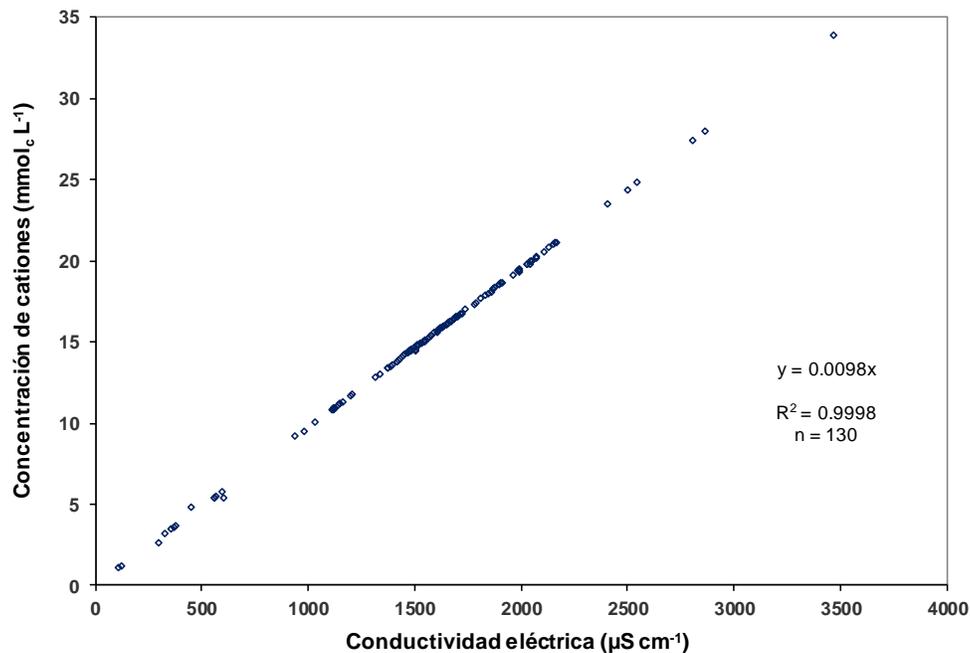


Figura 7. Relación entre la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y la concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

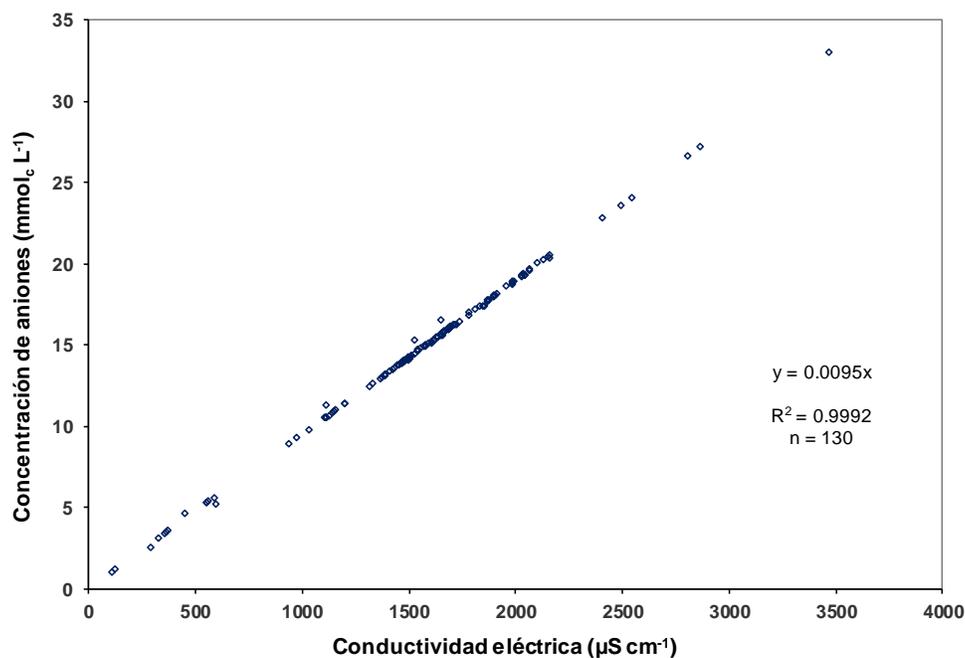


Figura 8. Relación conjunta de la conductividad eléctrica experimental ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y la concentración de aniones ( $\text{mmolc L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

#### 6.4.2 Conductividad eléctrica experimental y conductividad eléctrica teórica

Se estableció la relación de la conductividad eléctrica teórica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) con la conductividad eléctrica experimental ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ).

Para determinar la conductividad eléctrica teórica de cada muestra de agua, se procedió a utilizar el Cuadro 13, de tal manera que primero se obtuvieron los valores teóricos de CE de cada ión, y después se sumaron.

La relación conjunta de estas conductividades fue de 1.0978 con una  $R^2$  de 0.9979, que puede apreciarse en la Figura 9, y como se trata de un valor que se encuentra dentro del rango de 0.9 a 1.1 se considera aceptable.

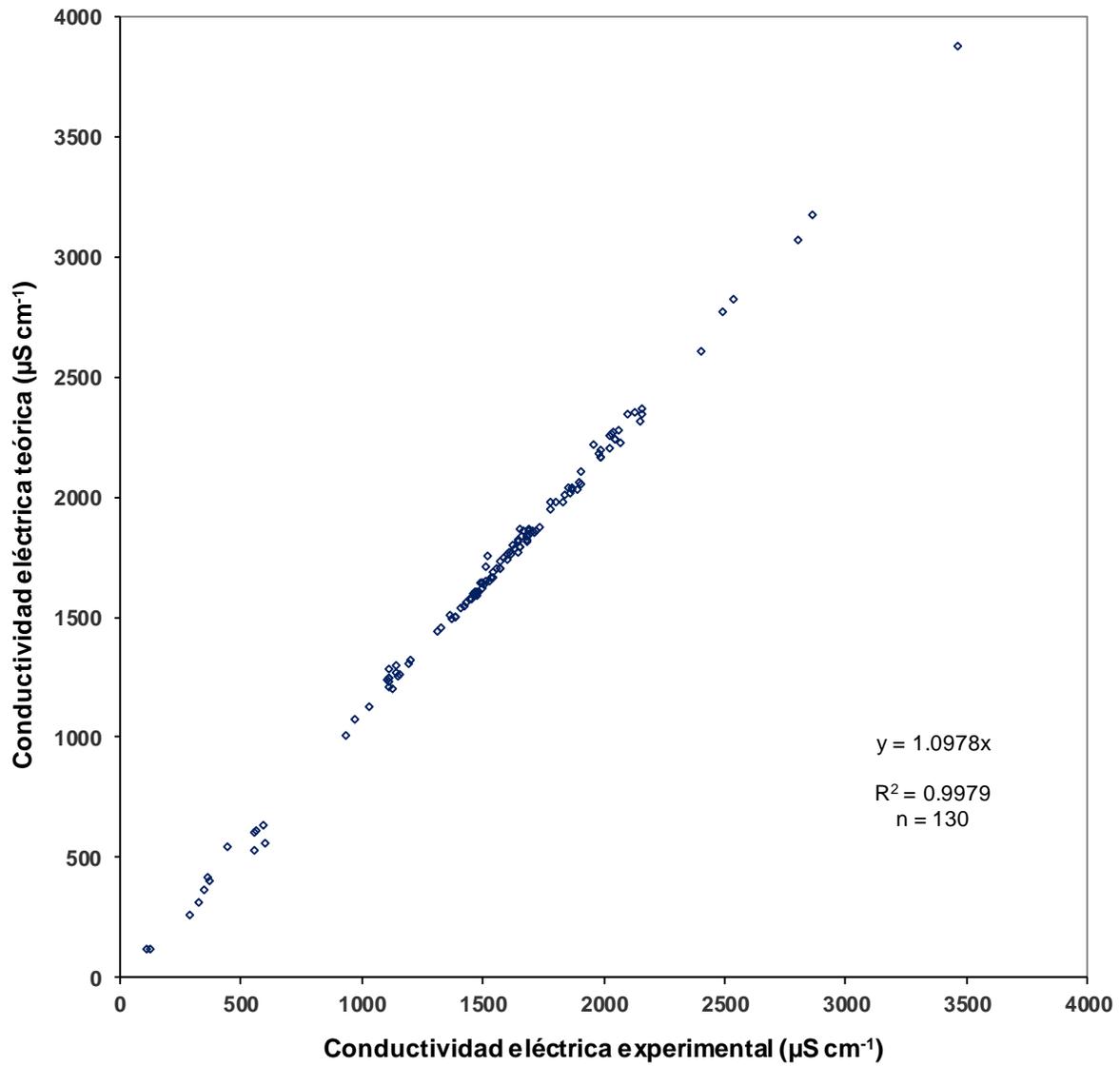


Figura 9. Relación conjunta de la conductividad eléctrica experimental ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y la conductividad eléctrica teórica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

### 6.4.3 Conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos

Con fines de mediciones aproximadas de la salinidad en concentraciones bajas se ha utilizado para los sólidos totales disueltos, los valores de la conductividad eléctrica en  $\text{dS m}^{-1}$ ; que se multiplican por un factor de 640; y para concentraciones de salinidad de soluciones hipersalinas la conductividad eléctrica, expresada en  $\text{dS m}^{-1}$ , esta medición se multiplica por un factor de 800 (Jurinak y Suarez, 1990).

Se determinó la relación funcional de las aguas residuales muestreadas (Figura 10) para los STD calculados, como sigue:

$$\text{mg L}^{-1} = a \times CE \ (\mu\text{S cm}^{-1})$$

Donde: a, es el coeficiente o factor por el que tendrá que multiplicarse la CE para estimar los STD, es adimensional, y su valor depende del grupo de aguas que describa y de las unidades usadas en CE.

Y se obtuvo un coeficiente  $a=0.6479$  que corresponde a aguas con altos contenidos de bicarbonatos, de esta manera la relación funcional queda expresada de la siguiente manera:

$$STD = a \times CE$$

$$STD_{\text{calculados}} = 0.6479 \times CE$$

Donde: STD, son los sólidos totales disueltos expresados en  $\text{mg L}^{-1}$ ; a, es el coeficiente para el grupo de aguas estudiado, es adimensional; CE, es la conductividad eléctrica expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

Si se manejan múltiplos de las unidades, la relación funcional  $\text{mg L}^{-1}=a \times CE$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) también se puede expresar como:

- Para  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ,  $a= 0.6479$  y queda como  $\text{mg L}^{-1}=0.6479 \times CE$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ).
- Para  $\text{mS cm}^{-1}$ ,  $a= 647.9$  y queda como  $\text{mg L}^{-1}=647.9 \times CE$  ( $\text{mS cm}^{-1}$ ).
- Para  $\text{dS m}^{-1}$ ,  $a=647.9$  y queda como  $\text{mg L}^{-1}=647.9 \times CE$  ( $\text{dS m}^{-1}$ ).

En la práctica experimental y de investigación es muy útil conocer estos coeficientes para cada grupo de aguas, ya que en condiciones de campo, cuando se realizan numerosas determinaciones del parámetro de CE, y se hace necesario conocer los STD; para este efecto, se pueden multiplicar los valores de la CE por dicho coeficiente.

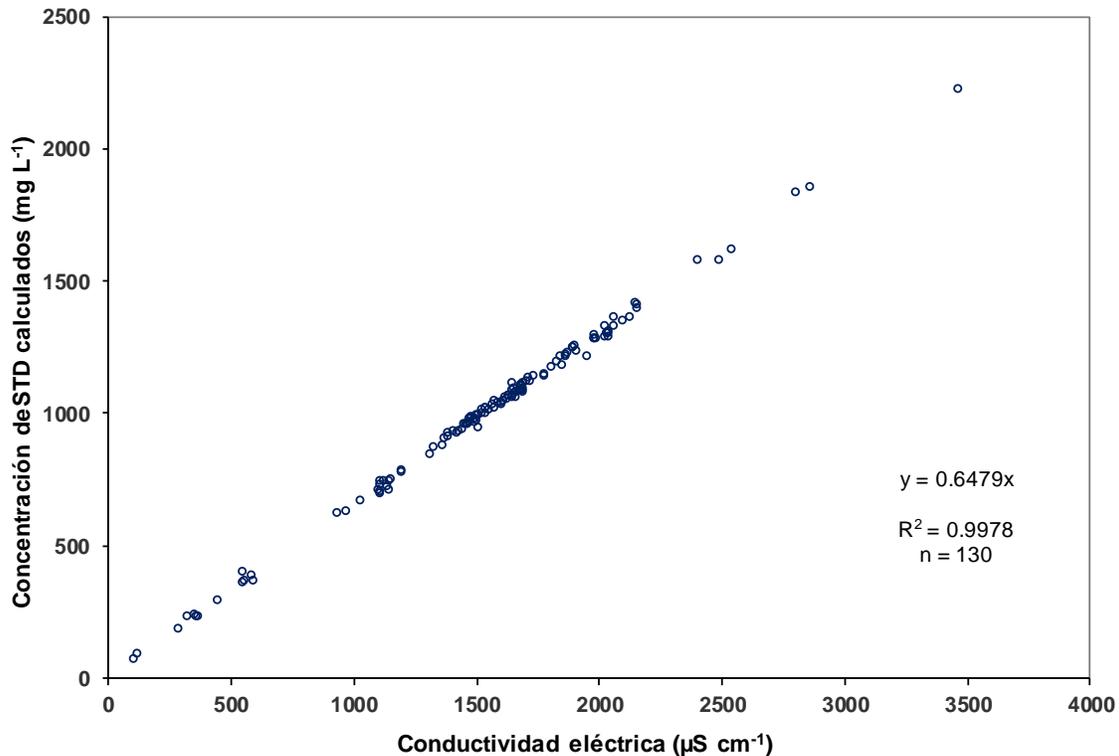


Figura 10. Relación entre la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y la concentración de STD calculados ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

Los residuos secos evaporados también son identificados como sólidos totales disueltos medidos.

También se determinó la relación funcional de las aguas residuales muestreadas (Anexo 4) para los STD medidos, como sigue:

$$\text{mg L}^{-1} = a \times \text{CE } (\mu\text{S cm}^{-1})$$

Y se obtuvo un coeficiente  $a=0.6102$  que corresponde a aguas con altos contenidos de bicarbonatos, de esta manera la relación funcional queda expresada de la siguiente manera:

$$STD = a \times CE$$

$$STD_{medidos} = 0.6102 \times CE$$

Donde: STD, son los sólidos totales disueltos expresados en  $\text{mg L}^{-1}$ ; a, es el coeficiente para el grupo de aguas estudiado, es adimensional; CE, es la conductividad eléctrica expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

### **Relación de sólidos totales disueltos medidos con los calculados.**

Se graficó el residuo seco evaporado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en eje de las abscisas y los STD calculados ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en el eje de las ordenadas, y se obtuvo la relación de STD medidos con STD calculados (Anexo 6) aplicando una regresión lineal.

$$y = 1.0555x$$

Donde: y, son los STD calculado, expresados en  $\text{mg L}^{-1}$ ; 1.0555 es el factor de la relación entre sólidos medidos y calculados; x son los STD medidos, expresados en  $\text{mg L}^{-1}$ .

De acuerdo a APHA (1995) una relación aceptable debe encontrarse entre 1.0 y 1.2, y en este caso se cumple.

## 6.5 Distribución de frecuencias de los datos analíticos

Se construyó una gráfica de frecuencias con el fin de conocer la distribución preliminar de los valores de la CE de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale, en la Figura 11 se presentan ocho clases con la frecuencia y porcentaje correspondiente a cada intervalo.

La mayoría de las muestras de las aguas residuales del Valle del Mezquital se encuentran entre 1375 y 1800  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , es decir, se identificaron 62 muestras en dicho rango, que representan el 47.7% del total. En el intervalo de 1800 a 2225  $\mu\text{S cm}^{-1}$  se encuentra el 22.3% de las muestras, seguido de la clase de 950 a 1375 con el 14.6% de las muestras.

El rango más alto se encuentra en los siguientes valores de 3075 a 3500  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , y el más bajo es de 100 a 525  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , con apenas 1 y 8 muestras, respectivamente. Se puede apreciar que las muestras con más bajas concentraciones corresponden a manantiales y ríos que tienen escasas aportaciones de aguas residuales.

Los productores agrícolas toman el agua directamente de las corrientes de aguas residuales de la red hidrográfica, sin ningún tratamiento previo a la aplicación en las parcelas. Esta dinámica que ha prevalecido durante décadas, ha provocado una serie de dificultades en los predios agrícolas, el más común es el problema de infiltración del agua en los suelos provocado por las altas concentraciones del sodio. En este estudio, el sitio de muestreo “Drenaje agrícola entrada a Capula” reportó la concentración de sales más alta (3,468  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), con predominancia del ión sodio, seguido de cloruros y bicarbonatos.

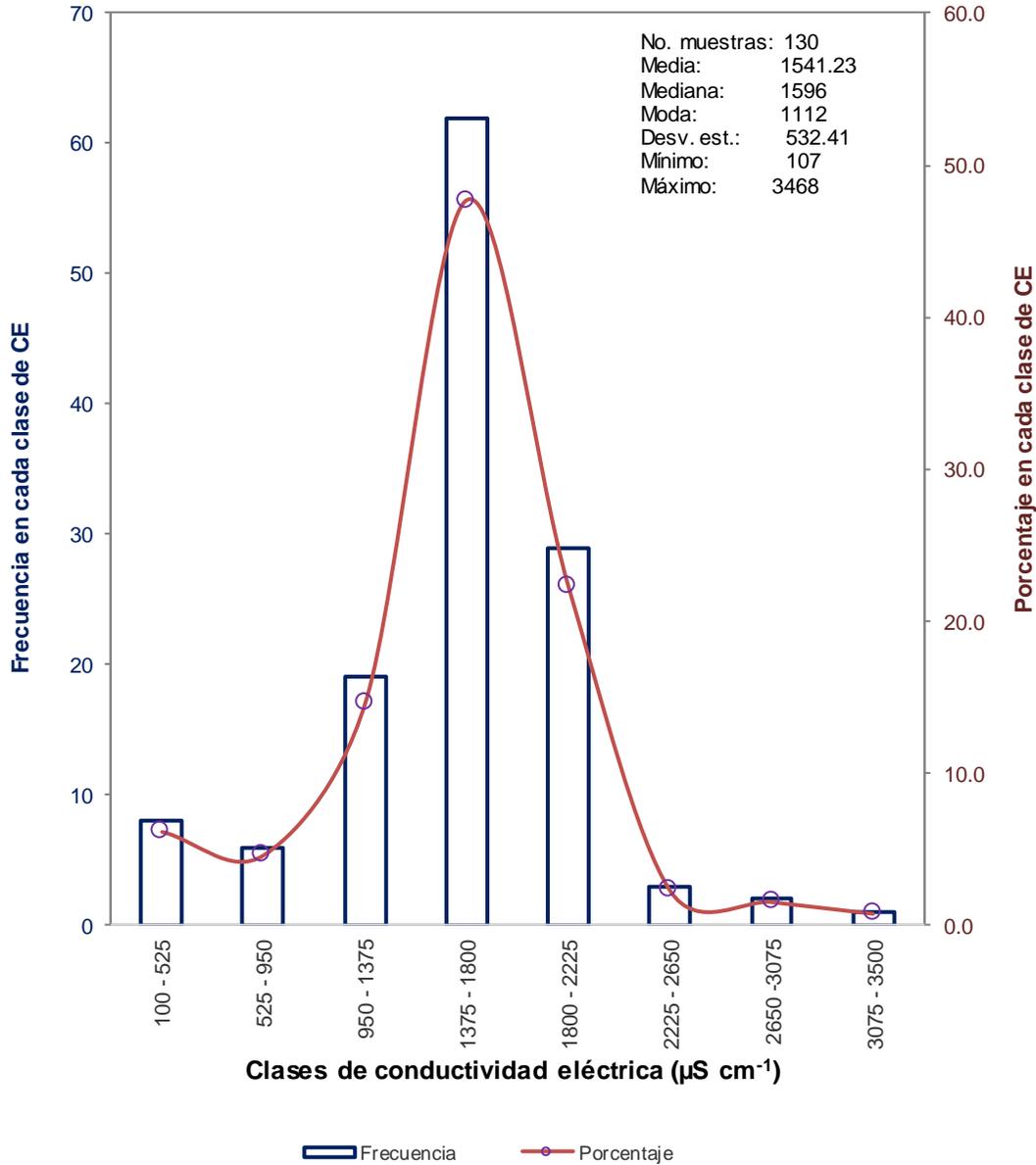


Figura 11. Distribución de frecuencias con respecto a la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

En el Anexo 2 se presenta la distribución de frecuencias del residuo seco evaporado o sólidos totales disueltos ( $\text{mg L}^{-1}$ ), y se puede mencionar que 60 muestras, que representan el 46.2% del total, se encuentran en el intervalo de 934 a 1356  $\text{mg L}^{-1}$ . Las aguas de baja concentración, son 13 muestras en el rango de

90 a 512 mg L<sup>-1</sup>, corresponden a los sitios de: Laguna de Zumpango, Río Maconí, Presa Dolores, Manantial Chapantongo, Río el Arenalito, Río Amajac (Tamazunchale), Río Claro (Tamazunchale), Río Capulhuacanito, Río Tultitlán, Río San Felipe Orizatlán (Hidalgo), Molango (Laguna Atezca), Cascada antes de río Venado (cerca de Zacualtipán), y Río Venado (Metztitlán). Mientras que las aguas de alta concentración, del rango de 1778 a 2200 mg L<sup>-1</sup>, se ubicaron en dos sitios: Drenaje agrícola entrada a Capula y Canal de drenaje parte alta Capula.

