



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**  
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**CALIDAD DE LAS AGUAS DEL SISTEMA**  
**HIDROGRÁFICO ZAHUAPAN-ATOYAC**

DAVID VINICIO CARRERA VILLACRÉS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. MEXICO

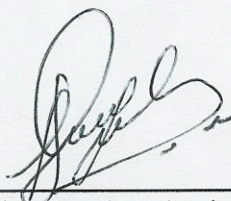
2007

La presente tesis titulada: CALIDAD DE LAS AGUAS DEL SISTEMA HIDROGRÁFICO ZAHUAPAN-ATOYAC, realizada por el alumno: DAVID VINICIO CARRERA VILLACRÉS, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

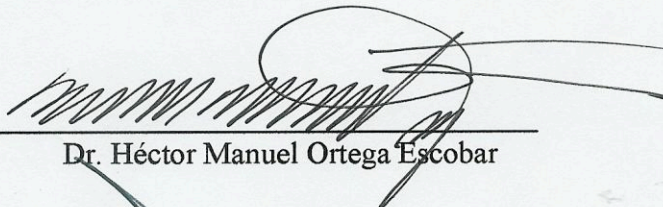
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



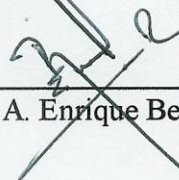
Dr. Carlos Ramírez Ayala

ASESOR



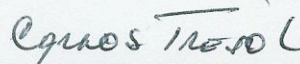
Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar

ASESOR



Dr. A. Enrique Becerril Román

ASESOR



Dr. Carlos Trejo López

Montecillo, Texcoco, México, Septiembre del 2007

# CALIDAD DE LAS AGUAS DEL SISTEMA HIDROGRÁFICO ZAHUAPAN-ATOYAC

David Vinicio Carrera Villacrés, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2007

El sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, Estado de Tlaxcala está formado por la confluencia de los ríos Zahuapan y Atoyac cerca del poblado de Panzacola, Tlaxcala. En las estribaciones de la sierra de Tlaxco, se tienen escurrimientos que derivan a la laguna de Jalnené. El Río Zahuapan nace en la laguna de Jalnené. El río Atoyac se origina en las estribaciones de la sierra de Calpulalpan, Tlaxcala. Los ríos Zahuapan y Atoyac reciben en su cauce aguas urbano-industriales de las zonas económicas del valle de Tlaxcala y Zacatelco; además de numerosas poblaciones aguas arriba. El río Atoyac atraviesa la ciudad de Puebla siguiendo su cauce hasta la presa Manuel Ávila Camacho. Gran parte del territorio del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac pertenece al eje Neovolcánico Transmexicano, en este eje se han generado numerosos aparatos volcánicos y focos termales. Hacia los cauces de los ríos Zahuapan y Atoyac se vierten una gran cantidad de afluentes de origen termal de diferente concentración y composición cualitativa. Las unidades estratigráficas son de carácter sedimentario. Los objetivos fundamentales de este trabajo fueron los de evaluar la calidad de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con fines de riego agrícola. Las evaluaciones de la calidad de estas aguas se hicieron utilizando los siguientes índices: 1. Concentración de sales, 2. Composición iónica  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , 3. Valores de presión osmótica de las aguas superficiales en las diferentes estaciones de muestreo, 4. La Relación de Adsorción de sodio en tres diferentes conceptualizaciones y 5. Carbonato de sodio residual. De acuerdo con los resultados obtenidos se hace evidente que los ríos Zahuapan –Atoyac poseen muy bajas concentraciones totales y pocas cantidades de sodio en los orígenes de su nacimiento, sin embargo, cuando hacia estos ríos se vierten las aguas urbano-industriales de las zona económica de Tlaxcala-Zacatelco, las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac adquieren valores elevados de La Relación de Adsorción de Sodio. Los altos valores de los contenidos de bicarbonatos de estas aguas modificarán obviamente en el tiempo, los valores de La Relación de Adsorción de Sodio en sus tres diferentes conceptualizaciones. Con los diferentes estimadores de La Relación de Adsorción de Sodio se puede predecir como afectan esta agua a las propiedades físicas de los suelos. Los contenidos de boro en las aguas urbano-industriales del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac son elevadas para cultivos poco tolerantes. Los contenidos de fosfatos en estas aguas favorecen el desarrollo de los procesos de eutrofización.

Palabras claves: salinidad, sodicidad, PSI, RAS.

## QUALITY OF WATERS FROM THE HYDROGRAPHIC SYSTEM ZAHUAPAN-ATOYAC

David Vinicio Carrera Villacrés, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2007

The hydrographic system Zahuapan-Atoyac, State of Tlaxcala is formed by the confluence of the rivers Zahuapan and Atoyac near the town of Panzacola, Tlaxcala. In the spurs of the mountain range of Tlaxco, there are drainings that derive to the lagoon of Jalnené. The Atoyac River is originated in the spurs of the mountain range of Calpulalpan, Tlaxcala. The rivers Zahuapan and Atoyac receive in their channel urban-industrialists waters of the economic zones of the valley of Tlaxcala and Zacatelco; in addition to numerous populations' waters above. The Atoyac River crosses the city of Puebla following its channel until the dam Manuel Ávila Camacho. Great part of the territory of the hydrographic system Zahuapan-Atoyac belongs to the Neovolcánica Transmexican axis, in this axis numerous apparatuses volcanic and thermal centers have been generated. Into the channels of the rivers Zahuapan and Atoyac a great amount of affluents of thermal origin of different concentration and qualitative composition are spilled. The stratigraphic units are of sedimentary character. The main targets of this work were to evaluate the quality of waters of the hydrographic system Zahuapan-Atoyac with agricultural irrigation aims. The evaluations of the quality of these waters were done using the following index: 1. Concentration of salts, 2. Ionic composition  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ , 3. Values of osmotic pressure of superficial waters in the different stations from sampling, 4. The Sodium Absorption Ratio in three different conceptualizations and 5. Residual sodium carbonate. In agreement with the obtained results it becomes evident that the Zahuapan - Atoyac Rivers have very low total concentrations and few amounts of sodium in the origins of their birth, nevertheless, when the urban-industrialists waters of the economic zone of Tlaxcala-Zacatelco are spilled into these Rivers, waters of the hydrographic system Zahuapan-Atoyac acquire elevated values of the Sodium Absorption Ratio. The high values of the bicarbonate contents of these waters will obviously modify with time, the values of the Sodium Absorption Ratio in their three different conceptualizations. With the different estimators from the Sodium Absorption Ratio it is possible to predict how this water affects the physical properties of grounds. The boron contents in the urban-industrialists waters of the hydrographic system Zahuapan-Atoyac are elevated for little tolerant cultures. The phosphate contents in these waters favor the development of the eutrofization processes.

Key words: Salinity, sodicity, ESP, SAR.

Agradecimiento:

Al Instituto Ecuatoriano de Crédito Educativo y Becas (IECE) que a través de la Organización de Estados Americanos (OEA) con el programa LASPAU, me otorgó la beca para estudiar y realizar este trabajo. Sin los cuales hubiese sido imposible lograrlo, mi eterna gratitud hacia ellos.

Al Ecuador, mi pequeña patria grande en su gente, que me vio nacer y del cual estoy muy orgulloso de pertenecer.

Al pueblo de México que a través de mis entrañables amigos me han hecho sentir como en casa.

A los doctores Manuel Ortega Escobar y Carlos Ramírez Ayala por la dirección de este trabajo, por su filosofía impartida muy acertada y principalmente por su amistad.

A los doctores A. Enrique Becerril Román y Carlos Trejo López por la revisión, el tiempo y el apoyo que me brindaron para culminar mis estudios.

A todos los profesores y trabajadores de Colegio de Postgraduados, especialmente los del programa de Hidrociencias que siempre estuvieron listos para ayudarme.

Dedicatoria:

A mis padres M.Sc. Ing. José Luis Carrera Falcón y Rocío Villacrés Raza, a quien debo todo y no me alcanzaría la vida entera para pagarles.

A mis abuelitos Enrique, Carmelita, Miguel y Lolita, que fueron y son ejemplo de tesón en la vida, mi cariño y admiración hacia ellos.

A mis hermanos José Luis, Isadora y Felipe, incondicionales amigos.

A Jazmín con quien compartí momentos inolvidables y se queda parte de mi vida con ella.

## ÍNDICE

	Pág.	
1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
2.1	Objetivo general	3
2.2	Objetivos particulares	3
2.3	Hipótesis	3
3.	REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1	El uso de agua residual en el mundo	4
3.2	El uso de agua residual en México	5
3.3	Geoquímica de los elementos	7
3.3.1	El silicio en la corteza terrestre	8
3.3.2	El carbono en la corteza terrestre	8
3.3.3	El fósforo en la corteza terrestre	9
3.3.4	El azufre en la corteza terrestre	10
3.3.5	El calcio en la corteza terrestre	11
3.3.6	El potasio en la corteza terrestre	12
3.3.7	El magnesio en la corteza terrestre	14
3.3.8	El sodio en la corteza terrestre	14
3.3.9	El cloro en la corteza terrestre	15
3.3.10	El boro en la corteza terrestre	15
3.4	Intemperismo	16
3.4.1	Intemperismo químico	16
3.4.2	Intemperismo mineral	17
3.5	Origen de las sales	18
3.6	Solubilidad de las sales mas importantes	21
3.7	Composición promedio del agua en ríos y en océanos	25
3.8	Peligro de la salinización sódica	27
3.8.1	Causas de la aparición del sodio intercambiable	27
3.9	Calidad de las aguas para riego	29
3.9.1	Factores que afectan al agua para el riego	30
3.10	Efectos de las sales solubles sobre los cultivos	30
3.10.1	Efecto osmótico	31

3.10.1.1	Propiedades coligativas de las soluciones	31
3.10.1.2	Teoría de los gases ideales	33
3.11	Peligro de salinidad	38
3.12	Clasificación de las aguas para riego con base a la salinidad efectiva (SE)	38
3.13	Clasificación de las aguas para riego con base a la salinidad potencial (SP)	39
3.14	Peligro de la sodicidad (Ecuación de Gapon)	40
3.15	Clasificación de las aguas con base al R.A.S.	41
3.16	Ecuación para el cálculo del $RAS_{aj}$	42
3.17	Ecuación para el cálculo del $RAS^o$	44
3.18	Efecto de la concentración de los iones $CO_3^{2-}$ y $HCO_3^-$	47
3.19	Porcentaje de sodio intercambiable	48
3.20	Dureza	49
3.21	Problemas de infiltración	49
3.21.1	Evaluación de los problemas de infiltración	50
3.21.2	Soluciones a los problemas de infiltración	51
3.22	Efectos de la toxicidad por iones específicos	52
3.22.1	Efecto del ion cloro	52
3.22.2	Efecto del ion sodio	53
3.22.3	Efecto del ion boro	53
3.22.4	Efecto del ion fósforo	54
3.23	Directrices sobre la calidad del agua	55
3.24	Clasificación hidrogeoquímica	57
3.25	Clasificación de los suelos	60
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	62
4.1	Descripción geográfica del área de estudio	62
4.2	Ubicación del área de estudio del primer muestreo	70
4.3	Ubicación y número de sitios del segundo muestreo	71
4.4	Métodos	74
4.5	Descripción de las determinaciones	75
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	83
5.1	Comprobación en la exactitud de los datos obtenidos	96
5.2	Distribución de frecuencias de los datos analíticos	111



5.3	Distribución de aniones y cationes	118
5.4	Clasificación de las aguas con base en la salinidad	131
5.4.1	Factores que determinan la calidad del agua	131
5.4.2	Presión osmótica	131
5.5	Índice de salinidad	143
5.6	Índice de salinidad efectiva	159
5.7	Índice de salinidad potencial	162
5.8	Clasificación de las aguas con base en la sodicidad	165
5.8.1	Porcentaje de sodio posible	174
5.8.2	Porcentaje de sodio intercambiable (XNa)	177
5.8.3	Carbonato de sodio residual (C.S.R.)	180
5.9	Clasificación de las aguas por su dureza	183
5.10	Clasificación de las aguas en base a su efecto sobre la infiltración	186
5.11	Efecto del ion cloro	197
5.12	Efecto del ion boro	200
5.13	Composición química de las sales hipotéticas	205
5.14	Efecto del ion fósforo	212
5.15	Número de partículas	217
5.16	Clasificación hidrogeoquímica	224
6.	CONCLUSIONES	230
7.	RECOMENDACIONES	234
8.	BIBLIOGRAFÍA	236
	ANEXO	243

## ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Superficie irrigada ha.	4
Cuadro 2. Familia de sales y salmueras.	19
Cuadro 3. Secuencia de la extracción de algunos iones durante el intemperismo de acuerdo con (Fersman, 1973).	21
Cuadro 4. Categorías de migración (movilidad de los elementos) de acuerdo con (Polynov y Kovda, 1973).	21
Cuadro 5. Máxima solubilidad en agua de algunas sales encontradas en suelos a diferentes temperaturas (solución saturada) (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).	22
Cuadro 6. Solubilidad de las sales en el sistema NaCl-MgCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O en porcentaje por peso.	23
Cuadro 7. Solubilidad de CaSO <sub>4</sub> en agua en presencia de cantidades diferentes de NaCl a temperaturas de 20°C (en g por 100 g de agua) citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).	23
Cuadro 8. Solubilidad de CaSO <sub>4</sub> en agua en presencia de CaCl <sub>2</sub> (en g por 100 g de agua) citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).	23
Cuadro 9. Solubilidad de CaCO <sub>3</sub> respecto a la calidad de CO <sub>2</sub> en el aire a temperatura de 16°C citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).	24
Cuadro 10. Solubilidad del CaCO <sub>3</sub> con presión parcial de CO <sub>2</sub> igual a 0.00032 atm (en g por L) citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).	25
Cuadro 11. Solubilidad de MgCO <sub>3</sub> en agua en temperatura de 18 °C para diferentes presiones de CO <sub>2</sub> citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).	25
Cuadro 12. Composición de diversos iones y clasificación de acuerdo a (Taylor y McLennan, 1985).	26
Cuadro 13. Propiedades del suelo en función de los cationes según actividad relativa de los mismos (Ortega, 1976).	29
Cuadro 14. Número de partículas en corrientes y agua de mar	37
Cuadro 15. Clasificación de las aguas con base en la conductividad eléctrica (Richards <i>et al.</i> , 1959).	38
Cuadro 16. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo a la salinidad efectiva (Richards <i>et al.</i> , 1959).	39
Cuadro 17. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad potencial (Richards <i>et al.</i> , 1959).	40

Cuadro 18.	Clasificación de las aguas en base al R.A.S.	41
Cuadro 19.	Procedimiento para calcular el pHc de las aguas <sup>a, b</sup> . (Ayers y Westcot, 1987).	44
Cuadro 20.	Concentración de calcio (Ca <sup>0</sup> ) en el agua de suelo, contenida en 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 CEa <sup>1, 2, 3</sup> . (Ayers y Westcot, 1987).	46
Cuadro 21.	Clasificación en base a los índices de Eaton. Carbonato de Sodio Residual (C.S.R.) (Richards <i>et al.</i> , 1959).	47
Cuadro 22.	Clasificación del Ca <sup>2+</sup> como CaCO <sub>3</sub> para determinar su dureza de acuerdo a (Keith, 1967).	49
Cuadro 23.	Clasificación de las aguas de riego en base al contenido de cloruros (Can, 2005).	53
Cuadro 24.	Límites permisibles de boro para aguas de riego (Richards <i>et al.</i> , 1959).	54
Cuadro 25.	Directrices para interpretar la calidad de las aguas para el riego <sup>1</sup> .	56
Cuadro 26.	Unidades cartográficas de suelos para el mapa mundial de suelos de la (FAO/UNESCO, 1968).	61
Cuadro 27.	Principales elevaciones del estado de Tlaxcala.	63
Cuadro 28.	Determinaciones físico-químicas para aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.	74
Cuadro 29.	Localización geográfica de las estaciones de muestreo de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	87
Cuadro 30.	Composición iónica de las aguas residuales de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	88
Cuadro 31.	Localización geográfica de las estaciones de muestreo de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	91
Cuadro 32.	Composición iónica de las aguas residuales de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	92
Cuadro 33.	Porcentajes permisibles de diferencia en los resultados analíticos (APHA, 1995).	96
Cuadro 34.	Factores de conductividad para iones más comunes encontrados en el agua (APHA, 1995).	109
Cuadro 35.	Presión osmótica calculada por tres métodos de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	134

Cuadro 36.	Presión osmótica calculada por tres métodos de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	140
Cuadro 37.	Clasificación de las aguas con base en la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	149
Cuadro 38.	Clasificación de las aguas y problemas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	150
Cuadro 39.	Clasificación de la salinidad en base al grado de restricción de uso según Ayers y Westcot (1987) de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	152
Cuadro 40.	Clasificación de la salinidad en base al grado de restricción de uso según Ayers y Westcot (1987) de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	153
Cuadro 41.	Clasificación de las aguas con base en la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	157
Cuadro 42.	Clasificación de las aguas y problemas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	158
Cuadro 43.	Clasificación de las aguas con base en la salinidad efectiva del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	160
Cuadro 44.	Clasificación de las aguas con base en la salinidad efectiva del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	161
Cuadro 45.	Índice de la salinidad potencial de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	163
Cuadro 46.	Índice de la salinidad potencial de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	164
Cuadro 47.	Cálculo del RAS por tres métodos de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac y del Índice de Saturación (IS) (1er muestreo).	167
Cuadro 48.	Clasificación de las aguas por tres métodos del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	168
Cuadro 49.	Clasificación de las aguas y problemas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	169
Cuadro 50.	Cálculo del RAS por tres métodos de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac y del Índice de Saturación (IS) (2do muestreo).	171
Cuadro 51.	Clasificación de las aguas por tres métodos del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	172

Cuadro 52.	Clasificación de las aguas y problemas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	173
Cuadro 53.	Porcentaje de sodio posible de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	175
Cuadro 54.	Porcentaje de sodio posible de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	176
Cuadro 55.	Efecto posible del porcentaje de sodio intercambiable de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	178
Cuadro 56.	Efecto posible del porcentaje de sodio intercambiable de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	179
Cuadro 57.	Carbonato de sodio residual de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	181
Cuadro 58.	Carbonato de sodio residual de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	182
Cuadro 59.	Clasificación de las aguas por su dureza en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	184
Cuadro 60.	Clasificación de las aguas por su dureza en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	185
Cuadro 61.	Clasificación de las aguas en base al efecto sobre la infiltración en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	191
Cuadro 62.	Clasificación de las aguas en base al efecto sobre la infiltración en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	196
Cuadro 63.	Clasificación del contenido de cloruros de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	198
Cuadro 64.	Clasificación del contenido de cloruros de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	199
Cuadro 65.	Clasificación de las aguas de riego de acuerdo al contenido de boro (Can, 2005).	200
Cuadro 66.	Clasificación del contenido de boro de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	202
Cuadro 67.	Clasificación del contenido de boro de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	204
Cuadro 68.	Composición química de las sales hipotéticas de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	206

Cuadro 69.	Composición química de las sales hipotéticas de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	209
Cuadro 70.	Problemas de eutrofización de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	213
Cuadro 71.	Problemas de eutrofización de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	215
Cuadro 72.	Número de partículas de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	218
Cuadro 73.	Número de partículas de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	221
Cuadro 74.	Clasificación hidrogeoquímica de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	227
Cuadro 75.	Clasificación hidrogeoquímica de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	229

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Distribución de la precipitación en México.	5
Figura 2.	Porcentaje en peso de los elementos constituyentes de la corteza terrestre (hasta 16 km de profundidad).	7
Figura 3.	Liberación de iones de acuerdo a Goldshmidt	16
Figura 4.	Solubilidad de diferentes sales en función de la temperatura citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).	25
Figura 5.	Reducción relativa de la infiltración, provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio RAS [fuente: Rhoades (1977) y Oster y Schroer (1979), citado por Ayers y Westcot (1987)].	51
Figura 7.	Diagrama trilineal para representar resultados de estudios de química del agua (Fetter, 1988).	58
Figura 8.	Sistema de clasificación hidrogeoquímica para aguas naturales usando el diagrama trilineal (Fetter, 1988).	59
Figura 6.	Mapa de las eras geológicas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del primer muestreo de aguas.	64
Figura 9.	Mapa de las eras geológicas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del segundo muestreo de aguas.	65
Figura 10.	Mapa de los tipos de suelos en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del primer muestreo de aguas.	68
Figura 11.	Mapa de los tipos de suelos en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del segundo muestreo de aguas.	69
Figura 12.	Mapa de ubicación del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del primer muestreo de aguas.	70
Figura 13.	Mapa de ubicación del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del segundo muestreo de aguas.	71
Figura 14.	Mapa con los tipos de rocas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del primer muestreo de aguas.	85
Figura 15.	Mapa con los tipos de rocas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del segundo muestreo de aguas.	86
Figura 16.	Concentración de soluciones con una sola sal con relación a su conductividad eléctrica (Richards <i>et al.</i> , 1959).	97

Figura 17.	Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (primer muestreo).	98
Figura 18.	Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (primer muestreo).	99
Figura 19.	Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (segundo muestreo).	100
Figura 20.	Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (segundo muestreo).	101
Figura 21.	Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica de todos los puntos de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.	103
Figura 22.	Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica de todos los puntos de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.	104
Figura 23.	Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (primer muestreo).	106
Figura 24.	Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (segundo muestreo).	107
Figura 25.	Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica de todos los puntos de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.	108
Figura 26.	Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica (primer muestreo).	113
Figura 27.	Distribución de frecuencias de la concentración total de sólidos disueltos (primer muestreo).	114
Figura 28.	Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica (segundo muestreo).	116
Figura 29.	Distribución de frecuencias de la concentración total de sólidos disueltos (segundo muestreo).	117
Figura 30.	Composición iónica de las aguas de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo, baja concentración).	120
Figura 31.	Composición iónica de las aguas de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo, alta concentración).	121
Figura 32.	Perfil longitudinal de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	122
Figura 33.	Perfil del pH de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	123
Figura 34.	Perfil de la temperatura del agua de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo)	124



Figura 35.	Composición iónica de las aguas de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo, baja concentración).	126
Figura 36.	Composición iónica de las aguas de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo, alta concentración).	127
Figura 37.	Perfil longitudinal de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	128
Figura 38.	Perfil del pH de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	129
Figura 39.	Perfil de la temperatura de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	130
Figura 40.	Relación entre la conductividad eléctrica y la presión osmótica experimental (PO exp. 1er muestreo) de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.	133
Figura 41.	Relación entre la concentración y la presión osmótica calculada con tres métodos diferentes de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	136
Figura 42.	Perfil de la presión osmótica de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	137
Figura 43.	Relación entre la conductividad eléctrica y la presión osmótica experimental (PO exp. 2do muestreo) de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.	139
Figura 44.	Relación entre la concentración y la presión osmótica calculada con tres métodos diferentes de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	141
Figura 45.	Perfil de la presión osmótica de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	142
Figura 46.	Diagrama para la clasificación de las aguas para riego citado en (Richards <i>et al.</i> , 1959).	143
Figura 47.	Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS original según Cuadro 47 (1er muestreo).	146
Figura 48.	Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS <sub>aj</sub> según Cuadro 47 (1er muestreo).	147
Figura 49.	Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS <sup>o</sup> según Cuadro 47 (1er muestreo).	148
Figura 50.	Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS original según Cuadro 50 (2do muestreo).	154

Figura 51.	Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS <sub>aj</sub> según Cuadro 50 (2do muestreo).	155
Figura 52.	Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS° según cuadro 50 (2do muestreo).	156
Figura 53.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS original (1er muestreo, baja concentración) según Figura 5.	187
Figura 54.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS <sub>aj</sub> (1er muestreo, baja concentración) según Figura 5.	188
Figura 55.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS° (1er muestreo, baja concentración) según Figura 5.	189
Figura 56.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo, alta concentración) según Figura 5.	190
Figura 57.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS original (2do muestreo, baja concentración) según Figura 5.	192
Figura 58.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS <sub>aj</sub> (2do muestreo, baja concentración) según Figura 5.	193
Figura 59.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS° (2do muestreo, baja concentración) según Figura 5.	194
Figura 60.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo, alta concentración) según Figura 5.	195
Figura 61.	Distribución del contenido de boro en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	201
Figura 62.	Distribución del contenido de boro en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	203
Figura 63.	Distribución de las sales hipotéticas en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo, alta concentración).	207
Figura 64.	Distribución de las sales hipotéticas en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo, baja concentración).	208

Figura 65.	Distribución de las sales hipotéticas en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo, alta concentración).	210
Figura 66.	Distribución de las sales hipotéticas en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo, baja concentración).	211
Figura 67.	Distribución de los ortofosfatos en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	214
Figura 68.	Distribución de los ortofosfatos en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	216
Figura 69.	Distribución del número de partículas (cationes baja concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	219
Figura 70.	Distribución del número de partículas (aniones baja concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	219
Figura 71.	Distribución del número de partículas (cationes alta concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	220
Figura 72.	Distribución del número de partículas (aniones alta concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	220
Figura 73.	Distribución del número de partículas (cationes baja concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	222
Figura 74.	Distribución del número de partículas (aniones baja concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	222
Figura 75.	Distribución del número de partículas (cationes alta concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	223
Figura 76.	Distribución del número de partículas (aniones alta concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).	223
Figura 77.	Clasificación hidrogeoquímica en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).	226
Figura 78.	Clasificación hidrogeoquímica en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo). Número de puntos de muestreo.	228

## 1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales en los países en vías de desarrollo es una meta que no se cumple plenamente. La gran parte de estas aguas son recolectadas e inmediatamente vertidas a los cauces naturales, contaminando los ecosistemas. Según La Organización Mundial de la Salud, existen 1,100 millones de personas en el planeta que no tienen servicio de agua potable y América Latina es la región del mundo que tiene más agua con un 42% de las reservas globales (The Miami Herald, 2006).

En países como India, Pakistán, China y México, el riego con aguas residuales se ha producido con frecuencia, de manera espontánea y no planificada, y ha sido practicado durante décadas e incluso siglos por agricultores pobres de áreas urbanas y peri-urbanas. Las conclusiones de los estudios realizados indican que aproximadamente el 80% de las aguas residuales podría ser usada para riego, siendo China y el Sudeste de Asia quienes hacen un empleo significativo de los residuos no tratados para este fin (Mara y Cairncross, 1990).

Solamente en América Latina, al menos unas 500,000 ha de tierra son irrigadas con aguas residuales no tratadas, de las cuales más de la mitad se encuentran en México (Rodríguez *et al.*, 1994). Lo mismo sucede en África, donde varios estudios de casos Bakker *et al.* (2000) realizados en las principales ciudades (Accra en Ghana, Dakar en Senegal y Nairobi en Kenia) señalan el uso generalizado de aguas residuales. La agricultura consume más del 70% de los recursos globales de agua explotados y las ciudades compiten cada vez más con la agricultura por el agua, por lo que es obligatorio estudiar las fuentes alternativas de agua para riego. Una de las formas es a través del conocimiento y mejoramiento del uso de aguas residuales urbanas, transformando los desechos en recursos para la obtención de productos útiles y necesarios para la población.

La superficie de riego en México es del orden de los 6.5 millones de hectáreas con su infraestructura correspondiente, de las cuales aproximadamente 3.55 millones de hectáreas se concentran bajo la jurisdicción de los 82 Distritos de Riego y 2.95 millones de hectáreas se ubican en 195 Distritos de Desarrollo Rural con aproximadamente 40,000 Unidades de Riego. Estas tienen obras de pequeña irrigación en donde se riegan principalmente con aguas subterráneas y pequeñas presas de almacenamiento (SEMARNAT Y CONAGUA, 2006).

En la actualidad el país con el plan de aprovechamiento de aguas residuales más ambicioso es Israel, su programa tecnológico más conocido, es el denominado proyecto de reutilización de las aguas residuales de la región de Dan, que tiene como finalidad el tratamiento de las mismas, la recarga y el almacenamiento del efluente tratado en un acuífero y su reutilización posterior en las explotaciones agrícolas del Negev.

En este trabajo se pretende determinar las concentraciones iónicas de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, ya que el uso de aguas residuales en la agricultura es una práctica ampliamente establecida a nivel mundial. Es necesario estudiar la calidad de las aguas a través del conocimiento de las concentraciones iónicas de las mismas; de esta manera se puede valorar la productividad de los campos agrícolas conjuntamente con las propiedades del suelo irrigados con este recurso y además es un indicador ambiental para en el futuro tomar medidas de prevención y mitigación. La falta de conciencia en el manejo de agua y la creciente demanda de este recurso, puede ocasionar la pérdida de 350 millones toneladas de alimento en el año 2025. (CEN, 2002).

Las aguas residuales son utilizadas como una fuente de riego, así como también un incremento de nutrientes para las plantas (como N, P y K), permitiendo a los agricultores reducir la necesidad de fertilizantes químicos u orgánicos. Sin embargo el efecto producido en los distritos de riego por esta agua, están relacionados con la salinidad, la sodicidad y la infiltración de los suelos. Con el diagnóstico exacto se podrán plantear alternativas del uso adecuado de las aguas y obtener alternativas para un mayor rendimiento de los suelos agrícolas sin afectar al ecosistema.

Para la determinación de la calidad de las aguas en este sistema hidrográfico, utilizamos diferentes índices de clasificación físico-químicas conjuntamente con otros parámetros. El río Zahuapan es uno de los cauces que ha preocupado en mayor medida a la comunidad y autoridades del estado de Tlaxcala, principalmente por los altos índices de contaminación ya que sus cauces traen tanto agua limpia proveniente de manantiales, como aguas negras no tratadas por usos municipales, industriales, diversos comercios, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos y en general de cualquier otro uso, así como la combinación de todos ellos.