La distribución de frecuencias del residuo seco calcinado (mg L<sup>-1</sup>) se presenta en el Anexo 3, y se encontró que 59 muestras, que representan el 45.4% del total, se encuentran en el intervalo de 352 a 744 mg L<sup>-1</sup>. Las aguas de baja concentración, son 13 muestras en el rango de 40 a 352 mg L<sup>-1</sup>, corresponden a los mismos sitios que reportaron menor residuo seco evaporado, es decir a manantiales y ríos que tienen pocas aportaciones de aguas residuales. De manera similar ocurrió con las aguas de alta concentración, del rango de 1448 a 1800 mg L<sup>-1</sup>, se ubicaron en los dos sitios que también reportaron mayor residuo seco evaporado, ubicados en la localidad de Capula.

## **6.6 Clasificación de las aguas residuales con base en la salinidad**

### **6.6.1 Conductividad eléctrica**

Una vez medida la concentración total de sales solubles en las aguas residuales muestreadas, se hizo la clasificación en términos de conductividad eléctrica (cuatro clases: C1, C2, C3 y C4).

A manera de resumen, el Cuadro 16 identifica la cantidad de muestras que corresponden a cada clase.

Cuadro 16. Resumen de la clasificación de acuerdo con la conductividad eléctrica de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	Clase	Número de muestras
< 250	C1 – aguas de baja salinidad	2
250 a 750	C2 – aguas de salinidad media	11
750 a 2250	C3 – aguas altamente salinas	111
> 2250	C4 – aguas muy altamente salinas	6

De acuerdo a la clasificación únicamente por CE, se identificó lo siguiente:

- Las dos muestras de agua con clase C1 (aguas de baja salinidad) corresponden los sitios de Cascada antes de río Venado (cerca de Zacualtipán) y Molango (en Laguna Atezca).
- Solamente el 8.5% de las aguas muestreadas se ubican en clase C2, identificadas como aguas de salinidad media.
- El 85.4% de las aguas muestreadas se ubican en clase C3, identificadas como aguas altamente salinas.
- Los seis sitios que reportaron clase C4, identificadas como aguas muy altamente salinas, corresponden a Canal revestido Santa Ana Nextlalpan, Canal de drenaje parte alta Capula, Drenaje agrícola entrada a Capula, Canal revestido entrada a Ixmiquilpan (El Cardonal), Canal cuadrado en calle Miguel Hidalgo (Barrio San Miguel, Ixmiquilpan) y Río Ixmiquilpan.

Lo anterior denota un grave problema por salinidad, debido a que la mayor parte de las aguas residuales, en la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, son “aguas altamente salinas”.

Para mejor detalle, la clasificación de las aguas residuales de acuerdo con la CE expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , para cada sitio de muestreo, se presenta el Cuadro 17.

La CE es un parámetro que no debe analizarse de forma aislada, ya que debe tomarse en cuenta la cantidad del ión predominante en el agua de riego.

Cuadro 17. Clasificación de acuerdo con la conductividad eléctrica de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

No. muestra	Conductividad eléctrica	
	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Clasificación
1	1145	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
2	1806	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
3	561	C2 - AGUAS DE SALINIDAD MEDIA
4	2024	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
5	2806	C4 - AGUAS MUY ALTAMENTE SALINAS
6	1855	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
7	2036	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
8	2041	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
9	1986	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
10	1956	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
11	1986	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
12	1543	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
13	1713	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
14	1864	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
15	1831	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
16	1474	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
17	1370	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
18	1541	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
19	1528	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
20	370	C2 - AGUAS DE SALINIDAD MEDIA
21	1619	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
22	1478	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
23	1453	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
24	1893	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
25	1499	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
26	1411	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
27	1842	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
28	1482	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
29	1705	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
30	1590	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
31	1390	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
32	1497	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
33	1604	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
34	1511	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
35	1462	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
36	1613	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
37	1312	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
38	1466	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
39	1430	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
40	1421	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
41	1576	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
42	1539	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
43	1685	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
44	1500	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
45	1444	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
46	365	C2 - AGUAS DE SALINIDAD MEDIA
47	1513	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
48	1468	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS

... Cuadro 17.

No. muestra	Conductividad eléctrica	
	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Clasificación
49	1897	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
50	1368	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
51	1556	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
52	1506	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
53	1112	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
54	1473	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
55	2151	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
56	2067	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
57	1384	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
58	1569	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
59	1650	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
60	2129	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
61	1866	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
62	2159	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
63	2044	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
64	1473	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
65	2066	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
66	2027	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
67	2045	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
68	1722	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
69	1904	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
70	1148	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
71	1331	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
72	1872	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
73	1112	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
74	1112	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
75	1107	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
76	1573	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
77	975	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
78	1690	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
79	1112	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
80	1989	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
81	1652	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
82	1682	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
83	1653	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
84	1692	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
85	1664	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
86	1197	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
87	1657	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
88	1634	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
89	1667	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
90	2864	C4 - AGUAS MUY ALTAMENTE SALINAS
91	1112	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
92	1908	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
93	2160	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
94	3468	C4 - AGUAS MUY ALTAMENTE SALINAS
95	1736	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
96	1984	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
97	2103	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
98	590	C2 - AGUAS DE SALINIDAD MEDIA

... Cuadro 17.

No. muestra	Conductividad eléctrica	
	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Clasificación
99	936	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
100	1686	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
101	1635	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
102	1031	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
103	1681	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
104	1626	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
105	1686	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
106	1690	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
107	1695	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
108	1646	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
109	1602	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
110	2403	C4 - AGUAS MUY ALTAMENTE SALINAS
111	2541	C4 - AGUAS MUY ALTAMENTE SALINAS
112	2494	C4 - AGUAS MUY ALTAMENTE SALINAS
113	1646	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
114	598	C2 - AGUAS DE SALINIDAD MEDIA
115	1779	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
116	1783	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
117	1522	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
118	1139	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
119	1124	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
120	1494	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
121	122	C1 - AGUAS DE BAJA SALINIDAD
122	447	C2 - AGUAS DE SALINIDAD MEDIA
123	107	C1 - AGUAS DE BAJA SALINIDAD
124	291	C2 - AGUAS DE SALINIDAD MEDIA
125	326	C2 - AGUAS DE SALINIDAD MEDIA
126	554	C2 - AGUAS DE SALINIDAD MEDIA
127	1200	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
128	351	C2 - AGUAS DE SALINIDAD MEDIA
129	552	C2 - AGUAS DE SALINIDAD MEDIA
130	1157	C3 - AGUAS ALTAMENTE SALINAS
<hr/>		
MEDIANA	1596.0	
MEDIA	1541.2	
MODA	1112	
DESV. EST.	532.42	
MÍNIMO	107.0	
MÁXIMO	3468.0	

## 6.6.2 Presión osmótica

Se obtuvo la relación funcional de la presión osmótica y la CE para las aguas residuales muestreadas (Figura 12), y se encontró que el valor de la pendiente de la recta es 0.4259 cuando la CE se expresa en  $\text{mS cm}^{-1}$ :

$$PO(\text{atm}) = a \times CE \text{ (mS cm}^{-1}\text{)}$$

$$PO(\text{atm}) = 0.4259 \times CE \text{ (mS cm}^{-1}\text{)}$$

Si la CE se expresa en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , la relación funcional para este grupo de aguas muestreadas, queda de la siguiente manera:

$$PO(\text{atm}) = 0.0004259 \times CE \text{ (}\mu\text{S cm}^{-1}\text{)}$$

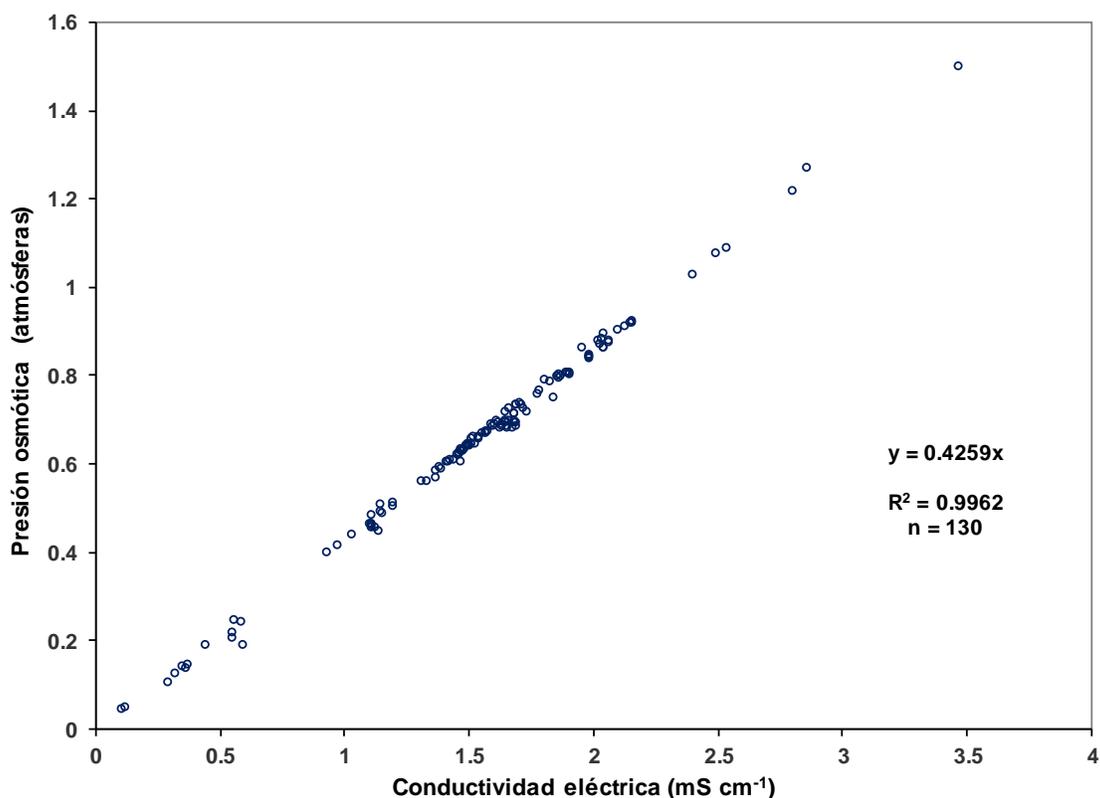


Figura 12. Relación entre la conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) y la presión osmótica (atm) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

Se obtuvo la relación funcional de la presión osmótica y la suma de cationes para las aguas residuales muestreadas (Figura 13), el valor de la pendiente de la recta es de 0.0436 cuando la suma de cationes se expresa en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , y la expresión es la siguiente:

$$PO(\text{atm}) = 0.0436 \times \text{Cationes } (\text{mmol}_c \text{L}^{-1})$$

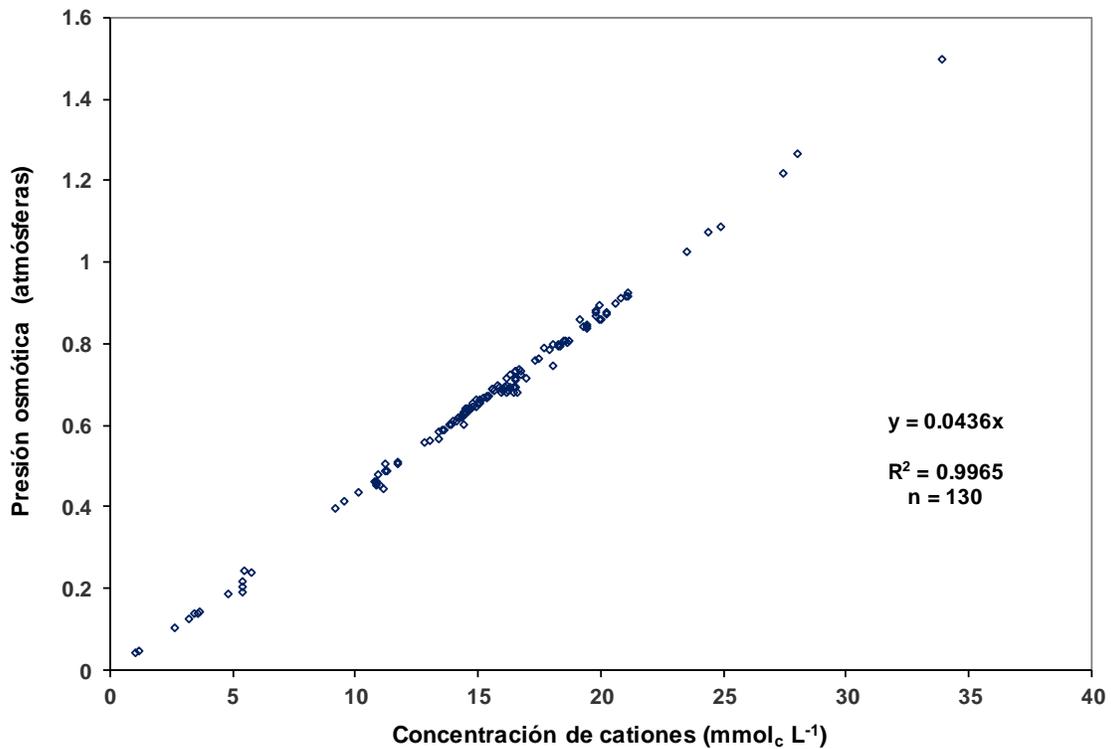


Figura 13. Relación entre la concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) y la presión osmótica (atm) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

### 6.6.3 Índice de salinidad efectiva

La salinidad efectiva es una relación que expresa el peligro que representan las sales solubles del agua de riego en el momento en que pasan a formar parte de la solución del suelo (Doneen, 1975), debido a que toma en cuenta la precipitación de las sales más nocivas, que además tienen elevada solubilidad, lo que da por resultado soluciones salinas muy concentradas.

La clasificación de las aguas residuales de acuerdo con el índice de salinidad efectiva, para cada sitio de muestreo, se puede apreciar en el Cuadro 20.

A manera de resumen, el Cuadro 18 identifica la cantidad de muestras que corresponden a cada una de las tres clases.

Cuadro 18. Resumen de la clasificación de acuerdo con la salinidad efectiva de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

Salinidad efectiva ( mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	Clase	Número de muestras
< 3	Buena	11
3 – 15	Condicionada	105
> 15	No recomendable	14

De acuerdo con el índice de salinidad efectiva, la mayoría de las aguas que conduce la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale, son aguas “condicionadas” para el riego y representan el 80.8% de las muestras, mientras que el 10.8% son aguas “no recomendables” para el riego.

De las once muestras de agua que se clasifican como “buena”, solamente cinco pertenecen a las aguas residuales de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán: Río Maconí, Canal revestido Xamajé, Presa Dolores, Manantial Chapantongo y La Gloria (río).

Las catorce muestras de agua “no recomendables”, se encuentran en la zona de

aguas residuales (red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán).

#### 6.6.4 Índice de salinidad potencial

La clasificación de las aguas residuales de acuerdo con el índice de salinidad potencial, para cada sitio de muestreo, se puede apreciar en el Cuadro 20.

A manera de resumen, el Cuadro 19 identifica la cantidad de muestras que corresponden a cada clase.

Cuadro 19. Resumen de la clasificación de acuerdo con la salinidad potencial de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

Salinidad potencial ( $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ )	Clase	Número de muestras
< 3	Buena	12
3 – 15	Condicionada	113
> 15	No recomendable	5

De acuerdo con el índice de salinidad potencial, las cinco muestras que se encuentra clasificadas como aguas “no recomendables” para el riego, pertenecen a los sitios de las aguas residuales (red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán): Canal revestido Santa Ana Nextlalpan, Río Ixmiquilpan, Canal cuadrado (calle Miguel Hidalgo, barrio San Miguel, Ixmiquilpan), Drenaje agrícola entrada a Capula y Canal de drenaje parte alta Capula.

Por otra parte, se encontró que la mayoría de las aguas que conduce la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale, son aguas “condicionadas” para el riego que representan el 86.9%.

De las once muestras de agua que se clasifican como “buena”, solamente tres pertenecen a las aguas residuales de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán: Río Maconí, Presa Dolores y Manantial Chapantongo.

Cuadro 20. Clasificación de acuerdo con la salinidad efectiva y salinidad potencial de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrogáfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

No. muestra	Salinidad Efectiva		Salinidad Potencial	
	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	Clasificación	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	Clasificación
1	8.84	C - CONDICIONADA	8.01	C - CONDICIONADA
2	13.55	C - CONDICIONADA	10.46	C - CONDICIONADA
3	4.22	C - CONDICIONADA	3.13	C - CONDICIONADA
4	15.15	NR - NO RECOMENDABLE	12.72	C - CONDICIONADA
5	21.09	NR - NO RECOMENDABLE	15.60	NR - NO RECOMENDABLE
6	13.80	C - CONDICIONADA	11.12	C - CONDICIONADA
7	15.06	NR - NO RECOMENDABLE	12.55	C - CONDICIONADA
8	15.91	NR - NO RECOMENDABLE	12.98	C - CONDICIONADA
9	13.97	C - CONDICIONADA	10.88	C - CONDICIONADA
10	14.90	C - CONDICIONADA	13.64	C - CONDICIONADA
11	13.85	C - CONDICIONADA	11.10	C - CONDICIONADA
12	10.57	C - CONDICIONADA	8.06	C - CONDICIONADA
13	11.69	C - CONDICIONADA	8.82	C - CONDICIONADA
14	12.55	C - CONDICIONADA	9.99	C - CONDICIONADA
15	12.36	C - CONDICIONADA	9.78	C - CONDICIONADA
16	10.09	C - CONDICIONADA	7.70	C - CONDICIONADA
17	9.74	C - CONDICIONADA	7.23	C - CONDICIONADA
18	10.74	C - CONDICIONADA	8.59	C - CONDICIONADA
19	10.40	C - CONDICIONADA	7.70	C - CONDICIONADA
20	2.30	B - BUENA	2.16	B - BUENA
21	11.49	C - CONDICIONADA	8.64	C - CONDICIONADA
22	10.23	C - CONDICIONADA	7.38	C - CONDICIONADA
23	10.36	C - CONDICIONADA	7.57	C - CONDICIONADA
24	12.63	C - CONDICIONADA	9.55	C - CONDICIONADA
25	10.95	C - CONDICIONADA	8.11	C - CONDICIONADA
26	10.05	C - CONDICIONADA	7.44	C - CONDICIONADA
27	11.63	C - CONDICIONADA	9.30	C - CONDICIONADA
28	10.40	C - CONDICIONADA	7.82	C - CONDICIONADA
29	11.99	C - CONDICIONADA	9.39	C - CONDICIONADA
30	11.85	C - CONDICIONADA	9.04	C - CONDICIONADA
31	9.58	C - CONDICIONADA	7.05	C - CONDICIONADA
32	10.47	C - CONDICIONADA	8.27	C - CONDICIONADA
33	11.77	C - CONDICIONADA	8.84	C - CONDICIONADA
34	10.52	C - CONDICIONADA	8.21	C - CONDICIONADA
35	10.10	C - CONDICIONADA	7.93	C - CONDICIONADA
36	11.89	C - CONDICIONADA	9.21	C - CONDICIONADA
37	9.10	C - CONDICIONADA	7.51	C - CONDICIONADA
38	10.37	C - CONDICIONADA	8.02	C - CONDICIONADA
39	9.94	C - CONDICIONADA	7.90	C - CONDICIONADA
40	9.89	C - CONDICIONADA	7.72	C - CONDICIONADA
41	11.13	C - CONDICIONADA	7.97	C - CONDICIONADA
42	10.87	C - CONDICIONADA	7.83	C - CONDICIONADA
43	11.56	C - CONDICIONADA	8.74	C - CONDICIONADA
44	10.95	C - CONDICIONADA	8.45	C - CONDICIONADA
45	9.34	C - CONDICIONADA	7.84	C - CONDICIONADA
46	2.70	B - BUENA	2.23	B - BUENA
47	11.32	C - CONDICIONADA	10.22	C - CONDICIONADA
48	10.16	C - CONDICIONADA	8.07	C - CONDICIONADA

... Cuadro 20.

No. muestra	Salinidad Efectiva		Salinidad Potencial	
	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Clasificación	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Clasificación
49	13.05	C - CONDICIONADA	10.03	C - CONDICIONADA
50	9.44	C - CONDICIONADA	6.72	C - CONDICIONADA
51	10.96	C - CONDICIONADA	8.62	C - CONDICIONADA
52	10.65	C - CONDICIONADA	7.80	C - CONDICIONADA
53	0.00	B - BUENA	5.75	C - CONDICIONADA
54	10.41	C - CONDICIONADA	8.05	C - CONDICIONADA
55	15.08	NR - NO RECOMENDABLE	10.95	C - CONDICIONADA
56	14.47	C - CONDICIONADA	10.44	C - CONDICIONADA
57	9.88	C - CONDICIONADA	7.28	C - CONDICIONADA
58	11.02	C - CONDICIONADA	8.24	C - CONDICIONADA
59	11.32	C - CONDICIONADA	8.29	C - CONDICIONADA
60	15.32	NR - NO RECOMENDABLE	12.66	C - CONDICIONADA
61	12.89	C - CONDICIONADA	9.93	C - CONDICIONADA
62	15.11	NR - NO RECOMENDABLE	11.66	C - CONDICIONADA
63	14.07	C - CONDICIONADA	11.58	C - CONDICIONADA
64	9.12	C - CONDICIONADA	7.30	C - CONDICIONADA
65	14.22	C - CONDICIONADA	11.82	C - CONDICIONADA
66	14.37	C - CONDICIONADA	10.95	C - CONDICIONADA
67	13.90	C - CONDICIONADA	11.71	C - CONDICIONADA
68	11.78	C - CONDICIONADA	9.01	C - CONDICIONADA
69	12.92	C - CONDICIONADA	9.69	C - CONDICIONADA
70	7.75	C - CONDICIONADA	6.39	C - CONDICIONADA
71	9.16	C - CONDICIONADA	7.16	C - CONDICIONADA
72	13.31	C - CONDICIONADA	10.02	C - CONDICIONADA
73	7.64	C - CONDICIONADA	6.38	C - CONDICIONADA
74	7.66	C - CONDICIONADA	5.87	C - CONDICIONADA
75	7.68	C - CONDICIONADA	5.80	C - CONDICIONADA
76	11.00	C - CONDICIONADA	9.09	C - CONDICIONADA
77	6.82	C - CONDICIONADA	5.61	C - CONDICIONADA
78	12.59	C - CONDICIONADA	9.25	C - CONDICIONADA
79	7.14	C - CONDICIONADA	6.09	C - CONDICIONADA
80	14.17	C - CONDICIONADA	11.38	C - CONDICIONADA
81	11.82	C - CONDICIONADA	8.80	C - CONDICIONADA
82	10.35	C - CONDICIONADA	8.35	C - CONDICIONADA
83	10.30	C - CONDICIONADA	8.64	C - CONDICIONADA
84	12.33	C - CONDICIONADA	10.25	C - CONDICIONADA
85	11.43	C - CONDICIONADA	9.25	C - CONDICIONADA
86	8.35	C - CONDICIONADA	6.62	C - CONDICIONADA
87	10.31	C - CONDICIONADA	8.29	C - CONDICIONADA
88	11.56	C - CONDICIONADA	7.98	C - CONDICIONADA
89	12.66	C - CONDICIONADA	9.80	C - CONDICIONADA
90	24.20	NR - NO RECOMENDABLE	17.24	NR - NO RECOMENDABLE
91	7.69	C - CONDICIONADA	6.02	C - CONDICIONADA
92	14.12	C - CONDICIONADA	10.05	C - CONDICIONADA
93	15.86	NR - NO RECOMENDABLE	12.15	C - CONDICIONADA
94	30.01	NR - NO RECOMENDABLE	17.37	NR - NO RECOMENDABLE
95	10.81	C - CONDICIONADA	8.68	C - CONDICIONADA
96	14.12	C - CONDICIONADA	11.32	C - CONDICIONADA
97	15.21	NR - NO RECOMENDABLE	12.76	C - CONDICIONADA

... Cuadro 20.

No. muestra	Salinidad Efectiva		Salinidad Potencial	
	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Clasificación	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Clasificación
98	3.39	C - CONDICIONADA	2.90	B - BUENA
99	6.54	C - CONDICIONADA	4.73	C - CONDICIONADA
100	11.61	C - CONDICIONADA	9.06	C - CONDICIONADA
101	11.75	C - CONDICIONADA	8.00	C - CONDICIONADA
102	7.18	C - CONDICIONADA	5.78	C - CONDICIONADA
103	10.47	C - CONDICIONADA	8.92	C - CONDICIONADA
104	11.10	C - CONDICIONADA	9.25	C - CONDICIONADA
105	10.52	C - CONDICIONADA	9.13	C - CONDICIONADA
106	10.55	C - CONDICIONADA	9.09	C - CONDICIONADA
107	10.78	C - CONDICIONADA	9.27	C - CONDICIONADA
108	11.15	C - CONDICIONADA	9.56	C - CONDICIONADA
109	11.29	C - CONDICIONADA	9.28	C - CONDICIONADA
110	17.04	NR - NO RECOMENDABLE	12.80	C - CONDICIONADA
111	18.60	NR - NO RECOMENDABLE	15.39	NR - NO RECOMENDABLE
112	18.44	NR - NO RECOMENDABLE	15.39	NR - NO RECOMENDABLE
113	11.32	C - CONDICIONADA	9.34	C - CONDICIONADA
114	2.34	B - BUENA	1.76	B - BUENA
115	12.53	C - CONDICIONADA	10.24	C - CONDICIONADA
116	12.58	C - CONDICIONADA	10.81	C - CONDICIONADA
117	10.77	C - CONDICIONADA	9.12	C - CONDICIONADA
118	7.84	C - CONDICIONADA	6.60	C - CONDICIONADA
119	0.00	B - BUENA	5.40	C - CONDICIONADA
120	10.59	C - CONDICIONADA	8.56	C - CONDICIONADA
121	0.34	B - BUENA	0.24	B - BUENA
122	3.19	C - CONDICIONADA	2.96	B - BUENA
123	0.64	B - BUENA	0.58	B - BUENA
124	0.96	B - BUENA	0.80	B - BUENA
125	0.98	B - BUENA	0.62	B - BUENA
126	1.16	B - BUENA	0.79	B - BUENA
127	8.04	C - CONDICIONADA	6.38	C - CONDICIONADA
128	1.56	B - BUENA	1.31	B - BUENA
129	3.62	C - CONDICIONADA	2.88	B - BUENA
130	7.77	C - CONDICIONADA	6.02	C - CONDICIONADA
MEDIANA	10.91		8.61	
MEDIA	10.67		8.43	
MODA	10.52		9.25	
DESV. EST.	4.454		3.185	
MÍNIMO	0.00		0.24	
MÁXIMO	30.01		17.37	

## 6.7 Clasificación de las aguas residuales con base en la sodicidad

### 6.7.1 Relación de adsorción de sodio, y clasificación de las aguas residuales de acuerdo con Richards, 1973

Se calcularon los valores de la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale, de acuerdo a diferentes conceptualizaciones, mismas que se despliegan en el Cuadro 22.

A manera de resumen, el Cuadro 21 presenta la cantidad de muestras que corresponden a cada clase, para cada conceptualización de RAS, y se esquematiza de manera gráfica en las Figuras 14, 15 y 16, donde es posible apreciar la clasificación de las aguas residuales de acuerdo con la clasificación de Richards.

Cuadro 21. Resumen de la clasificación de acuerdo con las diferentes formulaciones de la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

No.	Clasificación	Número de muestras para las diferentes conceptualizaciones de la relación de adsorción de sodio		
		RAS <sub>original</sub>	RAS <sub>corregido</sub>	RAS <sub>ajustado</sub>
1	C1S1	2	2	2
2	C1S2	0	0	0
3	C1S3	0	0	0
4	C1S4	0	0	0
5	C2S1	11	11	11
6	C2S2	0	0	0
7	C2S3	0	0	0
8	C2S4	0	0	0
9	C3S1	7	6	0
10	C3S2	100	93	21
11	C3S3	4	12	71
12	C3S4	0	0	19
13	C4S1	0	0	0
14	C4S2	0	0	0
15	C4S3	4	4	0
16	C4S4	2	2	6

Para la RAS original el 76.9% de aguas muestreadas se encuentran en la clase C3S2, para la RAS corregida se encontró que el 71.5% de las aguas pertenecen a la clase C3S2, mientras que para la RAS ajustada el 54.6% de las aguas son clase C3S3.

Se obtuvo que los valores de la  $RAS_{or}$  al corregirse, desplazaron algunas aguas a otros grupos de clasificación, es decir de la clase C3S2 a la clase C3S3.

Y los valores de la  $RAS_{or}$  al ajustarse se desplazan a otros grupos de clasificación, desapareciendo la clase C3S1 y apareciendo la clase C3S4, indicando mayor problema para el uso de estas aguas en el riego agrícola debido a sus altas concentraciones de sales y RAS.

Los valores de la  $RAS_{aj}$  son superiores a los valores de la  $RAS_{or}$  y  $RAS^0$ , estos resultados coinciden con Mendoza (2016), y para efectos de predicción, permite conocer los valores máximos de la RAS que puede alcanzar el agua en determinadas condiciones físico-químicas específicas.

Cuadro 22. Valores de las distintas formulaciones de la relación de adsorción de sodio, de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrogáfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

No. muestra	RAS <sub>original</sub>	RAS <sub>corregido</sub>		RAS <sub>ajustado</sub>	
	RAS	Ca°	RAS°	pH <sub>c</sub>	RAS <sub>aj</sub>
1	7.68	1.14	7.48	8.15	9.59
2	8.94	1.00	10.02	7.60	16.10
3	5.07	0.89	4.53	8.40	5.09
4	9.34	1.08	10.24	7.65	16.33
5	11.15	1.03	13.22	7.28	23.62
6	8.91	1.06	9.78	7.67	15.45
7	9.10	1.05	10.04	7.61	16.24
8	10.55	0.94	11.37	7.75	17.42
9	7.89	1.02	8.82	7.51	14.95
10	9.67	1.25	10.43	7.75	15.94
11	7.82	1.07	8.78	7.50	14.87
12	6.43	0.89	6.84	7.69	11.00
13	6.67	0.89	7.24	7.59	12.10
14	6.78	0.90	7.41	7.54	12.64
15	6.77	0.90	7.37	7.56	12.47
16	6.27	0.88	6.65	7.73	10.46
17	6.56	0.88	6.88	7.82	10.37
18	6.69	1.02	7.23	7.69	11.42
19	6.26	0.97	6.82	7.63	11.09
20	1.05	1.23	0.93	8.46	0.99
21	7.16	0.97	7.74	7.66	12.48
22	6.42	0.96	6.95	7.65	11.24
23	6.82	0.96	7.42	7.69	11.66
24	6.67	0.90	7.33	7.49	12.75
25	7.56	0.96	8.25	7.71	12.77
26	6.67	0.96	7.22	7.71	11.26
27	6.02	1.43	6.93	7.38	12.17
28	6.73	0.96	7.29	7.68	11.57
29	7.20	0.98	7.99	7.57	13.15
30	8.02	0.97	8.61	7.74	13.33
31	6.14	0.96	6.57	7.72	10.35
32	6.66	0.96	7.15	7.72	11.18
33	7.85	0.92	8.51	7.71	13.26
34	6.62	0.99	7.21	7.67	11.45
35	6.43	1.02	6.97	7.69	11.03
36	7.88	0.97	8.50	7.72	13.24
37	6.17	1.04	6.51	7.82	9.78
38	6.76	0.96	7.23	7.74	11.20
39	6.43	0.97	6.87	7.75	10.62
40	6.43	0.96	6.86	7.75	10.62
41	6.96	0.82	7.48	7.69	11.87
42	6.89	0.82	7.38	7.71	11.61
43	6.90	0.98	7.52	7.59	12.46
44	7.45	0.96	7.97	7.76	12.19
45	5.49	0.91	5.78	7.75	9.03
46	1.11	1.94	0.89	8.54	0.95
47	8.08	1.17	8.38	7.93	11.90
48	6.49	1.07	6.94	7.70	11.04

... Cuadro 22.

No. muestra	RAS <sub>original</sub>	RAS <sub>corregido</sub>		RAS <sub>ajustado</sub>	
	RAS	Ca°	RAS°	pH <sub>c</sub>	RAS <sub>aj</sub>
49	7.25	0.99	7.98	7.53	13.59
50	6.03	0.81	6.15	7.88	9.19
51	6.87	0.92	7.35	7.72	11.52
52	6.78	0.88	7.22	7.73	11.31
53	4.22	1.04	4.38	7.83	6.62
54	6.86	0.99	7.44	7.69	11.70
55	8.29	0.91	9.23	7.45	16.16
56	8.07	0.91	8.95	7.48	15.52
57	6.68	0.88	6.99	7.82	10.56
58	6.84	0.89	7.34	7.70	11.64
59	6.91	0.97	7.51	7.60	12.45
60	8.74	1.07	9.68	7.55	16.14
61	7.28	0.98	7.99	7.54	13.50
62	8.11	1.00	9.00	7.46	15.74
63	7.70	1.13	8.51	7.52	14.48
64	5.02	1.17	5.52	7.56	9.26
65	7.73	1.14	8.56	7.51	14.62
66	8.14	0.91	9.01	7.52	15.27
67	7.49	1.13	8.30	7.51	14.16
68	6.93	1.04	7.67	7.56	12.75
69	7.08	0.99	7.94	7.47	13.70
70	5.34	0.86	5.43	7.97	7.64
71	6.07	1.02	6.50	7.75	10.00
72	7.92	0.90	8.58	7.63	14.05
73	5.39	0.79	5.41	8.01	7.48
74	5.54	0.86	5.47	8.06	7.40
75	5.66	1.07	5.78	7.87	8.68
76	6.89	1.07	7.45	7.69	11.80
77	5.41	1.03	5.44	8.02	7.44
78	8.39	0.98	9.31	7.63	14.87
79	4.69	1.26	4.75	7.85	7.28
80	8.30	1.13	9.21	7.57	15.22
81	7.39	0.89	7.88	7.65	12.94
82	5.43	1.11	6.02	7.47	10.47
83	5.53	1.18	6.05	7.54	10.29
84	7.94	1.08	8.64	7.69	13.56
85	6.81	1.11	7.43	7.64	11.97
86	5.95	1.01	6.24	7.85	9.24
87	5.52	1.07	6.09	7.50	10.46
88	7.19	0.89	7.67	7.67	12.43
89	8.78	1.04	9.51	7.70	14.96
90	16.84	0.65	18.38	7.71	28.43
91	5.50	0.89	5.45	8.04	7.45
92	8.95	0.90	10.07	7.56	16.46
93	9.33	1.07	10.55	7.51	17.68
94	20.87	0.66	23.01	7.50	39.58
95	5.65	1.07	6.29	7.47	10.91
96	8.28	1.06	9.17	7.56	15.19
97	8.70	1.14	9.63	7.57	15.93

... Cuadro 22.