## 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### 2.1 Objetivo general

Determinar las composiciones iónicas de las aguas de los diferentes cauces en la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac, en diferentes puntos de muestreo, desde el inicio de la formación de los cauces hasta la zona de aprovechamiento agrícola.

### 2.2 Objetivos particulares

Determinar las concentraciones de los diferentes iones en las aguas de los cauces del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

Muestrear las aguas del sistema hidrográfico en dos estaciones del año (Invierno-Primavera).

Determinar los parámetros físico-químicos de las aguas de este sistema: temperatura ( $^{\circ}\text{t}$ ), concentración de iones hidrogeno (pH), conductividad eléctrica (CE), residuo seco evaporado (RSE), residuo seco calcinado (RSC), carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), fósforo (P), boro (B) y presión osmótica.

Establecer la distribución de cationes y de aniones en las distintas estaciones de muestreo. Obtener los siguientes índices de clasificación de aguas: índice de salinidad potencial, índice de salinidad efectiva, por ciento de sodio posible y carbonato de sodio residual.

Determinar el valor de la Relación de Adsorción de Sodio, según sus diferentes conceptualizaciones.

### 2.3 Hipótesis

Se deben presentar variaciones de las concentraciones en los diferentes puntos de las aguas de los cauces del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, debido a la descarga de aguas urbano-industriales en todo el trayecto de esta red hidrográfica.

### 3. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 El uso de agua residual en el mundo

En las regiones áridas y semiáridas del mundo, el recurso hidráulico es cada vez más escaso por lo que cualquier fuente de agua adquiere relevancia para la supervivencia y el desarrollo socioeconómico.

El valor de estos efluentes como fertilizantes es tan importante como el valor del agua. En las aguas residuales tratadas mediante sistemas convencionales las concentraciones típicas de nutrientes son: de N 50 mg L<sup>-1</sup>, de P 10 mg L<sup>-1</sup> y de K 30 mg L<sup>-1</sup>. Si anualmente se aplican 5,000 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, la aportación anual de fertilizantes sería 250 kg ha<sup>-1</sup> de N, 50 kg ha<sup>-1</sup> de P y 150 kg ha<sup>-1</sup> de K. De esta forma, todo el N y la mayor parte del P y K que son necesarios para la producción agrícola serían administradas por el efluente.

A nivel mundial, después de la República Popular de China; México es el segundo país que más agua residual emplea en actividades agrícolas. En el Cuadro 1 se detalla la superficie irrigada con aguas residuales en el mundo según (Mara y Cairncross, 1990). En América Latina, México es la nación que más hectáreas irriga con aguas servidas no tratadas (Garza, 1994).

Cuadro 1. Superficie irrigada. ha.

Lugar	Superficie
Arabia Saudita, RIAD	2,850
Argentina, Mendoza	3,700
Australia, Melbourne	10,000
Chile, Santiago	16,000
China, diversas ciudades	1,330,000
Estados Unidos, diversas ciudades	11,875
India, diversas ciudades	85,500
Israel, diversas ciudades	8,800
Perú, Lima	6,800
Sudáfrica, Johannesburgo	18,000
Sudán, Khartum	2,800
Túnez, Túnez	4,450
México, diversas ciudades	350,000
Valle del Mezquital	130,000
Valle de Juárez	26,000

En países desarrollados, el uso planificado de agua residual tratada es más común, como en los casos de Israel, Australia, Alemania y los Estados Unidos. Haruvy (1997) señala que Israel es el país que está a la vanguardia en el uso planificado de aguas residuales, con un total del 70% del agua que demandará la agricultura en el 2040 a ser proveída mediante el tratamiento del efluente.

### 3.2 El uso de agua residual en México

La fuente principal de abastecimiento de agua en México es la lluvia, la precipitación anual promedio es de 777 mm, que equivale a una precipitación total de  $1570 \text{ km}^3$  al año. Se estima que si el escurrimiento superficial es de  $410 \text{ km}^3$  y la recarga subterránea de  $40 \text{ km}^3$ , el diferencial ( $1120 \text{ km}^3$ , 71.34%) se pierde por evapotranspiración. Esto quiere decir que la atmósfera en forma de humedad ambiental, transporta la mayor cantidad de agua evaporada, más del doble de la que escurre por todos los ríos del país, con los datos del INEGI (2006) se elaboró la Figura 1.

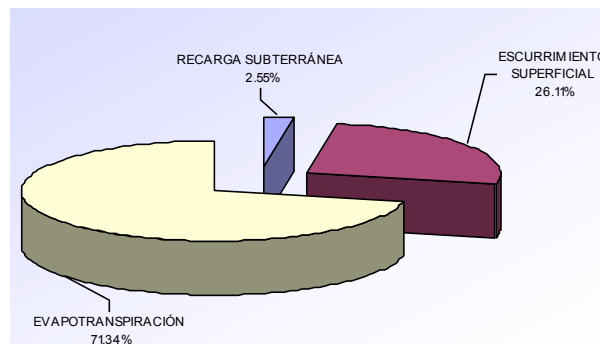


Figura 1. Distribución de la precipitación en México.

Estudios que ha realizado el Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias y el Instituto Internacional para el Manejo del Agua, dentro de 23 años los alimentos pueden quedar fuera del alcance de las personas con menos recursos. Lo anterior indica que el 70% de agua utilizada en el mundo se destina a producir los alimentos que sustentan la actividad humana y dentro de 30 años, se necesitará 60% más de alimentos para cubrir la demanda de la población.



En México un tercio de la población carece del líquido vital; mientras el 35% del total del agua es desperdiciado en fugas. El 36% del agua que se utiliza en el país proviene de fuentes subterráneas, el 30% del agua que se emplea en la agricultura se extrae de los acuíferos.

El agua es uno de los factores más importantes para el desarrollo social y económico del hombre. Su escasez y su contaminación amenazan aspectos fundamentales de la seguridad como: el equilibrio del medio acuático, la producción de alimentos, la salud pública y la estabilidad social y política. En tal sentido, las aguas residuales generadas por aquellos centros de población que tiene sistemas de drenaje para evacuar sus residuos líquidos, se convierten en una importante alternativa para la producción agrícola. A principios de 1990, el Instituto Nacional de Ecología (INE) estimaba que alrededor del 44.3% de las aguas residuales generadas por la población de México, por lo común no tratadas, eran utilizadas en la agricultura. La Comisión Nacional del Agua de México (CNA) estima que en el país se están regando alrededor de 350,000 ha con un volumen de  $160 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de aguas de origen municipal, algunas mezcladas con aguas residuales industriales, superficiales y de pozo.

Actualmente en México existen más de 30 grandes escenarios donde la irrigación agrícola depende de las aguas negras generadas por igual número de poblaciones. En numerosos lugares de México no hay vigilancia ni control sanitario alguno para la reutilización de este recurso. Los lugares donde se utiliza aguas residuales para la producción agrícola son: Aguascalientes, Chihuahua, Cd. Juárez, Durango, Guadalajara, La Laguna, Monterrey, Morelia, Obregón, Puebla, Querétaro y el Valle del Mezquital (Garza, 1994). El Valle del Mezquital, en el Estado de Hidalgo, después de China es el segundo campo agrícola del mundo regado con la aguas negras provenientes de la Ciudad de México, aproximadamente 130,000 ha.

En el Estado de Chihuahua son varias las ciudades donde las aguas residuales sin tratar son destinadas a la agricultura local. Las ciudades de Chihuahua donde se utilizan aguas residuales son: Camargo, Chihuahua, Cd. Juárez, Delicias, Jiménez, Nuevo Casas Grandes y Ojinaga. El valle de Juárez viene siendo, en importancia, el segundo campo agrícola más grande de México regado con aguas negras y uno de los mas grandes del mundo. En el caso del valle de Juárez, la demanda de aguas residuales para el riego de los cultivos comenzó

aproximadamente a finales de la década de los 40's, cuando esta necesidad se agudizó debida principalmente por insuficiencia de agua para riego agrícola. Sin embargo, más tarde esta práctica tuvo una aceptación cultural porque era un buen mejorador de suelos (fertilizantes), lo que reducía costos (Garza, 1994).

### 3.3 Geoquímica de los elementos

Varios autores se consultaron para llevar a cabo este apartado (Antipov y Kader, 1961; Fersman, 1971; Huez, 1985; Santana, 1989; Díaz 1990; Mott, 1996; Díaz 1999 y Can, 2005). En el planeta Tierra se hallan muy propagados en primer lugar los elementos livianos, como son el oxígeno, silicio, aluminio, hierro y calcio que constituyen el 90.03% de la corteza terrestre. El sodio, potasio, magnesio, hidrogeno, titanio, carbono y cloro, conjuntamente con los anteriores forman el 99.29% de la corteza terrestre, quedando el resto de elementos con el 0.7% en peso. En la actualidad están bien definidas las leyes que explican la presencia de los elementos y su comportamiento, por ejemplo los elementos naturales como el nitrógeno, oxígeno y los gases nobles se encuentran de preferencia en la atmósfera; en los lagos salados y en las minas salinas se encuentran juntos sales de cloro, bromo y yodo combinadas con los metales potasio, sodio, magnesio y calcio. En la Figura 2 se expresa la distribución de los elementos en la corteza terrestre según (Fersman, 1971).

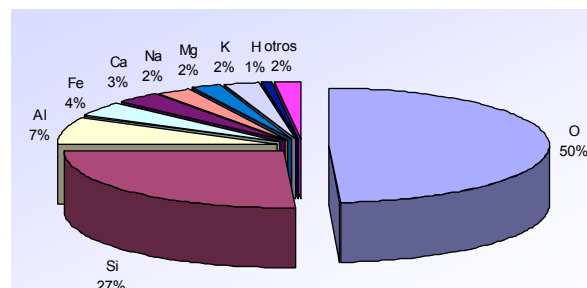


Figura 2. Porcentaje en peso de los elementos constituyentes de la corteza terrestre (hasta 16 km de profundidad).

En los granitos que son rocas lustrosas cristalinas originadas por solidificación de los magmas fundidos, se encuentran elementos químicos que entran en la composición de las piedras preciosas constituidas por átomos de boro, berilio, litio y fluor, así como también existen acumulación de metales raros como wolframio, niobio y tantalio. En contraposición a los granitos, en las rocas basálticas pesadas, surgidas del interior de la tierra se encuentran juntos

minerales de cromo, níquel, cobre, hierro y platino. En las vetas de minerales que se elevan hacia la superficie procedente de potentes focos de magma fundido se encuentra zinc, plomo, oro, plata, arsénico y mercurio.

### **3.3.1 El silicio en la corteza terrestre**

El silicio, después del oxígeno, es el elemento más difundido en la naturaleza, nunca se encuentra libre siempre se combina con el oxígeno para formar sílice, ácido silícico, óxido de silicio o cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). En el granito hay 80% de sílice que representa el 40% de silicio formando la gran mayoría de rocas duras, también es el componente principal de la arcilla común y a partir de él se forma la arena de las riberas fluviales. Este elemento está presente en el sistema óseo de los animales, haciéndolo fuerte al igual que en los tallos de las plantas.

### **3.3.2 El carbono en la corteza terrestre**

Este elemento es esencial para la vida, es parte constitutiva de la materia viva. El carbono se encuentra en los magmas fundidos en forma de láminas o aglomeraciones esféricas de grafito, como cristales o como la piedra preciosa que es el diamante en el interior de la tierra y en las vetas de masas derretidas. Con mayores cantidades escapa de las rocas ígneas solidificadas, como hidrocarburos y carburos volátiles que ascienden a la superficie formando grafito y al unirse con el oxígeno forma el gas carbónico que tiende a elevarse hacia la superficie. En las profundidades de la tierra, el ácido silícico no permite que se forme el gas carbónico, no existe ningún mineral de origen eruptivo que contenga anhídrido carbónico. En dichas rocas se retiene el gas carbónico en sus huecos internos tal como se retenían las soluciones de sales de cloro y en estas oclusiones de gas se acumula una cantidad de anhídrido carbónico cinco veces mayor que la que se encuentra en la atmósfera.

En las regiones volcánicas en actividad o ya extintas, el anhídrido carbónico escapa con otros compuestos volátiles para mezclarse con agua y formar aguas minerales carbónicas, las cuales llegan a tener tal grado de saturación que parece que hierve por las burbujas que salen en su superficie. El anhídrido carbónico sólido se utiliza para fines científicos y es conocido como hielo seco.

En la formación de la tierra hubo periodos de gran actividad volcánica, durante los que se arrojaban cantidades enormes de anhídrido carbónico en donde se desarrolló la vegetación tropical a gran escala y el carbono continuó su ciclo hasta regresar a su estado esencial.

Al contrario de las profundidades de la tierra, en donde el ácido silícico es predominante, en la superficie de la corteza terrestre, el anhídrido carbónico es el que transforma por su acción destructiva las rocas eruptivas, extrae los metales combinándose con el calcio y el magnesio para luego acumularse en formas de calizas y dolomitas. El clima terrestre esta supeditado al carbono, puesto que todo el mundo orgánico varía según cambia la concentración del carbono.

Las propiedades químicas son diversas, el carbono se puede combinar ilimitadamente con el oxígeno, hidrógeno, nitrógeno entre otros elementos químicos. Estas combinaciones forman proteínas, grasas, hidratos de carbono, vitaminas que intervienen en la composición de los tejidos de todos los organismos vivos. A pesar de su importancia, la masa fundamental que constituyen los organismos vivos esta compuesta por 10% de carbono, agua 80% y el resto esta formado por otros elementos químicos. La antracita es la más rica en carbono y su estructura confirma la naturaleza vegetal de la hulla y de los lignitos.

Cuando se examinan con microscopio, los minerales se observan gran variedad de cristales, estos son los restos de los esqueletos calizos de organismos llamados rizópodos, que están compuestos por carbonato cálcico, cuando mueren estos organismos forman la roca, conjuntamente con otros animales y plantas que se encuentran en las rocas calizas.

### **3.3.3 El fósforo en la corteza terrestre**

La palabra fósforo significa portador de luz, ya que la piedra a temperatura ordinaria emite una luminosidad suave. Aproximadamente en el siglo XIX por estudios del químico Liebig, se descubrió la importancia de este elemento para la agricultura, creando incredulidad en los científicos de su tiempo. Este elemento es básico para la vida y el pensamiento, su contenido en los huesos determina el crecimiento y desarrollo normal de las células de la medula ósea y es el que da rigidez a los organismos vivos.

El fósforo pasa por la naturaleza desde las profundas masas fundidas, por las finas agujas de apatita y termina en los filtros vivientes, microorganismos que se apoderan del fósforo de las disoluciones débiles del agua del mar. El destino del fósforo está ligado a los procesos de la vida y la muerte, este elemento se acumula donde muere la vida orgánica y donde tiene lugar la muerte en masa de animales, como son los puntos de enlace de las corrientes marítimas donde se dan los cementerios submarinos. El fósforo se concentra en la tierra de dos formas: en los yacimientos profundos de apatito, que vienen de los magmas fundidos calientes o en los restos de las partes óseas de los animales.

### **3.3.4 El azufre en la corteza terrestre**

Este elemento fue uno de los primeros conocidos por el hombre, en el mar Mediterráneo las enormes erupciones volcánicas en los tiempos de los griegos y romanos acarrearán cantidades gigantescas de azufre y el olor de gas sulfuroso y el ácido sulfhídrico se consideraban síntomas de la actividad del Dios subterráneo Vulcano. El azufre es arrastrado en disolución junto con el arsénico y el antimonio. Al llegar a la superficie las rocas oscuras, opacas, lustrosas, polimetálicas y diversos géneros de minerales brillantes y piritas, sufren la acción del oxígeno del aire y del agua formando compuestos azufrados, como es el caso del gas sulfuroso.

El azufre no se mantiene mucho tiempo en su estado original, se une con diversos metales, originando, en las regiones volcánicas, conglomerados de alunita en forma de manchas blancas e incluso, algunos astrónomos dicen que es esta la que forma la aureola y los rayos blancos que rodean los cráteres de la luna. Una gran cantidad de azufre oxidado, se halla en combinación con el calcio, siendo muy activa en la tierra, el yeso.

El azufre que forma el ácido sulfúrico, en caso específico, parte se transforma nuevamente en gas y toda una serie de microorganismos lo reducen, de las soluciones de sus sales se forma ácido sulfhídrico y gases volátiles que en cantidades inmensas se encuentran en aguas petrolíferas, saturando los gases del aire en los bajos pantanosos y en muchos estuarios y lagos donde el barro se usa como medicina.

El azufre es uno de los elementos más importantes en la nutrición vegetal, ya que forma parte de aminoácido y este de la composición de las proteínas. Durante la descomposición de la proteína se transforma en ácido sulfhídrico que se oxida hasta sulfatos por las sulfato bacterias, al unirse con el agua se forma el ácido sulfúrico y cuando existen condiciones de anaerobiosis, las formas oxidadas del azufre se reducen hasta sulfhídrico.

### **3.3.5 El calcio en la corteza terrestre**

Cuando de las masas fundidas en el inicio de la formación de La Tierra, paulatinamente, se desprendían vapores pesados formando la atmósfera, el calcio y el magnesio eran ya los metales más importantes del planeta. En las rocas que salían a la superficie en el fondo de los océanos, hay una capa de basalto en la que los átomos de calcio tienen gran importancia e incluso los continentes se mueven sobre esta capa. Con el anhídrido carbónico, el calcio se combina establemente, si existe exceso de anhídrido carbónico, el carbonato cálcico es transportado por las aguas y si hay pérdida de anhídrido carbónico, el carbonato cálcico se precipita en forma de polvo blanco cristalino. De esta manera se crearon las capas calcáreas y, en movimientos de la tierra, las capas subterráneas incandescentes abrasaban las calizas a miles de grados transformándolos en mármol.

Todos los seres vivos necesitan protegerse y en ese afán el calcio es muy importante, por ejemplo las conchas marinas están hechas de fosfato cálcico, las primeras valvas que existieron al inicio de la formación de la tierra estuvieron formadas del mineral apatito.

Sin embargo, el fosfato cálcico no existe en la naturaleza en gigantescas proporciones, por lo que, el progreso del mundo se construyó con base en otras combinaciones más solubles como el ópalo, sulfatos de estroncio, bario y carbonato de calcio. Miles de formas diferentes de calcio en las conchas y esqueletos, se acumulan en el fondo del mar para formar cementerios inmensos de carbonato de calcio, dando inicio a nuevas formaciones rocosas y futuras cordilleras.

Cuando se observan los mármoles que adornan las edificaciones suntuosas, tenemos que tener presente las aglomeraciones de caliza cuyo origen se remonta a pequeñas células vivas y a los

procesos químicos que captan los átomos de calcio diseminados en el agua del mar, convirtiéndolos en duros esqueletos cristalinos llamados calcita y aragonita.

El ciclo del calcio continúa, nuevamente se disuelve en agua y sus iones existen en la corteza terrestre en complejas soluciones acuosas, formando las llamadas aguas duras ricas en calcio, precipitándose con el azufre como yeso y también cristalizándose en estalactitas y estalagmitas. El calcio también se usa para la construcción en forma de cemento, en hornos inmensos se libera el calcio del ácido carbónico, creando la cal y por ende el cemento.

### **3.3.6 El potasio en la corteza terrestre**

El potasio tiene una estrecha relación con el sodio, más de cien minerales lo forman en la corteza terrestre y es parte en la composición de otras cien especies de minerales. El potasio se forma cuando se enfrían estos elementos que se distribuyen de acuerdo a su capacidad de migración para formar gases volátiles. Sin embargo, este no se forma con los primeros minerales, se le encuentra en las profundidades en las rocas basálticas que cubren los fondos de los mares en no más del 0.3%.

En las partes altas se acumulan los iones más móviles, encontramos el silicio, el aluminio y también encontramos potasio conjuntamente con el sodio. De estos compuestos se forman las rocas graníticas que cubren gran parte de la superficie terrestre, formando los continentes flotando sobre el basalto. Los granitos se consolidan en lo profundo de la corteza terrestre y el potasio se encuentra en una concentración del 2% componiendo el mineral feldespato, lo encontramos en las micas negras y blancas y también se acumula en una cantidad considerable en el mineral blando de la leucita. El nacimiento de los átomos de potasio en la tierra es en granitos y las lavas ácidas de las rocas eruptivas.

Los minerales al ser erosionados se oscurecen las rocas y la arena de cuarzo puro se acumula en forma de dunas, como los restos de los que fueran los macizos graníticos, en todo este proceso, también se erosionan los feldespatos, del cual los agentes activos extraen el sodio y el potasio, estableciendo un mineral laminar que es la arcilla. El sodio y potasio están juntos hasta esta etapa, ya que cuando se destruye el granito se separan.

El sodio es altamente soluble y viaja conjuntamente con el agua sin depositarse en ningún lado hasta llegar a los océanos, para formar el cloruro de sodio que es el principal producto primario de la industria química. En contraparte el potasio esta en muy pequeñas concentraciones en el agua de mar, el número de átomos de sodio y potasio contenidos en las rocas es usualmente el mismo, pero de cada mil átomos de potasio, solo dos van a parar a las océanos y el resto quedan retenidos en la capa de terreno, los suelos tienen la capacidad de adsorberlo. El potasio, sodio y calcio son extraídos con facilidad por las raíces de las plantas, las plantas no pueden vivir sin él, sin este importante elemento se marchitan y mueren.

El potasio también esta presente en los animales, por ejemplo en los músculos del hombre en donde prevalece sobre el sodio, hay mucho potasio en el cerebro, los riñones, el hígado y el corazón. Este átomo es un elemento esencial en la época de crecimiento del organismo pero en la parte adulta ya no dependemos mucho del mismo.

El ciclo del potasio comienza desde el suelo, desde ahí es extraído por las plantas, pasa en parte al organismo animal o a los hombres y con el estiércol vuelve nuevamente al suelo. A pesar de esto, ciertos átomos logran emigrar a los océanos y, conjuntamente, con otras sales fijan la salinidad del agua marina, a pesar que hay cuarenta veces más átomos de sodio que de potasio. A través de las diferentes eras geológicas, algunos cuerpos de agua se secan por los movimientos endógenos y exógenos de la tierra, la evaporación del agua es tan fuerte de tal manera que va precipitando diferentes sales, este orden es primero cristaliza en el fondo el carbonato cálcico, luego el yeso, después el cloruro sódico que es la sal común. En este cuerpo de agua seco queda una solución salina que esta saturada de diversas sales entre las principales sales de sodio y potasio.

A mediados del siglo XIX el químico alemán Liebig observó la importancia que tenía el potasio y el fósforo para el desarrollo de las plantas pronunciando las siguientes palabras " Sin estos dos elementos no puede haber fecundidad en los campos ". En virtud de esto, el salitre que era traído desde América del Sur de los grandes salares de Chile y Bolivia, eran sumamente costosos, no se conocían otras fuentes productoras de fósforo y, la harina de huesos que propuso Liebig, eran igualmente caros. Durante mucho tiempo la producción



mundial de potasio estaba en manos de los alemanes, en los yacimientos salinos de Stassfurt en los montes Harz, desde los cuales se distribuían a todos los países por trenes.

En la actualidad, la ex Unión Soviética tiene la mayor reserva de potasio en los mares de Perm, en los cuales este se depositó hace 300 o 400 millones de años. Un isótopo de potasio posee propiedades radioactivas a pequeña escala, emite espontáneamente diversos rayos y se transforma en átomos de otras sustancias, este isótopo después de varias reagrupaciones forma átomos de calcio. El Potasio es radioactivo, al ser inestable forma átomos de calcio y el calor que se desprende es aproximadamente el 20% del calor que se produce en la tierra, según investigadores de la ex Unión Soviética. Calculando la cantidad del argón 40 que se produce durante esta desintegración se puede determinar con exactitud la edad de las rocas (Fersman, 1971).

### **3.3.7 El magnesio en la corteza terrestre**

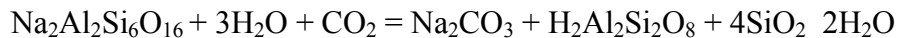
Los átomos de magnesio se encuentran en los suelos en diferentes minerales conjuntamente con el silicio, entre otros se tiene la biotita y olivino. En los suelos calcáreos se encuentra el magnesio en forma de dolomita, al igual que los anteriores átomos se incorpora al suelo desde el estiércol o desperdicios vegetales y pasa a formar algunas sales solubles, para luego lixiviarse o sea nuevamente adsorbido por el suelo.

El hierro, zinc y posiblemente el manganeso puede sustituir parcialmente al magnesio en los minerales naturales, la variedad portadora de hierro la ferropericlasa puede contener entre 5 y 10% de FeO. La periclasa puede sintetizarse rápidamente de  $MgCl_2$  o  $Mg(OH)_2$  que a su vez puede cambiar a hidromagnesita, la ferropericlasa se altera a brucita con separación de óxido de hierro. La periclasa es un mineral de alta temperatura resultante del metamorfismo de dolomías y calizas magnesianas, se encuentra en aureolas de contacto formadas por disociación de dolomita  $CaMg(CO_3)_2 = CaCO_3 + MgO + CO_2$ , rodeada por un borde de brucita desarrollado por la hidratación de la periclasa.

### **3.3.8 El sodio en la corteza terrestre**

Este ion se encuentra en cantidades considerables en los mares y en los suelos de climas áridos en donde la salinidad es muy alta. El sodio es muy soluble, por eso se acumula en los mares

transportados por las escorrentías, esto hace que se lixivie de los suelos, pero una parte de éste queda adsorbido, a pesar de que su retención es baja. Existen diversos minerales que contienen sodio, entre otros se tiene la halita, mirabilita, salitre sódico y termonatrita. Se forma sodio por el intemperismo de los aluminosilicatos de acuerdo a lo siguiente:



Los carbonatos y bicarbonatos de sodio que se forman reaccionan con los ácidos y sales formando cloruro de sodio, sulfato de sodio, nitrato de sodio, durante el intemperismo de minerales que contienen cloro, el sodio se presenta como sulfato de sodio

### 3.3.9 El cloro en la corteza terrestre

El átomo de cloro proviene de la descomposición de la roca ígnea, en especial con las evaporitas, de la descomposición de la materia orgánica y de la evaporación de los océanos. Por su alta solubilidad, no se fija bien en los suelos y es muy fácil su lavado.

### 3.3.10 El boro en la corteza terrestre

El átomo de boro se encuentra en forma de borosilicatos en los granitos de las rocas ígneas, en la turmalina se encuentra en mayor cantidad. Es un elemento metaloide, semiconductor, trivalente que existe abundantemente en el mineral bórax. Hay dos alótropos de este; uno es amorfo formando un polvo marrón, y el otro es metálico de color negro. La forma metálica es dura (9.3 en la escala de Mohs) y mal conductor a temperatura ambiente. No se ha encontrado libre en la naturaleza.

El Boro se forma en un proceso denominado astillamiento "spallation", que radica en la rotura de núcleos más pesados causado por el bombardeo de rayos cósmicos. Este proceso no es muy frecuente, por lo que su abundancia es muy pequeña. La concentración estimada del boro en la corteza terrestre es de 10 ppm, el boro es mucho más abundante en rocas sedimentarias (300 ppm) que en rocas ígneas (3 ppm), esta diferencia es derivada de tres características: la preferencia del boro por las fases fundidas (elemento incompatible), su alta movilidad en la fase acuosa y su fuerte afinidad por minerales arcillosos (elemento litófilo). Este átomo llega a la corteza terrestre a través de diferentes vías y son, la precipitación atmosférica que contiene

pequeñas cantidades de boro en disolución, el vulcanismo y la actividad geológica análoga, que liberan roca fundida con concentraciones variables de boro.

### 3.4 Intemperismo

Esta sección se elaboró en base a varios autores: (Doneen, 1975; Ortega, 1976; Del Valle, 1983; Vásquez, 1984; Gonzáles, 1982; Huez, 1985; Alperovich *et al.*, 1986; Santana, 1989; Ruiz, 1995; Cintora y Ortega, 2005 y Hernández *et al.*, 2006). La definición de intemperismo a través de los diferentes investigadores que se dedicaron a este tema es diferente, sin embargo hay preferencia de usar este término en vez de meteorización, ya que el intemperismo, no solamente se refiere a la geología de los cambios producidos por las acciones físico químicas del ambiente, sino que también incluye la alteración por la acción biológica.

En forma resumida el intemperismo es la búsqueda de equilibrio de diversas variables, de tal manera que se alteran los minerales para producir otro resultante. La velocidad con que sucede este proceso depende de: tamaño de las partículas constituyentes, permeabilidad, posición del nivel freático, composición y temperatura, composición y cantidad de agua activa en el proceso, presencia de oxígeno y de otros gases en el sistema, macro y microflora presente, área superficial relativa y solubilidad relativa.

Son muchas las variables de este proceso, y es por eso que los productos finales cambian tanto incluso en lugares relativamente cercanos

#### 3.4.1 Intemperismo químico

Los minerales esenciales que se encuentran en las rocas ígneas son los silicatos ( $\text{SiO}_2$ ) principalmente de  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ . El intemperismo libera estos iones de acuerdo a la clasificación propuesta por Goldshmidt citada por Del Valle (1983) que se aprecia en la Figura 3.

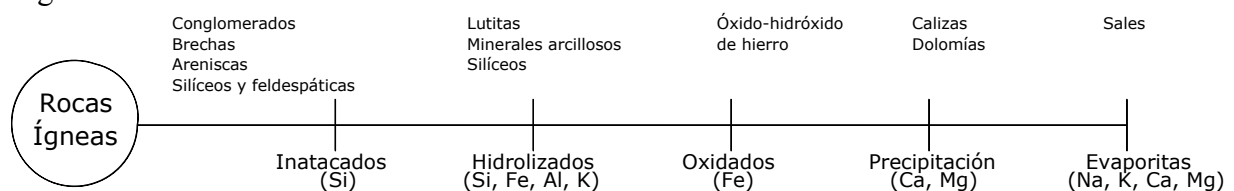


Figura 3. Liberación de iones de acuerdo a Goldshmidt.