No. muestra	RAS <sub>original</sub>	RAS <sub>corregido</sub>		RAS <sub>ajustado</sub>	
	RAS	Ca°	RAS°	pH <sub>c</sub>	RAS <sub>aj</sub>
98	3.00	1.19	2.91	8.08	3.95
99	5.28	0.92	5.38	7.97	7.52
100	6.84	1.05	7.55	7.59	12.40
101	7.44	0.89	7.92	7.67	12.86
102	5.51	1.03	5.61	7.96	7.92
103	4.64	1.42	5.23	7.41	9.23
104	6.64	1.18	7.23	7.64	11.67
105	5.38	1.22	5.95	7.50	10.21
106	5.16	1.23	5.74	7.48	9.91
107	4.34	1.50	4.91	7.39	8.71
108	6.57	1.18	7.15	7.64	11.58
109	7.10	1.08	7.70	7.68	12.19
110	8.86	0.92	9.95	7.40	17.70
111	9.87	1.16	11.09	7.46	19.11
112	10.04	1.12	11.24	7.49	19.14
113	6.79	1.18	7.38	7.63	12.00
114	0.35	1.36	0.36	7.77	0.56
115	7.53	1.07	8.29	7.61	13.50
116	7.51	1.13	8.21	7.64	13.23
117	7.01	1.10	7.52	7.67	12.10
118	3.10	1.26	3.67	7.61	5.54
119	3.94	1.26	4.29	7.63	6.97
120	6.99	1.04	7.54	7.72	11.73
121	0.44	0.70	0.36	8.89	0.22
122	1.26	0.86	1.26	8.31	1.37
123	1.10	0.91	0.68	9.27	0.14
124	0.91	0.76	0.85	8.39	0.92
125	0.77	0.76	0.75	8.20	0.92
126	0.62	1.18	0.68	7.53	1.15
127	5.36	0.86	5.63	7.84	8.35
128	1.34	0.90	1.25	8.32	1.46
129	2.61	1.27	2.42	8.26	2.99
130	5.42	0.86	5.66	7.86	8.35
MEDIANA	6.78	0.99	7.35	7.68	11.66
MEDIA	6.60	1.02	7.15	7.73	11.46
MODA	6.43	1.18	7.23	7.69	14.87
DESV. EST.	2.634	0.167	2.976	0.285	5.148
MÍNIMO	0.35	0.65	0.36	7.28	0.14
MÁXIMO	20.87	1.94	23.01	9.27	39.58

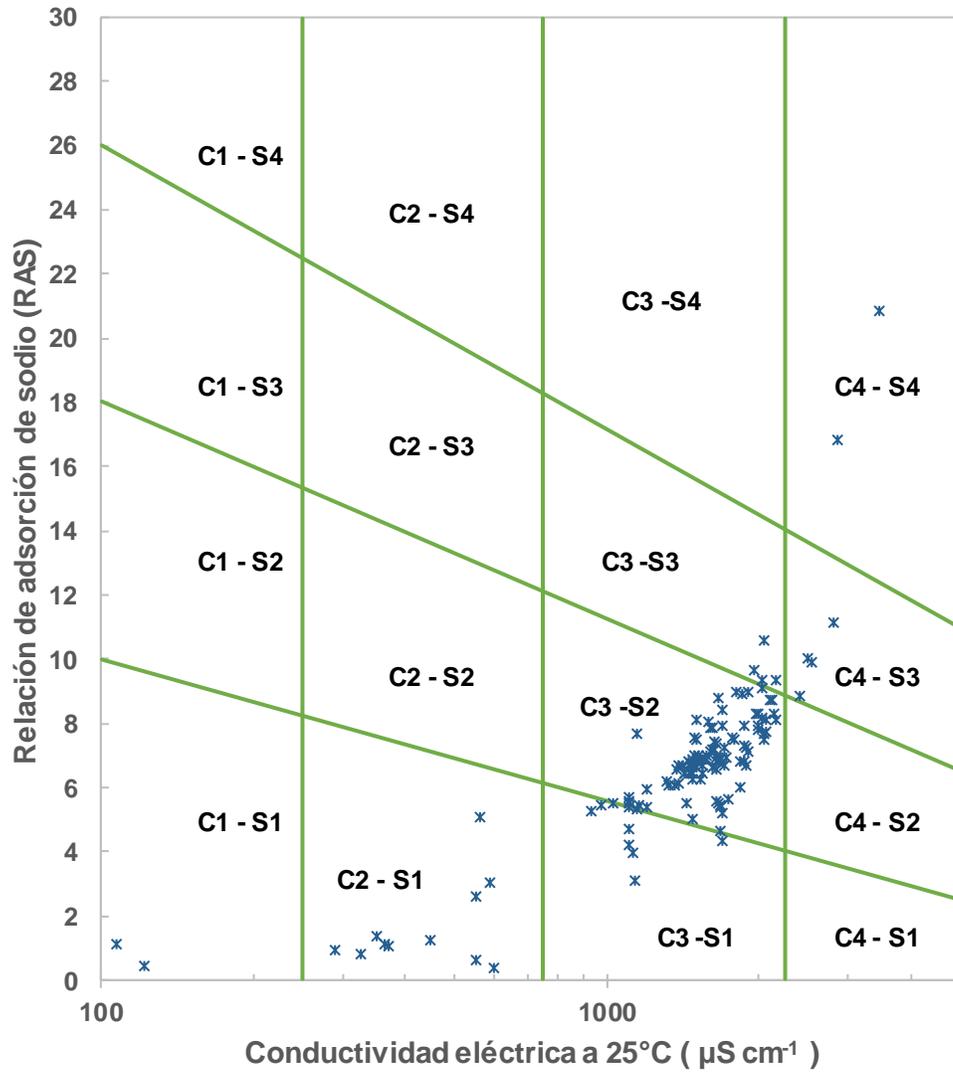


Figura 14. Diagrama de clasificación de acuerdo con la relación de adsorción de sodio original de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. Relación entre  $\text{RAS}_{\text{original}}$  y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ).

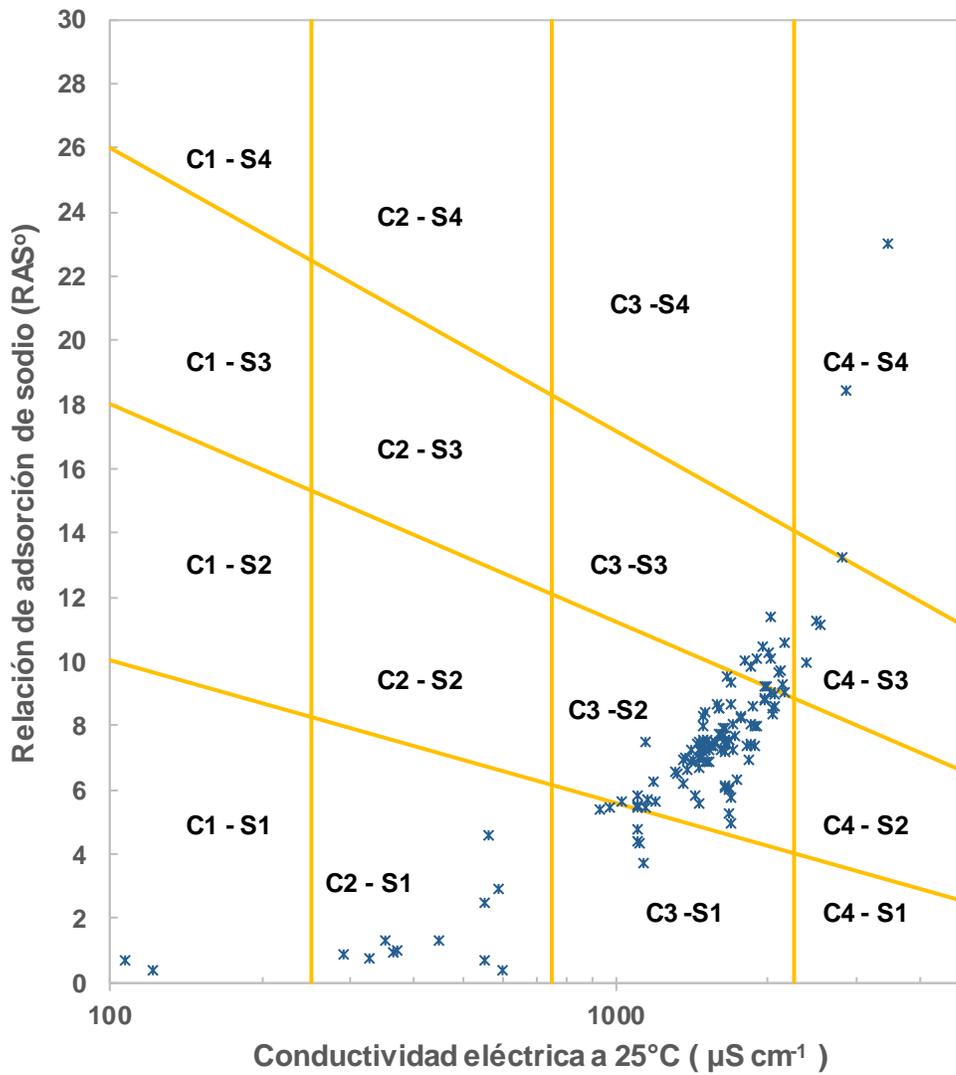


Figura 15. Diagrama de clasificación de acuerdo con la relación de adsorción de sodio corregido de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. Relación entre  $RAS_{\text{corregido}}$  y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ).

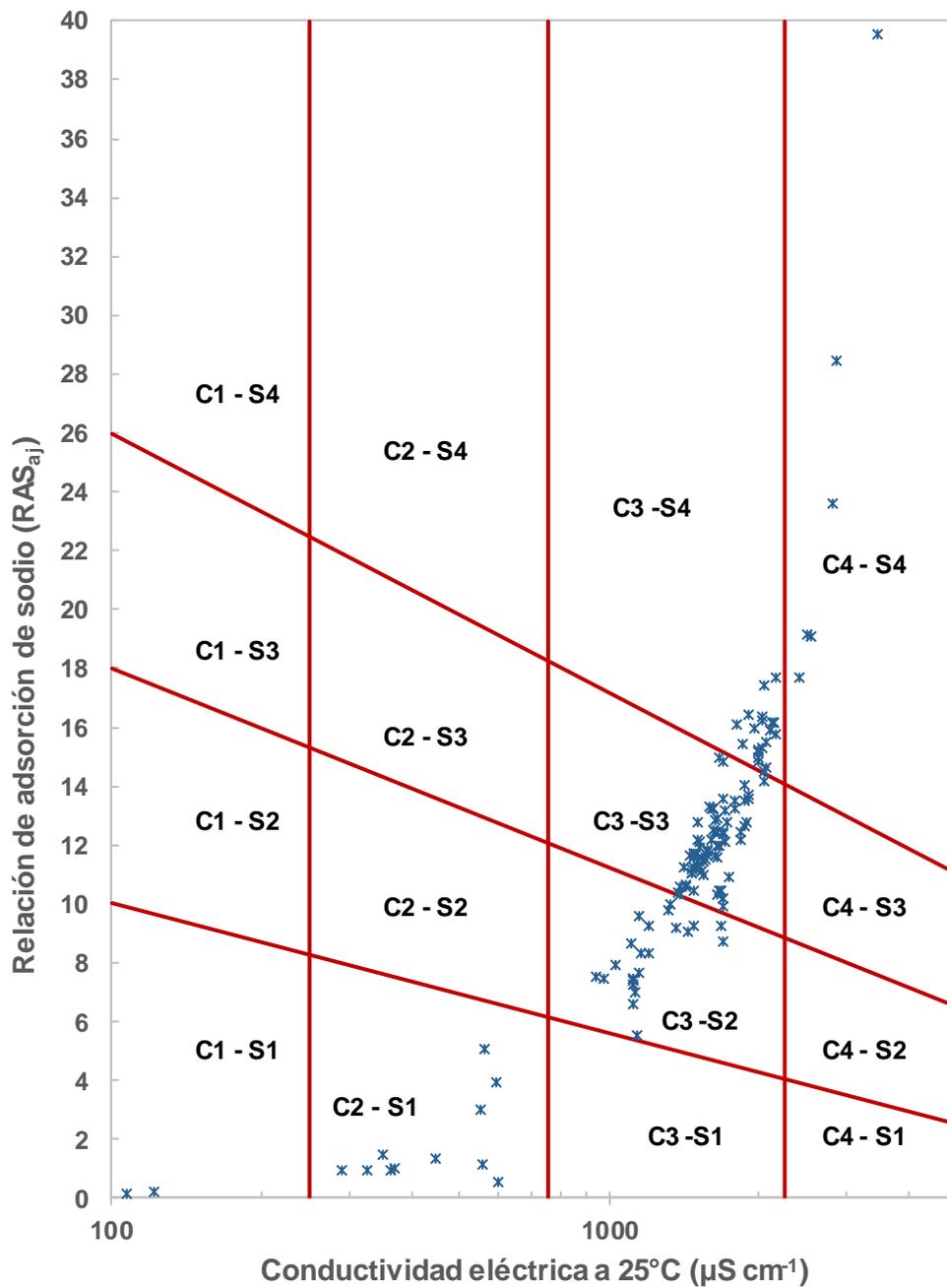


Figura 16. Diagrama de clasificación de acuerdo con la relación de adsorción de sodio ajustado de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. Relación entre  $RAS_{aj}$  y la conductividad eléctrica ( $\mu S cm^{-1}$ ).

### **6.7.2 Porcentaje de sodio intercambiable y la relación de adsorción de sodio (PSI – RAS)**

Es necesario hacer una predicción de los valores del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en los suelos del Valle del Mezquital que se riegan con aguas residuales, para las distintas conceptualizaciones de RAS, y para tal efecto se utilizaron los siguientes coeficientes de selectividad iónica de Gapon (Velásquez, 2001; Velásquez *et al.*, 2002; Mendoza, 2009): 0.0072444, 0.011861 y 0.0168999 ( $\text{mmol L}^{-1}$ )<sup>-1/2</sup>.

La relación funcional PSI-RAS de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale, se presenta en las Figuras 17, 18 y 19 que toman en cuenta las diferentes conceptualizaciones de la relación de adsorción de sodio.

Los orígenes de los iones de Na<sup>+</sup> en las aguas residuales de las zonas urbano industriales, se debe a que en los diversos procesos industriales se utilizan grandes cantidades de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, y por este motivo la mayoría de las aguas muestreadas reportaron grandes cantidades de Na<sup>+</sup>.

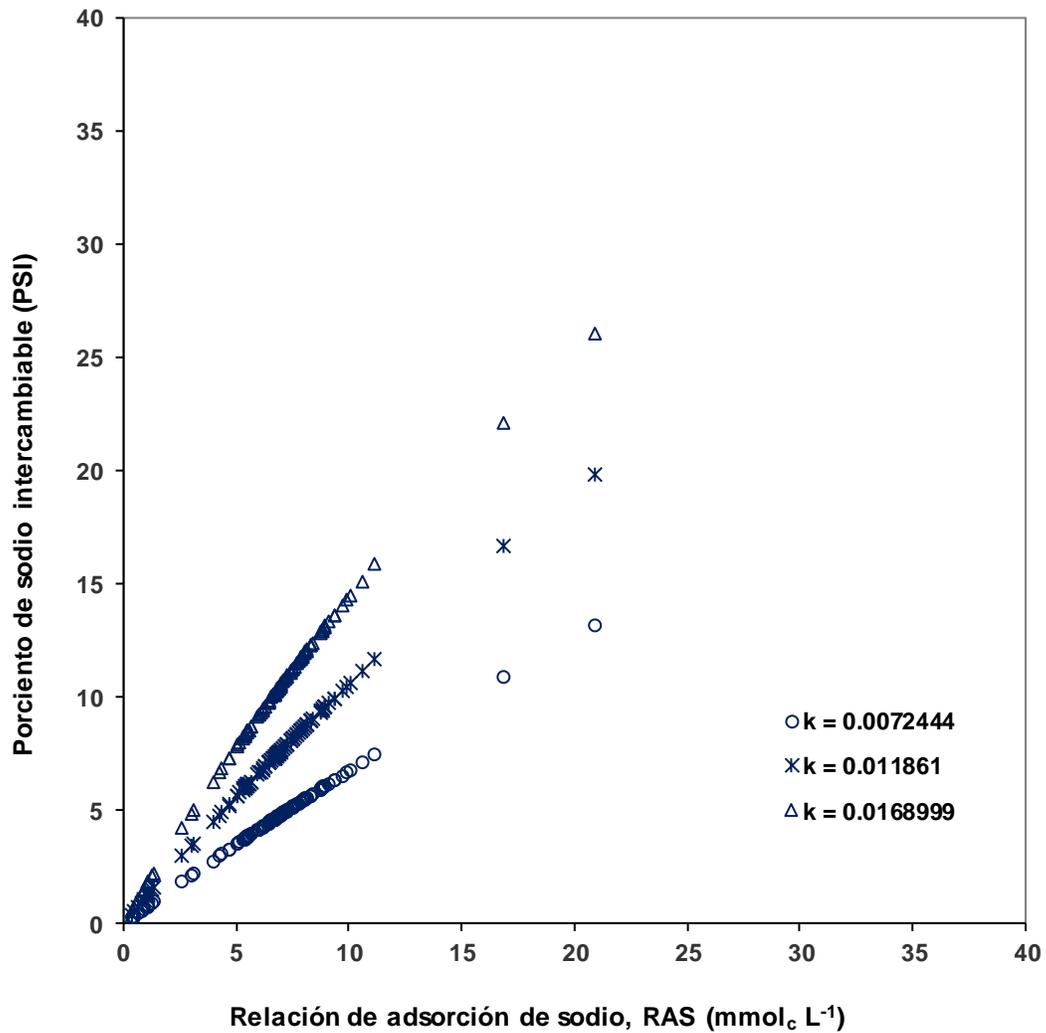


Figura 17. Relación entre la relación de adsorción de sodio original y el porcentaje de sodio intercambiable de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

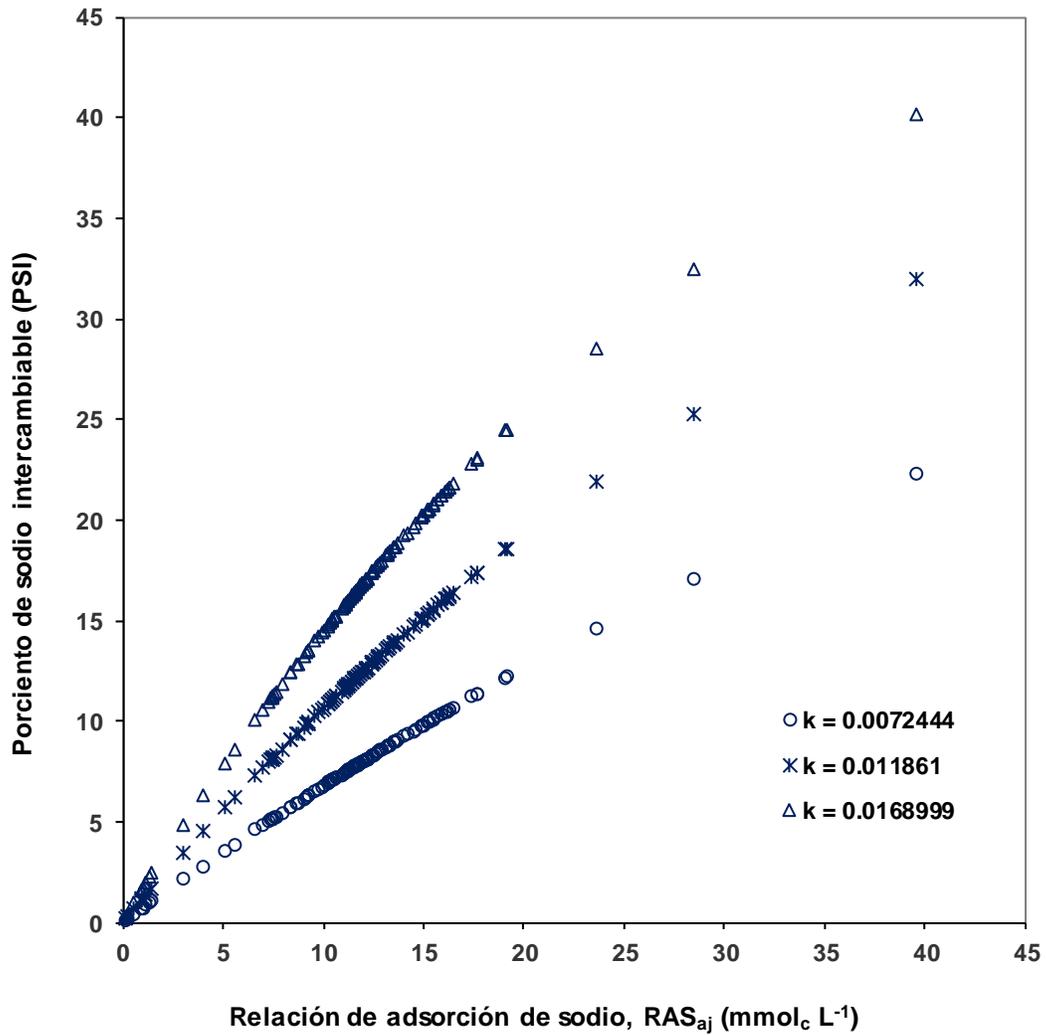


Figura 18. Relación entre la relación de adsorción de sodio ajustada y el porcentaje de sodio intercambiable de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

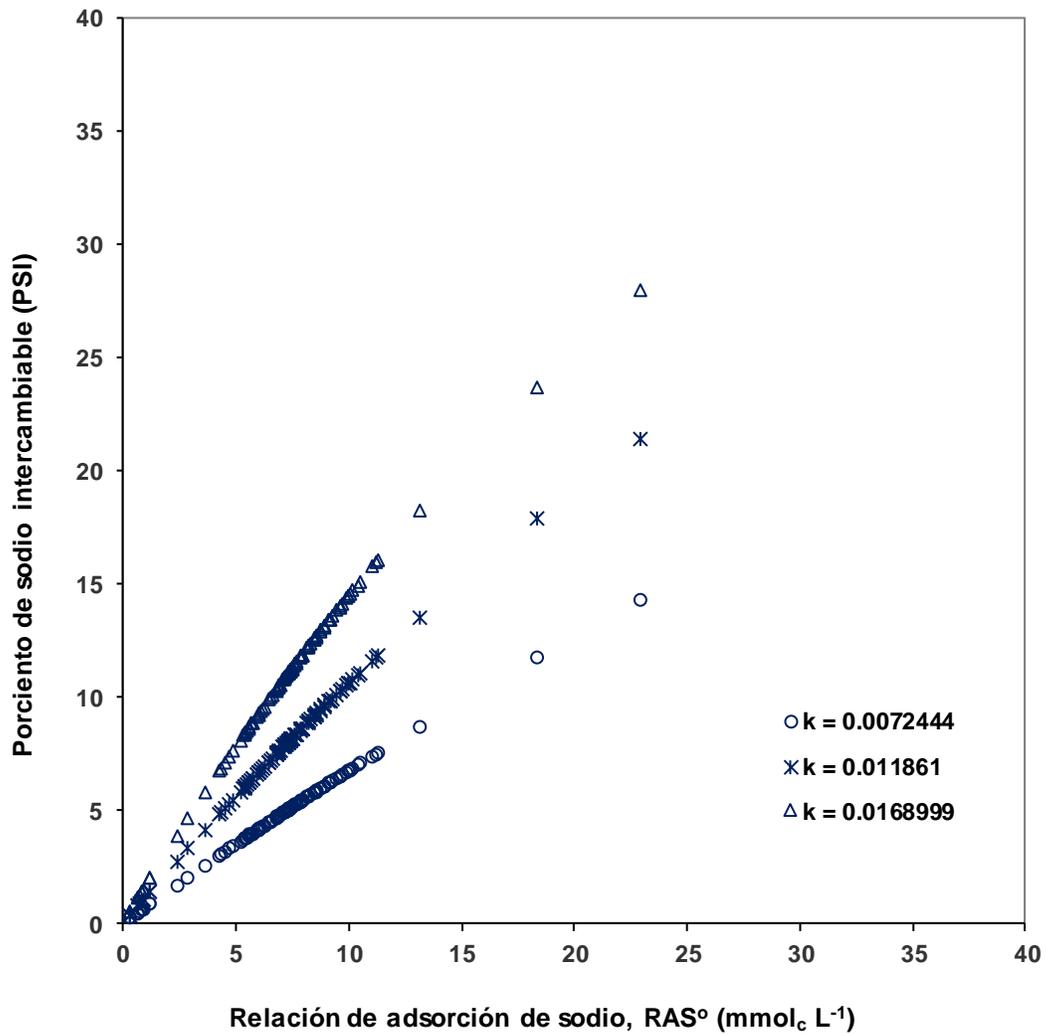


Figura 19. Relación entre la relación de adsorción de sodio corregida y el porcentaje de sodio intercambiable de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

### 6.7.3 Clasificación de las aguas residuales con base en el peligro de disminución de la infiltración

Se clasificaron los valores de RAS de las aguas residuales muestreadas (en sus diferentes conceptualizaciones), de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale, de acuerdo al peligro de la disminución de la infiltración, y se presentan en el Cuadro 24.

A manera de resumen, el Cuadro 23 presenta la cantidad de muestras que corresponden a cada clase, para cada conceptualización de RAS, y se esquematiza de manera gráfica en las Figuras 20, 21 y 22, donde es posible apreciar la clasificación de las aguas residuales de acuerdo con el peligro de disminución de la infiltración.

Cuadro 23. Resumen de la clasificación de acuerdo con el peligro de disminución de la infiltración de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

Formulaciones de RAS	Número de muestras		
	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción severa
RAS <sub>original</sub>	76	52	2
RAS <sub>corregido</sub>	54	74	2
RAS <sub>ajustado</sub>	1	126	3

Cuadro 24. Clasificación del peligro de disminución de la infiltración para distintas formulaciones de la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

No. muestra	Clasificación del peligro de disminución de la infiltración		
	RAS <sub>original</sub>	RAS <sub>corregido</sub>	RAS <sub>ajustado</sub>
1	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
2	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
3	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
4	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
5	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
6	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
7	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
8	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
9	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
10	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
11	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
12	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
13	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
14	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
15	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
16	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
17	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
18	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
19	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
20	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
21	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
22	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
23	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
24	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
25	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
26	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
27	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
28	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
29	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
30	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
31	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
32	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
33	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
34	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
35	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
36	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
37	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
38	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
39	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
40	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
41	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
42	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
43	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
44	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
45	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
46	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
47	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
48	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada



... Cuadro 24.

No. muestra	Clasificación del peligro de disminución de la infiltración		
	RAS <sub>original</sub>	RAS <sub>corregido</sub>	RAS <sub>ajustado</sub>
99	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
100	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
101	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
102	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
103	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
104	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
105	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
106	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
107	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
108	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
109	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
110	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
111	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
112	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
113	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
114	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
115	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
116	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
117	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
118	Sin reducción	Sin reducción	Reducción ligera o moderada
119	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
120	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
121	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
122	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
123	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
124	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
125	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
126	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
127	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
128	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
129	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
130	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada

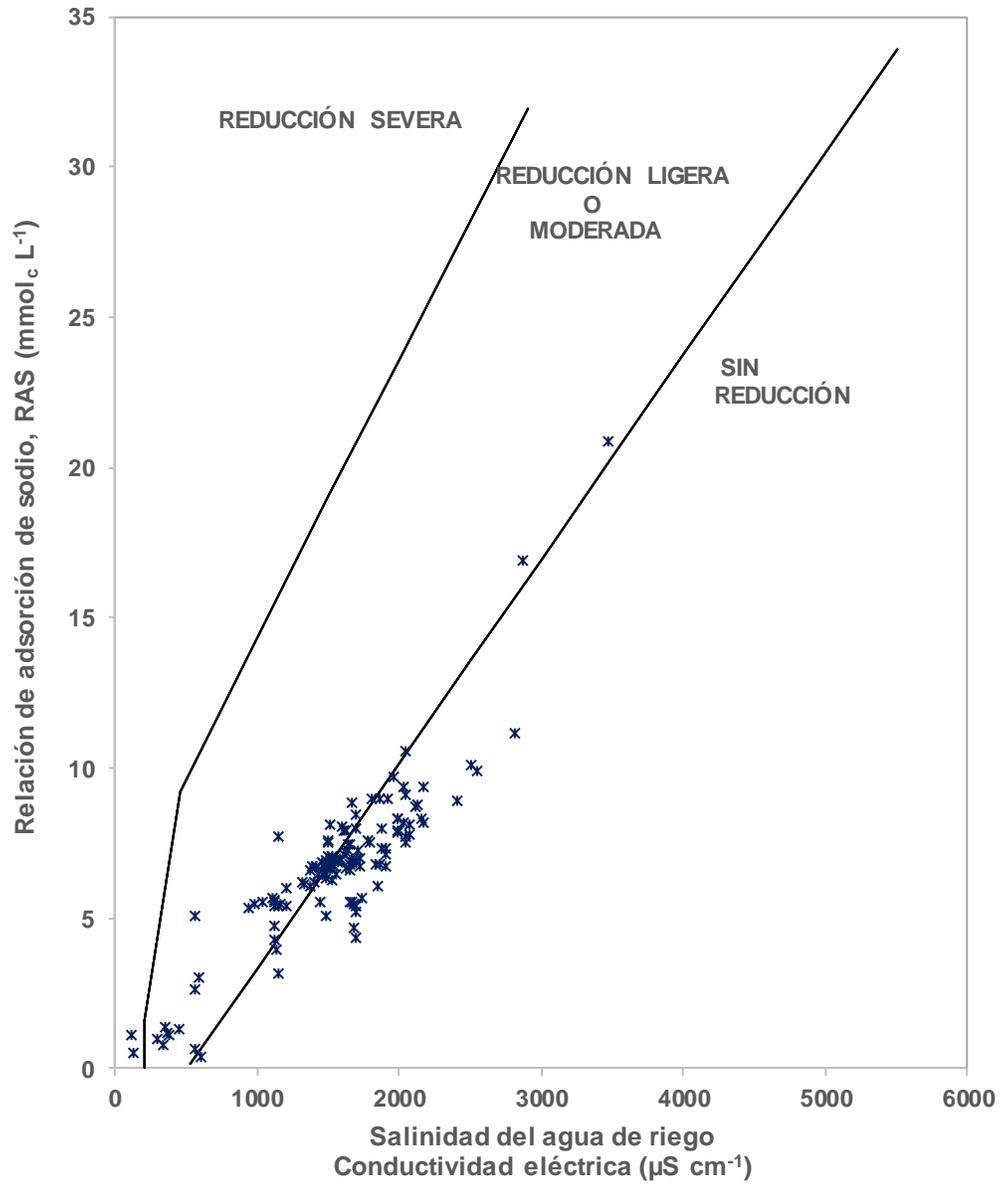


Figura 20. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio original de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.  $RAS_{original}-CE$ .

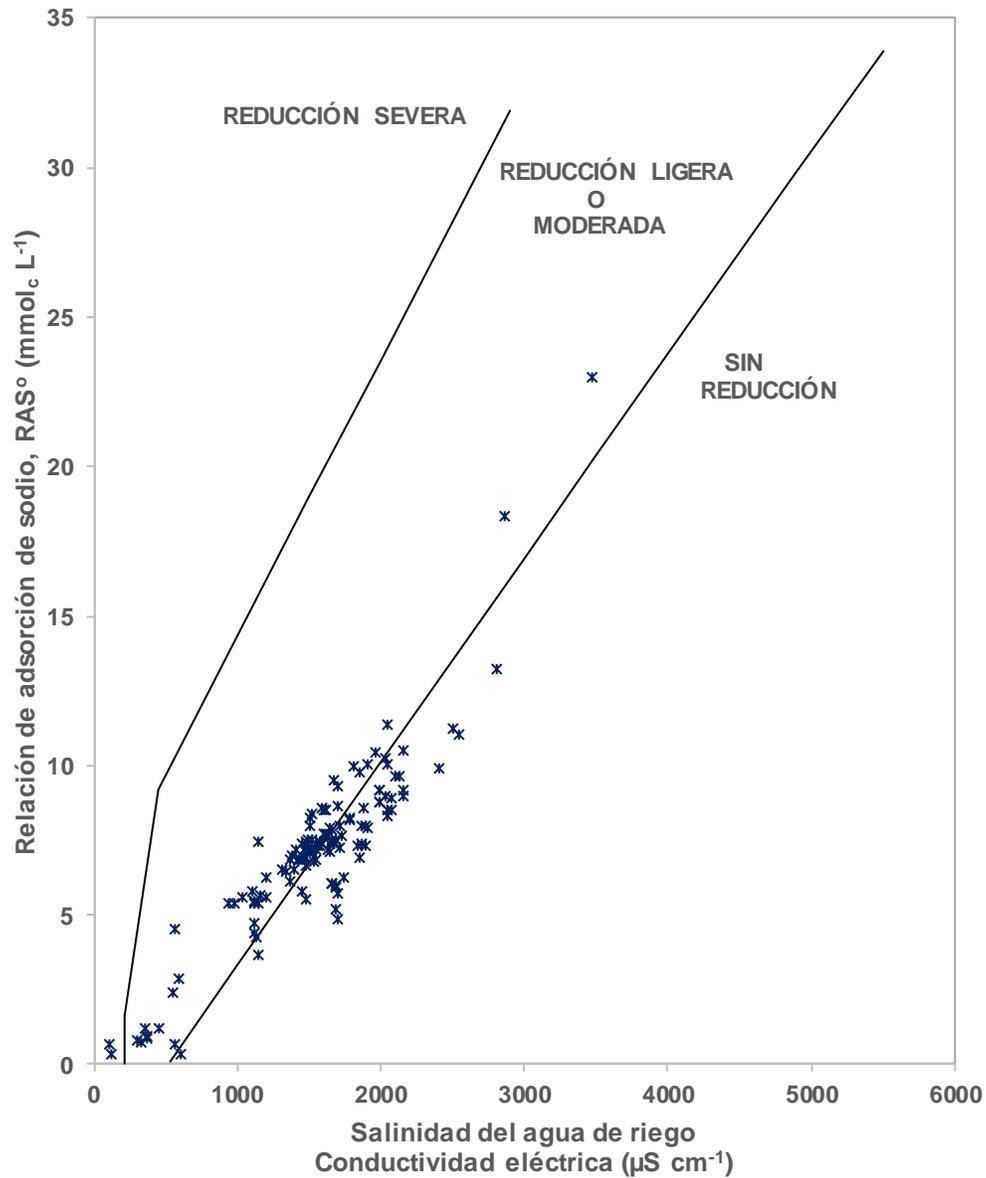


Figura 21. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio corregida de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. RAS<sub>corregido</sub>-CE.

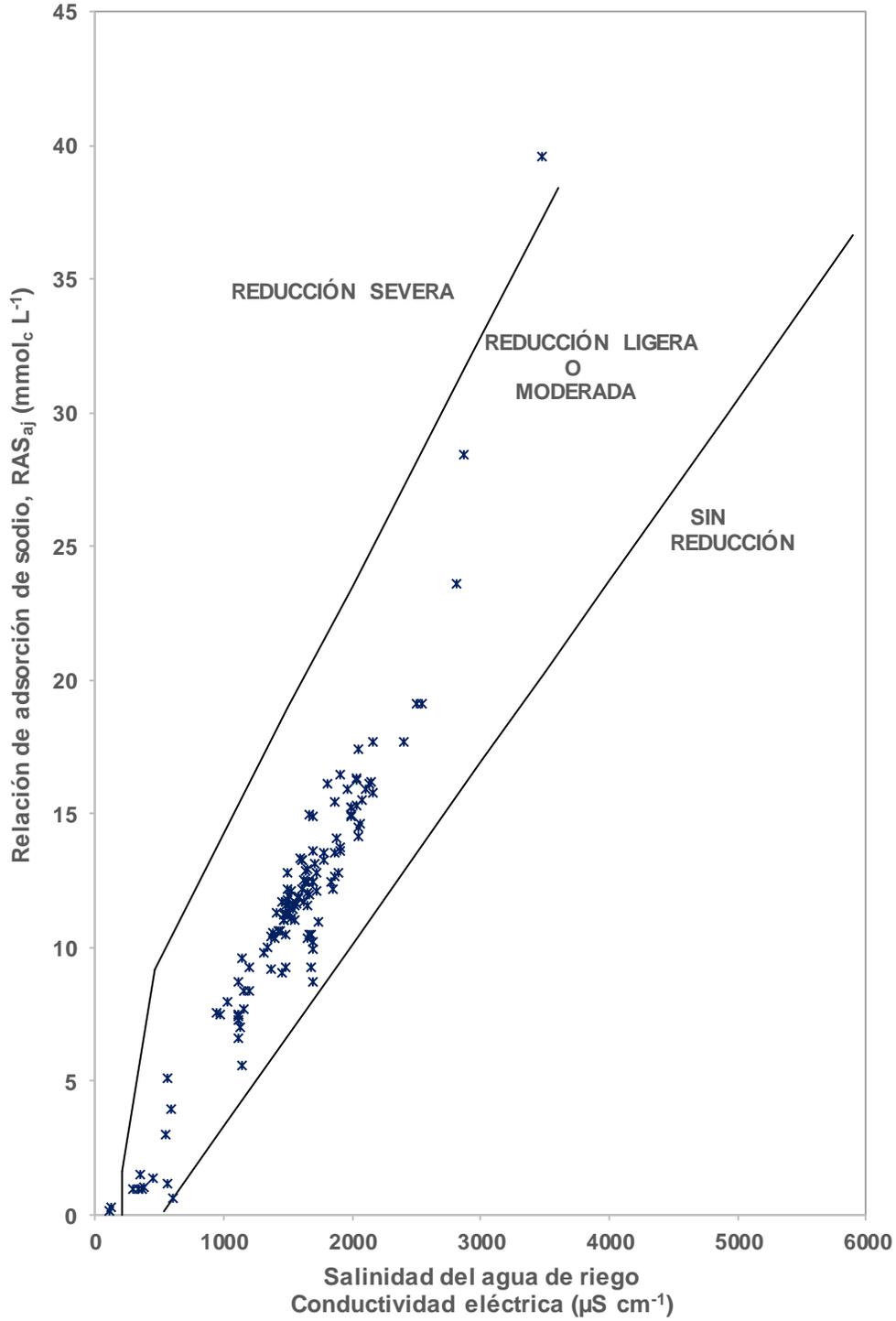


Figura 22. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio ajustada de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale. RAS<sub>ajustada</sub>-CE.

#### 6.7.4 Carbonato de sodio residual

Se calcularon los valores de CSR de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale, y se clasificaron en tres clases (Cuadro 26). Los valores obtenidos se concentran de manera gráfica en la Figura 23.

A manera de resumen, el Cuadro 25 presenta la cantidad de muestras que corresponden a cada clase de CSR.

Los contenidos de CSR menores a  $1.25 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  en 63 muestras de aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan, indican que son aguas “buenas” para riego, mientras que 51 muestras se identifican como “condicionadas” para el riego. Por otro lado, los contenidos de CSR mayores a  $2.5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  en 6 muestras de aguas residuales, indican que son aguas “no recomendables”

Cuadro 25. Resumen de la clasificación de acuerdo con el carbonato de sodio residual de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

Carbonato de sodio residual ( $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ )	Clase	Número de muestras		
		Red Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán	Red Tamazunchale	Total
< 1.25	Buena	63	10	73
1.25 a 2.5	Condicionada	51	0	51
> 2.5	No recomendable	6	0	6

La zona identificada como red Tamazunchale indica que las 10 muestras de agua son “buenas” para el riego agrícola.