Los iones básicos se combinan con los aniones cloruro, sulfato y bicarbonato. El cloro, azufre y anhídrido carbónico están contenidos en los gases volcánicos y no proceden del intemperismo de las rocas continentales. Para percibir mejor el fenómeno se divide en dos: la intemperización geoquímica y edafoquímica. En la geoquímica ocurren los fenómenos de solución, oxidación, reducción, y combinación de ambos ciclos como la disolución, hidrólisis, hidratación, carbonatación y quelación.

La oxidación se produce en las rocas bien aireadas, cuando la cantidad de oxígeno es considerable y las necesidades biológicas por el mismo son menores. La oxidación desintegra los minerales que contiene  $\text{Fe}^{2+}$  y hace que se rompa la estructura mineral se rompe al formar  $\text{Fe}^{3+}$ . Como ejemplo se tiene la mica de biotita que contiene mucho  $\text{Fe}^{2+}$ , el hierro liberado se une con el ion  $\text{OH}^-$  u oxígeno para dar origen a minerales de hierro. Esto quiere decir que la oxidación simple es una reacción con el oxígeno para formar óxidos y si el agua es incorporada va a formar hidróxidos. Este fenómeno tiene los colores característicos de rojo o amarillo en los suelos y rocas. La energía que se produce en la oxidación del hierro, manganeso, azufre y fósforo es consumida por las bacterias produciendo livianita.

La reducción es lo opuesto a la oxidación y ocurre en lugares saturados en agua, como los niveles freáticos en sitios anaeróbicos y de poco oxígeno. Las reducciones de óxidos de hierro son muy evidentes, los colores rojos y amarillentos son cambiados a verde y gris. La materia orgánica es reducida por fermentación de bacterias y los sulfatos son reducidos por bacterias a sulfuros.

Finalmente la hidrólisis se produce entre los minerales y el agua, es decir entre el  $\text{H}^+$  u  $\text{OH}^-$  del agua y de los iones del mineral. La concentración de los iones hidrógeno son importantes porque cuando incrementa la concentración de éste, decrece la solubilidad del  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , lo que causa la formación de minerales arcillosos. También se combina con  $\text{OH}^-$ , los cuales se incrementan con la hidrólisis y permite continuar la misma.

### **3.4.2 Intemperismo mineral**

El intemperismo mineral depende entre otros de: tamaño, forma y perfección del cristal así como del acceso de agentes del intemperismo. En el cuarzo, que es el más estable de los

minerales, todos los átomos de oxígeno se comparten con más de un silicio. En los feldespatos, el  $\text{Ca}^{2+}$  no se adapta bien a la estructura de cadena pero, balancea las cargas por medio de una sustitución del silicio con aluminio. El  $\text{K}^+$  se adapta al menor desequilibrio de cargas del menor intercambio de aluminio y silicio y, se adapta bien a los espacios de las cadenas. Los minerales son cantidades elevadas de bases hidrolizadas

La solubilidad de los minerales intemperizados, la formación de minerales cristalinos y el índice de eliminación de los productos de la intemperización como los óxidos-silicios y las bases se relacionan con el tiempo para formar nuevos minerales.

El intercambio iónico tiene una alta capacidad de intercambiar los cationes de los metales alcalinos y alcalinotérreos, extrae de las soluciones los cationes divalentes de los metales alcalinotérreos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), cationes de los metales alcalinos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), con esto se controla la precipitación de las diferentes sales hacia la fase sólida de los suelos.

La formación de la alcalinidad de los suelos esta relacionado con la actividad biológica de las bacterias sulfato-reductoras que precisamente reducen los compuestos sulfáticos en un medio anaeróbico.

### **3.5 Origen de las sales**

Esta sección fue elaborada en base a los autores: (Bazilevich, 1965; Fersman, 1973; Polynov y Kovda, 1973; Aceves, 1979; Arora y Coleman, 1979; Bawer, 1987; Risacher y Fritz, 1995). En todo el planeta hay grandes extensiones de depósitos salados, la mayor corteza de sal del mundo se encuentra en la zona fría y desértica del Altiplano boliviano llamado el salar de Uyuni, contiene enormes riquezas mineras, tal es el caso, el mayor potencial de litio que existe en la tierra. Como se puede apreciar el salar de Uyuni esta alejado del Océano, por lo que no es una condición que se presente salinidad en los lugares cercanos al mar. Existen alrededor de 50,000 lagos salados y costas distribuidos por todos los continentes incluido la Antártica; además del litio se extraen más sales.

Estos lugares se explotan desde la antigüedad, el cloruro de sodio para la alimentación, los carbonatos de sodio para detergentes, boratos para activar la fusión de los metales, los nitratos

para fabricar pólvora y fertilizantes, al igual que la potasa; esta se extrae de evaporitas marinas y también de salmueras continentales. El carbonato de sodio se utiliza mucho en la industria química, se produce a partir del cloruro de sodio y de carbonato de calcio. El sulfato de sodio se utiliza en la industria del papel y del vidrio. Las zeolitas son silicoaluminatos hidratados de sodio, potasio y calcio que se encuentran en los lagos salado-alcalinos. También se puede utilizar para extraer algunos elementos radioactivos de los vertidos de las centrales nucleares.

Algunos lagos salados son reservas de energía térmica, estos son estratificados en los que una capa de salmuera de densidad elevada esta cubierta por una capa menos densa. Esto sucede por la interfase que existe entre las dos, deja penetrar la radiación solar a la capa inferior, pero no la deja salir, lo que hace calentar a la salmuera profunda. Los carbonatos de sodio, como en natrón que precipita a partir de salmueras muy básicas con pH mayores a 10 y los sulfatos de sodio con lo boratos y silicatos de sodio, son exclusivos de sales de evaporitas continentales.

La formación de las sales neutras y alcalinas depende inicialmente de la composición del agua dulce y de la naturaleza de las rocas de la cuenca. La evaporación puede variar en la composición de las disoluciones debidas a su interacción con los sedimentos. Esto se puede ver en el Cuadro 2 de acuerdo a (Risacher y Fritz, 1995).

Cuadro 2. Familia de sales y salmueras.

	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Cl <sup>-</sup>	halita	silvita	bischofita	antarcticita
	NaCl	KCl	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
	354-357 g/kg	285-358 g/kg	1120-1170 g/kg	1370-1660 g/kg
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mirabilita		epsomita	yeso
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O		MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O
	91-622 g/kg		369-695 g/kg	2.24-2.63 g/kg
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	natrón		magnesita	calcita
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O		MgCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>
	183-835 g/kg		0.15-0.07 g/kg	0.08-0.05 g/kg

El primer mineral que precipita es la calcita (CaCO<sub>3</sub>) por su pequeña solubilidad, si hay más calcio que carbonato en el agua inicial, la disolución se enriquecerá en calcio y se empobrecerá en carbonato; esto es una sal neutra, lo que quiere decir que el pH estará entre 7 y 8. Si existe más carbonato que calcio, será el carbonato el que se concentrará, esto quiere decir que la disolución se vuelve básica y el pH será superior a 10; esto es una sal alcalina.

Las acumulaciones salinas con la participación de la soda se ha dividido en once etapas. Las primeras cuatro se caracterizan por un aumento en la concentración de las soluciones de baja concentración que poseen muchos bicarbonatos de los metales alcalinotérreos y traza de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  hasta acumulaciones sulfato-sódicas y clorhídrico-sódicas, en estas etapas ocurre una adsorción de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  por el intercambio catiónico que aumenta la alcalinidad y acumulación en los sulfatos y los cloruros.

En la quinta y sexta etapas empieza una adsorción del  $\text{Na}^+$  y una desadsorción de los iones intercambiables del  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ; el  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  participan en la precipitación del  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$  en la fase sólida, parcialmente se precipita el  $\text{CaSO}_4$  y se forman acumulaciones sódico-sulfáticas y sódico-clorhídricas de alta concentración. En la octava etapa se solubilizan los carbonatos de los metales alcalinotérreos en soluciones de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y del yeso en soluciones de  $\text{NaCl}$ . En estas etapas se inhibe la acumulación de soda y se acumulan los sulfatos de sodio, magnesio y el cloruro de sodio.

En las etapas diez y once las acumulaciones salinas son altamente saturadas con sulfatos de sodio y precipitación de éste en estado sólido, una introducción activa del sodio y un desplazamiento del calcio y magnesio adsorbidos en unión con el cloro y formando  $\text{CaCl}_2$  y  $\text{MgCl}_2$ . Los sulfatos se precipitan en forma de mirabilita, durante el proceso de metamorfización de las soluciones altamente concentradas de sulfato de sodio, frecuentemente, se precipitan de una sal compleja, conjuntamente con el yeso formando glauberita  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$ .

De acuerdo a Fersman (1973), la geoquímica de las sales sobre la tierra esta basada en la solución y la extracción de los iones desde los minerales, en el transcurso del intemperismo seguido por su precipitación y acumulación bajo condiciones específicas físico geográficas. La secuencia de extracción de los iones, su velocidad de migración y la capacidad de algunos iones de acumularse en depresiones en forma de sales, están proporcionadas por el coeficiente de energía de los iones (C.E.), el radio iónico, la valencia y la estabilidad de los cristales que los compone, esto se observa en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Secuencia de la extracción de algunos iones durante el intemperismo de acuerdo con (Fersman, 1973).

Secuencia de extracción	Iones	I (C.E.)	Iones	II (C.E.)	Iones	III (C.E.)	Iones	IV (C.E.)
	Cl <sup>-</sup>	0.23	Na <sup>+</sup>	0.45	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	2.75	Fe <sup>+3</sup>	5.15
Iones	Br <sup>-</sup>	0.23	K <sup>+</sup>	0.36			Al <sup>+3</sup>	4.25
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.18	Ca <sup>2+</sup>	1.75				
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.66	Mg <sup>2+</sup>	2.10				
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.78						

La movilidad de los componentes formados y las cantidades que ellos acumulan en forma de sales que se incrementan con el decrecimiento del coeficiente de energía y el decrecimiento del radio iónico y de su valencia.

Polynov y Kovda (1973) dividieron los elementos en categorías que se expresan en el Cuadro 4, de acuerdo a su movilidad durante el intemperismo y su capacidad de migración:

Cuadro 4. Categorías de migración (movilidad de los elementos) de acuerdo con (Polynov y Kovda, 1973).

Categorías	Iones
1. Virtualmente no solubles	Si de cuarzo
2. Ligeramente solubles	Fe, Al, Si
3. Solubles	Si, P, Mn
4. Altamente soluble	Ca, Na, K, Mg, Cu, Co, Zn
5. Muy altamente soluble	Cl, Br, I, S, C, B

La participación de los elementos en la formación de suelos salinos y las aguas naturales que van a facilitar la migración de los mismos, se ha dividido en cinco categorías presentadas en el anterior Cuadro 4, los cuales van a componer las sales para su futura acumulación, entre otras se tiene: NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>.

La formación de los suelos salinos en las épocas actuales, es parte de estos procesos geoquímicas que han ocurrido en la tierra desde el inicio de su formación y consiste en el intercambio y diferenciación de las sales entre el magma, los océanos, la corteza y la superficie de los continentes.

### 3.6 Solubilidad de las sales más importantes

Esta sección se elaboró de acuerdo a la literatura (Brooks *et al.*, 1958; Bower y Goertzen, 1958; Bower y Hatcher, 1962; Bower *et al.*, 1962; Bower *et al.*, 1965; Bower *et al.*, 1968;



Fersman, 1973; Polynov y Kovda, 1973; Bahri, 1988; Dean, 1991; Curtin *et al.*, 1992; Aguilera y Martínez, 1996). La pérdida en la producción de los cultivos sucede cuando las sales solubles se concentran en la zona radical y no son lixiviadas, éstas por lo regular proceden de las agua de riego o de un nivel freático superficial. Puede existir acumulación de sales solubles en tales concentraciones en el suelo que no permita al cultivo extraer suficiente agua. Este fenómeno se estudiara más a detalle en relación al efecto osmótico que se produce en las plantas.

Conociendo lo problemas que conllevan las sales solubles es muy importante para este sistema hidrográfico estudiar la solubilidad de las sales, esto se presenta en el Cuadro 5 citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).

Cuadro 5. Máxima solubilidad en agua de algunas sales encontradas en suelo a diferentes temperaturas (solución saturada) (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).

Sales	g por 100 g de solución						En g por litro de solución					
	Temperatura en °C						Temperatura en °C					
	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	6.5	10.9	17.9	28.4	32.4	32.1	70	122	213	371	441	429
NaHCO <sub>3</sub>	6.5	7.5	8.7	10.0	11.3	12.7	68	80	93	107	121	137
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.3	8.3	16.1	29.0	32.6	31.8	45	90	185	373	430	415
NaCl	26.3	26.3	26.4	26.5	26.7	26.9	318	317	317	317	318	319
MgSO <sub>4</sub>	18.0	22.0	25.2	28.0	30.8	33.4						
MgCl <sub>2</sub>	38.8	39.8	41.0	48.6	51.8	54.5						
CaCl <sub>2</sub>	37.3	39.4	42.7	50.7	53.4	56.0						
NaNO <sub>3</sub>	42.1	44.4	46.7	49.0	51.2	53.3	570	607	686	686	724	762
KNO <sub>3</sub>	11.6	17.5	24.0	31.5	39.0	46.1	125	194	279	384	498	614
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	51.7	52.2	52.6	53.2	53.9	54.7	814	823	829	839	852	867
KHCO <sub>3</sub>	18.4	21.5	25.2	28.5	32.2	36.0						
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	6.7	8.5	10.0	11.5	12.9	14.2	71	91	108	125	142	157
KCl	21.9	23.8	25.6	27.2	28.7	30.1	253	277	301	322	341	359

La presencia en solución de sales que tiene un ion común que causa la solubilidad de las mismas, por ejemplo la existencia de una solución de grandes cantidades de cloruro de magnesio provoca un sostenido decrecimiento en la solubilidad o precipitación del cloruro de sodio, tal como se indica en el Cuadro 6 citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).

Cuadro 6. Solubilidad de las sales en el sistema NaCl-MgCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O en porcentaje por peso.

Temperatura	NaCl	MgCl <sub>2</sub>	Fase sólida
25° C	26.45	0.00	NaCl
	20.50	5.00	NaCl
	15.20	10.00	NaCl
	10.50	15.00	NaCl
	6.50	20.00	NaCl
	3.30	25.00	NaCl
	1.10	30.00	
	0.30	35.55	NaCl + MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O
	0.00	35.60	MgCl <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O

Un cambio similar ocurre con el aumento en la concentración del NaCl. También se observa este fenómeno con los sulfatos.

En el caso de mezclas de sales con distintos iones, la solubilidad de los componentes tiene el nivel más bajo de los aumentos de solubilidad. Esto es atribuible a la disociación de sales, por ejemplo el cambio de la solubilidad del yeso cuando se combina con cloruros tal como se aprecia en los Cuadros 7 y 8 citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973). Cuando la solubilidad aumenta, es un efecto atribuible al Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> al bajar la actividad del Ca<sup>2+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en solución, así que las concentraciones de los iones deben aumentar para mantener la constancia de la solubilidad.

Cuadro 7. Solubilidad de CaSO<sub>4</sub> en agua en presencia de cantidades diferentes de NaCl a temperaturas de 20°C (en g por 100 g de agua) citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).

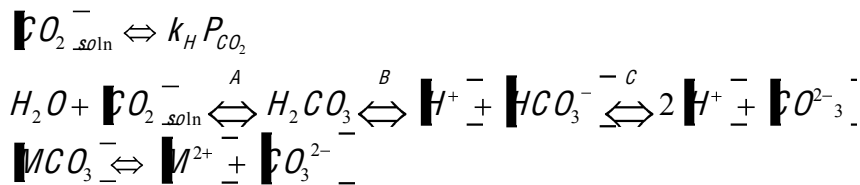
NaCl	CaSO <sub>4</sub>
0.0	0.204
17.2	0.787
20.0	0.823
24.4	0.820
29.3	0.614
35.8	0.709

Cuadro 8. Solubilidad de CaSO<sub>4</sub> en agua en presencia de CaCl<sub>2</sub> (en g por 100 g de agua) citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).

CaCl <sub>2</sub>	CaSO <sub>4</sub>
0.0	0.204
5.2	0.103
9.9	0.086
18.9	0.077
40.8	0.035

La solubilidad de los carbonatos es influenciado por el contenido de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> disuelto en agua, tal como se aprecia en los Cuadros 9 y 10 citados en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973). El CO<sub>2</sub> en el agua es altamente soluble, varios investigadores dicen que es 12 veces mayor que el aire lo que provoca un humedecimiento intenso.

La química del carbonato de calcio y magnesio es más compleja (Cuadro 11) que la de los iones de sodio y potasio. La solubilidad del ion carbonato es controlada por la presión parcial del dióxido de carbono en el aire en equilibrio con el agua del suelo, la temperatura del suelo y la concentración de electrolitos disueltos en el agua del suelo. La solubilidad del carbonato expresa el equilibrio hasta establecerse; esto se da de la siguiente manera:



Las constantes involucran una temperatura de 25°C y son la constante de Henry  $k_H=0.0344$ , la primera y segunda constante de disociación del ácido carbónico,  $k_1=4.45 \times 10^{-7}$  y  $k_2=4.69 \times 10^{-11}$ , ( $pK_1=6.35$ ,  $pK_2=10.3$ ), para las reacciones B, C y la solubilidad del carbonato. La presión parcial del dióxido de carbono a 25°C en el aire es  $P_{\text{CO}_2}$ . Para el carbonato de calcio, la solubilidad es  $K_{sp}=[\text{Ca}][\text{CO}_3]=4.8 \times 10^{-9}$  a 25°C,  $pK_{sp}=8.32$ . El CaCO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O.

Cuadro 9. Solubilidad de CaCO<sub>3</sub> respecto a la calidad de CO<sub>2</sub> en el aire a temperatura de 16°C citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).

Contenido de CO <sub>2</sub> en el aire en porcentaje por volumen	Contenido en gramos en 1 L de agua		pH
	De acuerdo a Sclesing	De acuerdo a Weigner	
0.00	0.0131	0.0131	10.23
0.03	0.0634	0.0627	8.48
0.3	0.1334	0.1380	7.81
1.0	0.2029	0.2106	7.47
10	0.4700	0.4889	6.80
100	1.0986	1.0577	6.13

Las sales más importantes en los suelos y aguas de las zonas áridas y semiáridas son: Sales del ácido carbónico: Carbonatos de calcio, de magnesio, de sodio, de potasio (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Sales del ácido sulfúrico: Sulfatos de de calcio, de magnesio, de

sodio, de potasio ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ). Sales del ácido clorhídrico: Cloruro de calcio, de magnesio, de sodio, de potasio ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ).

Cuadro 10. Solubilidad de  $\text{CaCO}_3$  con presión parcial de  $\text{CO}_2$  igual a 0.00032 atm (en g por litro) citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).

Temperatura en °C	0	5	10	15	20	25	30
Contenido de $\text{CaCO}_3$	0.081	0.075	0.070	0.065	0.060	0.056	0.052

Cuadro 11. Solubilidad del  $\text{MgCO}_3$  en agua en temperatura de 18 °C para diferentes presiones de  $\text{CO}_2$  citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).

Presión de $\text{CO}_2$ en atm	0.005	0.001	0.01	0.1	1.0	5.0	10.0
Contenido de $\text{MgCO}_3$ en $\text{g L}^{-1}$	2.51	3.11	6.04	12.2	25.8	46.0	59.2

En soluciones muy concentradas, algunas sales fácilmente solubles, forman nuevos compuestos, frecuentemente, más solubles todavía.

En la Figura 4 citado por Irrigation/Drainage and Salinity (1973) es claro notar que cuando la temperatura de la sal aumenta, también aumenta su solubilidad y también, el  $\text{NaCl}$  es una sal que permanece con poca variación en su solubilidad, es casi independientemente de la temperatura.

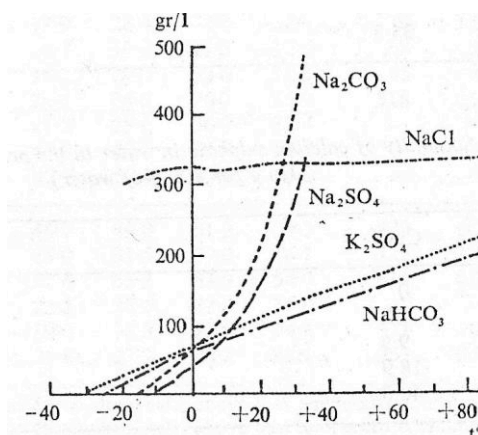


Figura 4. Solubilidad de diferentes sales en función de la temperatura citado en (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).

### 3.7 Composición promedio del agua en ríos y en océanos

En el Cuadro 12 según Taylor y McLennan (1985) se representan los iones en  $\text{mg L}^{-1}$  que se encuentran presentes en el agua de mar y en los ríos, como se puede observar están inmersos

todos los elementos de la tabla periódica solamente variando su concentración y su tiempo de residencia. Tal como lo dijo Plinio El Viejo, por el año 25 DC " Las características de las aguas son un reflejo de los materiales con los que esta en contacto ".

Cuadro 12. Composición de diversos iones y clasificación de acuerdo a (Taylor y Mc Lennan, 1985).

Elemento	Clasificación <sup>a</sup>	Agua de ríos	Agua de mar	Agua de mar enriquecida	Máxima residencia <sup>b</sup>
Li	I	3 x 10 <sup>-3</sup>	1.7 x 10 <sup>-1</sup>	56.7	2.5 x 10 <sup>6</sup>
Be	IV	1 x 10 <sup>-5</sup>	2 x 10 <sup>-7</sup>	0.02	6.3 x 10
B	I	1 x 10 <sup>-2</sup>	4.5	450	1.6 x 10 <sup>7</sup>
F	I	1 x 10 <sup>-3</sup>	1.3	1300	7.9 x 10 <sup>5</sup>
Na	I	6.3	1.08 x 10 <sup>4</sup>	1714	2 x 10 <sup>8</sup>
Mg	I	4.1	1.29 x 10 <sup>3</sup>	315	5 x 10 <sup>7</sup>
Al	IV	5 x 10 <sup>-2</sup>	8 x 10 <sup>-4</sup>	0.016	7
Si	II	6.5	2.8	0.43	7.9 x 10 <sup>3</sup>
P	II	2 x 10 <sup>-2</sup>	7.1 x 10 <sup>-2</sup>	3.6	4 x 10 <sup>4</sup>
S	I	3.7	9 x 10 <sup>2</sup>	243	5 x 10 <sup>8</sup>
Cl	I	7.8	1.95 x 10 <sup>4</sup>	2500	6.3 x 10 <sup>8</sup>
K	I	2.3	3.99 x 10 <sup>2</sup>	173	1.3 x 10 <sup>7</sup>
Ca	I	15	4.13 x 10 <sup>2</sup>	27.5	1.3 x 10 <sup>6</sup>
Sc	IV	4 x 10 <sup>-6</sup>	6.7 x 10 <sup>-7</sup>	0.17	2.5 x 10
Ti	IV	3 x 10 <sup>-3</sup>	<9.6 x 10 <sup>-4</sup>	0.32	<1.6 x 10 <sup>2</sup>
V	IV	9 x 10 <sup>-4</sup>	1.2 x 10 <sup>-3</sup>	1.3	7.9 x 10 <sup>3</sup>
Cr	IV	1 x 10 <sup>-3</sup>	2 x 10 <sup>-4</sup>	0.2	1.6 x 10 <sup>3</sup>
Mn	III	7 x 10 <sup>-3</sup>	3 x 10 <sup>-4</sup>	0.04	3.2 x 10
Fe	IV	4 x 10 <sup>-2</sup>	6 x 10 <sup>-5</sup>	0.0015	6.9 x 10 <sup>-1</sup>
Co	III	1 x 10 <sup>-4</sup>	2 x 10 <sup>-6</sup>	0.02	2 x 10
Ni	III	3 x 10 <sup>-4</sup>	5 x 10 <sup>-4</sup>	1.7	1.6 x 10 <sup>3</sup>
Cu	III	7 x 10 <sup>-3</sup>	3 x 10 <sup>-4</sup>	0.04	1 x 10 <sup>3</sup>
Zn	III	2 x 10 <sup>-2</sup>	4 x 10 <sup>-4</sup>	0.02	1.3 x 10 <sup>3</sup>
Ga	IV	9 x 10 <sup>-5</sup>	2 x 10 <sup>-5</sup>	0.2	7.9 x 10 <sup>2</sup>
Ge	IV	5 x 10 <sup>-6</sup>	5 x 10 <sup>-6</sup>	1	2 x 10 <sup>3</sup>
As	IV	2 x 10 <sup>-3</sup>	1.7 x 10 <sup>-3</sup>	0.85	1 x 10 <sup>5</sup>
Se	III	6 x 10 <sup>-5</sup>	1.3 x 10 <sup>-4</sup>	2.2	6.3 x 10 <sup>5</sup>
Br	I	2 x 10 <sup>-2</sup>	6.7 x 10	3350	7.9 x 10 <sup>8</sup>
Rb	I	1 x 10 <sup>-3</sup>	1.2 x 10 <sup>-1</sup>	120	7.9 x 10 <sup>5</sup>
Sr	I	7 x 10 <sup>-2</sup>	7.6	109	5 x 10 <sup>6</sup>
Y	III	4 x 10 <sup>-5</sup>	7 x 10 <sup>-6</sup>	0.18	1.3 x 10 <sup>2</sup>
Zr	IV		3 x 10 <sup>-5</sup>		1.6 x 10 <sup>2</sup>
Nb	IV		<5 x 10 <sup>-6</sup>		<2.5 x 10 <sup>2</sup>
Mo	I	6 x 10 <sup>-4</sup>	1.1 x 10 <sup>-2</sup>	18.3	3.2 x 10 <sup>5</sup>
Ag	III	3 x 10 <sup>-4</sup>	2.7 x 10 <sup>-6</sup>	0.009	2 x 10 <sup>4</sup>
Cd	IV	1 x 10 <sup>-5</sup>	8 x 10 <sup>-5</sup>	8	7.9 x 10 <sup>4</sup>
In	IV		1 x 10 <sup>-7</sup>		1 x 10 <sup>3</sup>
Sn	IV	4 x 10 <sup>-5</sup>	5 x 10 <sup>-7</sup>	0.013	1.3 x 10 <sup>2</sup>
Sb	III	7 x 10 <sup>-5</sup>	1.5 x 10 <sup>-4</sup>	2.1	1.3 x 10 <sup>5</sup>
I	I	7 x 10 <sup>-3</sup>	5.6 x 10 <sup>-2</sup>	8	<4 x 10 <sup>6</sup>
Cs	I	2 x 10 <sup>-5</sup>	2.9 x 10 <sup>-4</sup>	14.5	4 x 10 <sup>4</sup>
Ba	III	2 x 10 <sup>-2</sup>	1.4 x 10 <sup>-2</sup>	0.7	5 x 10 <sup>3</sup>
La	III	4.8 x 10 <sup>-5</sup>	4.5 x 10 <sup>-6</sup>	0.094	7.9 x 10
Cl	III	7.9 x 10 <sup>-5</sup>	3.5 x 10 <sup>-6</sup>	0.044	3.2 x 10
Pr	III	7.3 x 10 <sup>-6</sup>	1 x 10 <sup>-6</sup>	0.14	7.9 x 10
Nd	III	3.8 x 10 <sup>-5</sup>	4.2 x 10 <sup>-6</sup>	0.11	7.9 x 10
Sm	III	7.8 x 10 <sup>-6</sup>	8 x 10 <sup>-7</sup>	0.1	7.9 x 10
Eu	III	1.5 x 10 <sup>-6</sup>	1.5 x 10 <sup>-7</sup>	0.1	6.3 x 10
Gd	III	8.5 x 10 <sup>-6</sup>	1 x 10 <sup>-6</sup>	0.11	1 x 10 <sup>2</sup>
Tb	III	1.2 x 10 <sup>-6</sup>	1.7 x 10 <sup>-7</sup>	0.14	1 x 10 <sup>2</sup>
Dy	III	7.2 x 10 <sup>-6</sup>	1.1 x 10 <sup>-6</sup>	0.15	1 x 10 <sup>2</sup>
Ho	III	1.4 x 10 <sup>-6</sup>	2.8 x 10 <sup>-7</sup>	0.2	1.3 x 10 <sup>2</sup>
Er	III	4.2 x 10 <sup>-6</sup>	9.2 x 10 <sup>-7</sup>	0.22	1.6 x 10 <sup>2</sup>
Tm	III	6.1 x 10 <sup>-7</sup>	1.3 x 10 <sup>-7</sup>	0.21	1.6 x 10 <sup>2</sup>
Yb	IV	3.6 x 10 <sup>-6</sup>	9 x 10 <sup>-7</sup>	0.25	2 x 10 <sup>2</sup>
Lu	IV	6.4 x 10 <sup>-7</sup>	1.4 x 10 <sup>-7</sup>	0.22	2 x 10 <sup>2</sup>
Hf	IV		<7 x 10 <sup>-6</sup>		<1.3 x 10 <sup>3</sup>

Elemento	Clasificación <sup>a</sup>	Agua de ríos	Agua de mar	Agua de mar enriquecida	Máxima residencia <sup>b</sup>
Ta	IV		$<2.5 \times 10^{-6}$		$<2.0 \times 10^3$
W	IV	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	3.3	$7.9 \times 10^4$
Re	IV		$4 \times 10^{-6}$		$3.2 \times 10^6$
Au	III	$2 \times 10^{-6}$	$4.9 \times 10^{-6}$	2.5	$1.6 \times 10^6$
Hg	III	$7 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6}$	0.14	$7.9 \times 10^3$
Tl	IV		$1 \times 10^{-5}$		$6.3 \times 10^3$
Pb	III	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-6}$	0.002	$5 \times 10$
Bi	IV		$2 \times 10^{-5}$		$2.5 \times 10^4$
Th	IV	$<1 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-8}$	0.0006	3.4
U	I	$4 \times 10^{-5}$	$3.1 \times 10^{-3}$	2.7	$1 \times 10^6$

Fuente: Taylor y McLennan (1985)

<sup>a</sup> I. El elemento conservador cuya concentración está directamente relacionada con la salinidad de agua de mar

II. El elemento que no se conserva cuya concentración varía con la profundidad o regionalmente dentro de los océanos o tanto en general debido a la participación en la actividad biológica

III. El elemento que no se conserva cuya concentración cambia irregularmente y no está relacionado con la profundidad, salinidad o factores geográficos.

IV. Sin clasificación.

<sup>b</sup> Representa el tiempo de residencia oceánico en años

### 3.8 Peligro de la salinización sódica

La alta toxicidad de las sales de los carbonatos de sodio y las propiedades físicas extremadamente no favorables que dan estas sales a suelos y espesores subyacentes, conducen a que los suelos alcalinos de salinidad sódica se caractericen por tener baja fertilidad.

La existencia de carbonatos y bicarbonatos de metales alcalinos, condicionan la aparición en los suelos de salinización sódica de una reacción fuertemente alcalina. El pH de estos suelos es mayor a 8.5 y varía de 9-11.

En suelos alcalinos, los bicarbonatos y carbonatos de los metales alcalinos pueden existir prácticamente en forma pura o en mezclas con cloruros y sulfatos. Por eso es necesario diferenciar suelos sódico-sulfáticos y suelos sódico-clorhídricos. Existe una función directa entre la alcalinidad de los extractos acuosos de estos suelos y la cantidad de sodio intercambiable: Entre mayor sea la alcalinidad debida a carbonatos y bicarbonatos, compuestos alcalinos y pH, de los suelos de salinidad sódica, mayor es el grado de saturación del suelo con sodio intercambiable (Richards *et al.*, 1959).

#### 3.8.1 Causas de la aparición del sodio intercambiable

La alta concentración de electrolitos en los suelos salinos anula la carga de las micelas de los coloides de los suelos y provoca su deshidratación, quitando películas de agua durante la

hidratación de los iones de los electrolitos. Los suelos salinos se encuentran coagulados, que cementan la masa del suelo en agregados más o menos diferenciados

Los cationes que son adsorbidos por los coloides del suelo, de acuerdo con la acción de aumentar la movilidad de los coloides del suelo, se colocan en la siguiente serie de descenso llamada “serie de Hofmeister”:  $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Ba}^{2+}$ . La aparición de los suelos sódicos está relacionada con el  $\text{Na}^+$  y solamente en menor grado con el  $\text{K}^+$ .

Los suelos sódicos presentan diversos problemas para la agricultura, entre otros se tiene poca resistencia al agua, gran dureza cuando se deshidratan y en caso contrario gran plasticidad cuando se hidratan y también problemas de infiltración que se explicaran más adelante.

El calcio es un buen coagulante al formar flóculos permitiendo que el suelo tenga una estructura granulada, contrario a lo que sucede con el  $\text{Na}^+$ . Esto es porque el sodio se disocia en mucho mayor grado de la superficie coloidal que el calcio, en la capa difusa aparecen más iones de sodio que de calcio y magnesio. Cuando el sodio es el ion predominante en la capa difusa, la carga de partículas coloidales no se neutraliza totalmente y estas se repelen, a este proceso, cuando las partículas del suelo se convierten en unidades independientes, se le llama dispersión. Alrededor del sodio y de los coloides, aumenta la hidratación favoreciendo la precipitación de los coloides y en definitiva el suelo en el agua (Ortega, 1976).

Existen varios estudios en donde la doble capa difusa esta saturada de cationes divalentes, esta más comprimida que cuando lo esta con cationes monovalentes; esto precisamente hace el mecanismo floculante de los cationes divalentes.

Cuando la carga sin neutralizar de las partículas es alta, éstas se repelen mutuamente y el suelo se dispersa en el agua y lo hace más plástico. El suelo con buena estructura tiene partículas coloidales con pequeña carga residual, y ocasiona que las propiedades agronómicas de los suelos sean buenas, así entonces el suelo no se dispersa, la fracción arcillosa no tiene movilidad y el agua se infiltra fácilmente.

Según Gorbunov, citado por Ortega (1976), los cationes adsorbidos influyen en las diferentes propiedades de los suelos siguiendo el Cuadro 13:

Cuadro 13. Propiedades del suelo en función de los cationes según actividad relativa de los mismos (Ortega, 1976).

Propiedad del suelo	Actividad relativa
Dispersión	$\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$
Máxima higroscopicidad	$\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$
Velocidad de infiltración	$\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+}$
Ascensión capilar	$\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$
Plasticidad	$\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$
Resistencia de los agregados	$\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+}$
Reacción de la solución pH	$\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$
Hinchamiento	$\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$
Velocidad de absorción del agua	$\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+}$
Adherencia	$\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$
Disociación de coloides	$\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$
Compresibilidad cuando hay deshidratación	$\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$

Si observamos la dispersión, es claro notar que el suelo saturado con  $\text{Na}^+$  se dispersa más que el suelo que esta saturado con  $\text{K}^+$  y, este suelo, se dispersará más que el suelo saturado con  $\text{Mg}^{2+}$  y así hasta llegar al Aluminio, según se interpreta el Cuadro 13.

### 3.9 Calidad de las aguas para riego

La calidad del agua para riego esta establecida por la concentración y la composición de los componentes disueltos que contenga. La baja calidad de las aguas superficiales y subterráneas es un factor limitante en los distritos de riego.

El estudio en la calidad y cantidad de agua para riego en décadas pasadas era un formalismo, puesto que existían fuentes abundantes de excelente calidad y fácil acceso, pero, en la actualidad y en los años por venir, esto ya no es tan cierto. El uso excesivo del recurso de buena calidad hace que en el presente debamos estudiar las aguas y hacer una evaluación de los efectos adversos que se producen en los suelos, los cultivos, los animales e incluso a las personas que van a consumir estos productos (Richards *et al.*, 1959).

El problema radica en adaptar las aguas disponibles hacia el requerimiento necesario, esto quiere decir que hay que conocer la causa y efecto entre el uso y el problema futuro, para comprender si es admisible el requerimiento. Las experiencias y los resultados medidos han hecho que se tengan ciertas normas técnicas para evaluar el uso del agua de una determinada calidad, de tal manera que se pueda pronosticar la respuesta de los cultivos.



### **3.9.1 Factores que afectan al agua para el riego**

Existen diversos factores que afectan, pero son cinco, los que tienen que ver directamente con las sales totales que van a afectar a los cultivos, estos son: Composición química del agua, cultivos a regar, suelos a regar, clima, irrigación y drenaje (Ayers y Westcot, 1987).

1. Composición química del agua: La calidad del agua está determinada por el contenido de sales totales y la composición iónica, estas pueden dar una indicación general de su calidad.
2. Cultivos a regar: Éste puede ser el factor más importante a considerar, la calidad del agua tiene que estar estrechamente ligada a la tolerancia del cultivo específico y el ciclo de las sales totales o la concentración de un ion específico. Existen varias tablas de tolerancia de muchos tipos de cultivos.
3. Suelos a regar: El comportamiento del suelo en contacto con el agua depende de las propiedades físicas iniciales. La presencia de una capa impermeable afecta a la distribución de sales en el perfil. La aplicación de agua con sales o libre de sales podría reducir la salinidad de los suelos, siempre y cuando exista un adecuado drenaje, esto puede marcar una gran diferencia.
4. Clima: La evapotranspiración y la precipitación son muy importantes elementos a considerar, la profundidad del agua aplicada al cultivo depende de ello. La cantidad de precipitación distribuida uniformemente durante la temporada de crecimiento del cultivo diluirá la solución del suelo, pero no provocará lixiviación en el perfil.
5. Irrigación y drenaje: La aplicación de una cantidad de agua menor a la requerida, provocará la acumulación de sales, hay que buscar un equilibrio al respecto, teniendo una irrigación y drenaje adecuado.

### **3.10 Efectos de las sales solubles sobre los cultivos**

La acumulación de las sales en la zona radical de los cultivos, es un factor que impide el crecimiento de los mismos, el ensalitramiento de los suelos provoca condiciones desfavorables para el desarrollo de las plantas. Existen cuatro problemas concretos al respecto, estos son el efecto osmótico, la concentración total de sales solubles, la concentración de

relativa del sodio con respecto a otros cationes, la toxicidad por ion específico y, bajo ciertas condiciones, la concentración de bicarbonatos con relación a la concentración de calcio más magnesio (Aceves, 1979).

### **3.10.1 Efecto osmótico**

Es necesario diferenciar el potencial osmótico y la presión osmótica, el potencial se refiere a la presencia de partículas en la solución como un potencial del agua, este es equivalente a la presión osmótica en magnitud, pero de signo contrario. El potencial osmótico se expresa en términos de energía, mientras que la presión osmótica siempre se expresa en unidades de presión.

A continuación se explican las propiedades coligativas de las soluciones y la teoría de los gases ideales.

#### **3.10.1.1 Propiedades coligativas de las soluciones**

Las propiedades físicas de las soluciones que dependen del número pero no del tipo de partículas de soluto, en una cantidad dada de solvente, se conocen como propiedades coligativas. Existen cuatro de esas propiedades: 1. presión de vapor, 2. punto de ebullición, 3. punto de congelación y 4. presión osmótica.

##### **1. Presión de vapor**

La presión de vapor es la presión ejercida por un vapor en equilibrio con su líquido. Cuando se añade un soluto no volátil a un disolvente puro, la presión de vapor del disolvente es menor en esa solución. Con esto se puede establecer que la adición de un soluto no volátil, lleva a una disminución de la presión de vapor del disolvente. Esto se debe a que en una solución, el número de partículas de disolvente se reduce debido a la presencia del soluto. Este efecto se puede explicar por la ley de Raoult, la cual establece que la presión de vapor en una solución ideal, es directamente proporcional a la fracción molar del disolvente en la solución. Matemáticamente se puede expresar:

$$P_A = P_A^0 X_A$$

donde:  $P_A = P_{\text{disolvente en solución}}$ ,  $P_A^0 = P_{\text{disolvente puro}}$ ,  $X_A = X_{\text{disolvente}}$

La ley de Raoult aplica en soluciones ideales, es decir en soluciones en la que el soluto y disolvente son químicamente similares, de manera tal, que las fuerzas intermoleculares entre soluto y disolvente son similares a las de soluto con soluto y disolvente con disolvente. Muy pocas soluciones son ideales: algunas se desvían positivamente (sus presiones de vapor son mayor de lo esperado) y otras negativamente (sus presiones de vapor son menor de lo esperado).

## 2. Elevación en el punto de ebullición y depresión en el punto de congelación

A. Aumento en el punto de ebullición: Al añadir un soluto no volátil a un disolvente puro, el punto de ebullición del solvente en la solución aumenta. Esto se puede explicar en términos de la reducción en la presión de vapor producido por el soluto. Si la presión de vapor es menor, se requiere aumentar la temperatura a un valor mayor que el punto de ebullición normal, para que la presión de vapor sea 1.0 atm. Para soluciones diluidas, el cambio en el punto de ebullición es directamente proporcional a la concentración de soluto dado por la expresión:

$$\Delta T_b = K_b m$$

donde:  $\Delta T_b$  = aumento en el punto de ebullición ( $T_{b \text{ solución}} - T_{b \text{ disolvente}}$ )

$K_b$  = constante de elevación en el punto de ebullición (característica de cada disolvente).

$m$  = molalidad de la solución = moles soluto/kg disolvente

B. Depresión en el punto de congelación: Una solución que contiene un soluto no volátil se congela a una temperatura más baja que el disolvente puro. Esto se debe a la disminución en la presión de vapor causada por el soluto. Para soluciones diluidas, el cambio en el punto de congelación es directamente proporcional a la concentración de soluto dado por la expresión:

$$\Delta T_f = K_f m$$

donde:  $\Delta T_f$  = depresión en el punto de congelación ( $T_{f \text{ disolvente}} - T_{f \text{ solución}}$ )

$K_f$  = constante de depresión en el punto de congelación (característica de cada disolvente).

$m$  = molalidad de la solución = moles soluto/kg disolvente

## 3. Presión Osmótica

Ciertas membranas semipermeables permiten el paso del disolvente a través de ellas pero no las del soluto. El flujo de disolvente a través de una membrana semipermeable, para igualar la concentración de soluto en ambos lados de la membrana, se conoce como ósmosis. Este proceso puede evitarse si se aplica presión a la solución. La presión que, cuando aplicada, impide el proceso de ósmosis, se conoce como presión osmótica. Para una solución la presión osmótica está relacionada con su concentración y, todo se puede explicar de una mejor manera, por la ley de los gases ideales que se explica a continuación:

### 3.10.1.2 Teoría de los gases ideales

La ley de los gases ideales se explica a través de la teoría cinética, el comportamiento macroscópico de los gases (el observado desde el punto de vista experimental), se debe al comportamiento microscópico de sus moléculas. Estas moléculas se mueven libremente en el espacio sin otra limitación, que aquella que le impone el choque con las demás moléculas o con las paredes del lugar en el que se encuentran. La pequeña densidad de los gases, se debe a la gran distancia entre moléculas y, la pequeña viscosidad, se explica teniendo en cuenta que las fuerzas intermoleculares entre dos choques consecutivos son despreciables.

Se llaman gases ideales o también gases de Avogadro, a los gases hipotéticos que cumplen exactamente la ecuación:

$$pv = RT \quad (1)$$

$p$ : es la presión en Pa;  $R$ : Es la constante universal de los gases cuyo valor en unidades SI es: 8.314511984 (J/mol k). Esta es una constante física que relaciona la cantidad de gas medido en número de moléculas con la presión y la temperatura. Un gas ideal es un gas imaginario que cumple esta constante, la cual asume que el volumen de moléculas es 0, la mayor parte de los gases reales se acercan a esta constante en condiciones de temperatura y alejado del punto de licuefacción o sublimación.

$T$ : Es la temperatura que esta expresada en °Kelvin: 273.15 K

$v$ : Es el volumen específico molar definido por:

$$v = \frac{V}{n} \quad (2)$$

$V$ : Es el volumen ocupado por el gas.

$n$ : Es la cantidad de sustancia (moles), que puede calcularse si se conoce la masa  $m$  del gas presente y su masa molecular  $M$

$$n = \frac{m}{M}$$

Sustituyendo 2 en 1 se tiene:

$$pV = nRT \quad (3)$$

Partiendo de la ecuación 1 o 3, se deduce una serie de leyes que deben cumplir los gases ideales. Estas leyes pueden resumirse así: Ley de Avogadro, ley de Boyle, leyes de Gay-Lussac, ley de Joule y ley de Mayer.

Con respecto a los calores específicos a volumen y presión constante, para un gas ideal no son en general constantes, estos son funciones exclusivas de la temperatura como se comprueba con la ley de Joule.

Ley de Avogadro resulta de la ecuación 3, se deduce que puesto que  $R$  es una constante universal, para valores determinados de  $p$ ,  $V$ ,  $T$ , todos los gases poseen la misma cantidad de sustancia, es decir el mismo número de moles, despejando se tiene:

$$n = \frac{pV}{RT} \quad (4)$$

También es cierto que el volumen ocupado en igualdad de condiciones de presión y temperatura, por una misma cantidad de sustancia, es el mismo para todos los gases ideales. El volumen molar en condiciones normales tendrá un valor fijo, despejando 1 se tiene:

$$V_o = \frac{RT_o}{P_o} = \frac{8.314512 \times 273.15}{1.01325 \times 10^5} = 22.414 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \quad (5)$$

$$T_o = 273.15 \text{ K}$$

$$p_o = 1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa (presión normal).}$$

La definición de mol se deduce que un mol está constituido por un número fijo de unidades elementales (átomos, moléculas, etc), este número fue calculado por Avogadro; el valor que se considera hoy es:

$$N_A = 6.0221367 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (6)$$

Este es el llamado número o constante de Avogadro, que es una constante universal. Entonces se puede relacionar la cantidad de sustancia con el número  $N$  de moléculas presentes:

$$n = \frac{N}{N_A} \quad (7)$$

La ecuación 3 se puede poner así:

$$pV = \frac{N}{N_A} RT \quad (8)$$

Las leyes de Boyle y de Gay-Lussac, se deduce si una determinada cantidad de gas ideal está en un estado determinado la ecuación 3 se puede poner así:

$$\frac{pV}{T} = nR = \text{constante} \quad (9)$$

Esto indica que, si el gas experimenta cualquier evolución, el producto de la presión por el volumen dividido por la temperatura tendrá el mismo valor en cualquier punto del proceso.

Entre dos estados A, B, por ejemplo la ecuación 9 se puede escribir así:

$$\frac{P_A V_A}{T_A} = \frac{P_B V_B}{T_B} \quad (10)$$

Si la evolución es isotérmica la ecuación 9 se puede escribir así:

$$T = \text{constante} \quad pV = \text{constante} \quad p_A V_A = p_B V_B$$

Que es la ley de Boyle (o de Boyle-Marriote) que indica que, a lo largo de una evolución isotérmica, el volumen y la presión son inversamente proporcionales, esta es la primera ley de Gay-Lussac, que indica que en una evolución isobárica el volumen crece linealmente con la temperatura.

$$\frac{V}{T} = \text{constante} \quad \frac{V_A}{T_A} = \frac{V_B}{T_B} \quad (11)$$

Si la evolución es isocora (volumen constante), la ecuación 9 se permite escribir:

$$V = \text{constante} \quad \frac{P}{T} = \text{constante} \quad \frac{P_A}{T_A} = \frac{P_B}{T_B} \quad (12)$$

Que es la segunda ley de Gay-Lussac, indica que un proceso a volumen constante para un gas ideal la presión variará proporcionalmente con la temperatura.

La presión osmótica esta relacionada directamente con el crecimiento de las plantas, debido al potencial osmótico. Esto se debe a una alta concentración de sales en el suelo. Al incrementarse los iones el potencial osmótico descenderá, el grado de disminución del potencial osmótico está en función de la concentración de los solutos como por el tipo de ellos.

Para calcular la presión osmótica se utiliza la ecuación 3:

$$PV = nRT$$

Con base en datos experimentales del personal del laboratorio de Estados Unidos de Norteamérica propone la siguiente formula para la estimación de la presión osmótica.

$$PO = 0.36 \times CE \quad (13)$$

$PO$  = Presión osmótica (atm)

$CE$  = Conductividad eléctrica (dS m<sup>-1</sup>)

La presión osmótica de una solución es directamente proporcional a la concentración de solutos, con la concentración total de sólidos disueltos (STD), entonces se puede establecer una igualdad entre estos dos parámetros (CE y STD) y obtener una ecuación que nos permite calcular con mayor exactitud:

$$PO = 0.36 \times CE$$

$$CE = \frac{PO}{0.36}$$

$$STD = 640 \times CE$$

$$CE = \frac{STD}{640}$$

Entonces se tiene:

$$\frac{PO}{0.36} = \frac{STD}{640}$$

$$PO = \frac{STD \times 0.36}{640}$$

Donde:

$PO$  = Presión osmótica (atm)

$CE$  = Conductividad eléctrica (dS m<sup>-1</sup>)

$STD$  = Total de sólidos solubles (ppm)

La ecuación 13 es otro método para comprobar la autenticidad de los valores obtenidos en laboratorio utilizando la teoría de los gases ideales y el osmómetro.

El Cuadro 14 es un ejemplo de aplicación de las propiedades coligativas de los elementos. Con los datos expresados en el Cuadro 12, se pueden calcular el número de partículas que se encuentra en los ríos y en los mares. Es importante notar que las cantidades con las que estamos trabajando son muy grandes.

Cuadro 14. Número de partículas en corrientes y agua de mar.

Elemento	PA g/mol	N.O.	P.E. g	Agua de ríos mg/l	Agua de mar mg/l	Agua de mar enriquecida mg/l	Agua de ríos mol/l	Agua de mar mol/l	Agua de mar enriquecida mol/l	Numero de Partículas agua de ríos	Numero de Partículas Agua de mar	Numero de Partículas Agua de mar enriquecida
Li	6.94	1	6.94	0.003	0.17	56.7	0.00000043228	0.00002449568	0.05670000000	2.60231E+17	1.47464E+19	3.41334E+22
Be	9.01	2	4.505	0.00005	0.0000002	0.02	0.0000000555	0.0000000002	0.00001000000	3.34073E+15	1.33629E+13	6.02E+18
B	10.81	3	3.6033	0.01	4.5	450	0.00000092507	0.00041628122	0.15000000000	5.56892E+17	2.50601E+20	9.03E+22
F	18.99	1	18.99	0.003	1.3	1300	0.00000015798	0.00006845708	1.30000000000	9.51027E+16	4.12112E+19	7.826E+23
Na	22.99	1	22.99	6.3	0.000108	1714	0.00027403219	0.00000000470	1.71400000000	1.64967E+20	2.82801E+15	1.03183E+24
Mg	24.3	2	12.15	4.1	0.00129	315	0.00016872428	0.00000005309	0.15750000000	1.01572E+20	3.1958E+16	9.4815E+22
Al	26.98	3	8.9933	0.05	0.0008	0.016	0.00000185322	0.00000002965	0.00000533333	1.11564E+18	1.78503E+16	3.21067E+18
Si	28.08	4.2	6.6857	6.5	2.8	0.43	0.00023148148	0.00009971510	0.00010238095	1.39352E+20	6.00285E+19	6.16333E+19
P	30.97	5	6.194	0.02	0.071	3.6	0.00000064579	0.00000229254	0.00072000000	3.88763E+17	1.38011E+18	4.3344E+20
S	32.06	6	5.3433	3.7	0.09	243	0.00011540861	0.00000280724	0.04050000000	6.9476E+19	1.68996E+18	2.4381E+22
Cl	35.45	1357	2.6124	7.8	0.000195	2500	0.00000220028	0.00000000006	0.00184229919	1.32457E+18	3.31142E+13	1.10906E+21
K	39.1	1	39.1	2.3	0.0399	173	0.00005882353	0.00000102046	0.17300000000	3.54118E+19	6.14317E+17	1.04146E+23
Ca	40.08	2	20.04	15	0.0413	27.5	0.00037425150	0.00000103044	0.01375000000	2.25299E+20	6.20324E+17	8.2775E+21
Sc	44.95	3	14.983	0.000004	0.00000067	0.17	0.00000000009	0.00000000001	0.00005666667	5.35706E+13	8.97308E+12	3.41133E+19
Ti	47.87	4.3	11.133	0.003	0.00096	0.32	0.0000006267	0.00000002005	0.00007441860	3.77272E+16	1.20727E+16	4.48E+19
V	50.94	5432	0.0094	0.0009	0.0012	1.3	0.00000001767	0.00000002356	0.00000023932	1.0636E+16	1.41814E+16	1.44072E+17
Cr	51.99	3	17.33	0.001	0.0002	0.2	0.00000001923	0.00000000385	0.00006666667	1.15791E+16	2.31583E+15	4.01333E+19
Mn	54.94	42763	0.0013	0.007	0.0003	0.04	0.00000012741	0.00000000546	0.00000000094	7.67019E+16	3.28722E+15	5.63104E+14
Fe	55.84	3.2	17.45	0.04	0.00006	0.0015	0.00000071633	0.00000000107	0.00000046875	4.31232E+17	6.46848E+14	2.82188E+17
Co	58.93	2.3	25.622	0.0001	0.000002	0.02	0.00000000170	0.00000000003	0.00000869565	1.02155E+15	2.0431E+13	5.23478E+18
Ni	58.69	2.3	25.517	0.0003	0.0005	1.7	0.00000000511	0.00000000852	0.00073913043	3.07719E+15	5.12864E+15	4.44957E+20
Cu	63.54	2.1	30.257	0.007	0.0003	0.04	0.00000011017	0.00000000472	0.00001904762	6.63204E+16	2.8423E+15	1.14667E+19
Zn	65.4	2	32.7	0.02	0.0004	0.02	0.00000030581	0.00000000612	0.00001000000	1.84098E+17	3.68196E+15	6.02E+18
Ga	69.72	3	23.24	0.00009	0.00002	0.2	0.00000000129	0.00000000029	0.00006666667	7.77108E+14	1.72691E+14	4.01333E+19
Ge	72.64	4	18.16	0.000005	0.000005	1	0.00000000007	0.00000000007	0.00025000000	4.14372E+13	4.14372E+13	1.505E+20
As	74.92	3.5	21.406	0.002	0.0017	0.85	0.00000002670	0.00000002269	0.00024285714	1.60705E+16	1.36599E+16	1.462E+20
Se	78.96	4	19.74	0.000006	0.00013	2.2	0.00000000008	0.00000000165	0.00055000000	4.57447E+13	9.91135E+14	3.311E+20
Br	79.9	1357	0.0589	0.02	0.67	3350	0.00000025031	0.00000838548	0.00246868091	1.50688E+17	5.04806E+18	1.48615E+21
Rb	85.47	1	85.47	0.001	0.12	120	0.00000001170	0.00000140400	0.12000000000	7.04341E+15	8.45209E+17	7.224E+22
Sr	87.62	2	43.81	0.07	7.6	109	0.00000079890	0.00008673819	0.05450000000	4.8094E+17	5.22164E+19	3.2809E+22
Y	88.9	3	29.633	0.00004	0.000007	0.18	0.00000000045	0.00000000008	0.00006000000	2.70866E+14	4.74016E+13	3.612E+19
Zr	91.22	4	22.805		0.00003		0.00000000000	0.00000000033	0.00000000000	0	1.97983E+14	0
Nb	92.9	5.3	17.528		0.000005		0.00000000000	0.00000000005	0.00000000000	0	3.24004E+13	0
Mo	95.9	65432	0.0015	0.0004	0.011	18.3	0.00000000417	0.00000011470	0.00000027968	2.51095E+15	6.90511E+16	1.68367E+17
Ag	107.9	1	107.9	0.0003	0.0000027	0.009	0.00000000278	0.00000000003	0.00009000000	1.67377E+15	1.50639E+13	5.418E+18
Cd	112.4	2	56.2	0.00001	0.00008	8	0.00000000009	0.00000000071	0.00400000000	5.35587E+13	4.2847E+14	2.408E+21
In	114.8	3	38.267		0.0000001		0.00000000000	0.00000000000	0.00000000000	0	5.2439E+11	0
Sn	118.7	4.2	28.262	0.00004	0.0000005	0.013	0.00000000034	0.00000000000	0.00000309524	2.02864E+14	2.5358E+12	1.86333E+18
Sb	121.7	3.5	34.771	0.00007	0.00015	2.1	0.00000000058	0.00000000123	0.00060000000	3.46261E+14	7.41988E+14	3.612E+20
I	126.9	1357	0.0935	0.007	0.056	8	0.00000005516	0.00000044129	0.0000589536	3.32072E+16	2.65658E+17	3.54901E+21
Cs	132.9	1	132.9	0.00002	0.00029	14.5	0.00000000015	0.00000000218	0.01450000000	9.05944E+13	1.31362E+15	8.729E+18
Ba	137.3	2	68.65	0.02	0.014	0.7	0.00000014567	0.00000010197	0.00035000000	8.76912E+16	6.13838E+16	2.107E+20
La	138.9	3	46.3	0.000048	0.0000045	0.094	0.00000000035	0.00000000003	0.00003133333	2.08035E+14	1.95032E+13	1.88627E+19
Cl	35.45	1357	0.0261	0.000079	0.0000035	0.044	0.00000000223	0.00000000010	0.00000003242	1.34155E+15	5.94358E+13	1.95195E+16



### 3.11 Peligro de la Salinidad

La calidad de las aguas para riego esta determinada por la concentración y la composición de constituyentes disueltos en el agua, durante la evaluación del uso de una agua de riego en la agricultura es necesario establecer la salinización e incremento de las concentraciones de algunos iones. Richards *et al.* (1959) ha puesto parámetros para evitar la salinización de los suelos. Con base en la conductividad eléctrica las aguas se clasifican de acuerdo al Cuadro 15.

Cuadro 15. Clasificación de las aguas con base en la conductividad eléctrica (Richards *et al.*, 1959).

Clasificación	Tipo	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Observaciones
C1	Aguas de Baja salinidad	<250	Existe en condiciones normales de riego
C2	Aguas de salinidad media	250-750	Necesita un moderado lavado
C3	Aguas altamente salinas	750-2250	No utilizar en suelos sin drenaje
C4	Aguas muy altamente salinas	>2250	Debe lavarse

C1: Las agua bajas en salinidad se pueden usar para riego en la mayoría de cultivos, en casi cualquier tipo de suelo sin temor que se desarrolle salinidad. Tal vez se requiera algún lavado, pero es necesario un buen sistema de riego, exceptuando suelos de pobre permeabilidad.

C2: Las aguas de salinidad media se utilizan siempre que haya un lavado moderado, sin embargo la producción de los cultivos moderadamente tolerantes a las sales, es factible sin un control de salinidad riguroso.

C3: Las aguas altamente salinas no se pueden, utilizar en suelos sin drenaje, si existiera un tipo de drenaje, se necesitarían prácticas especiales de control de salinidad y los cultivos a regar deberían ser muy tolerantes a las sales.

C4: Las aguas muy altamente salinas no son apropiadas para riego bajo condiciones normales, sin embargo, se pueden utilizar ocasionalmente cuando los suelos son permeables, se debe aplicar exceso de agua y seleccionar cultivos altamente tolerantes a las sales.