Cuadro 26. Clasificación de acuerdo con el carbonato de sodio residual de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

No. muestra	Carbonato de sodio residual	
	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Clasificación
1	0.30	B - BUENA
2	2.17	C - CONDICIONADA
3	0.80	B - BUENA
4	1.11	B - BUENA
5	3.57	NR - NO RECOMENDABLE
6	1.37	C - CONDICIONADA
7	1.35	C - CONDICIONADA
8	1.65	C - CONDICIONADA
9	1.59	C - CONDICIONADA
10	0.32	B - BUENA
11	1.37	C - CONDICIONADA
12	1.66	C - CONDICIONADA
13	1.89	C - CONDICIONADA
14	1.68	C - CONDICIONADA
15	1.64	C - CONDICIONADA
16	1.40	C - CONDICIONADA
17	1.49	C - CONDICIONADA
18	1.02	B - BUENA
19	1.44	C - CONDICIONADA
20	-0.93	B - BUENA
21	1.69	C - CONDICIONADA
22	1.74	C - CONDICIONADA
23	1.62	C - CONDICIONADA
24	1.98	C - CONDICIONADA
25	1.85	C - CONDICIONADA
26	1.58	C - CONDICIONADA
27	0.07	B - BUENA
28	1.54	C - CONDICIONADA
29	1.70	C - CONDICIONADA
30	1.72	C - CONDICIONADA
31	1.41	C - CONDICIONADA
32	1.15	B - BUENA
33	1.87	C - CONDICIONADA
34	1.22	B - BUENA
35	1.10	B - BUENA
36	1.60	C - CONDICIONADA
37	0.62	B - BUENA
38	1.23	B - BUENA
39	1.02	B - BUENA
40	1.12	B - BUENA
41	1.96	C - CONDICIONADA
42	1.90	C - CONDICIONADA
43	1.54	C - CONDICIONADA
44	1.51	C - CONDICIONADA
45	0.56	B - BUENA
46	-1.18	B - BUENA
47	0.08	B - BUENA
48	1.08	B - BUENA
49	1.62	C - CONDICIONADA
50	1.70	C - CONDICIONADA

... Cuadro 26.

No. muestra	Carbonato de sodio residual	
	mmol. L <sup>-1</sup>	Clasificación
51	1.32	C - CONDICIONADA
52	1.68	C - CONDICIONADA
53	0.00	B - BUENA
54	1.38	C - CONDICIONADA
55	2.51	NR - NO RECOMENDABLE
56	2.42	C - CONDICIONADA
57	1.55	C - CONDICIONADA
58	1.60	C - CONDICIONADA
59	1.71	C - CONDICIONADA
60	1.06	B - BUENA
61	1.60	C - CONDICIONADA
62	2.02	C - CONDICIONADA
63	0.68	B - BUENA
64	0.34	B - BUENA
65	0.70	B - BUENA
66	2.07	C - CONDICIONADA
67	0.52	B - BUENA
68	1.38	C - CONDICIONADA
69	1.68	C - CONDICIONADA
70	0.72	B - BUENA
71	0.86	B - BUENA
72	1.70	C - CONDICIONADA
73	1.22	B - BUENA
74	1.02	B - BUENA
75	1.14	B - BUENA
76	0.85	B - BUENA
77	0.53	B - BUENA
78	2.18	C - CONDICIONADA
79	0.21	B - BUENA
80	0.82	B - BUENA
81	2.64	NR - NO RECOMENDABLE
82	0.55	B - BUENA
83	0.10	B - BUENA
84	1.00	B - BUENA
85	0.51	B - BUENA
86	0.85	B - BUENA
87	0.63	B - BUENA
88	2.15	C - CONDICIONADA
89	2.00	C - CONDICIONADA
90	4.66	NR - NO RECOMENDABLE
91	0.86	B - BUENA
92	2.42	C - CONDICIONADA
93	1.68	C - CONDICIONADA
94	9.90	NR - NO RECOMENDABLE
95	0.61	B - BUENA
96	1.09	B - BUENA
97	0.8	B - BUENA
98	0.02	B - BUENA
99	1.07	B - BUENA
100	1.10	B - BUENA
101	2.52	NR - NO RECOMENDABLE

... Cuadro 26.

No. muestra	Carbonato de sodio residual	
	mmol. L <sup>-1</sup>	Clasificación
102	0.63	B - BUENA
103	-0.99	B - BUENA
104	0.36	B - BUENA
105	-0.25	B - BUENA
106	-0.44	B - BUENA
107	-1.62	B - BUENA
108	0.26	B - BUENA
109	0.84	B - BUENA
110	2.50	C - CONDICIONADA
111	1.06	B - BUENA
112	1.23	B - BUENA
113	0.58	B - BUENA
114	-1.68	B - BUENA
115	1.05	B - BUENA
116	0.57	B - BUENA
117	1.43	C - CONDICIONADA
118	-2.21	B - BUENA
119	0.00	B - BUENA
120	1.00	B - BUENA
121	0.05	B - BUENA
122	-1.41	B - BUENA
123	-0.04	B - BUENA
124	0.05	B - BUENA
125	0.21	B - BUENA
126	0.14	B - BUENA
127	0.93	B - BUENA
128	0.04	B - BUENA
129	-0.52	B - BUENA
130	1.05	B - BUENA
<hr/>		
MEDIANA	1.11	
MEDIA	1.11	
MODA	1.37	
DESV. EST.	1.241	
MÍNIMO	-2.21	
MÁXIMO	9.90	

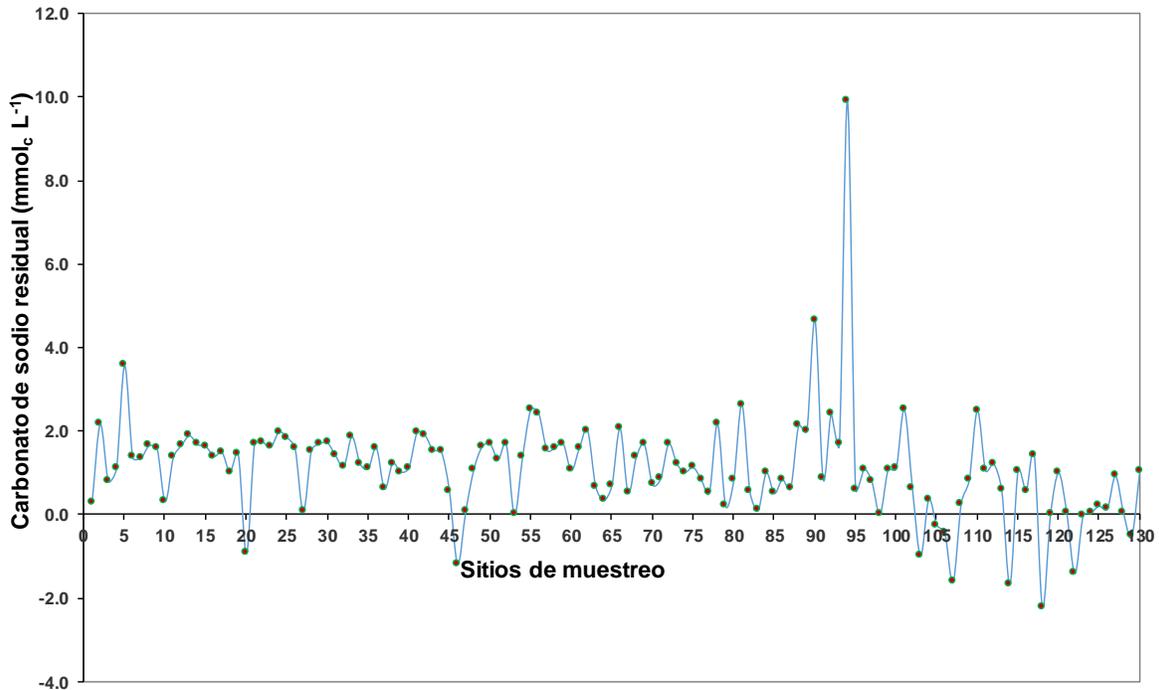


Figura 23. Distribución de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ( $\text{mmolc L}^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

## 6.8 Clasificación de las aguas residuales con base en la toxicidad específica de los iones

Derivado del análisis de boro, sodio, cloruros y sulfatos, se presenta la clasificación que corresponde a cada ion.

### 6.8.1 Contenido de boro en las aguas residuales

En el muestreo de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale, la variación del contenido de boro fluctuó entre 0 y  $1.95 \text{ mg L}^{-1}$ , con un promedio de  $0.86 \text{ mg L}^{-1}$ , y se presenta la distribución en la Figura 24.

De acuerdo con el contenido de boro, 110 muestras son clasificadas como aguas “condicionadas”, y únicamente 20 muestras son aguas clasificadas como “buenas”

para riego (Cuadro 27). Las aguas clasificadas como condicionadas representan el 84.6% del total de las muestras, e indican que deberá prestarse atención a la sensibilidad de los cultivos de la región. Es importante mencionar que, de todos los sitios de muestreo, al momento de clasificar las aguas según el contenido de boro, hubo ausencia de aguas “no recomendables”.

Cuadro 27. Resumen de la clasificación de acuerdo con el contenido de boro de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

Contenido de boro ( mg L <sup>-1</sup> )	Clase	Número de muestras		
		Red Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán	Red Tamazunchale	Total
< 0.3	Buena	11	9	20
0.3 a 4.0	Condicionada	109	1	110
> 4.0	No recomendable	0	0	0

En el caso de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, destaca el sitio del Río Tula-Ixmiquilpan que reportó el valor máximo de boro (1.95 mg L<sup>-1</sup>), seguido del Canal de tierra-2 entrada a El Salvador con 1.48 mg L<sup>-1</sup>. Los puntos de muestreo Salida Gran Canal Tequixquiac, Canal de tierra Tequixquiac (canal del puerco), y Canal de tierra Las Vías (presa Endhó) reportaron 1.41 mg L<sup>-1</sup> de boro. El resto de los sitios registró valores inferiores o iguales a 1.37 mg L<sup>-1</sup>, mismos que se presentan en el Cuadro 28.

Así mismo, para las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, cinco sitios no reportaron presencia de boro: Emisor norte (Laguna de Zumpango), Río Maconí, Presa Dolores, La Gloria (río), Pozo artesiano El Salvador (CAAMSSH).

En el caso de las aguas identificadas como red hidrográfica Tamazunchale, se encontraron siete sitios sin presencia de boro: Río Amajac (Tamazunchale), Río Claro (Tamazunchale), Río Tultitlán, Río San Felipe Orizatlán (Hidalgo), Molango (Laguna Atezca), Cascada antes de río Venado (cerca de Zacualtipán) y Río Venado (Metztitlán).

Cuadro 28. Clasificación de acuerdo con el contenido de boro de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

No. muestra	Boro	
	mg L <sup>-1</sup>	Clasificación
1	0.00	B - BUENA
2	0.61	C - CONDICIONADA
3	0.14	B - BUENA
4	1.37	C - CONDICIONADA
5	0.07	B - BUENA
6	1.30	C - CONDICIONADA
7	1.33	C - CONDICIONADA
8	1.33	C - CONDICIONADA
9	1.26	C - CONDICIONADA
10	1.41	C - CONDICIONADA
11	1.41	C - CONDICIONADA
12	0.86	C - CONDICIONADA
13	1.01	C - CONDICIONADA
14	1.12	C - CONDICIONADA
15	1.15	C - CONDICIONADA
16	0.94	C - CONDICIONADA
17	0.86	C - CONDICIONADA
18	1.08	C - CONDICIONADA
19	1.05	C - CONDICIONADA
20	0.14	B - BUENA
21	1.37	C - CONDICIONADA
22	1.15	C - CONDICIONADA
23	1.08	C - CONDICIONADA
24	1.37	C - CONDICIONADA
25	1.15	C - CONDICIONADA
26	1.23	C - CONDICIONADA
27	1.12	C - CONDICIONADA
28	1.33	C - CONDICIONADA
29	1.19	C - CONDICIONADA
30	1.23	C - CONDICIONADA
31	0.83	C - CONDICIONADA
32	1.23	C - CONDICIONADA
33	1.23	C - CONDICIONADA
34	1.41	C - CONDICIONADA
35	1.33	C - CONDICIONADA
36	0.90	C - CONDICIONADA
37	1.12	C - CONDICIONADA
38	1.23	C - CONDICIONADA
39	0.90	C - CONDICIONADA
40	1.08	C - CONDICIONADA
41	0.83	C - CONDICIONADA
42	0.83	C - CONDICIONADA
43	1.05	C - CONDICIONADA
44	0.79	C - CONDICIONADA
45	1.15	C - CONDICIONADA
46	0.00	B - BUENA
47	0.86	C - CONDICIONADA
48	0.94	C - CONDICIONADA
49	1.30	C - CONDICIONADA

... Cuadro 28.

No. muestra	Boro	
	mg L <sup>-1</sup>	Clasificación
50	0.97	C - CONDICIONADA
51	0.25	B - BUENA
52	0.94	C - CONDICIONADA
53	0.72	C - CONDICIONADA
54	1.01	C - CONDICIONADA
55	1.15	C - CONDICIONADA
56	1.48	C - CONDICIONADA
57	1.05	C - CONDICIONADA
58	0.61	C - CONDICIONADA
59	0.00	B - BUENA
60	1.26	C - CONDICIONADA
61	0.79	C - CONDICIONADA
62	1.01	C - CONDICIONADA
63	0.94	C - CONDICIONADA
64	1.12	C - CONDICIONADA
65	0.90	C - CONDICIONADA
66	1.33	C - CONDICIONADA
67	0.94	C - CONDICIONADA
68	0.86	C - CONDICIONADA
69	1.12	C - CONDICIONADA
70	0.83	C - CONDICIONADA
71	0.86	C - CONDICIONADA
72	0.86	C - CONDICIONADA
73	0.86	C - CONDICIONADA
74	0.83	C - CONDICIONADA
75	1.05	C - CONDICIONADA
76	0.83	C - CONDICIONADA
77	0.68	C - CONDICIONADA
78	0.86	C - CONDICIONADA
79	0.47	C - CONDICIONADA
80	0.86	C - CONDICIONADA
81	0.76	C - CONDICIONADA
82	0.83	C - CONDICIONADA
83	0.97	C - CONDICIONADA
84	0.90	C - CONDICIONADA
85	0.79	C - CONDICIONADA
86	0.72	C - CONDICIONADA
87	0.97	C - CONDICIONADA
88	0.83	C - CONDICIONADA
89	0.97	C - CONDICIONADA
90	1.08	C - CONDICIONADA
91	0.68	C - CONDICIONADA
92	0.86	C - CONDICIONADA
93	1.08	C - CONDICIONADA
94	0.90	C - CONDICIONADA
95	1.05	C - CONDICIONADA
96	1.01	C - CONDICIONADA
97	0.94	C - CONDICIONADA
98	0.76	C - CONDICIONADA
99	0.18	B - BUENA

... Cuadro 28.

No. muestra	Boro	
	mg L <sup>-1</sup>	Clasificación
100	1.19	C - CONDICIONADA
101	0.90	C - CONDICIONADA
102	0.22	B - BUENA
103	1.19	C - CONDICIONADA
104	0.97	C - CONDICIONADA
105	0.94	C - CONDICIONADA
106	0.86	C - CONDICIONADA
107	1.33	C - CONDICIONADA
108	1.01	C - CONDICIONADA
109	0.79	C - CONDICIONADA
110	0.86	C - CONDICIONADA
111	1.19	C - CONDICIONADA
112	0.90	C - CONDICIONADA
113	1.95	C - CONDICIONADA
114	0.00	B - BUENA
115	0.86	C - CONDICIONADA
116	0.94	C - CONDICIONADA
117	0.72	C - CONDICIONADA
118	0.36	C - CONDICIONADA
119	0.00	B - BUENA
120	0.65	C - CONDICIONADA
121	0.00	B - BUENA
122	0.00	B - BUENA
123	0.00	B - BUENA
124	0.00	B - BUENA
125	0.00	B - BUENA
126	0.04	B - BUENA
127	0.32	C - CONDICIONADA
128	0.00	B - BUENA
129	0.00	B - BUENA
130	0.29	B - BUENA
MEDIANA	0.92	C - CONDICIONADA
MEDIA	0.86	C - CONDICIONADA
MODA	0.86	C - CONDICIONADA
DESV. EST.	0.408	
MÍNIMO	0.00	
MÁXIMO	1.95	

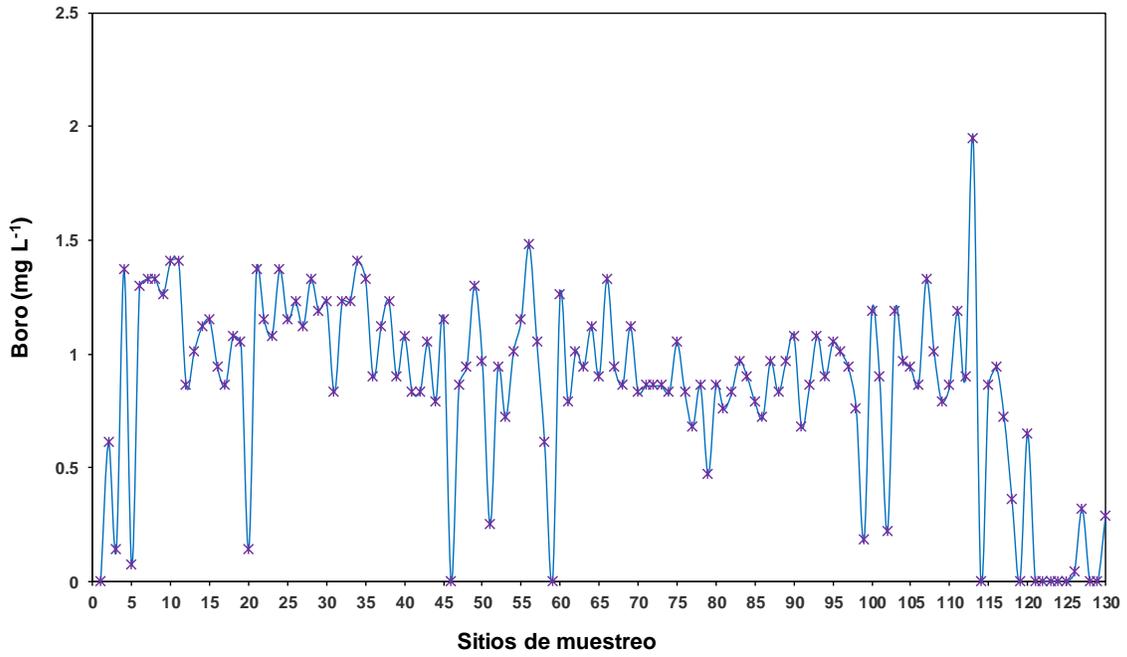


Figura 24. Distribución de acuerdo con el contenido de boro (mg L<sup>-1</sup>) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

### 6.8.2 Sodio en % del total de cationes

Para mostrar la presencia del ión  $\text{Na}^+$  en las aguas muestreadas, se utilizó el porcentaje de sodio soluble (PSS), expresado como porcentaje del total de cationes solubles.

En el muestreo de las aguas residuales, la variación del contenido de sodio fluctuó entre 0.29 y 29.14  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , con un promedio de 9.9  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , que expresado en % del total de cationes y tomando en cuenta la conductividad eléctrica, se clasificó a las aguas en cinco clases (Cuadro 29), y la distribución se presenta en la Figura 25.