### 3.12 Clasificación de las aguas para riego con base a la salinidad efectiva (SE)

Representan un peligro las sales más solubles del agua al formar parte de la solución del suelo, al sustraerse de la concentración total los carbonatos de calcio y magnesio y los sulfatos de calcio, cuando estos se precipitan en el agua de riego, pasan a formar parte de la solución del suelo y dejan de participar en el ascenso de la presión osmótica.

Se calcula la salinidad efectiva con lo siguiente

Si  $Ca^{2+} \geq CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}$  Entonces:

SE=suma de cationes-  $CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}$

Si  $Ca^{2+} < CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}$  pero  $Ca^{2+} > CO_3^{2-} + HCO_3^-$  Entonces:

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

Si  $Ca^{2+} < CO_3^{2-} + HCO_3^-$  pero  $Ca^{2+} + Mg^{2+} > CO_3^{2-} + HCO_3^-$  Entonces:

SE=suma de cationes-  $CO_3^{2-} + HCO_3^-$

Si  $Ca^{2+} + Mg^{2+} < CO_3^{2-} + HCO_3^-$  Entonces:

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

Todos los iones se expresan en meq L<sup>-1</sup> se puede observar que a la suma de cationes se le resta el comportamiento de las sales que se pueden precipitar y que, por lo tanto se encuentran en menor cantidad, puesto que estos son los que determinan la cantidad máxima de sal que se puede precipitar en un momento dado. El Cuadro 16 indica la clasificación.

Cuadro 16. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo a la salinidad efectiva (Richards *et al.*, 1959)

Clase	Salinidad efectiva en meq L <sup>-1</sup>
Buena	<3.0
Condicionada	3.0-15.0
No recomendable	>15.0

### 3.13 Clasificación de las aguas para riego con base en la salinidad potencial (SP)

Esta determina la cantidad de Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> que afectan a los cultivos debido al aumento de la presión osmótica de la solución del suelo. Los cloruros y los sulfatos son sales que permanecen en la solución del suelo siempre que la humedad aprovechable para las plantas sea < 50%.

La ecuación para determinar es:

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

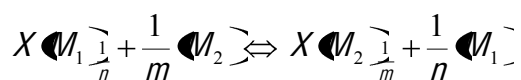
Las concentraciones están en meq L<sup>-1</sup>.

Cuadro 17. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad potencial (Richards *et al.*, 1959)

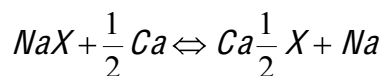
Clase	Salinidad potencial en meq L <sup>-1</sup>
Buena	<3.0
Condicionada	3.0-15.0
No recomendable	>15.0

### 3.14 Peligro de la sodicidad (Ecuación de Gapon).

La ecuación de Gapon ha sido usada largamente para predecir el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) como función de los iones en solución, estos son, el sodio y el calcio que están en equilibrio con la solución y el suelo. Esta ecuación se deriva de la siguiente reacción.



X es la superficie de las partículas con carga negativa y su suma es el complejo de intercambio catiónico; n es la valencia del ion M<sub>1</sub> y m es la valencia del ion M<sub>2</sub>. Es el proceso de intercambio catiónico, si se supone que solo se encuentra el ion Ca en estado adsorbido y en calidad de electrolito en solución, se tiene las sales del ion Na, entonces ambos interactúan con la ecuación siguiente:



X representa el complejo de intercambio catiónico y la concentración de la solución que esta expresado en mmoles L<sup>-1</sup>.

También esta ecuación se puede representare de esta manera:

$$\frac{\overline{Na}X}{\overline{Ca}X} = kg \frac{Na^+}{\sqrt{Ca^{2+}}}$$

kg el es coeficiente de selectividad de Gapon y es una constante de intercambio que debe ser determinada empíricamente.  $\overline{Na}$  y  $\overline{Ca}$  expresan las fracciones adsorbidas. Si agregamos el magnesio y expresamos las concentraciones en miliequivalentes se obtiene:

$$\frac{\overline{Na}}{\overline{Ca} + \overline{Mg}} = kg \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

La parte de la izquierda se le conoce como la relación de sodio intercambiable (RSI) y a la parte derecha se le conoce como Relación de Adsorción de Sodio (RAS). Si conocemos el RAS y kg, se puede calcular el valor del PSI siguiendo el siguiente razonamiento:

$$RSI = \frac{SI}{CIC - SI}$$

$$PSI = \frac{SI}{CIC} \times 100$$

SI es el sodio intercambiable y CIC es la capacidad de intercambio catiónico, entonces se tiene:

$$PSI = \frac{RSI}{1 + RSI} \times 100$$

La presencia de iones divalentes como el  $Ca^{2+}$  generalmente estabilizan o aumentan la conductividad hidráulica de los suelos y, en el caso del  $Na^+$ , la solución se percola a través de una capa de suelo, disminuyendo la conductividad hidráulica. La capacidad coagulante de los cationes aumenta con la valencia y, dentro de cada grupo, con su peso atómico.

La disponibilidad de  $Ca^{2+}$  en las aguas naturales, esta supeditada a que no esté precipitado por efecto de  $CO_3^{2-}$  y  $HCO_3^-$ , es por esta razón el  $Ca^{2+}$  se coloca en forma de  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  en las aguas de riego. El  $CaCO_3$  se forma y precipita el  $Ca^{2+}$ , esto sucede en pH altos de 9.5 a 10 y hace que disminuya la conductividad hidráulica.

### 3.15 Clasificación de las aguas con base al R.A.S.

Los suelos que tiene altas concentraciones de sodio intercambiable posee un  $pH > 8.4$ , alta dispersión de los coloides y altos contenidos de  $CO_3^{2-}$  y  $HCO_3^-$ . La relación de las aguas con respecto a la relación de adsorción de sodio se basa en el efecto que tiene el sodio sobre las condiciones físicas de los suelos. La clasificación por el efecto de sodio considera el efecto del RAS y la conductividad eléctrica, el cuadro 18 considera los valores más altos de acuerdo a la figura 54 citada en Richards *et al.* (1959) y sirve solamente de referencia.

Cuadro 18. Clasificación de las aguas en base al R.A.S.

Clasificación	Tipo	R.A.S.	Observaciones
S1	Aguas bajas en Na	<10	Poca probabilidad de PSI
S2	Aguas medias en Na	10-18	Presenta problemas si no hay lavado
S3	Aguas altas en Na	18-26	Necesita practicas especiales de manejo
S4	Aguas muy altas en Na	>26	Inadecuada excepto cuando es su salinidad baja

S1: Las aguas bajas en sodio se pueden utilizar para el riego en la mayoría de los cultivos con poca posibilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable, pero es posible que existan cultivos sensibles que pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

S2: Las aguas medias en sodio pueden ser perjudiciales en suelos con textura fina y, el peligro se multiplica, con una alta capacidad de intercambio catiónico, siempre que exista un lavado deficiente. Esta agua solo se puede utilizar en suelos con textura gruesa, con alto porcentaje de materia orgánica y buena permeabilidad.

S3: Las aguas altas en sodio pueden producir niveles tóxicos de sodio intercambiable. Se puede requerir de productos químicos como yeso o adicionar materia orgánica.

S4: Las aguas muy altas en sodio son inadecuadas para el riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando el uso del calcio o la aplicación de yeso no eleva el costo de la producción.

### 3.16 Ecuación para el cálculo del RAS<sub>aj</sub>

Esta ecuación fue creada por Bower *et al.* (1968) y es una modificación de la ecuación de Gapon.

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

Este es el RAS ajustado que es función de la disponibilidad del calcio en condiciones de una alcalinidad determinada. Cuando se tiene un pH de 8.4 es un suelo no sódico en equilibrio con el CaCO<sub>3</sub>. Para estimar la precipitación del ion carbonato del agua de riego, se utiliza el índice de saturación de Langelier (IS) citado por Ayers y Westcot (1987), indica el grado de saturación con CaCO<sub>3</sub> de la solución del suelo. El IS se define por la diferencia entre el pH del agua actual (pHa) y el pH teórico que el agua alcanzaría en equilibrio con el CaCO<sub>3</sub>.

$$IS = pHa - pH_c$$

$$IS = (8.4 - pH_c)$$

pH<sub>c</sub> es el pH teórico en equilibrio con la calcita CaCO<sub>3</sub> y se calcula:

$$pH_c = (pK_2 - pK_{ps}) + p(Ca^{2+} + Mg^{2+}) + p(CO_3^{2-} + HCO_3^-)$$

p(Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>) es el logaritmo negativo de la concentración molar del Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>.

$p(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$  se relaciona al logaritmo negativo de la concentración equivalente del  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ .

$(pK_2 - pK_{ps})$  son el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del  $\text{H}_2\text{CO}_3$  y el producto de solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  corregidos ambos por la fuerza iónica.

Si el índice de saturación es positivo, el  $\text{CaCO}_3$  va a precipitarse y, si es negativo, va a mantenerse en solución. No se toma en consideración la precipitación del sulfato de calcio, también hace equivalentes física y químicamente al calcio y magnesio.  $pH_a$  es el pH del agua y se determina en laboratorio, pero para el presente trabajo asumimos un valor de 8.4 que es el pH del  $\text{CaCO}_3$  en agua destilada. En el cuadro 19 se explica la manera de calcular  $pH_c$ .

Cuadro 19. Procedimiento para calcular el pHc de las aguas<sup>a,b</sup>. (Ayers y Westcot, 1987).

$\text{pHc}=(\text{pK}_2-\text{pK}_{\text{ps}})+\text{pCa}^{2+}+\text{p(Alk)}^{\text{c}}$			
Concentración meq L <sup>-1</sup>	$\text{pK}_2-\text{pK}_{\text{ps}}$	$\text{pCa}^{2+}$	p(Alk)
0.05	2.00	4.60	4.30
0.10	2.00	4.30	4.00
0.15	2.00	4.10	3.80
0.20	2.00	4.00	3.70
0.25	2.00	3.90	3.60
0.30	2.00	3.80	3.50
0.40	2.00	3.70	3.40
0.50	2.10	3.60	3.30
0.75	2.10	3.40	3.10
0.80	2.10	3.38	3.08
1.00	2.10	3.30	3.00
1.10	2.10	3.26	2.96
1.25	2.10	3.20	2.90
1.50	2.10	3.10	2.80
2.00	2.20	3.00	2.70
2.10	2.20	2.98	2.68
2.50	2.20	2.90	2.60
3.00	2.20	2.80	2.50
4.00	2.20	2.70	2.40
5.00	2.20	2.60	2.30
6.00	2.20	2.50	2.20
8.00	2.30	2.40	2.10
10.00	2.30	2.30	2.00
12.50	2.30	2.20	1.90
15.00	2.30	2.10	1.80
20.00	2.40	2.00	1.70
30.00	2.40	1.80	1.50
50.00	2.50	1.60	1.30
80.00	2.50	1.40	1.10

<sup>a</sup> Fuente: Nacayama (1982) citado por Ayers y Wescot 1987.

<sup>b</sup> El pHc es el pH teórico calculado para el agua de riego

<sup>c</sup> Entrando en la primera columna con las concentraciones en meq L<sup>-1</sup> de i) Ca+Mg+Na; ii) Ca; y iii) CO<sub>3</sub> + HCO<sub>3</sub>, se obtiene los valores de (pK<sub>2</sub> - pK<sub>ps</sub>), pCa y p(Alk), respectivamente.

### 3.17 Ecuación para el cálculo del RAS<sup>o</sup>

Es el RAS corregido que ajusta la concentración de calcio en el agua al valor de equilibrio esperado después del riego, también incluye los efectos del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), del bicarbonato (HCO<sub>3</sub>), de la salinidad sobre el calcio contenido en el agua de riego y que no es constituyente del agua del suelo. Supone la existencia del calcio en el suelo como caliza CaCO<sub>3</sub> u otros tipos de minerales como los silicatos y la no precipitación del magnesio.

El calculo del RAS corregido ayuda a entender los problemas de infiltración originados por concentraciones altas de sodio y bajas de calcio, en las agua de riego se calcula según Suarez (1981), Rhoades (1982) citado por (Ayers y Westcot 1987).

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

*Na*: contenido de sodio en el agua de riego en meq L<sup>-1</sup>.

*Ca<sup>o</sup>*: contenido corregido de calcio en el agua de riego meq L<sup>-1</sup>.

*Mg*: contenido de magnesio en el agua de riego meq L<sup>-1</sup>.

*Ca<sup>o</sup>* es el contenido de calcio corregido por las salinidad del agua (CEa), por el contenido de bicarbonato en relación a su propio contenido de calcio (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Ca<sup>2+</sup>) y por la presión parcial del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ejercida en los primeros milímetros del suelo (P=0.0007 atm.). El (Ca<sup>o</sup>) son los valores que representan la concentración final del calcio que permanecería en solución en el suelo, como resultado de aplicar agua de determinada salinidad (CEa) y contenido relativo de bicarbonatos en relación al calcio (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Ca<sup>2+</sup>). En el cuadro 20 se presentan los valores corregidos de Ca<sup>o</sup>.



Cuadro 20. Concentración de calcio ( $\text{Ca}^0$ ) en el agua de suelo, contenida en suelo cerca de la superficie, que resultaría de regar con aguas de determinado valor  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$  y conductividad  $\text{CEa}^{1,2,3}$ . (Ayers y Westcot, 1987).

	SALINIDAD DEL AGUA APLICADA (CEa) $\text{dS m}^{-1}$											
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3	4	6	8
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	5.71	5.87	6.06	6.31	6.52	6.86	7.13	9.57	7.91
0.25	4.51	4.65	4.76	4.92	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	5.62	5.91
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	0.43	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

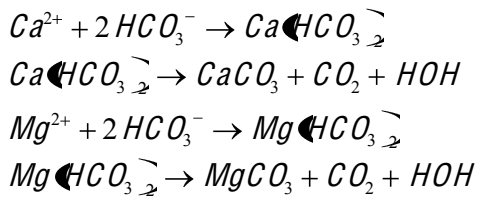
<sup>1</sup> Fuente: Suárez (1981) citado por (Ayers y Westcot, 1987).

<sup>2</sup> Supone: a) una fuente de calcio proveniente de silicatos o caliza ( $\text{CaCO}_3$ ); b) no existe precipitación del magnesio; y c) la presión relativa al  $\text{CO}_2$  cerca de la superficie del suelo es 0.0007 atmósferas.

<sup>3</sup>  $\text{Ca}^0$ ,  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$  expresados en  $\text{meq L}^{-1}$  y la CEa en  $\text{dS m}^{-1}$ .

### 3.18 Efecto de la concentración de los iones $\text{CO}_3^{2-}$ y $\text{HCO}_3^-$

Las aguas que tienen estos elementos vienen de yacimientos acuíferos de depósitos de basaltos, así como también de zonas industriales y puede ser por aguas subterráneas en las que se tiene procesos reductores de mucha intensidad. En estas, el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se precipitan en formas de  $\text{CO}_3^{2-}$  a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada de acuerdo a lo siguiente:



Estas reacciones no se forman en circunstancias ordinarias, pero a medida que se va reduciendo el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  aumenta la proporción de  $\text{Na}^+$  en las aguas de riego. Eaton (1995) propuso las siguientes ecuaciones:

$$\text{Por ciento de Na intercambiable} = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+} \times 100$$

$$\text{Por ciento de Na posible} = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \times \text{Na}^+ + \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-} \times 100$$

$$\text{Carbonato de Na residual} = \frac{\text{Na}_2\text{CO}_3}{\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}$$

Las concentraciones en  $\text{meq L}^{-1}$ . Los límites para Carbonato de Sodio Residual se encuentran en el Cuadro 21. Las aguas se consideran buenas, si el porcentaje de sodio posible < 50% y son condicionadas si el porcentaje de sodio posible > 50%.

Cuadro 21. Clasificación en base a los índices de Eaton. Carbonato de Sodio Residual (C.S.R.). (Richards *et al.*, 1959).

Clasificación	Tipo	C.S.R. $\text{meq L}^{-1}$	Observaciones
1	Aguas altas en C.S.R.	>2.5	No son buenas para el riego
2	Aguas medias en C.S.R.	1.25-2.5	Dudosas para el riego
3	Aguas bajas en C.S.R.	<1.25	Buenas para el riego

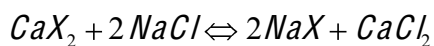
Si en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el contenido de calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme el carbonato de sodio debido a la alta solubilidad; pueden permanecer en solución aún después de que se han precipitado los

carbonatos de calcio y de magnesio, además el carbonato de sodio provoca la defloculación del suelo.

### 3.19 Porcentaje de sodio intercambiable

Los suelos cuando tienen sales en exceso y sodio intercambiable, son un problema para los cultivos. Existe más sodio intercambiable cuando las sales solubles son, en su mayor parte, sales de sodio y este es más persistente que el contenido salino de los suelos e, incluso, siguen presentes después que las sales solubles se eliminan.

El intercambio de cationes puede representarse por ecuaciones similares a las que se emplean en reacciones químicas de las soluciones, por ejemplo, la reacción entre el suelo saturado con calcio y una solución de cloruro de sodio, se puede escribir de la siguiente manera:



En donde  $X$  representa el complejo de intercambio del suelo. En la ecuación anterior la reacción no es completa debido a que mientras exista calcio soluble será adsorbido por el complejo de intercambio y, de igual manera, sucede con el sodio. Para calcular el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se utiliza la siguiente ecuación empírica en función de la relación de adsorción de sodio (RAS) citado por (Richards *et al.*, 1959).

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

Cuando se riega con aguas de composición relativamente constante, con buenas condiciones de drenaje, el PSI varía muy poco de un año a otro, esto quiere decir que el material del intercambio catiónico del suelo se ha equilibrado con respecto a los cationes de la solución del suelo que se incorporaron por el agua de riego.

Para estimar el PSI, considerando la precipitación del  $CaCO_3$ , se utiliza la siguiente ecuación:

$$PSI = 2RAS \left[ 1 + \left( 4 - pH_c \right) \right]$$

En donde  $RAS$  es la relación de absorción de sodio y  $pH_c$  el pH teórico en equilibrio con la calcita  $CaCO_3$  y se calcula como se explicó en capítulos anteriores.

### 3.20 Dureza

Las aguas duras son muy fáciles de determinar, son aquellas que a pesar de usar jabón en exceso no produce espuma. También estas producen incrustaciones en las tuberías de agua caliente, calentadores, caldera y toda unidad en donde se calienta el agua. Para calcular la dureza de las aguas, se debe encontrar la concentración de  $\text{CaCO}_3$ . Como en las determinaciones tenemos la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ , esta la llevamos al carbonato de calcio de la siguiente manera:

$$X\text{mgL}^{-1} = X\text{mgL}^{-1} \times \frac{\text{peqCaCO}_3}{\text{peqX}}$$

$X$ , en este caso es el calcio como  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{peq}$  es el peso equivalente. Este dato lo usamos para clasificar la dureza con los límites del cuadro 22.

Cuadro 22. Clasificación del  $\text{Ca}^{2+}$  como  $\text{CaCO}_3$  para determinar su dureza de acuerdo a (Keith, 1967).

Clasificación	Concentración $\text{mg L}^{-1}$
Blanda	0.0-75.0
Moderadamente dura	75.0-150.0
Dura	150.0-300.0
Muy dura	>300.0

### 3.21 Problemas de infiltración

Esta sección se elaboró en base a: (Ayers y Westcot, 1987; Aguilera y Martínez, 1996; Mott, 1996 y Velásquez *et al.*, 2002). Los problemas de infiltración se presentan cuando el agua de riego no atraviesa la superficie del suelo a una velocidad lo suficientemente rápida, de tal manera que exista la renovación del agua consumida por los cultivos entre dos riegos. Si el riego se realiza con aguas de mala calidad, el problema se tiene en los primeros centímetros del suelo, aunque con algunos casos a profundidades mayores. Este problema es similar a los que se tiene con la salinidad, quiere decir, reducción en la provisión de agua de los cultivos y también una reducción considerable del agua en la zona radical. La facilidad con que atraviesa el agua al suelo se mide en términos de velocidad. Por ejemplo una velocidad de infiltración de  $3 \text{ mm h}^{-1}$  se considera baja y en oposición una velocidad de  $12 \text{ mm h}^{-1}$  es alta. La calidad del agua y la infiltración son consecuencias de las características físicas del suelo tal como la textura, tipo de minerales en la arcilla y además por su composición química. Concentraciones

altas de sodio y bajas de calcio en el suelo y agua, reducen la velocidad con la que atraviesa el agua de riego al suelo cultivado. En definitiva la infiltración aumenta con la salinidad y disminuye con una reducción de salinidad, esto se observa con el aumento del contenido de sodio en relación al calcio (RAS).

### **3.21.1 Evaluación de los problemas de infiltración**

Cuando se tiene una salinidad inferior a  $0.5 \text{ dS m}^{-1}$  y más aún, cuando este de bajo de  $0.2 \text{ dS m}^{-1}$ , se tiene una agua corrosiva que tiende a lixiviar las sales y los minerales solubles, entre estos el calcio, causando una inestabilidad en la estructura del suelo. Las partículas más pequeñas del suelo se dispersan, obstruyen el espacio poroso sellando la superficie del suelo para no dejar pasar el agua. Otro problema que es muy visible en este tipo de suelos, es la formación de costras superficiales que causan problemas de germinación. Las aguas de muy baja salinidad con conductividades menores que  $0.2 \text{ dS m}^{-1}$ , frecuentemente causan problemas de infiltración. Las lluvias tienen baja conductividad eléctrica y, por esta razón provocan excesos de escorrentía en las áreas regadas.

La dispersión de los suelos y la pérdida de su estructura, se producen únicamente cuando el contenido de sodio supera al calcio en una proporción por arriba de 3:1, las concentraciones altas de sodio provocan muchos problemas de infiltración, al igual que una agua de muy baja salinidad; este efecto se debe a la falta de calcio para contrarrestar la dispersión que produce el sodio. El cultivo puede tener otros problemas como la falta de aireación, la formación de costras, enfermedades y la invasión de hierbas y mosquitos.

El RAS considera los problemas de infiltración como un exceso de sodio en relación con calcio y magnesio, pero no se toma en consideración los cambios de las concentraciones de calcio en el agua del suelo, que resultan de la precipitación o disolución durante o finalizado el riego.

El sodio permanece siempre soluble y en equilibrio con el sodio intercambiable del suelo. Esta no se afecta por factores externos, tales como, que se haya concentrado por la extracción de agua por las plantas, diluido por efecto de riego y lixiviado fuera de la zona radical. El calcio en cambio no se mantiene completamente soluble o en cantidades invariables, sino que cambia

mucho hasta encontrar su equilibrio; estos cambios se deben a la disolución de minerales como el yeso, aumentando el contenido de calcio en la solución del suelo o su precipitación en forma de carbonato de calcio. La disolución del calcio es impulsada por el dióxido de carbono disuelto en el agua del suelo, mientras que su precipitación empieza debido a la presencia de suficiente calcio junto con carbonatos, bicarbonatos y sulfatos en cantidades tales como para exceder la solubilidad del carbonato de calcio (caliza) o sulfato de calcio (yeso).

### 3.21.2 Soluciones a los problemas de infiltración

La recuperación de los suelos afectados por la infiltración es necesaria cuando la velocidad del agua al atravesar la superficie del suelo es muy lenta que no permite que llegue a los cultivos o lixivie las sales acumuladas en la zona radical. Los tratamientos para evitar estos problemas pueden ser físicos o químicos. Los tratamientos químicos tratan de añadir ciertos compuestos como el yeso para modificar la composición química del suelo o del agua o la mezcla de dos o más aguas de distintas calidades. En los tratamientos físicos, están incluidas las prácticas de cultivos para mejorar la infiltración. Los problemas son por causa de la salinidad y la presencia de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$  en el agua de riego.

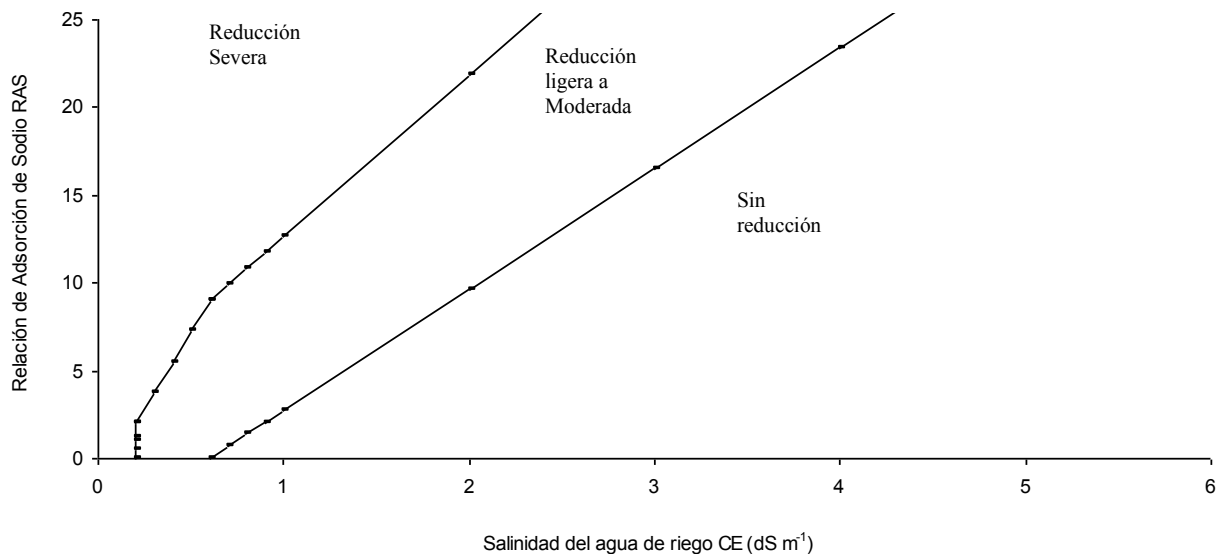


Figura 5. Reducción relativa de la infiltración, provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio RAS [fuente: Rhoades (1977) y Oster y Schroer (1979), citado por Ayers y Westcot (1987)].

Con un alto valor de RAS se puede mejorar aplicando yeso, esto va a aumentar el contenido de calcio reduciendo la proporción del sodio. El yeso, al aumentar la salinidad de las aguas de bajo contenido de sales, mejora la infiltración como se puede observar en la Figura 5, ya que la conductividad eléctrica va a aumentar. La solución con yeso no sería factible si la baja infiltración se debe a la presencia de capas impermeables de arcilla, mala textura, compactación del suelo y presencia de un nivel freático alto.

Las soluciones al problema de infiltración son más efectivas cuando se tiene una baja salinidad en agua ( $CE < 0.2 \text{ dS m}^{-1}$ ), un RAS alto en agua de baja o moderada salinidad ( $CE = 1.0 \text{ dS m}^{-1}$ ). El uso del yeso y el azufre aplicados directamente al suelo son preferibles y más eficaces cuando el agua tiene una salinidad entre moderada y alta y un valor RAS elevado.

### **3.22 Efectos de la toxicidad por iones específicos**

Esta sección se elaboró de acuerdo a la bibliografía siguiente: (Richards *et al.*, 1959; Aceves, 1979; Ayers y Westcot, 1987; Aguilera y Martínez, 1996). La toxicidad es un problema diferente al de la salinidad, esta sucede al interior de la planta y no depende de la disponibilidad del agua para la planta. Existen contrariedades cuando algunos cationes son absorbidos por las plantas con el agua del suelo y se acumulan en las hojas en razón de la transpiración, en cantidades tales, para provocar daño a las plantas. Esto provoca la reducción del rendimiento de los cultivos, dependiendo la sensibilidad de las plantas, el tiempo de exposición a estos iones y el uso del agua de riego.

Los iones tóxicos que se encuentran con mayor frecuencia en las aguas de riego son cloro, sodio y boro, produciendo daños individualmente o en combinación. Los problemas de toxicidad usualmente están asociados a los problemas de salinidad o de infiltración y pueden ocurrir independientemente de una salinidad baja.

#### **3.22.1 Efecto del ion cloro**

El cloro no es retenido en el suelo, encontrándose presente en las aguas de riego, donde es absorbido por las raíces y acumulándose en las hojas por transpiración. Cuando la concentración excede la tolerancia de la planta, se producen daños quemando las puntas de las hojas y necrosis; al aumentar la toxicidad, las hojas comienzan a dañarse en los bordes. Al ser

la necrosis excesiva provoca una defoliación temprana; en cultivos que son poco tolerantes, estos problemas se presentan cuando se tienen concentraciones de 0.3 a 1% de cloro, con base en peso seco de las hojas, sin embargo, puede variar como el caso de los frutales que empiezan a mostrar los síntomas con concentraciones mayores de 0.3% de cloro en base seca. La toxicidad del cloro también puede ocurrir por absorción directa a través de las hojas de los cultivos regados por aspersión. El cloro en altas concentraciones aumenta la solubilidad del Zn y Pb. En el Cuadro 23 se muestra los límites generales de toxicidad de cloro.

Cuadro 23. Clasificación de las aguas de riego en base al contenido de cloruros (Can, 2005).

Clasificación	Contenido de cloro en meq L <sup>-1</sup>
Buena	<1.0
Condicionada	1.0-5.0
No recomendable	>5.0

### 3.22.2 Efecto del ion sodio

Es más complicado precisar este problema que con cloro, siendo de mucha utilidad utilizar el RAS para saber si se va a presentar problemas por este ion, los síntomas aparecen en forma de necrosis o quemaduras a lo largo de los bordes de las hojas. Después de varios días o semanas, los problemas aparecen primero en las hojas más viejas en sus bordes y cuando se intensifica se desplaza hacia el centro de las hojas.

Entre los cultivos sensibles al sodio se tienen los frutales caducifolias, cítricos, nueces, aguacates y frijoles. En cultivos arbóreos causa la toxicidad cuando alcanza concentraciones mayores de 0.25 o 0.5% de sodio en base seca.

### 3.22.3 Efecto del ion boro

El boro es un elemento esencial para los cultivos en cantidades relativamente pequeñas y es tóxico cuando sobrepasa este nivel, para algunos cultivos la concentración esencial de boro es de 0.2 mg L<sup>-1</sup>, mientras que las concentraciones entre 1 a 2 mg L<sup>-1</sup> son tóxicas (Cuadro 24). En aguas superficiales es muy raro tener altas concentraciones, sin embargo en aguas de pozos cercanas a fallas sísmicas y geotérmicas se tienen altas concentraciones tal como lo demostró (González *et al.*, 2001). La toxicidad es más frecuente por el boro contenido en las aguas, que en el que se encuentra en suelo.



Los síntomas que presentan los cultivos aparecen en las hojas más viejas, manchas amarillas o secas en los bordes de las hojas, mientras se va acumulando en boro, los problemas se extienden desde el área intervenal hasta el centro de las mismas. Cuando la concentración foliar sobrepasa 250 o 300 mg de boro por kg de materia seca, hay ciertos cultivos que no acumulan suficiente boro en las hojas para poder determinar su toxicidad, en este caso se debe hacer el análisis en el agua y el suelo.

Cuadro 24. Límites permisibles de boro para aguas de riego (Richards *et al.*, 1959).

Clasificación	Cultivos sensibles ppm	Cultivos Semitolerantes ppm	Cultivos Tolerantes ppm
1	<0.33	<0.67	<1.00
2	0.33-0.67	0.67-1.33	1.00-2.00
3	0.67-1.00	1.33-2.00	2.00-3.00
4	1.00-1.25	2.00-2.50	3.00-3.75
5	>1.25	>2.50	>3.75

#### 3.22.4 Efecto del ion fósforo

Existen dos fuentes de fósforo, fósforo inorgánico y fósforo orgánico. El inorgánico proviene de las rocas fosfóricas de antiguos restos fósiles, fertilizantes y subproductos de la industria del detergente que son fabricados con fosfato dicálcico, fosfato de aluminio calcinado, todos son insolubles en el agua. Los solubles provienen del superfosfato simple, que en el mercado mundial representa el 17%, y del superfosfato triple que representa el 10%. La fuente de fósforo orgánico proviene de los estiércoles almacenados que pueden llegar a tener de 80 a 90% de fósforo inorgánico, de las harinas de pescado y lodos de agua residual urbana. La disponibilidad en el primer ciclo de cultivo es menor al 50% y es mejor aplicarlo en suelos ácidos para que esté soluble y disponible para los cultivos.

Los problemas asociados al mal uso del fósforo son de tres tipos: agronómicos, económicos y ambientales. En el agronómico existen bajos rendimientos, desbalance nutrimentales, deficiencias de Fe, Zn, S e inhibición de micorrizas, que son hongos que ayudan en el proceso de absorción de la planta. En el económico, el cultivo solamente consume del 3 al 30 % del fertilizante aplicado, el resto son pérdidas, con esto se aprecia que más de la mitad del costo no se está aprovechando. Los problemas ambientales son causadas por altas concentraciones

de fósforo, particularmente en cuerpos de agua pueden producir eutrofización. El nitrógeno, carbono y fósforo son los nutrientes requeridos por el agua dulce para provocar la eutrofización, sin embargo, ha recibido más atención el control de la contribución del fósforo, porque el aire y el agua intercambian nitrógeno y el carbono se fija en la atmósfera (Sharpley y Withers, 1994).

Ayers y Westcot (1987) según directrices para interpretar la calidad del agua, indican que los contenidos de fósforo en las aguas de riego, normalmente están de 0.0 a 2.0 mg L<sup>-1</sup>, mientras que Sharpley y Withers (1994) indican concentraciones críticas de fósforo disuelto y fósforo total; por ejemplo, en normas europeas el fósforo disuelto en concentraciones de 0.1 mg L<sup>-1</sup> puede causar una eutrofización acelerada, en otras normas, se habla de cantidades mayores a 90 ppb.

El fósforo en los suelos ocurre casi exclusivamente como ortofosfatos, en el cual el átomo central es el fósforo que está rodeado por cuatro átomos de oxígeno. La mayoría de los fosfatos en los suelos son sales de ácido fosfórico H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, la proporción relativa de la forma orgánica e inorgánica varía extensamente; generalmente el fósforo orgánico crece y decrece con el contenido de materia orgánica, por lo tanto es bajo en el subsuelo y alto en la superficie de la tierra.

### **3.23 Directrices sobre la calidad del agua**

Las directrices sobre la calidad del agua que se encuentran en el Cuadro 25, se refieren a los efectos que tienen los cultivos a largo plazo, en la producción, condiciones del suelo y el manejo agrícola. Estas directrices citadas en Ayers y Westcot (1987), tienen gran utilidad en la agricultura bajo riego, para evaluar el agua superficial, agua subterránea, agua de drenaje, efluentes de desagües y el resto de aguas residuales, es necesario anotar que las directrices pueden cambiar de acuerdo con la zona de estudio.

Cuadro 25. Directrices para interpretar la calidad de las aguas para el riego<sup>1</sup>.

Problema Potencial	Unidades	Grado de Restricción de Uso		
		Ninguna	Ligera a moderada	Severa
<b>Salinidad</b>				
(afecta disponibilidad de agua para cultivo) <sup>2</sup>				
CEa o	dS m <sup>-1</sup>	<0.7	0.7-3.0	>3.0
STD	mg L <sup>-1</sup>	<450	450-2000	>2000
<b>Infiltración</b>				
(reduce infiltración: evaluar usando a la vez la CEa y el RAS) <sup>3</sup>				
RAS=0-3	y CEa	>0.7	0.7-0.2	<0.2
RAS=3-6		>1.2	1.2-0.3	<0.3
RAS=6-12		>1.9	1.9-0.5	<0.5
RAS=12-20		>2.9	2.9-1.3	<1.3
RAS=20-40		>5.0	5.0-2.9	<2.9
<b>Toxicidad de iones específicos</b>				
(afecta cultivos sensibles)				
<b>Sodio (Na)<sup>4</sup></b>				
Riego por superficie	RAS	<3	3-9	>9
Riego por aspersión	meq L <sup>-1</sup>	<3	>3	
<b>Cloro (Cl)<sup>4</sup></b>				
Riego por superficie	meq L <sup>-1</sup>	<4	4.0-10	>10
Riego por aspersión	meq L <sup>-1</sup>	<3	>3	
<b>Boro (B)<sup>5</sup></b>				
Boro (B) <sup>5</sup>	mg L <sup>-1</sup>	<0.7	0.7-3.0	>3.0
<b>Varios (afecta cultivos sensibles)</b>				
Nitrógeno (NO <sub>3</sub> -N) <sup>6</sup>	mg L <sup>-1</sup>	<5	5.0-3.0	>30
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )				
(aspersión foliar únicamente)	meq L <sup>-1</sup>	<1.5	1.5-8.5	>8.5
pH			Amplitud normal	6.5-8.4

<sup>1</sup> Fuente: University of California, Committee of consultants 1974.

<sup>2</sup> CEa es la conductividad eléctrica del agua; medida de la salinidad, expresada en dS m<sup>-1</sup> a 25°C, o en mmhos cm<sup>-1</sup> a 25°C. Las dos medidas son equivalentes. STD es el total de sólidos en solución, expresado en mg L<sup>-1</sup>.

<sup>3</sup> RAS es la relación de adsorción de sodio.

<sup>4</sup> La mayoría de los cultivos arbóreos y plantas leñosas son sensibles al sodio y al cloro; en el caso de riego por superficie úsense los valores indicados.

<sup>5</sup> Tolerancias del boro, Cuadro 24

<sup>6</sup> NO<sub>3</sub>-N es el nitrógeno en forma de nitrato, expresado en términos de nitrógeno elemental (en el caso de aguas residuales incluir el NH<sub>4</sub>-N y el N orgánico)

Cuando se tienen valores de ninguna restricción (Cuadro 25), no se tienen problemas en los cultivos, cuando se tiene restricción de uso ligera a moderada hay que tener un cuidado

especial en los cultivos para alcanzar un máximo rendimiento y, el grado de restricción severo, involucra la aparición de problemas de suelo y bajo rendimiento de los cultivos. El uso del Cuadro 25 esta sujeto a realizar comprobaciones de campo, con el fin de estar seguro con los datos obtenidos en laboratorio.

### 3.24 Clasificación hidrogeoquímica

Esta sección se elaboró en base a la literatura: (Custodio y Llamas, 1983; Fetter, 1988; Domenico y Schwartz, 1990; Dean, 1991; Gonzales y Pal, 2001). Los datos obtenidos en laboratorio se pueden expresar según diversas tablas y unidades de acuerdo con los índices de clasificación que se utilicen, pero para determinados propósitos estos datos es mejor emplearlos en forma gráfica, hay un sinnúmero de ellos. El más extensamente utilizado es el diagrama trilineal de Piper, este método constituye la base para la clasificación común para aguas naturales (Fetter, 1988).

La mayor cantidad de los iones que se encuentran en las aguas naturales son:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . El diagrama trilineal indica la composición en porcentajes de los tres iones (Figura 6). Agrupando  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , los cationes más importantes pueden ser exhibidos. De la misma manera, si  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  son agrupados, indicarán los aniones más importantes. Los análisis son con base en porcentaje de cada catión y anión, cada vértice del triángulo representa una concentración del 100% de uno de los tres constituyentes. Cuando la muestra tiene dos componentes que los grupos presentan, entonces, el punto que representaría los porcentajes de cada uno, sería trazado entre los vértices para esos dos grupos.

La línea del porcentaje de calcio se dibuja paralela al lado de sodio más potasio, la línea de magnesio paralela a la de calcio, en donde intersectan, se traza otra línea paralela al magnesio hasta el paralelogramo superior, hasta la intersección con los aniones. La línea del cloro se traza paralela al lado del bicarbonato más carbonato, la del sulfato paralela a la de cloro, en donde se intersectan estas dos, se traza una línea paralela al lado de sulfato hasta intersectar la línea de los cationes en el paralelogramo superior. El gráfico en forma de diamante entre los dos triángulos es usado para representar la composición del agua con respecto a cationes y aniones. En la Figura 6 se explica el procedimiento de graficar y en la Figura 7 se tiene las zonas que representan la clasificación:

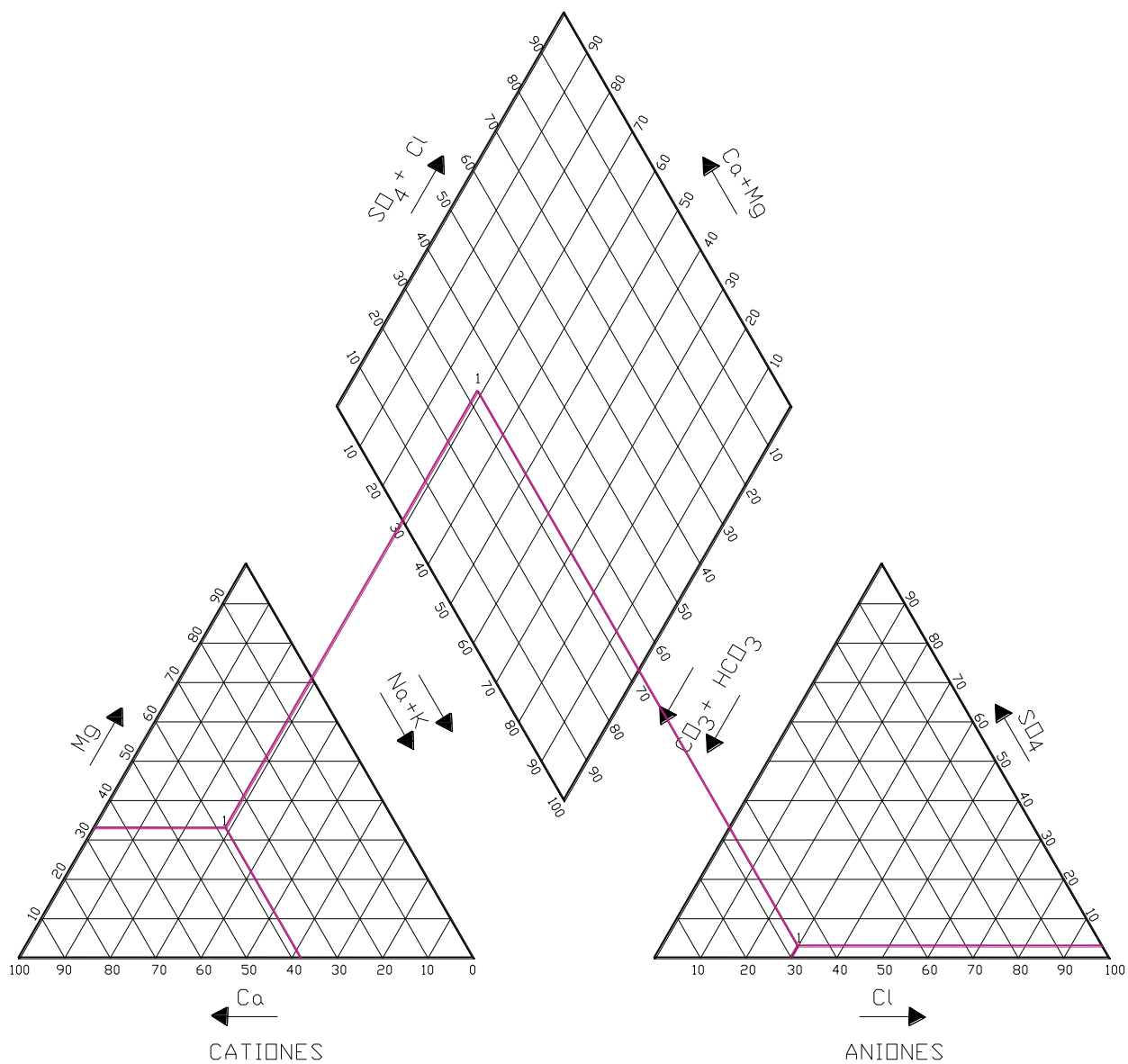


Figura 6. Diagrama trilineal para representar resultados de estudios de química del agua (Fetter, 1988).

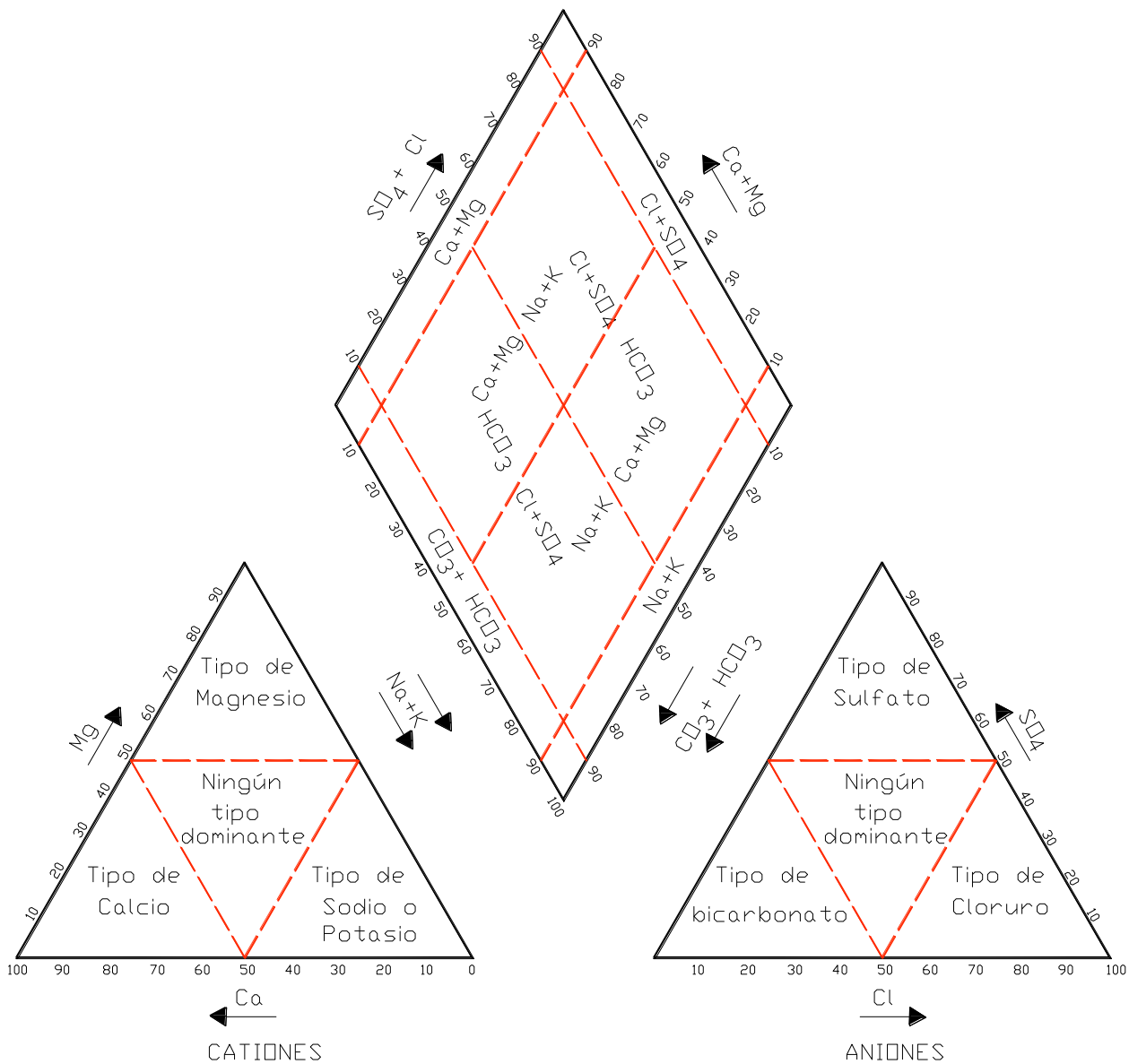


Figura 7. Sistema de clasificación hidrogeoquímica para aguas naturales usando el diagrama trilineal (Fetter, 1988).

### 3.25 Clasificación de los suelos

El método de la FAO/UNESCO tiene desarrollado un sistema de clasificación parcial para definir las unidades de los mapas y se estableció un sistema de doble categoría con una clase superior aproximada, pero no es completamente equivalente al nivel del gran grupo de clasificación utilizado por los Estados Unidos y algunos sistemas empleados por la ex-Unión Soviética. La categoría más baja se compone de intervalos de suelos con horizonte especiales. Entonces se propusieron fases para subdividir las clases secundarias, según diferencia de características o cualidades importantes en la utilización y administración de los suelos, clases de texturas (tres clases), cascajos, presencia de capas endurecidas, presencia de rocas duras, pendiente y existencia de salinidad (Buol *et al.*, 1998)

Para definir las clases fue necesario estar de acuerdo con el conjunto de horizontes de diagnóstico, algunos de los cuales se obtuvieron del sistema de clasificación de los Estados Unidos y otros sistemas de clasificación. La nomenclatura para las mismas se toma en parte de los nombres clásicos de suelos, primordialmente de la terminología original de los tipos de suelos de la ex Unión Soviética. Esto se presenta en el Cuadro 26, en donde se tiene las unidades del suelo dominante, que está dando la característica primaria del tipo de suelo dominante en función de los horizontes de diagnósticos específicos. También se tiene la subunidad del suelo dominante, que es la característica secundaria, que complementa el tipo de suelo dominante, identificado en función de horizonte de diagnóstico específico

Cuadro 26. Unidades cartográficas de suelos para el mapa mundial de suelos de la (FAO/UNESCO, 1968).

Lista de unidades de suelo	
FLUVISOLES (suelos depositados por el agua, con pocas modificaciones)	CHERNOZEMS (superficie negra, alto contenido de humus bajo vegetación de pradera)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Districo</li> <li>▪ Eútrico</li> <li>▪ Calcárico</li> <li>▪ Gléyico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico (sin ninguna propiedad especial)</li> <li>▪ Cálculo (con una capa de mas de 15 cm rica en cal o yeso)</li> <li>▪ Lúvico (considerable acumulación de arcilla en el subsuelo)</li> <li>▪ Gléyico</li> </ul>
REGOSOLES (suelos delgados sobre materiales no consolidados)	FEOZEMS (superficie oscura, mas lixiviada que los castanozem y los chernozem)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Districo</li> <li>▪ Eútrico</li> <li>▪ Calcárico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico (sin ninguna propiedad especial)</li> <li>▪ Calcárico (con algo de cal en menos de 50 cm de profundidad)</li> <li>▪ Lúvico (subsuelo mas rico en arcilla que la capa superficial)</li> <li>▪ Gléyico (subsuelo de varios colores, causada por la inundación)</li> </ul>
ARENOSOLES (suelos formados con arena)	CAMBISOLES (color claro, cambio de estructura o consistencia debido a la intemperización)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Districo</li> <li>▪ Eútrico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Eútrico (subsuelo rico o muy rico en nutrientes)</li> <li>▪ Cálculo</li> <li>▪ Vértico (subsuelo ligeramente agrietado en alguna parte de la mayoría de los años)</li> <li>▪ Húmico (capa superficial oscura con buen contenido de materia orgánica)</li> <li>▪ Ándico</li> </ul>
GLEYSOLES (horizontes moteados o reducidos, debido a la humedad)	LUVISOLES (suelos de contenido mediano a alto de bases con horizontes arcillosos)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Húmico</li> <li>▪ Cálculo</li> <li>▪ Tiónico</li> <li>▪ Plíntico (muy pobre, arcilloso y con manchas rojas en el perfil)</li> <li>▪ Hístico</li> <li>▪ Túndrico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Crómico (cuando esta húmedo es de color pardo oscuro a rojo poco intenso)</li> <li>▪ Férrico (subsuelo muy rojo con piedras llamadas nódulos)</li> <li>▪ Álbico (se han movido partículas finas de suelo (arcilla) de la capa superficial hacia abajo)</li> <li>▪ Plíntico</li> <li>▪ Gléyico</li> </ul>
RENDZINAS (suelos poco profundos sobre piedra caliza)	PODZOLUVISOLES (horizontes lixiviados que penetran en horizontes B arcillosos)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Gléyico</li> </ul>
RANKERS (suelos delgados sobre material silicico)	PODZOLES (horizontes aluviales de color claro y acumulaciones en el subsuelo de hierro, aluminio y humus)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Humoférrico</li> <li>▪ Férrico</li> <li>▪ Húmico</li> <li>▪ Ócrico</li> <li>▪ Plácico</li> <li>▪ Gléyico</li> </ul>
ANDOSOLES (cenizas volcánicas con superficies oscuras)	ACRISOLES (suelos sumamente intemperizados con horizontes arcillosos)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Víttrico (mucho vidrio volcánico en todas las capas del suelo)</li> <li>▪ Gléyico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Húmico (alto contenido de materia orgánica en la superficie)</li> <li>▪ Plíntico (muy pobre arcilloso y manchas rojas en el perfil)</li> <li>▪ Gléyico (subsuelo con varios colores, inundación del suelo)</li> </ul>
VERTISOLES (suelos inversores y autoabonados, ricos en arcilla montmorillonítica)	NITISOLES (bajo CEC de arcilla en horizontes arcillosos)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Districo</li> <li>▪ Eútrico</li> </ul>
YERMOSOLES (suelos desérticos)	FERRALSOLES (arcilla rica en sesquióxidos)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Cálculo</li> <li>▪ Yesoso</li> <li>▪ Lúvico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Ócrico</li> <li>▪ Ródico</li> <li>▪ Húmico</li> <li>▪ Plíntico</li> </ul>
XEROSOLES (suelos secos de regiones semiáridas)	HISTOSOLES (suelos orgánicos)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Cálculo</li> <li>▪ Yesoso</li> <li>▪ Lúvico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Districo (muy acido con bajo contenido de nutrientes como Ca, Mg y K)</li> <li>▪ Eútrico (acido o neutro con alto contenido de nutrientes)</li> </ul>
SOLONCHAKS (acumulación de sal soluble)	LITOSOLES (suelos poco profundos sobre rocas duras)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Húmico</li> <li>▪ Takírico (de textura arcillosa y con grietas en la superficie cuando esta seco)</li> <li>▪ Gléyico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Districo</li> <li>▪ Eútrico</li> </ul>
SOLONETZ (alto contenido de sodio)	CASTANOZEMS (color superficial de castaña, vegetación esteparia)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Húmico</li> <li>▪ Gléyico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico (sin ninguna propiedad esencial)</li> <li>▪ Cálculo (capa de mas 15 cm rica en cal o yeso)</li> <li>▪ Lúvico (considerable acumulación de arcilla en el subsuelo)</li> </ul>
PLANOSOLES (contacto brusco entre horizontes A y B)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Háptico</li> <li>▪ Húmico</li> <li>▪ Solódico</li> </ul>	



## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Descripción geográfica del área de estudio

El territorio que comprende el área de estudio está conformado por los estados de Puebla y Tlaxcala, en el cual están involucrados aproximadamente 48 municipios del estado de Tlaxcala, 22 ayuntamientos de Puebla y diversas poblaciones localizadas en las cercanías de la Presa de Valsequillo (Figura 12). Las unidades estratigráficas más antiguas del sistema hidrográfico son las rocas sedimentarias, sobre todo los depósitos clásticos formados en un ambiente continental lacustre, que según la litología son clasificados como asociaciones alternantes de areniscas y limonitas y de areniscas calizas. Es muy probable que estas rocas pertenezcan al Terciario inferior, ya que se encuentran cubiertas por derrames andesíticos y tobas intermedias del terciario superior que es el Mioceno. Las riolitas y tobas ácidas que aparecen restringidas a unos cuantos afloramientos también pertenecen al terciario superior que es el Plioceno. En las Figuras 8 y 9 se encuentran las eras geológicas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

En este mismo periodo los agentes de denudación fluviales y fluvio glaciares iniciaron una actividad intensa que provocó la nivelación de un relieve activo. Así se formaron grandes cuerpos de depósitos fluvio-glaciares (brechas sedimentarias en las faldas de volcanes andesíticos). La actividad volcánica basáltica empezó en el terciario superior y alcanzó una gran intensidad en el cuaternario (Pleistoceno), dejando distribuidas numerosas estructuras relativamente pequeñas. Durante los últimos derrames basálticos que hubieron, se cerraron algunos valles y se formaron cuencas endorreicas. La actividad tectónica continental y la volcánica han contribuido a modelar su relieve.

En el estado de Puebla se cuenta con un gran potencial geotérmico, ya que gran parte de su territorio forma parte de la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, o eje neovolcánico. El volcanismo reciente en esta región ha generado numerosos aparatos volcánicos y focos termales, como es el caso de los Humeros cuyas aguas se estudiaron en el segundo muestreo, que se localizan en su mayor parte dentro del estado de Puebla y parte de Veracruz, forman una gran estructura volcánica de aproximadamente 21 km de diámetro; en la Figura 13 son los puntos 22 y 23; se ubican al sur de Teziutlán y constituyen una de las zonas

geotérmicas más importantes del país, donde se han realizado varias perforaciones en la zona de colapso central de la caldera, para el aprovechamiento del vapor del subsuelo. Existen siete plantas generadoras de una capacidad de 5 Mw cada una.

La Faja Volcánica Mexicana o Eje Neovolcánico se formó en una zona de fallas de tensión de orientación Norte-Sur y noroeste-sureste y noreste-suroeste, que dieron lugar a grandes fosas tectónicas y aparatos volcánicos. Los conos cineríticos dispersos por toda la provincia, así como los amplios cráteres de explosión de la cuenca Oriental, conocidos como xalapazcos y axalapazcos, los cuales son objeto de este estudio.

El estado de Tlaxcala esta comprendido totalmente en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, sobre la meseta de Anáhuac, por lo que su geología ha estado inmersa en la actividad volcánica; su topografía esta formada por sierras, lomeríos con cañadas, mesetas, mesetas con lomeríos, mesetas con cañadas y llanuras con lomeríos. En la parte septentrional y meridional se localizan los volcanes Huintetepetl al norte de Tlaxco y la Malintzi (Malinche o Matlalcueyetl) localizado en la parte Sur-oriente con una altitud de 4461 m.s.n.m. En el Cuadro 27 se indican las principales elevaciones del Estado.

Las precipitaciones medias anuales son mayores en el centro Sur, donde oscilan de 600 a 1200 mm, mientras tanto que en el Oriente las lluvias son menores de 500 mm al año. La temperatura promedio fluctúa entre 13.8 y 15.7 °C. En el Estado de Tlaxcala se encuentran tres regiones hidrológicas: Balsas (cuenca río Atoyac 78.76%), Pánuco (río Moctezuma 18.21%) y Tuxpan-Nautla (río Tecolutla 3.03%); el principal río es el Zahuapan que va de Norte a Sur.