La presencia del ión sodio expresada en porcentaje del total de cationes, es considerable, ya que 119 muestras reportaron al sodio como ion predominante (mayor al 50% del total de cationes determinados). Esta situación implica que se debe prestar más atención a la zona del Valle del Mezquital, en cuanto a sales solubles, debido a que en verano se encontraron cantidades relevantes del sodio.

Se encontró que 85 muestras tienen de 60 a 70% de sodio en relación al total de cationes determinado.

Cuadro 29. Resumen de la clasificación de acuerdo con el contenido de sodio (expresado en % del total de cationes) y la CE de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

Clase	Número de muestras
Excelente a Buena	12
Buena a Admisible	4
Admisible a Dudosa	95
Dudosa a No válida	18
No válida	1

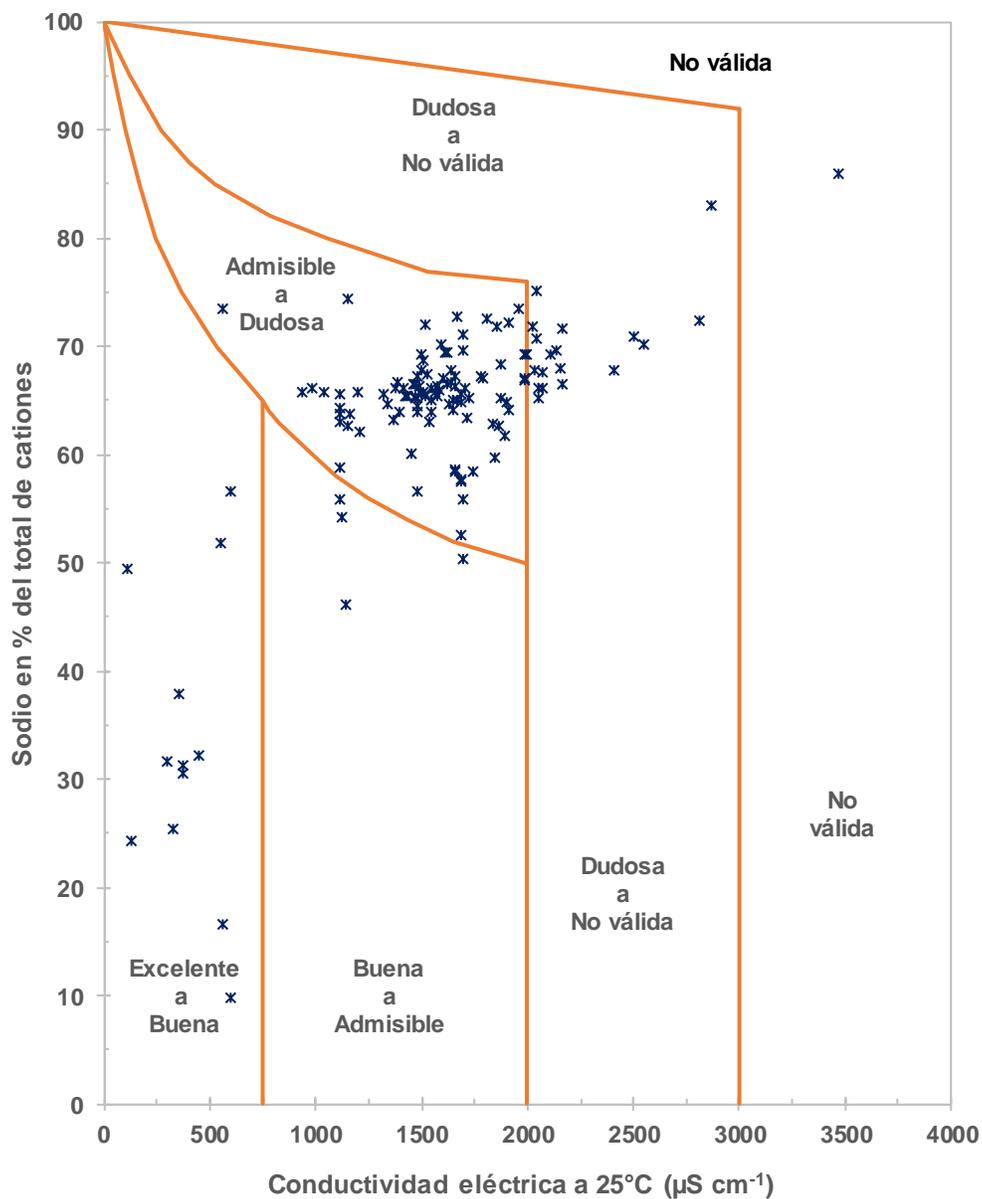


Figura 25. Diagrama de clasificación de acuerdo con la presencia del ión sodio expresada en % del total de cationes y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

En la relación funcional  $\text{mg L}^{-1} = a\text{Ce}$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), que describe CE y STD de las aguas muestreadas, el valor del coeficiente fue  $a=0.6479$ , que corresponde a aguas con altos contenidos de bicarbonatos.

De acuerdo a la clasificación por CE, el 8.5% de las aguas muestreadas se ubican en clase C2, identificadas como “aguas de salinidad media”, mientras que el 85.4% de las aguas se encuentran en clase C3, clasificadas como “aguas altamente salinas”.

En la relación funcional de la presión osmótica y la CE para las aguas muestreadas  $\text{PO(atm)} = a\text{CE}$  ( $\text{mS cm}^{-1}$ ), el valor de la pendiente de la recta fue de  $a=0.4259$  cuando la CE se expresa en  $\text{mS cm}^{-1}$  y la PO en atmósferas.

Los valores de RAS en las diferentes formulaciones, con respecto a los valores de la CE, se desplazan a otros grupos de clasificación. Los valores de la  $\text{RAS}_{aj}$  son superiores a los valores de la  $\text{RAS}_{or}$  y  $\text{RAS}^0$ , y para efectos de predicción, permite conocer los valores máximos de la RAS que puede alcanzar el agua en determinadas condiciones físico-químicas.

Los contenidos de CSR menores a  $1.25 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  en 73 muestras de agua indican que son aguas “buenas” para riego, mientras que 51 muestras se identifican como “condicionadas” para el riego. Por otro lado, los contenidos de CSR mayores a  $2.5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  en 6 muestras, indican que son aguas “no recomendables”

De acuerdo con el contenido de boro, las aguas de 110 sitios muestreados son clasificadas como “aguas condicionadas”, y únicamente 20 muestras son “aguas

buenas” para riego.

En lo relacionado a cationes, el ión sodio expresado en porcentaje del total de cationes, es considerable ya que 119 muestras lo reportaron como ion predominante (mayor al 50% del total de cationes medidos).

## **7.2 Recomendaciones**

Un parámetro de evaluación del uso de las aguas de riego es el nivel en que el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), se encuentra en el suelo debido a procesos de adsorción del sodio de las aguas de riego en el complejo de intercambio catiónico de suelos. Por lo tanto, se recomienda determinar experimentalmente los valores del coeficiente de selectividad iónica de Gapon para los diferentes suelos que existen en la región de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán.

Por otro lado, se debe continuar con los trabajos de caracterización físico-química de las aguas de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, para identificar las variaciones iónicas y sus efectos en el suelo, ya que la mayoría de estas aguas son utilizadas para riego de cultivos.

## 8. LITERATURA CITADA

**Aceves N., E., y O. Palacios V.** 1970. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. Colegio de Postgraduados, Chapingo.

**Amrhein, C., and D. L. Suarez.** 1991. Sodium-calcium exchange with anion exclusion and weathering corrections. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:698-706.

**Antipov-Karataev, I. N.** 1967. Reclamation of solonetz soils in the USSR. Israel. Program for scientific Translation. Jerusalén.

**APHA.** 1995. Standard methods for examination of water and wastewater. APHA (American Public Health Association), WWA (American Water Works Association), WPCF (Water Pollution Control Federation), Washington D.C., USA. 1035 pp.

**Arora, Y., and N. T. Singh.** 1980. Effect of amount of leaching water and method of calcium application on the reclamation of a saline sodic soil. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 28(2):219-222.

**Ayers, R. S., y D. W. Westcot.** 1987. La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO, Riego y Drenaje 29 Rev. 1. Traducido al español por J. F. Alfaro de: *Water quality and use in agriculture.* Roma, Italia. p. 1-81

**Bernstein, L., and L. E. Francois.** 1973. Leaching requirement studies. Sensitivity of alfalfa to salinity or irrigation and drainage waters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37:931-943.

**Bhardwaj, A. K., U. K. Mandal, A. Bar-Tal, A. Gilboa, and G. J. Levy.** 2008. Replacing saline-sodic irrigation water with treated wastewater: effects on saturated hydraulic conductivity, slaking, and swelling. *Irrig. Sci.* 26:139-146.

**Bower, C. A.** 1959. Cation-exchange equilibria in soils affected by sodium salts. *Soil Sci.* 88:32-35.

**Bower, C. A., and J. O. Goertzen.** 1955. Negative adsorption of salts by soils. *Soil Sci. Soc. Proc.* 19:147-151.

**Bower, C. A., G. Ogata, and J. M. Tucker.** 1968. Sodium Hazard of Irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation or solution of calcium carbonate. *Soil Sci.* 106(1):29-34.

**Bower**, C. A., L. V. Wilcox, G. W. Akin, and M. G. Keyes. 1965. An index of the tendency of  $\text{CaCO}_3$  to precipitation from irrigation waters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29:91-92.

**Cepeda**, J. M. 2009. *Química de suelos*. Editorial Trillas. 167p.

**Cifuentes E.**, Bluentha U., G. Ruiz-Palacios, G. Bennett S., y A. Peasey. 1994. Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: el Valle del Mezquital, México. *Salud Pública*. 36(1):3-9.

**Comisión Nacional del Agua**. 1995. Propuesta para la creación del centro de estudios sobre uso de aguas residuales en el Valle del Mezquital. México, Distrito Federal. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México.

**Coras M.**, P. M. 2000. Calidad química del agua para riego. Universidad Autónoma Chapingo. Fitotecnia. Texcoco, Estado de México.

**Doering**, E. J., and W. O Willis. 1980. Effect of soil solution concentration on cation exchange relationships. *Proc. Inter. Symp. On Salt-affected soils*. Karnal, India.

**Doneen**, L. D. 1975. Water quality for irrigated Agricultural. *In*: A. Poljakoff, Mayber A., and J. Gale (Eds.). *Plant in saline environments*. Springer-Verlang. New York. U.S.A.

**Eaton**, F. M. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Sci.* 69:123-133.

**Endo**, T., S. Yamamoto, T. Honna, and E. Eneji. 2002. Sodium-calcium exchange selectivity as influenced by clays minerals and composition. *Soil Sci.* 167(2):117-125.

**Espino De la O.**, E. 1981. Reuse of municipal wastewater for industrial purposes in México City. Pp 75-88, *In*: F.M. D'itri, J. Aguirre y M. M. Athie (Editors). *Municipal wastewater in Agriculture*. Academic Press. New York.

**Evangelou**, V. P., and F. J. Coale. 1987. Dependence of de Gapon coefficient exchangeable sodium for mineralogically different soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:68-72.

**Evangelou**, V. P., and R. E. Phillips. 1987. Sensitivity analysis on the comparison between the Gapon and Vanselow exchange coefficients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1473-1479.

**Evangelou**, V. P., and M. Marsi. 2003. Influence of ionic strength on sodium-calcium exchange of two temperature climate soils. *Plan and Soil*. 259:307-313.

**Frenkel**, H., and N. J. Alperovitch. 1984. The effect of mineral weathering and soil solution concentration on ESR-SAR relationships of arid and semi-arid zone soils from Israel. *J of Soil Sci.* 35:367-372.

**Frenkel**, H. A., and W. A. Hadas. 1978. The effect of salt precipitation and high sodium concentrations on soil hydraulic conductivity and water retention. *Water Resour. Res.* 14:217-221.

**Gupta**, U. C., Y. W. Jame, C. A. Cambell, A. J. Leyshon, and W. Nicholaichuk. 1985. Boron toxicity and deficiency: a review. *Can. J. Soil Sci.* 65(3):381-409.

**Harron**, W. R. A., G. R. Webster, and R. R. Cairns. 1983. Relationship between exchangeable sodium and sodium adsorption ratio in a solonetzic soil association. *Can. J. Soil Sci.* 63:461-467.

**Harward**, M. E., and N. T. Coleman. 1953. Ion exchange equilibria on the presence of small amounts of electrolyte. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 17:339-342.

**Hoffman**, G. J., R. S. Ayers, E. J. Doering, and B. L. McNeal. 1990. Salinity in irrigated agriculture. Pp. 145-185. *In: Agricultural irrigation. Chapter 5. Agronomy monograph No. 30.* Madison.

**INEGI**. 1992. Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo, México.

**INIFAP**. 1990. Análisis de la problemática del agua y perspectivas para la modernización de su uso en la agricultura de Guanajuato. Centro de investigaciones forestales y agropecuarias de Guanajuato. Campo experimental bajío. Celaya, Guanajuato.

**James**, D. W., M. R. J. Hanks, and J. J. Jurinak. 1982. *Modern irrigated soils.* Wile-Interscience Publication. U.S.A.

**Jurinak**, J. J., and D. L. Suarez. 1990. The chemistry of salt-affected soils and waters. pp. 42-63. *In.* Tanji, K. K. (ed). *Agricultural salinity Assessment and management.* Chapter 3. ASCE. Manual and reports on engineering practice No. 71. Published by American Society of Civil Engineers. New York. U.S.A.

**Jurinak**, J. J., C. Amrhein, and R. J. Wagenet. 1984. Sodic hazard: the effect of SAR and salinity and overburden materials. *Soil Sci.* 138(3):142-159.

**Kaledhonkar**, M. J., A. K. Keshari, and S. E. A. T. M. Van Der Zee. 2006. Relative sensitive of ESP profile to spatial and temporal variability in cation exchange capacity and pore water velocity under simulated field conditions. *Agric. Water Manage.* 83(172):58-68.

**Kelley**, W. P. 1963. Use saline irrigation water. *Soil Sci.* 95:395-391.

**Kopittkek**, P. M., H. B. So, and N. Menzies. 2006. Effect of ionic strength and clay mineralogy on Na-Ca exchangeable and the SAR-ESP relationship. *Euro. J. Soil Sci.* 57:623-633.

**Kovda**, V. A., C. Vanden Berg C., and R. M. Hogan. 1967. International source book on irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity. FAO/UNESCO.

**Kumar**, U. M., A. K. Bhardwaj, D. N. Warrington, D. Goldstein, A. T. Bar, and G. J. Levy. 2008. Changes in soil hydraulic conductivity, runoff, and soil loss due to irrigation with different types of saline-sodic water. *Geoderma.* 144:509-516.

**Langelier**, W. F. 1936. The analytical control of anti-corrosion water treatment. *J. Am. Water Works Assn.* 28(10):1500-1521.

**Läuchli**, A., and E. Epstein. 1990. Plant responses to saline and sodic conditions. Pp. 42-63. *In*: Tanji, K. K. (ed.). *Agricultural salinity assessment and management*. Chapter 6. ASCE. Manual and reports on engineering practice No. 71. Published by American society of civil engineers. New York. U.S.A.

**Levy**, R., J. Shalhevet, and N. Alperovitch. 1972. Selectivity coefficients of Ca-Mg exchange for three montmorillonitic soils. *Geoderma.* 8:133-138.

**López G.**, A. D., H. M. Ortega E., E. I. Sánchez B., A. Can C., D. J. Gómez M., y R. E. Vázquez A. 2016. Caracterización fisicoquímica del agua residual urbano-industrial y su importancia en la agricultura. *Tecnología y Ciencias del Agua.* 7(6):139-157.

**Maas**, E. V., and G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerant-current assessment. *J. Irri. Drain. Div. ASCE.* 103:115-134.

**Malagón**, D. 1975. Mineralogía de los suelos: sus relaciones con génesis, fertilidad y clasificación de suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. Bogotá D.C. 828p.

**Martínez**, J. 1986. Drenaje agrícola. Volumen 1. Edición del ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Madrid, España.

**McNeal**, B. L. 1968. Prediction of the effect of mixed-salt solutions on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:190-193.

**McNeal**, B. L., D. A. Layfield, W. A. Norvell, and J. D. Rhoades. 1968. Factors influencing hydraulic conductivity of soils in the presence of mixed-salt solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 32:187-190.

**Minhas**, P. S., R. K. Naresh, C. P. S. Chauhan, and R. K. Gupta. 1994. Field determined hydraulic properties of a sandy loam soil irrigated with various salinity and SAR. *Agric. Water Manage.* 25:97-108.

**Méndez R.**, I., D. Namihira G., L. Moreno A., y C. Sosa de M. 1990. El protocolo de investigación; lineamientos para su elaboración y análisis. 2a ed. México, Trillas, 210 p.

**Mendoza S.**, I. 2009. Calidad de las aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

**Mendoza S.**, I., H. M. Ortega E., y M. R. Romero L. 2016. Relación de adsorción de sodio en los suelos agrícolas del Valle del Mezquital regados con aguas residuales. *Rev. Ing., y Tecnol. Des. Sust.* 1:33-37.

**Munns**, R., and M. Tester. 2008. Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59:651-681.

**Nadler**, A., and M. Magaritz. 1981. Expected deviations from the ESP-SAR empirical relationships in calcium and sodium-carbonate-containing arid soils: field evidence. *Soil Sci.* 131(4):220-225.

**Ortega E.**, M. 1993. Causas del ensalitramiento y su efecto sobre los suelos. Colegio de Postgraduados. Centro de Hidrociencias. Montecillo, Estado de México.

**Oster**, J. D., and G. Sposito. 1980. The Gapon coefficient and the exchangeable sodium percentage-sodium adsorption ratio relation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:258-260.

**Ould Ahmed**, B. A., T. Yamamoto, V. Rasiah, M. Inoue, and H. Anyoji. 2007. The impact of saline water irrigation management options in dune sand on available soil water and its salinity. *Agric. Water Manage.* 88:63-72.

**Pal**, B., and B. R. Tripathi. 1982. Effect of EC and SAR of water on wheat and barley grown on different textured soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 30(3):421-423.

**Pal**, B., and U. V. Singh. 1985. Effect of phosphorus on yield and nutrient content in berseem (*Trifolium alexandrinum* L.) irrigated with saline waters. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 33:646-653.

**Paliwai**, K. V., and A. P. Gandhi. 1976. Effect of salinity, SAR, Ca:Mg ratio in irrigation water, and soil texture on the predictability of exchangeable sodium percentage. *Soil Sci.* 122:85-90.

**Pescod**, M. B. 1992. Wastewater treatment and use in agricultural. Pp. 114-117. Irrigation and drainage. Paper 47. FAO. Rome.

**Pizarro**, F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Segunda edición. Editorial Agrícola Española. Madrid, España.

**Pratt**, P. F., L. D. Whittig, and B. L. Grover. 1962. Effect of pH on the sodium-calcium exchange equilibria in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 26:227-230.

**Rao**, T. S., A. L. Page, and N. T. Coleman. 1968. The influence of ionic strength and ion-pair formation between alkaline earth metals and sulfate on Na-divalent cation-exchange equilibria. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 32:639-643.

**Rhoades**, J. D., and D. B. Krueger. 1968. Extraction of cations from silicate mineral during the determination of exchange cations in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 32:488-492.

**Rhoades**, J. D., A. Kandiah, and A. M. Mashali. 1992. The use of saline waters for crop production. FAO. Irrigation and Drainage Paper No. 58. Rome.