Cuadro 27. Principales elevaciones del estado de Tlaxcala

Nombre	m.s.n.m
Volcán Matlalcuétl	4 461
Cerro El Huilotepec	3 500
Cerro Huilapitzo	3 500
Cerro San Gabriel	3 340
Cerro Huintetépetl	3 220
Cerro Tlacoxtlo	3 080
Cerro San Nicolas	3 020
Cerro Cuatlapanga	2 900
Cerro Soltepec	2 860

Fuente: (INEGI, 2006). Carta Topográfica, 1:250000

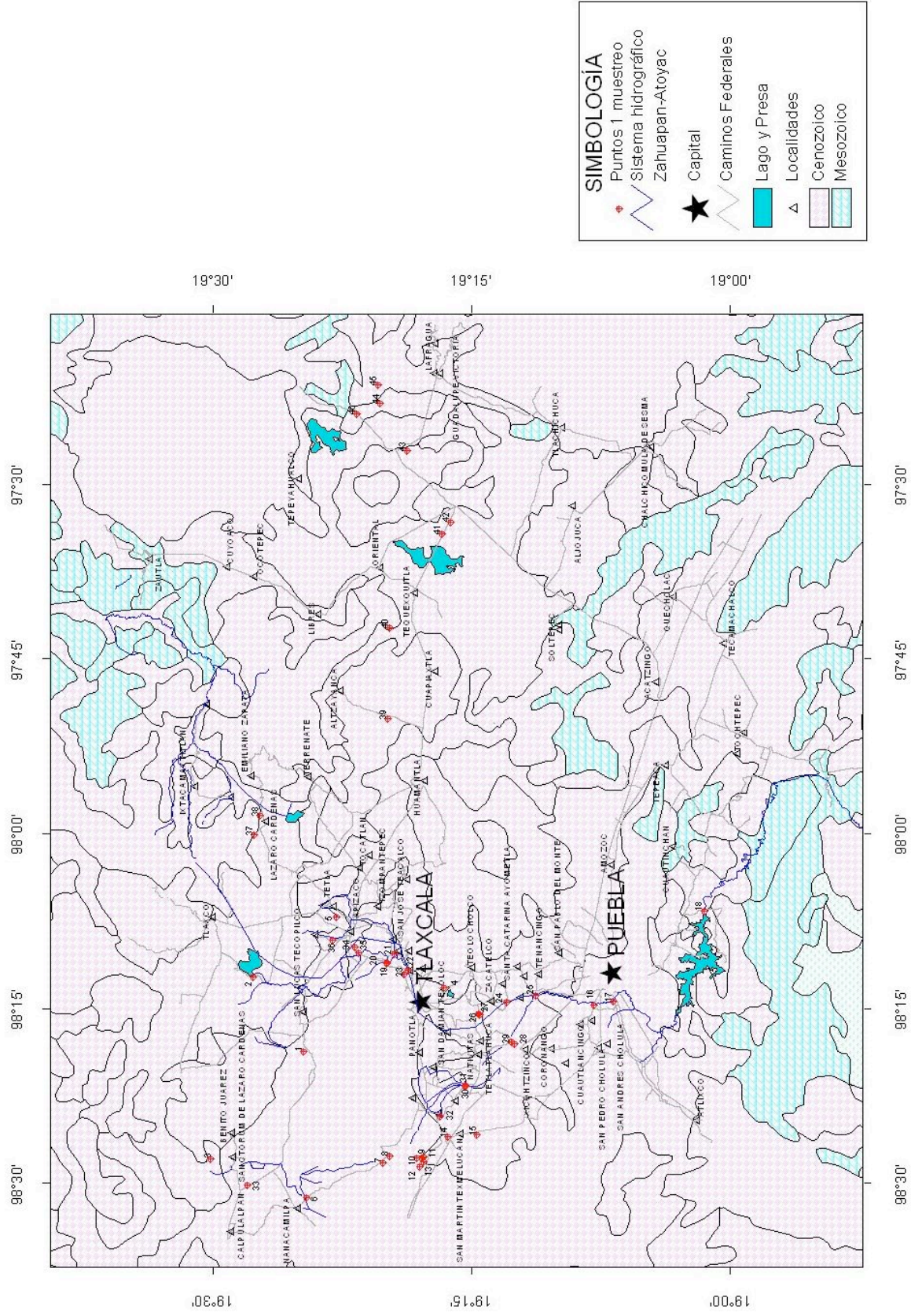


Figura 8. Mapa de las eras geológicas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del primer muestreo de aguas.

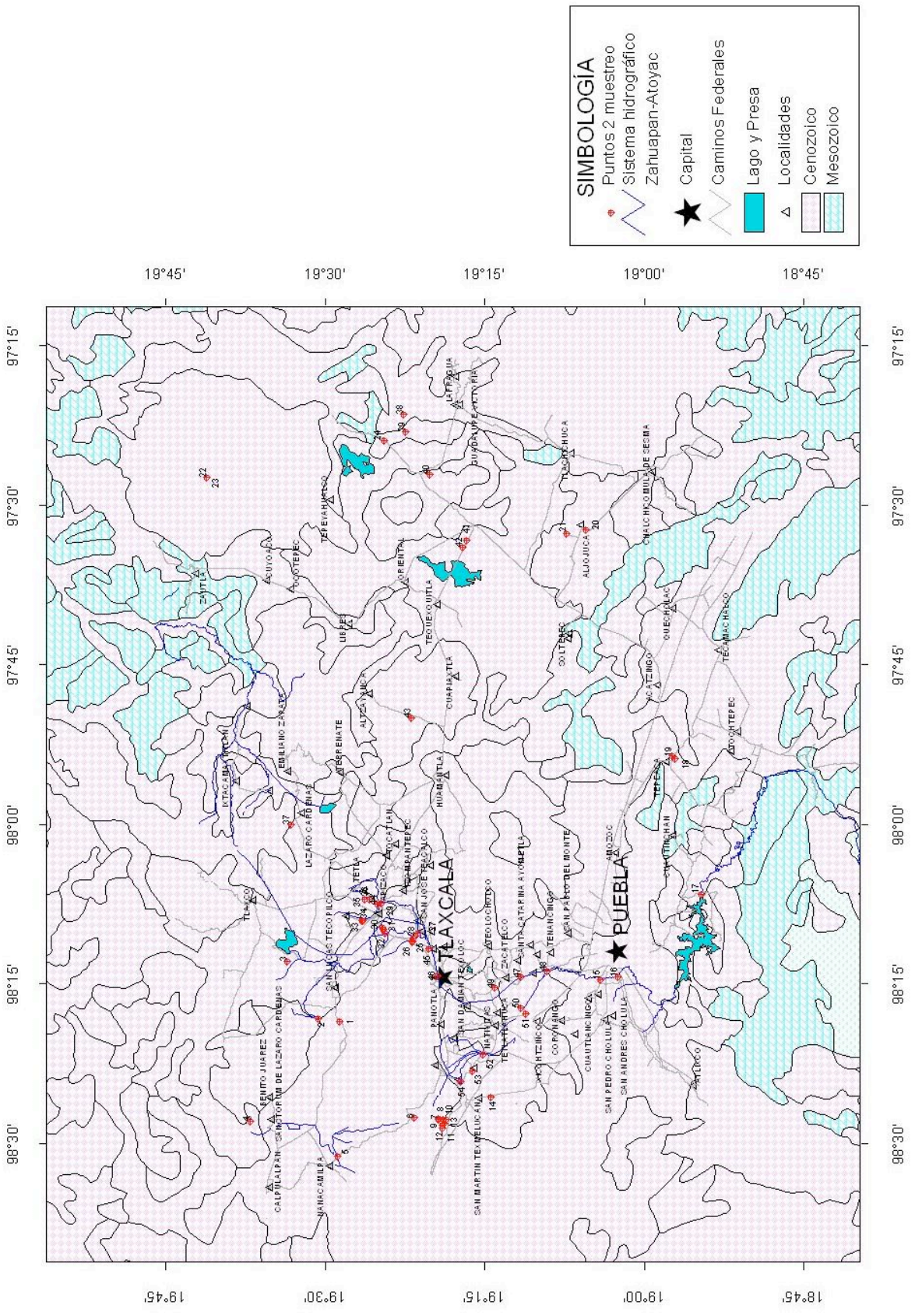


Figura 9. Mapa de las eras geológicas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del segundo muestreo de aguas.

El sistema de clasificación de los suelos que se utiliza en este estudio es solamente representativo, se aplican los datos del INEGI (2006) con los que se elaboraron los mapas en los diferentes tipos de suelo. El análisis se basa en el propuesto por la FAO/UNESCO (1968), modificado por la dirección del INEGI, los mapas están realizados en la escala 1:1 000 000. Este método se desarrolló por el año de 1961 con la finalidad de preparar una correlación mundial universal de unidades de suelos, para obtener un inventario de los recursos de suelos del mundo.

En las cuencas del río Zahuapan-Atoyac predominan los suelos de barro y consistencia limo arenosa, además de los sedimentos acarreados por escurrimientos, en la región de Calpulalpan-Apizaco los suelos son arcillosos, asociados al tepetate; mientras que en la porción de Tequexquitla los suelos son salinos.

En la zona de estudio predominan los afloramientos de rocas volcánicas como las andesitas, las riolitas, los basaltos, las tobas y las brechas volcánicas; así como diversas asociaciones de estas. Además hay sedimentos lacustres, fluviales y fluvio-glaciares (brechas sedimentarias).

La variedad de tipos de suelo se debe fundamentalmente a la constitución litológica y al clima de la zona. Las características de estos se deben a cenizas volcánicas que fueron depositadas por las emisiones volcánicas del Terciario, también se formaron de otras rocas ígneas como las andesitas, basaltos, brechas volcánicas, o bien por brechas sedimentarias y en menor proporción por depositación aluvial y limolitas-areniscas. El clima que se presenta es el templado subhúmedo, por lo que existe gran diversidad edáfica. Los tipos de suelo que se presentan en la zona de estudio son: Andosol, Cambisol, Feozem, Fluvisol, Gleysol, Litosol, Regosol, Lluvisol, Rendzina, Solonchak, Vertisol y Xerosol (Figuras 10 y 11).

Los Cambisoles se encuentran en las partes planas de la meseta escalonada con lomeríos al norte de Huamantla, partes bajas de la sierra volcánica compleja, llanos con lomeríos y la meseta con cañadas, están asociados a suelos jóvenes como los Fluvisoles, Regosoles, Litosoles y Feozem. Los Andosoles se localizan en el cerro de Huintetépetl y sur de Mariano Arista, sustentan bosques de pino, encino u oyamel y en algunas porciones son dedicados a la agricultura. Los Feozem se localizan en su mayor parte Norte. Estos son suelos con drenaje interno bueno y de fertilidad moderada, por lo cual son dedicados a la agricultura de temporal

y de riego o sustentan pastos inducidos. Se encuentran asociados a otros suelos como Litosoles, Cambisoles, Fluvisoles y Gleysoles. Los Fluvisoles se localizan al Este de Santa Ana Chiautempan, noroeste de Huamantla, Sur de San Juan Ixtenco y Occidente de Zacatelco. Los Gleysoles se localizan al suroeste de Tezoquipan, estos se encuentran asociados a Feozem y Fluvisoles y se dedican a la agricultura de temporal y de riego. Los Litosoles se ubican en los cerros Huilapitzo y Tlacoxtolo que están alrededor de la ciudad de Tlaxcala, Tlacotalpan e Ixcoclan, se encuentran asociados secundariamente a otros suelos, sustentan vegetación de izotal, bosque de táscate y bosque de encino. Los Luvisoles se encuentran en algunas porciones al Norte donde existe bosque de pino y al sureste donde se dedican a la agricultura. Las Rendzinas están asociados a Litosoles y se localizan al Norte y noroeste, estos sustentan vegetación matorral crasirosulifolios, así como vegetación secundaria constituida por izotales y chaparrales. Los Vertisoles se localizan en los alrededores de Cuauhtémoc, Atlangatepec, suroeste de Panotla y norte de Apizaco, estos se dedican principalmente a la agricultura.

La mayor parte de los puntos de ambos muestreos se encuentran en el estado de Tlaxcala, que cuenta con una superficie de 4060.923 km<sup>2</sup>, es la entidad federativa más pequeña, el 0.2% del territorio nacional, solo mayor que el Distrito Federal (INEGI, 2006). Se localiza en la parte centro-oriental del país, al Norte 19° 44', al Sur 19° 06' de latitud Norte; al Este 97° 38', al Oeste 98° 43' de longitud Oeste, con una altitud promedio de los 2000 m.s.n.m. Tlaxcala es el estado mejor comunicado del país, fue el primero en contar con vías férreas y es el que más kilómetros de caminos tiene por unidad de área. Además colinda al Norte con Hidalgo y Puebla; al Este y Sur con Puebla, al Oeste con Puebla, México e Hidalgo; su capital es Tlaxcala de Xicohtécatl (INEGI, 2006).

Debido a la relativa homogeneidad de la provincia del eje neovolcánico, se pueden explotar varios materiales de construcción como el tezontle, las gravas, las arenas y las arcillas, que son las principales.

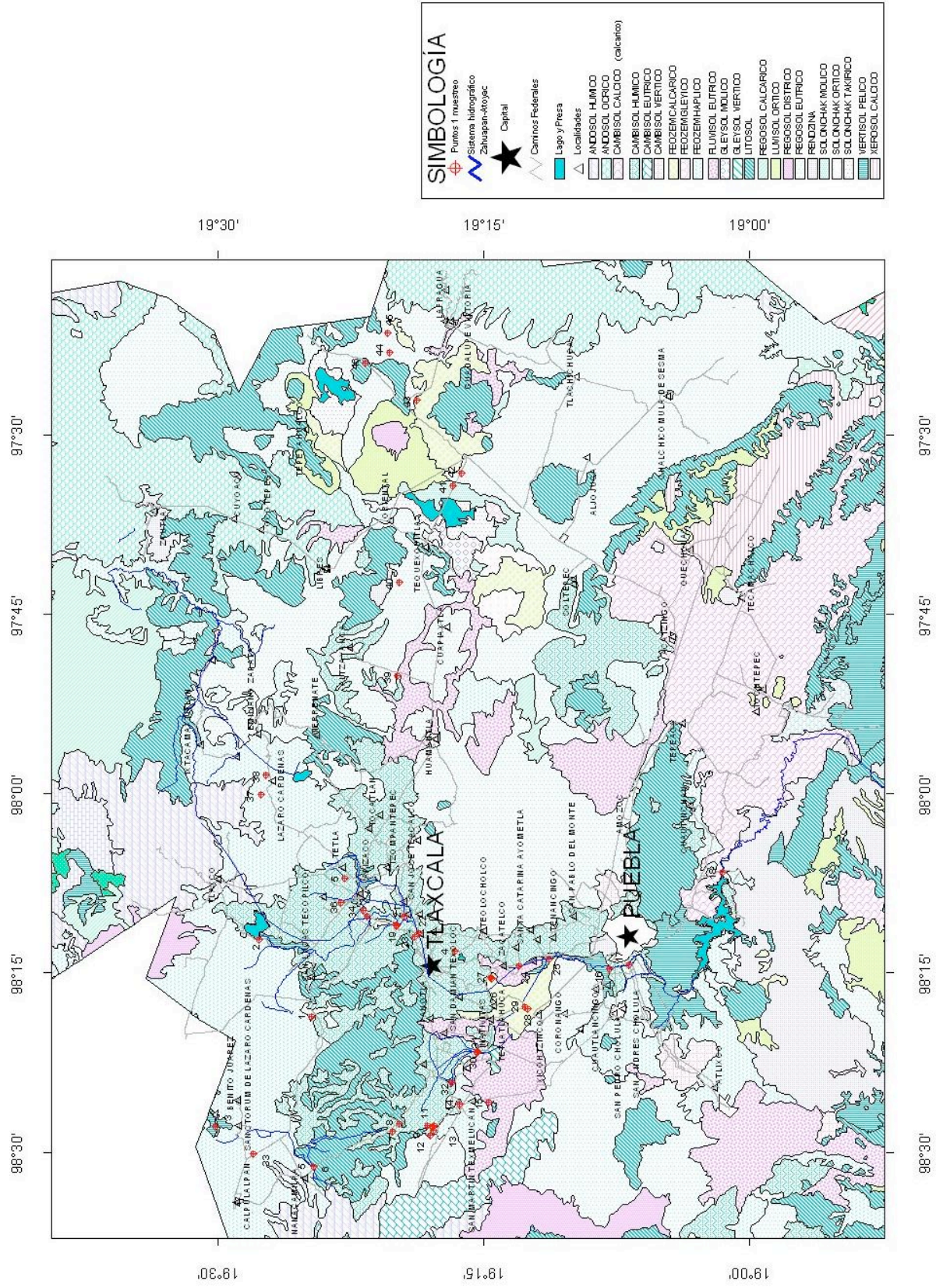


Figura 10. Mapa de los tipos de suelos en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del primer muestreo de aguas.

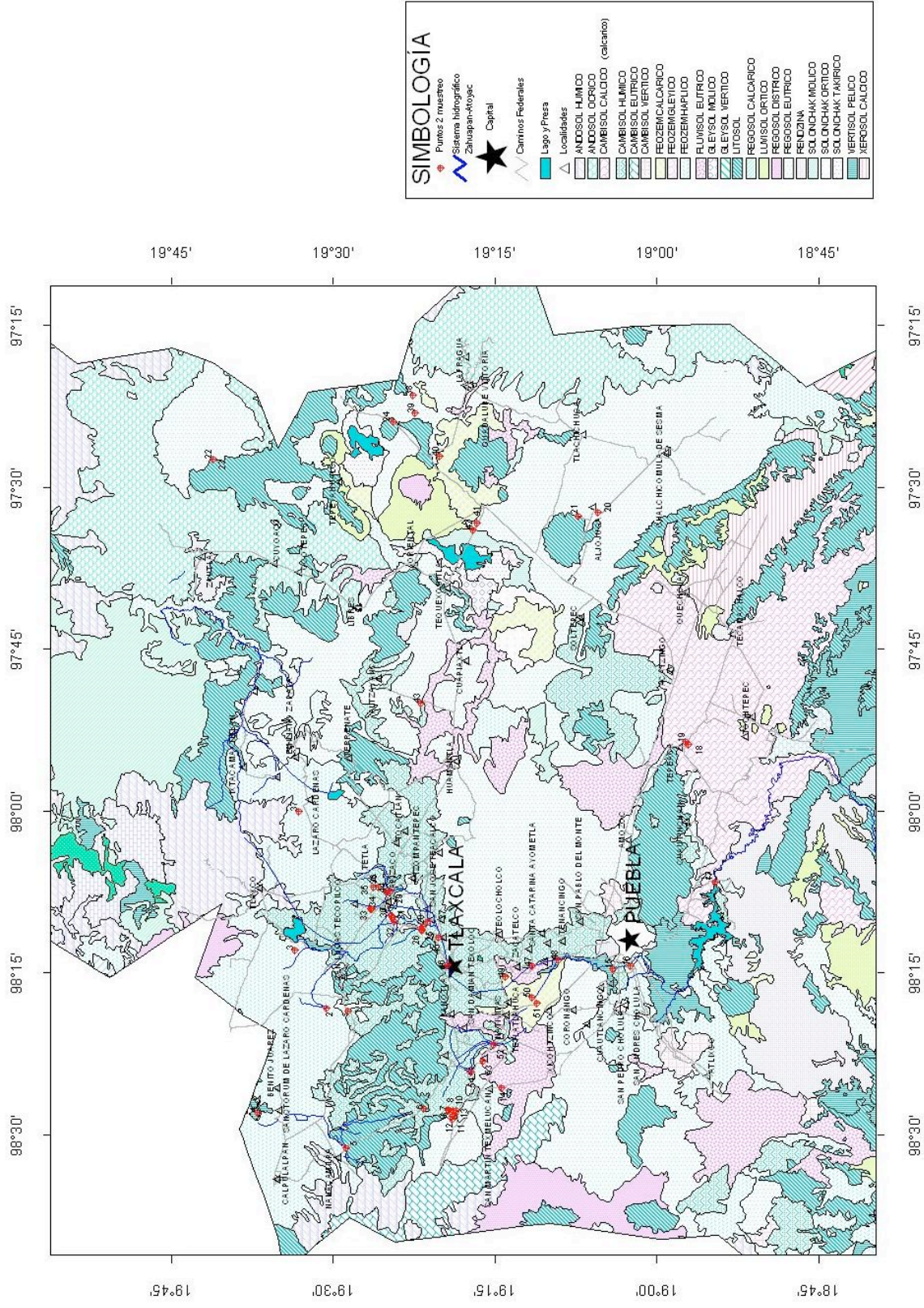


Figura 11. Mapa de los tipos de suelos en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del segundo muestreo de aguas.



## 4.2 Ubicación del área de estudio del primer muestreo.

Los puntos de la Figura 12: 1, 2, 3, 43, 44, 45 y 46 son muestreos de lagunas. Los puntos: 8, 12, 13, 34 y 36 son de manantiales. El resto son puntos de muestreo llevados a cabo en la zona de pozos profundos y de los cauces del distrito de riego de Valsequillo en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. Todos los mapas de este trabajo fueron realizados por el autor con la categoría proyección del mundo y tipo de coordenadas geográficas con la utilización de base de datos del (INEGI, 2006; ESRI, 2006 y CONABIO, 2006).

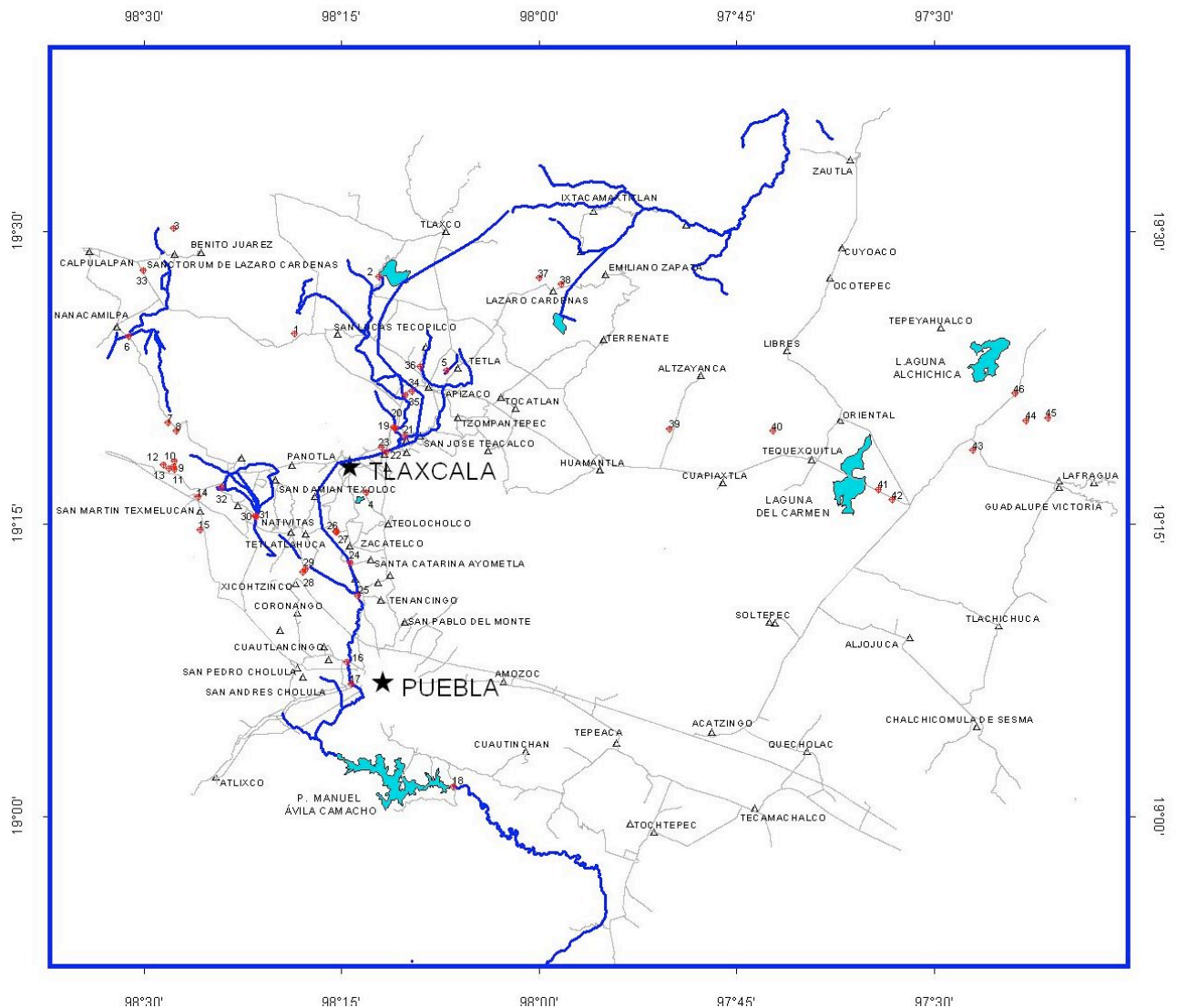


Figura 12. Mapa de ubicación del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del primer muestreo de aguas.

### 4.3 Ubicación y número de sitios del segundo muestreo

Fueron dos el número de muestreos realizados, el primero realizado en el mes de marzo del 2006 y el segundo entre Febrero y Marzo del 2007. La localización de los puntos del primer se encuentra en la Figura 12 y la localización de los puntos del segundo se encuentra en la Figura 13:

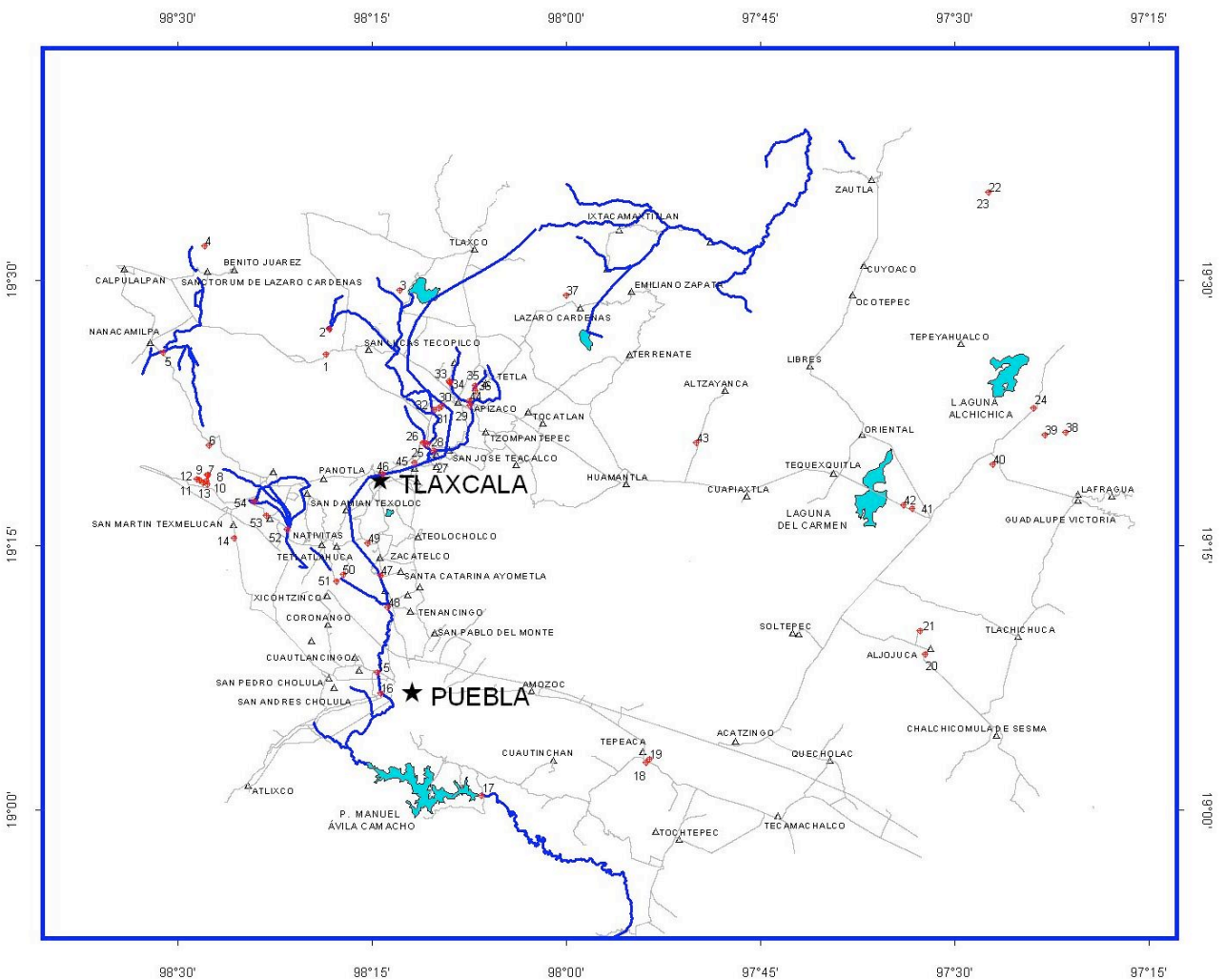


Figura 13. Mapa de ubicación del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del segundo muestreo de aguas.

Los puntos se tomaron a lo largo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, desde los inicios de los cauces hasta la desembocadura en cotas inferiores. En el primer muestreo se tomaron 46 puntos y en el segundo 54 para un total de 100. Los puntos del segundo muestreo de la Figura

13: 1, 2, 3, 4, 5, 20, 21, 24, 36, 37, 38, 39 y 40 son de lagunas. Los puntos en donde nace el sistema son los manantiales 6, 7, 11, 12, 13, 28, 30, 33, 34, 35, 43 y 49. Los pozos que se aprovechan para el riego de cultivos son 14, 18, 19, 41, 42, 47. Los puntos 22 y 23 son de los Humeros, zona geotérmica de gran importancia. El resto son cauces del río Zahuapan-Atoyac que desemboca en la presa Manuel Ávila Camacho. La forma de seleccionar los sitios de muestreo tomó en consideración los afluentes que desembocan en el cauce principal, observando puntos estratégicos para determinar su carácter químico, como por ejemplo al inicio y salida de las ciudades.

Para la toma de muestras de agua se utilizaron recipientes de plástico de 0.5 L, se tomaron dos de cada punto para realizar las determinaciones en el laboratorio y comprobar que no se tenga errores al manipular los reactivos y equipo. Para caracterizar el agua desde la perspectiva química es necesario determinar la cantidad, proporción y los diferentes tipos de iones que se tiene en la solución.

Las muestras se tomaron en canales de riego como son los principales, laterales, sublaterales y pozos de bombeo, presas de almacenamiento, lagos, ríos, arroyos, manantiales, drenes tales como colectores, ramales y mantos freáticos. La metodología de la toma de muestras varía de acuerdo al lugar que se encuentre, pero es necesario seguir ciertas recomendaciones.