**Rhue**, R. D., and R. S. Mansell. 1988. The effect of pH on sodium-calcium and potassium-calcium exchange selectivity for Cecil soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:641-647.

**Richards**, L. A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos: Manual No. 60. Sexta reimpresión. Departamento de Agricultura de los EE. UU., Laboratorio de Salinidad. Editorial Limusa. México. 172 p.

**Salinity Laboratory Staff, U.S.** 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U. S. Dept. Agric. Handbook 60. U. S. Washington, DC.

**Sharma**, D. R., and P. S. Minhas. 1998. Effect of irrigation with sodic waters of varying EC, RSC and SAR<sub>adj</sub>, SAR on soil properties and yield of cotton-wheat. J. Indian Soc. Soil Sci. 46(1):116-119.

**Silva**, J., P. Torres, y C. Madera. 2008. Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura, una revisión. Agronomía Colombiana 26(2):347-359.

**Singh**, R. B., P. S. Minhas, C. P. S. Chauhan, and R. K. Gupta. 1992. Effect of high salinity and SAR waters on salinization, sodication and yields of pearl-millet and wheat. Agric. Water Manage. 21:93-105.

**Secretaría de Recursos Hidráulicos**, S. R. H. 1971. Presencia del Boro en las aguas negras de la ciudad de México. México.

**Sposito, G.** 1977. The Gapon and Vanselow selecting coefficients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:1205-1206.

**Suarez, D. L.** 1981. Relationship between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 469-474.

**Suarez, D. L., J. D. Wood, and S. M. Lesch.** 2006. Effect of SAR on water infiltration under a sequential reain-irrigation management system. *Agric. Water Manage.* 8:150-164.

**Tedeschi, A., and R. D. Aquila.** 2005. Effects irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics. *Agric. Water Manage.* 77:308-322.

**Velásquez M., M. A.** 2001. Las variaciones de los procesos de adsorción de sodio en función de los diferentes valores de la relación de adsorción de sodio en las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan, Valle del Mezquital, Hgo. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Motecillo, Texcoco, Estado de México.

**Velásquez M., M. A., M. Ortega E., A. Martínez G., J. Kohashi S., y N. García C.** 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra.* 20(4):459-464.

**Verma, L.P.** 1983. Tolerance of Wheat to Boron in Irrigation Water. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 31:167-168.

**Wienhold, B. J., and T. P. Trooien.** 1998. Irrigation water effects on infiltration rate in northern great plains. *Soil Sci.* 163(11): 853-858.

**Wilcox, L. V., G. Y. Blair, and C. A. Bower.** 1954. Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation. *Soc. Soil Sci.* 77(4):259-266.

**Zuo, Y., L. Ren, F. Zhang, and R. F. Jiang.** 2007. Bicarbonate concentration as effect by soil water content controls iron nutrition of peanut plants in a calcareous soil. *Plant Physiol., and biochem.* 45:357-364.

## ANEXOS

### Residuo seco evaporado y residuo seco calcinado

**Anexo 1.** Composición del residuo seco evaporado y calcinado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

No. muestra	RSE ( $\text{mg L}^{-1}$ )	RSC ( $\text{mg L}^{-1}$ )
1	672	474
2	1096	760
3	410	286
4	1094	852
5	1760	1340
6	1092	784
7	1196	850
8	1152	826
9	1118	820
10	1118	806
11	1090	826
12	890	608
13	988	686
14	1026	736
15	1054	752
16	842	588
17	782	562
18	892	668
19	892	620
20	294	200
21	946	740
22	898	678
23	860	640
24	1112	816
25	890	676
26	852	638
27	1218	922
28	894	672
29	974	750
30	952	730
31	824	592
32	884	688
33	950	726
34	884	692
35	846	664
36	958	716
37	754	566
38	874	644
39	828	648
40	874	664

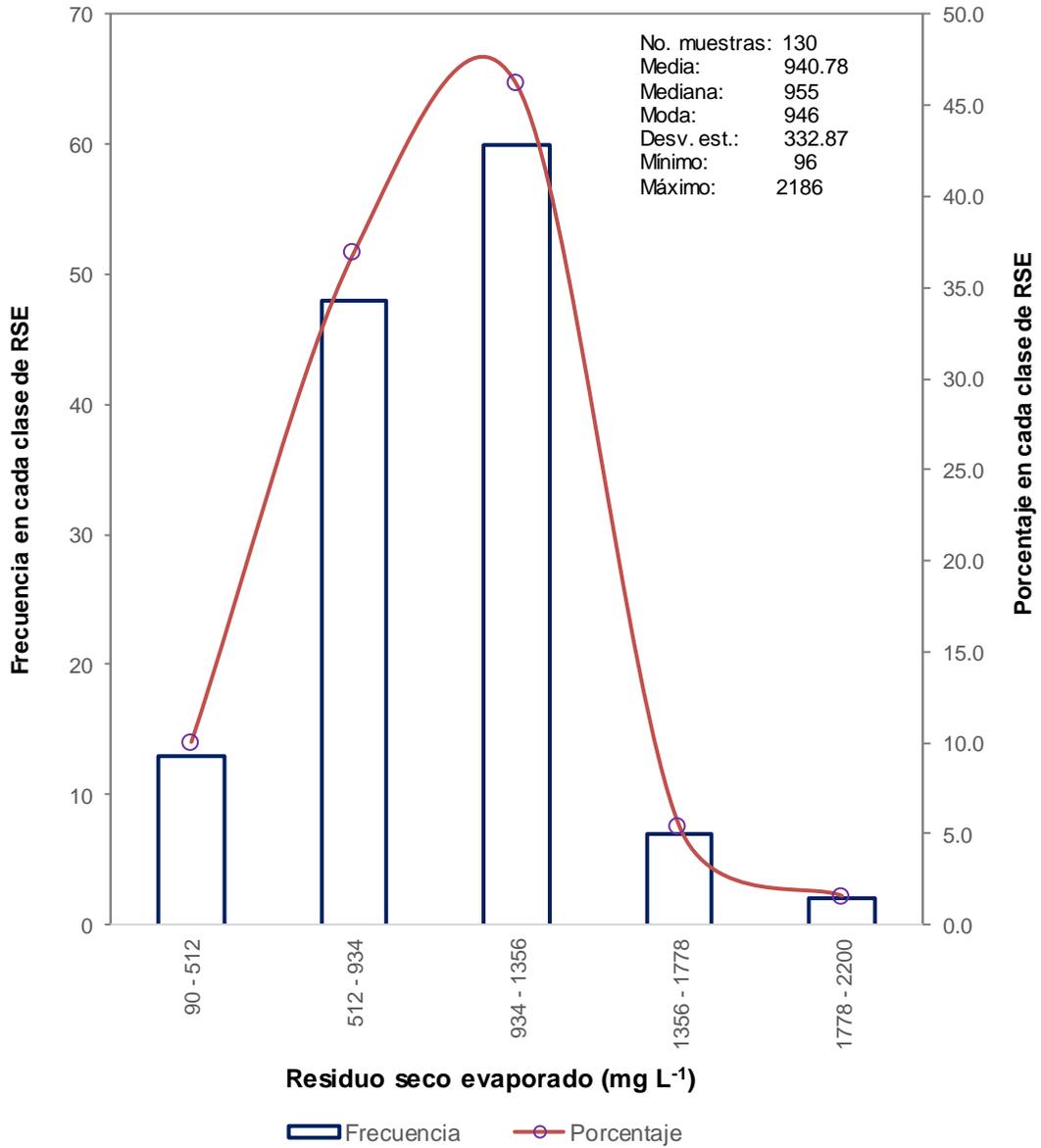
... Anexo 1.

<b>No. muestra</b>	<b>RSE (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>RSC (mg L<sup>-1</sup>)</b>
41	1500	644
42	928	688
43	970	738
44	896	664
45	880	682
46	290	204
47	872	650
48	890	702
49	1160	880
50	874	662
51	920	698
52	926	672
53	624	458
54	858	658
55	1420	1012
56	1238	944
57	832	590
58	1016	734
59	708	658
60	1282	986
61	1052	806
62	1254	936
63	1268	1006
64	866	640
65	1094	886
66	1172	882
67	1286	996
68	1086	812
69	1084	858
70	696	512
71	842	634
72	1054	826
73	690	522
74	696	528
75	702	516
76	992	742
77	602	428
78	1082	820
79	712	538
80	1238	1014
81	1256	1030
82	1076	812
83	1052	802
84	1048	768
85	1088	832
86	746	556
87	1078	822
88	1060	822
89	1060	820
90	1780	1450

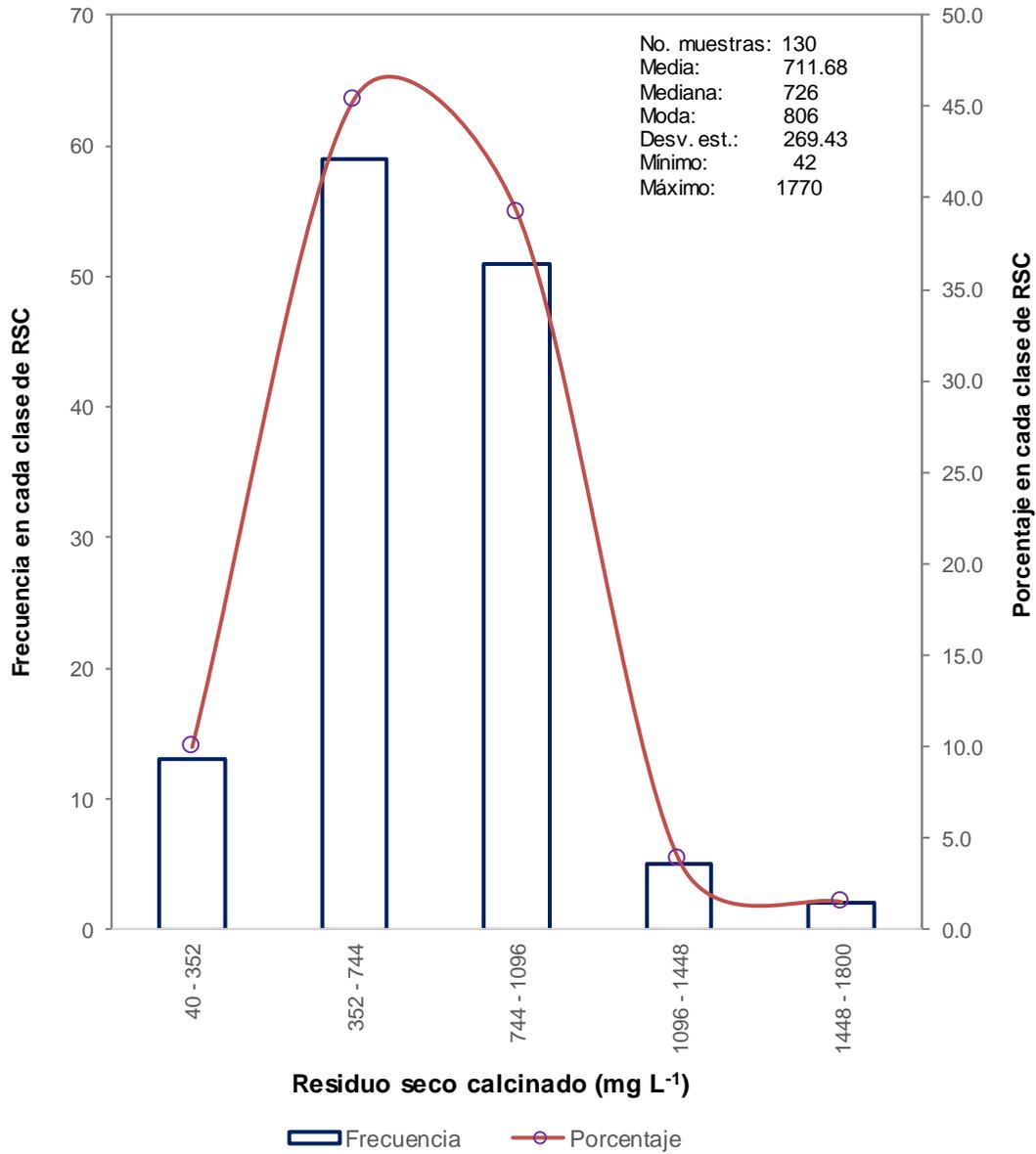
... Anexo 1.

<b>No. muestra</b>	<b>RSE (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>RSC (mg L<sup>-1</sup>)</b>
91	708	536
92	1216	998
93	1374	1128
94	2186	1770
95	1170	910
96	1204	1000
97	1300	926
98	322	230
99	600	462
100	1076	846
101	1054	816
102	630	476
103	1074	818
104	976	692
105	1068	818
106	1066	828
107	1080	824
108	1060	838
109	1008	772
110	1428	1232
111	1608	1314
112	1596	1332
113	1056	782
114	350	268
115	1106	888
116	1116	882
117	946	762
118	728	556
119	680	522
120	914	726
121	114	62
122	252	142
123	96	42
124	116	72
125	142	80
126	332	194
127	768	584
128	188	122
129	338	290
130	730	532
MEDIANA	955.00	726.0
MEDIA	940.78	711.7
MODA	946.00	806
DESV. EST.	332.8675	269.43
MÍNIMO	96.00	42.0
MÁXIMO	2186.00	1770.0

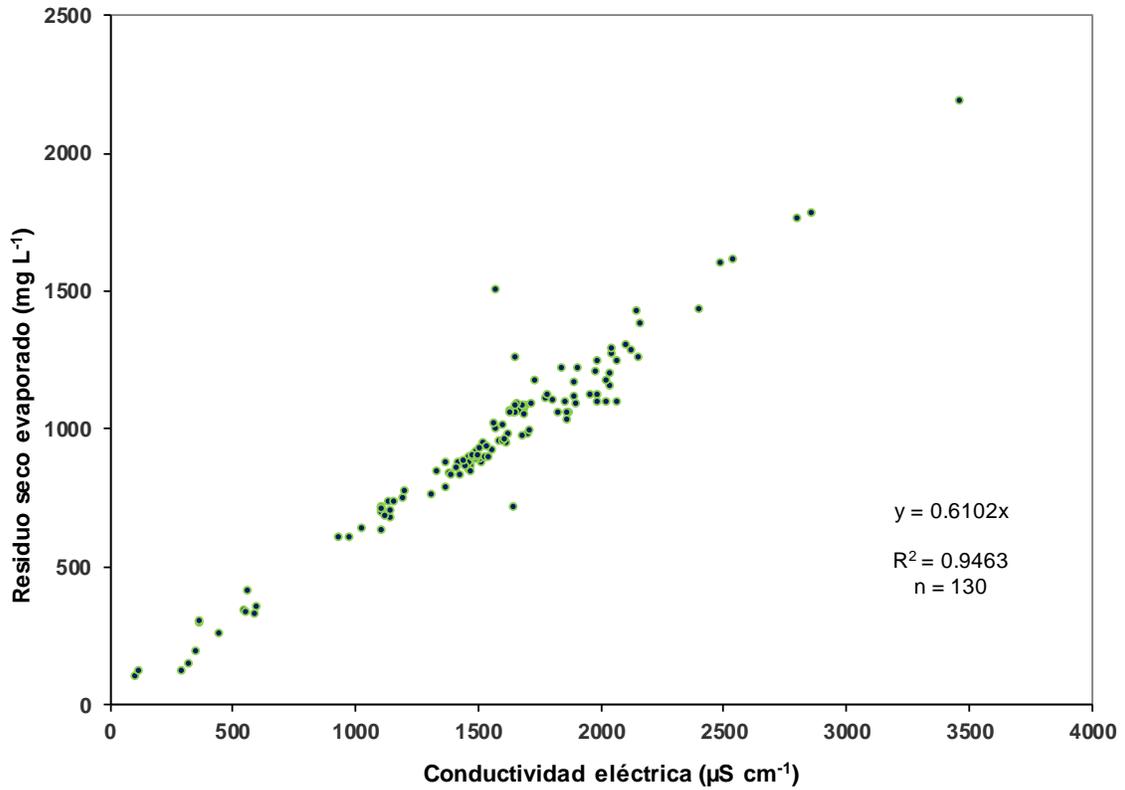
**Anexo 2.** Distribución de frecuencias con respecto al residuo seco evaporado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.



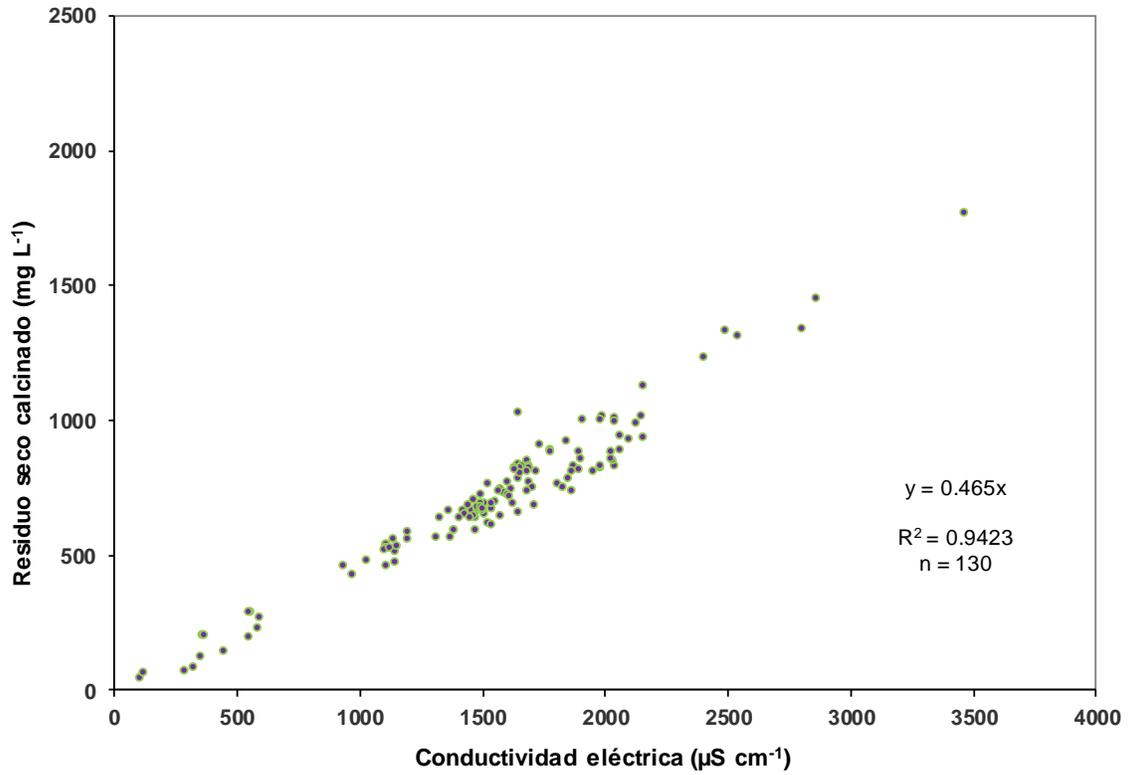
**Anexo 3.** Distribución de frecuencias con respecto al residuo seco calcinado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales muestreadas, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.



**Anexo 4.** Relación conjunta de la conductividad eléctrica experimental ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y el residuo seco evaporado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.



**Anexo 5.** Relación conjunta de la conductividad eléctrica experimental ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y el residuo seco calcinado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.



## Relación de los sólidos totales disueltos medidos con los calculados

**Anexo 6.** Relación conjunta de los STD medidos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y STD calculados ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale.