La cantidad mínima de agua que se necesita es de un 1 litro y es mejor que los recipientes sean de plástico, su tapón, mismos que a la vez se deben enjuagar con el agua que se va a recolectar. La etiqueta que se colocó en el envase tiene el nombre y la localización, fecha en que fue tomado, tipo de suelo y cultivo al que va a ser utilizada y nombre de la persona que tomó la muestra. La frecuencia del muestreo fue en relación directa con el propósito del trabajo, cuando se trata un muestreo periódico, se puede hacer cada mes, cuando se quiere estudiar el balance de sales. Las frecuencias de muestreo deben ser mayores para detectar los cambios en la cantidad de sales transportadas por variaciones en el caudal del sistema de riego.

#### *Muestreo de canales, drenes y ríos*

Las muestras se tomaron en el agua en movimiento en unos centímetros debajo de la superficie. La frecuencia tiene que ver con las oscilaciones del caudal en las diferentes

estaciones del año; por ejemplo, en épocas de avenidas se deben tomar las muestras mientras dure la misma, para observar el cambio en las concentraciones.

#### *Muestreo de presas de almacenamiento*

Las condiciones que se distinguieron son si se deriva constantemente y otra cuando es intermitente. Cuando se deriva constantemente la concentración de sales varía muy poco y no es necesaria mucha frecuencia de muestreo. En los almacenamientos donde se interrumpe el drenaje, las determinaciones deben ser más frecuentes cuando se inicia el drenaje.

#### *Muestreo en pozos profundos*

Cuando las extracciones son iguales a las aportaciones del acuífero, no se presentan variaciones significativas en la concentración de las sales, entonces no es necesario hacer frecuentes muestreos. Si la extracción excede al reabastecimiento del acuífero, entonces va existir variación en la concentración de sales, por tal motivo se debe hacer más extracciones para su estudio. Es muy importante tener en cuenta que el muestreo de pozos se debe hacer después de una hora que se haya bombeado para conocer realmente la cantidad de sales del acuífero.

#### *Muestreo de lagos de gran extensión*

La calidad química se debe determinar muestreando a diferentes profundidades y en varios puntos. Con muestreos mensuales se puede detectar la concentración de sales a diferentes profundidades. Siempre hay que muestrearse en las salidas de la obra cada día, si las concentraciones son muy grandes.

#### *Muestreo de manantiales*

Las muestras se pueden tomar cada mes puesto que sus concentraciones varían solo en caso de que varíe su caudal en el transcurso del tiempo.

#### *Muestreo de mantos freáticos*

Para prevenir la subida de los niveles freáticos y causar salinidad de los suelos, se estudió la calidad del agua mediante varios pozos de observación.

#### 4.4 Métodos

La toma de muestras se realizó en lugares en donde nacen los ríos y a lo largo de todo el sistema. Las determinaciones físico-químicas analíticas se describen a continuación:

Cuadro 28. Determinaciones físico-químicas para aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

DETERMINACIÓN	MÉTODO	REFERENCIA
1. pH	Potenciómetro marca Beckman	NOM-AA-08-1980
2. Conductividad eléctrica	Conductímetro puente de Wheatstone con celdas de vidrio de rango 1-5	NOM-AA-93-1984
3. Residuo seco evaporado o sólidos totales solubles	Gravimetría utilizando estufa Hot-Plate modelo Type 2200 Thermoline	NOM-AA-34-1981 Procedimiento B
4. Residuo seco calcinado	Gravimetría utilizando mufla Lindberg	NOM-AA-34-1981
5. Sodio y potasio	Flamometría con flamómetro 648 IL $\lambda=589$ nm utilizando soluciones Standard 140 meq l <sup>-1</sup> para Na <sup>+</sup> y 5.0 meq L <sup>-1</sup> para K <sup>+</sup>	APHA, 1995 3500-Na <sup>+</sup> y K <sup>+</sup> , D
6. Calcio mas magnesio	Volumétrico titulación con EDTA (Merck, Titristol, Art. 9992 0.01 N	APHA, 1995 3500 Ca <sup>2+</sup> , D
7. Carbonatos	Volumétrico titulación con acido sulfúrico (Merck, Titristol Art. 9984) 0.01 N, indicador fenolftaleína	APHA, 1995 2320 B
8. Bicarbonatos	Volumétricos titulación con ácido sulfúrico (Merck, Titristol Art. 9984) 0.01N	APHA, 1995 2320 B
9. Cloruros	Mohr. Titulación con nitrato de plata (Merck, Nitrato de Plata en solución, Art. OC248386)0.01 N. Indicador cromato de potasio al 5%	APHA, 1995 4500-C-IB
10. Sulfatos	Turbidimetría Espectrofotómetro 35 Perkin Elmer $\lambda=420$ nm	APHA, 1995 4500-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> E
11. Ortofosfatos	Volumétrico titulación con Colorimetría	APHA, 1995 Rodier, 1978
12. Boro	Azometina-H	Page (1982)
13. Presión Osmótica	Osmómetro	VAPRO, 1995

## 4.5 Descripción de las determinaciones

### *Determinación de la conductividad eléctrica*

La conductividad eléctrica tiene especial importancia debido a que es un método rápido y conveniente para medir la concentración de electrolitos. La conductancia específica de una solución diluida de un electrolito, es casi directamente proporcional a la concentración iónica de dicho electrolito y la conductividad total del agua es igual a la suma de las diferentes conductividades resultantes de los electrolitos presentes (A.S.T.M., 1991).

### *Procedimiento*

Para la determinación se utilizó un puente de lectura directa. Sumergimos la celda en la muestra de agua y registró la lectura y al mismo tiempo se midió la temperatura de la solución para realizar las correcciones. Se midió con el conductímetro marca Solu Bridge, Soil Tester.

$$CE_{25} = CE \times Fc \times Ft$$

$CE_{25}$  = Conductividad eléctrica a 25°C

CE = Conductividad eléctrica que se obtiene

Fc = Constante de celda (CE empírica/CE que se obtiene)

Ft = Constante de temperatura

### *Determinación del pH*

En 1909, el químico danés Sorensen definió el potencial hidrógeno (pH) como el logaritmo negativo de la concentración molar (más exactamente, de la actividad molar) de los iones hidrógeno. Esto es:  $pH = - \log [H^+]$

La evaluación electrométrica del pH se basó en la determinación de la actividad del ion  $H^+$  mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al  $H^+$ . Se midió directamente de la botella con el pH marca Beckman.

### *Determinación del residuo seco evaporado*

Los sólidos totales pueden estar presente en suspensión, solución o ambos, se dividen en materia orgánica (sólidos totales volátiles) e inorgánica (sólidos totales fijos). Los sólidos totales disueltos (STD) se deben a materiales solubles, mientras que los sólidos en suspensión son partículas discretas que se pueden medir al filtrar una muestra a través de un papel fino. El valor de STD indica la concentración cuantitativa de sales. La presencia de sólidos en las

aguas de riego afecta la calidad microbiológica del agua (contenido de oxígeno) y pueden ser fuente de problemas en los equipos de riego presurizado (obstrucciones). Dentro de los inconvenientes de la metodología de los residuos secos evaporados se encuentran: pérdida de algunas sales en forma de gases por la elevada temperatura; en aguas muy salinas no se logra evaporar toda el agua quedando un remanente en forma cristalina; no proporciona información del tipo de sales constituyentes; en aguas con silicio en solución este puede aumentar los sólidos totales disueltos debido a su alto peso atómico; agua con bajo valor de STD, pero con sodio, tendrán un efecto más drástico sobre los suelos de lo esperado.

#### *Procedimiento*

La muestra se filtró para obtener un líquido perfectamente claro. Se tomó una muestra de 25 mL en cápsulas de porcelana, previamente pesadas en una balanza digital. Las capsulas se colocaron en una plancha para evaporarlas utilizando una cama de arena de cuarzo a una temperatura de 105°C hasta quedar completamente secos; luego se pesaron así determinando su peso conjuntamente con la capsula. Como el peso de la capsula es conocida, por la diferencia se tiene el peso de la muestra

$$STD(ppm) = \frac{(\text{peso}_{\text{cápsula-residuo}} - \text{peso}_{\text{cápsula}}) \times 10^6}{25}$$

#### *Determinación del residuo seco calcinado*

##### *Procedimiento*

Para los residuos inorgánicos, se utilizaron las mismas capsulas anteriores, esta vez se evaporaron a una temperatura de 600°C durante 30 minutos, inmediatamente se pesan y por medio de la formula anterior se obtiene su valor. Para obtener los sólidos totales orgánicos utilizamos la siguiente formula:

$$ST(Org) = STD - ST(Inorg)$$

#### *Determinación del Calcio y Magnesio*

El grado de dureza de un agua aumenta, cuanto más calcio y magnesio hay disuelto. Magnesio y calcio son iones positivamente cargados con dos cargas; debido a su presencia, otros iones cargados positivamente se disolverán menos fácil en el agua dura, que en el agua que no contiene calcio y magnesio. Altas concentraciones de magnesio son tóxicas a las plantas.

##### *Procedimiento para $Ca^{2+}$*

En una muestra de 5 mL se agregó 8 gotas de hidróxido de sodio, una pequeña porción de murexida, la solución esta lista hasta obtener un color morado titulando con EDTA al 0.01N, cambia de color rosa café a violeta.

$$\text{meqL}^{-1} \text{Ca}^{2+} = \frac{\text{Lect} \times N_{\text{EDTA}} \times 1000}{\text{Alícuota}}$$

*Lect*: Lectura al titular con EDTA en mL.

*Alícuota*: Volumen de la muestra de agua que es analizada en mL.

$N_{\text{EDTA}}$ : Normalidad del EDTA.

#### *Procedimiento para $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$*

En una muestra de 5 mL se agregó 4 gotas de solución amortiguadora de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ , luego se añadió una pizca de eriocromo negro T, se tituló con EDTA al 0.01N, cambia de color violeta a azul.

$$\text{meqL}^{-1} \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} = \frac{\text{Lect} \times N_{\text{EDTA}} \times 1000}{\text{Alícuota}}$$

*Lect*: Lectura al titular con EDTA en mL.

*Alícuota*: Volumen de la muestra de agua que es analizada en mL.

$N_{\text{EDTA}}$ : Normalidad del EDTA.

Por diferencia se obtiene el valor de  $\text{Mg}^{2+}$ .

#### *Determinación del Sodio y Potasio*

El exceso de iones de sodio desplazan al calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), provocando la dispersión y desagregación del suelo. El suelo se vuelve duro y compacto en condiciones secas y reduce la infiltración de agua y aire a través de los poros que conforman el suelo. Este problema esta igualmente relacionado con otros factores como el nivel de salinidad y el tipo de suelo. Por ejemplo, alto contenido de sodio en suelos arenosos no afecta tanto, ya que éstos tienen una gran superficie de drenaje, en contra de otros suelos más compactos.

#### *Procedimiento*

Se determinó mediante el aparato Aut Cal Flame-Photometer 643. Primero se colocó una solución de Cesio, luego se abrió la válvula de gas LP, después se calibró con una solución de 140 meq  $\text{L}^{-1}$  de sodio y 5 meq  $\text{L}^{-1}$  de potasio. Al final el equipo se enceró con agua destilada y



se prende la flama. Se midió la muestra directamente de la botella, no hizo falta hacer diluciones, los resultados fueron en meq L<sup>-1</sup>.

### *Determinación de Carbonatos y Bicarbonatos*

Riesgo de carbonatos y bicarbonatos en aguas de regadío. Alto contenido de carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) y bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) aumenta el índice de **RAS** (sobre >3-4 meq L<sup>-1</sup> o >180-240 mg L<sup>-1</sup>).

Los iones de carbonato y bicarbonato se combinan con **calcio** y **magnesio** precipitando en forma de carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>) o carbonato de magnesio (MgCO<sub>3</sub>) cuando la solución del suelo se concentra bajo condiciones secas. La concentración de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> decrece en relación al sodio y el índice RAS es mayor. Esto provoca la alcalinización y aumento del **pH**, entonces, cuando el **análisis del agua** indica un nivel alto de pH, esto es una señal de que los valores de carbonatos y bicarbonatos son altos.

En aguas ricas en iones bicarbonatos, existe la tendencia de calcio y de magnesio a precipitarse en forma de carbonatos a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Esta situación genera una disminución en la concentración de calcio y magnesio y aumenta la proporción relativa de sodio. Se considera que una muestra de agua con más de 2.5 meq L<sup>-1</sup> de carbonato de sodio residual, no son buenas para el riego, las que contengan entre 1.25 a 2.5 meq L<sup>-1</sup> son dudosas y, las que contengan menos de 1.25 meq L<sup>-1</sup> con toda seguridad son buenas.

### *Procedimiento*

Para determinar su concentración se tomó 5 mL, se agregaron 5 gotas de fenolftaleína y luego se agregó ácido sulfúrico hasta que la muestra tomó una tonalidad blanquecina. En la misma muestra se determinó la concentración de bicarbonatos, para lo que agregamos 3 gotas de anaranjado de metilo y se volvió agregar ácido sulfúrico 0.01 N hasta tener un color durazno, se utiliza la misma muestra para los cloruros.

$$\text{meqL}^{-1} \text{CO}_3^{2-} = \frac{2y \times N_{\text{H}_2\text{SO}_4} \times 1000}{\text{Alícuota}}$$

*y*: Lectura al titular con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en mL.

*Alícuota*: Volumen de la muestra de agua que es analizada en mL.

*N<sub>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></sub>*: Normalidad del ácido sulfúrico.

Para los bicarbonatos la lectura al titular con  $H_2SO_4$  en mL es z.

$$meqL^{-1} HCO_3^- = \frac{(z-2y) \times N_{H_2SO_4} \times 1000}{Alícuota}$$

### *Determinación de Cloruros*

Cuando se describen los efectos perjudiciales que producen en las plantas, estos se refieren en general al impacto de los cloruros, si bien las plantas también absorben el gas de cloro del aire a través de sus hojas. Esto destruye los tejidos vegetales, en parte por oxidación y en parte por expulsión del hidrógeno de los compuestos orgánicos. Cuando se riega con aguas con alto contenido de cloruro de sodio, las sales se acumulan en la parte superior del sustrato, formando una capa de color blanco, compacta los suelos e impide que se absorba el agua por las plantas. Cuando la velocidad de infiltración es muy baja, puede ocurrir que el agua infiltrada no baste para cubrir las necesidades del cultivo. Los problemas más frecuentes relacionados con una infiltración baja, suelen producirse cuando el sodio se incorpora al suelo y deteriora su estructura; los agregados del suelo se dispersan en partículas pequeñas que tapan o sellan los poros y evitan que el agua pueda circular e infiltrarse con facilidad. El efecto contrario lo producen el calcio y el magnesio, por lo que para evaluar realmente el problema que puede generar un exceso de cloruros hay que saber también la cantidad de calcio y magnesio que hay en el suelo.

### *Procedimiento*

En la solución en la que se determinaron carbonatos y bicarbonatos, se le agregó tres gotas del indicador de cromato de potasio y se tituló con nitrato de plata hasta obtener un color rojo ladrillo.

$$meqL^{-1} Cl^- = \frac{Lect \times N_{AgNO_3} \times 1000}{Alícuota}$$

*Lect*: Lectura al titular con  $AgNO_3$  en mL.

*Alícuota*: Volumen de la muestra de agua que es analizada en mL.

$N_{AgNO_3}$ : Normalidad del nitrato de plata.

### *Determinación de Sulfatos*

Junto con los cloruros, los sulfatos son los principales aniones presentes en las muestras de agua y son aportes importantes en suelos salinos, pero su control se efectúa adecuadamente

considerando volúmenes extra de agua en los riegos para asegurar su salida fuera de la zona radical. Las plantas pueden presentar sensibilidad a concentraciones altas de sulfatos, ya que pueden limitar la absorción de sodio y alterar el balance catiónico óptimo dentro la planta. La concentración de sulfatos en una muestra de agua, es determinada generalmente por medio de técnicas gravimétricas o turbidimétricas.

#### *Procedimiento*

En un matraz volumétrica de 100 mL se agregaron 100 mL, para algunos casos, mientras que para las otras se tomaran 10 mL; en 100 mL con agua destilada. Luego se vacía el matraz erlermeyer de 125 mL, se adiciona 5 mL de la solución HCl y un poquito de cloruro de bario. Finalmente se agita durante un minuto y se obtiene la lectura de absorbancia en el espectrofotómetro marca Perkin, Elmer No.35. Previamente se realizó la curva de calibración con una solución conocida de 100 ppm de  $\text{SO}_4^{2-}$ , luego se hicieron diluciones para 0, 5, 10, 20, 30, 35 y 40 ppm de  $\text{SO}_4^{2-}$ , cada una de estas se midió la absorbancia, con estos datos se construyó la curva en el eje de las X se colocó la absorbancia y, en el eje de las Y las ppm de  $\text{SO}_4^{2-}$ , la regresión que se obtiene es del tipo  $Y=a+bX$ , en donde Y fueron las ppm de cada agua recolectada en el muestreo y X es la absorbancia de esta muestra.

#### *Determinación de ortofosfatos por colorimetría*

En medio ácido y en presencia de molibdato amónico los ortofosfatos forman un complejo fosfomolibdico, que reducido por el ácido ascórbico, desarrolla una coloración azul susceptible de una determinación colorimétrica. Hay formas orgánicas que pueden hidrolizarse durante el proceso de formación del color y dar los ortofosfatos. Este desarrollo se acelera utilizando un catalizador emético, tartrato doble de antimonio y potásico.

#### *Procedimiento*

Se lavaron bien los recipientes con ácido clorhídrico diluido eliminando los fosfatos de los detergentes comerciales. Después se preparó el reactivo preparado con 400 mL de ácido sulfúrico 5 N, 120 mL solución de molibdato amónico, 240 mL de solución de ácido ascórbico y 40 mL de solución de emético. Inmediatamente se preparó una solución madre patrón de 0.2 g  $\text{L}^{-1}$  de fosfato monopotásico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) y luego esta se disolvió 1/100 para obtener una solución patrón de 2 mg  $\text{L}^{-1}$ , con la que se preparó la curva de calibración, utilizando el espectrómetro en una longitud de onda a 690 nm.

Se colocaron 20 mL de la muestra a analizar, a lo que se añadió 4 mL de reactivo y completamos con agua destilada hasta 25 mL, esperamos 20 minutos y se leyó en el espectrómetro. Lo mismo se hace para obtener la curva de calibración.

#### *Determinación de boro*

El Boro es un no metal ligero que se encuentra principalmente en minerales de silicato. El contenido de boro en las rocas ígneas varía de 5 a 10  $\mu\text{g}$  de  $\text{B g}^{-1}$ , mientras que en las rocas sedimentarias varía de 20 a 100  $\mu\text{g}$  de  $\text{B g}^{-1}$  y en aguas marinas contiene en promedio de 100  $\mu\text{g}$  de  $\text{B g}^{-1}$ . El método para determinar el boro fue el de azometina-H, como un reactivo para dar el color con  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , complejo que conserva la absorbancia proporcional, por varias horas, independientemente, de la presencia de una gran variedad de sales. El método utilizado fue para el rango de 0.5 a 10  $\mu\text{g}$  de  $\text{B mL}^{-1}$  con azometina-H y una solución de  $\text{H}_3\text{BO}_3$  que forma un complejo estable de pH 5.1. La absorbancia es a 420 nm.

#### *Procedimiento*

El aparato que se utilizó fue el espectrofotómetro y tubos de polipropileno con una capacidad de 10 mL. Los reactivos utilizados fueron: agua desionizada, solución buffer que se preparó disolviendo 250 g de acetato de amonio, 15 g de EDTA en 400 mL de agua destilada. Lentamente se añadieron 125 mL de ácido acético glacial y se mezcló.

Para preparar la azometina-H, se disolvieron 0.45 g de azometina-H en 100 mL de 1% solución de ácido ascórbico L. El reactivo final se preparó cada semana y se mantuvo en refrigeración.

La solución Standard de boro se preparó de la siguiente manera: Se disolvieron 0.114 g de ácido bórico en agua destilada hasta ajustar 1000 mL, en esta solución cada mL contiene 20  $\mu\text{g}$  de  $\text{B mL}^{-1}$ . Se diluyeron 10, 20, 30, 40 y 50 mL de la solución Standard en 100 mL con agua destilada para tener soluciones con concentraciones de boro de 2, 4, 6, 8 y 10  $\mu\text{g}$  de  $\text{B mL}^{-1}$  respectivamente. Se incluyó para la curva de calibración, el punto 0 de agua destilada.

Para hacer las lecturas se pipeteó 1 mL de el agua analizar o de las soluciones diluidas para preparar la curva de calibración, todo esto en los tubos de polipropileno, se añadieron 2 mL de la solución buffer y se mezcló cuidadosamente, luego se añadieron 2 mL del reactivo de

azometina-H y se mezcló. Después de 30 minutos se determinó la absorbancia a 420 nm, valores que se llevaron a la curva de calibración.

### *Determinación de la Presión Osmótica*

#### *Procedimiento*

La presión de vapor y el punto de congelación están entre las propiedades coligativas de una solución comparada con un disolvente puro, esto se presentó en capítulos anteriores. Las propiedades coligativas son alteradas en proporción al número de partículas del soluto que se disolvieron en cada kilogramo del solvente (agua en caso de solución biológica). Por lo tanto, medir cualquier propiedad por medios indirectos, es medir la concentración de la solución u osmolalidad. La ventaja principal del método de presión de vapor es que no requiere un arreglo del estado físico de la muestra. El elemento sensible del osmómetro es un higrómetro.

Cuando la presión de vapor se equilibra en el espacio de la cámara, percibe la temperatura ambiental del aire al establecer el punto de referencia para la medición. Bajo el control electrónico mide la temperatura del punto de rocío dentro del espacio cerrado que da un producto proporcional a la temperatura diferencial. La diferencia entre la temperatura ambiental y la depresión de la temperatura del punto de rocío, es una función explícita de la presión de vapor de la solución. El osmómetro fue de la marca VAPRO modelo 5520, con una micro pipeta se extrajo directamente de las muestras de agua aproximadamente una gota, una membrana especial se colocó en el osmomómetro y sobre ella la muestra de agua, después de 75 segundos se obtiene la cantidad de sustancia en  $\text{mmol kg}^{-1}$ , este valor lo llevamos a la ecuación de los gases ideales y obtuvimos la presión osmótica en atm.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La red hidrográfica Zahuapan-Atoyac-presa Valsequillo se encuentra distribuida en los estados de Puebla y Tlaxcala, el río Zahuapan atraviesa por las ciudades capitales hasta llegar a la presa Manuel Ávila Camacho.

Para tener una mayor escala gráfica, los datos del primer y segundo muestreo realizados en los meses de Febrero y Marzo del 2006 y 2007 respectivamente se los dividió en dos: de baja concentración y de alta concentración. En las Figuras 14 y 15 se presentan la ubicación de los puntos de los dos muestreos, así como los tipos de rocas que se tiene en este sistema hidrográfico. En el Cuadro 29 y 31, se presentan la localización geográfica de los sitios de muestreo. En los Cuadros 30 y 32 se presentan la composición iónica de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, en los dos muestreos.

Los puntos de mayor concentración de sales son las lagunas de Alchichica y Atexcac (43, 46), esto se debe a que no existe un afluente ni efluente de las mismas. La evapotranspiración es mayor que la precipitación. Sus altos valores de salinidad se deben a la formación inicial volcánica y al encapsulamiento de estas lagunas, aislándolas de los niveles freáticos circundantes.

En caso contrario, las lagunas de Aljojuca, Tecuitlapa, Quecholac y La Preciosa tienen una constante interacción con el nivel freático, por lo que no son de alta concentración. Es evidente al observar los pozos aledaños a estas lagunas que se muestrearon en este trabajo, que prácticamente tienen concentraciones similares.

El río Zahuapan en su paso por el estado de Tlaxcala según el mapa geológico del INEGI (2006) atraviesa por roca ígnea extrusiva del cenozoico terciario en Emiliano Zapata, para continuar su mayor longitud por roca ígnea extrusiva del cenozoico cuaternario y una pequeña porción de suelo del cenozoico cuaternario (Figuras 14 y 15). De acuerdo al mapa fisiográfico, esta inmerso en la provincia del eje neovolcánico, en la subprovincia de lagos y volcanes de Anahuac; en los sistemas de topomorfias, se tiene sierra 23.38%, lomerío 7.83%, lomerío con cañadas 0.39%, meseta 0.06%, meseta con lomeríos 9.02%, meseta con cañadas 16.83%, y llanura con lomeríos 42.49%.

El sistema hidrográfico en su paso por el estado de Puebla según el mapa fisiográfico del INEGI (2006) atraviesa por la provincia de la Sierra Madre Oriental, la subprovincia de los lagos y volcanes de Anahuac, en esta zona se localizan las tres mayores elevaciones del país: Citlaltepétl o Pico de Orizaba con una altitud de 5610 msnm; Popocatepétl con una altitud de 5500 msnm e Iztaccihuatl con una altitud de 5220 msnm. Además, en las cumbres de estas elevaciones, existen tres de los pequeños glaciares de la región intertropical del mundo, entre las dos últimas, la sierra nevada en donde se localiza el Paso de Cortés, muy relevante por su importancia histórica y su accesibilidad. También se tiene el Alitzin o cerro La Negra con 4580 msnm y el volcán Matlalcueyétl o La Malinche con 4420 msnm. Todo lo antes mencionado, forma parte del sistema de topomorfias denominado sierra volcánica con estrato volcanes aislados.

Con respecto al abastecimiento de agua potable, el estado cuenta con 341 pozos profundos con un volumen promedio de extracción diaria de 138,683.20 m<sup>3</sup>, 76 manantiales con una extracción de 12,314.86 m<sup>3</sup> y 3 galerías con una extracción de 841.5 m<sup>3</sup>, esto quiere decir que cada segundo se extrae 1,757.4 litros dando un volumen anual de 55.4 millones de m<sup>3</sup>.

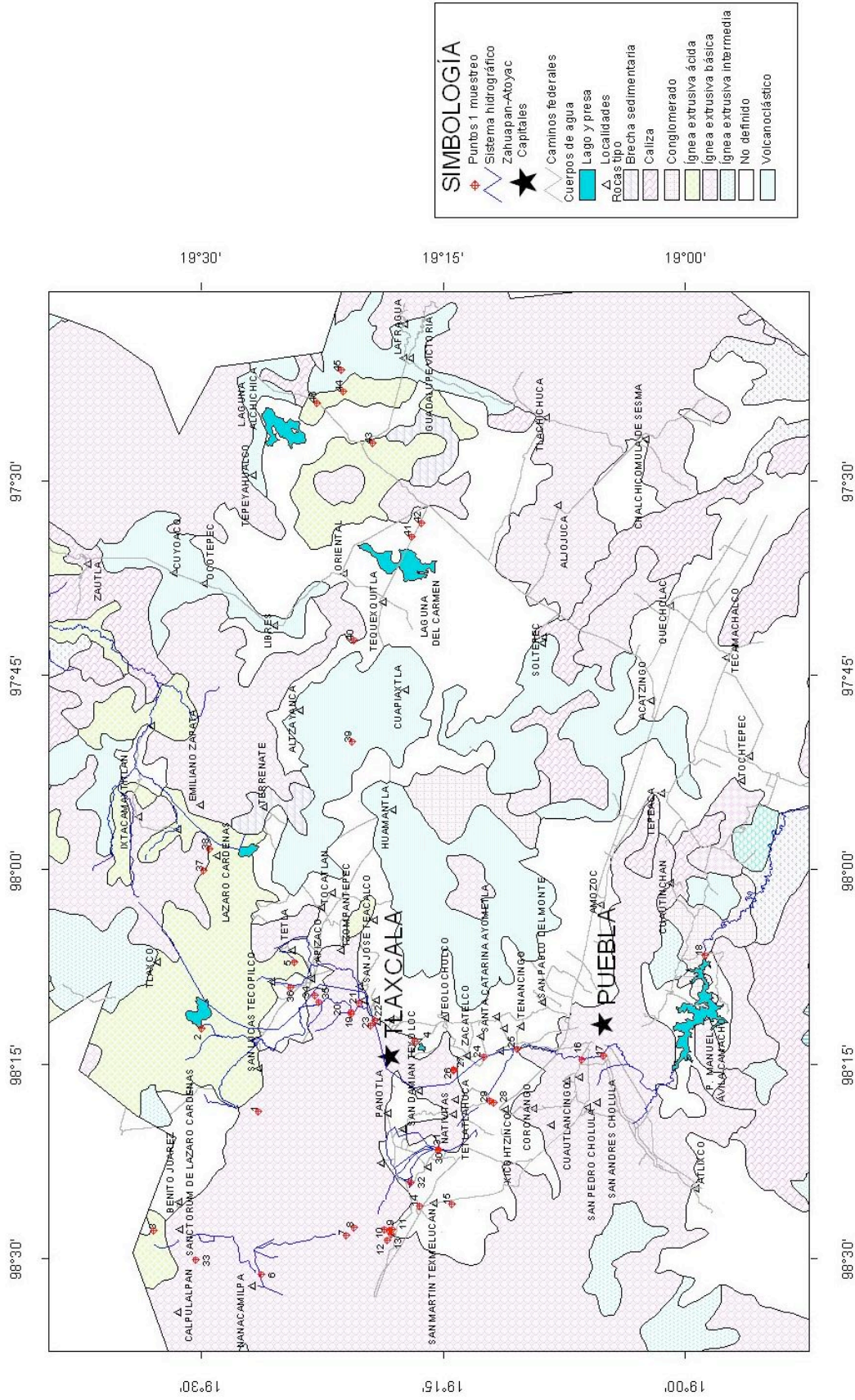


Figura 14. Mapa con los tipos de rocas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del primer muestreo de aguas.



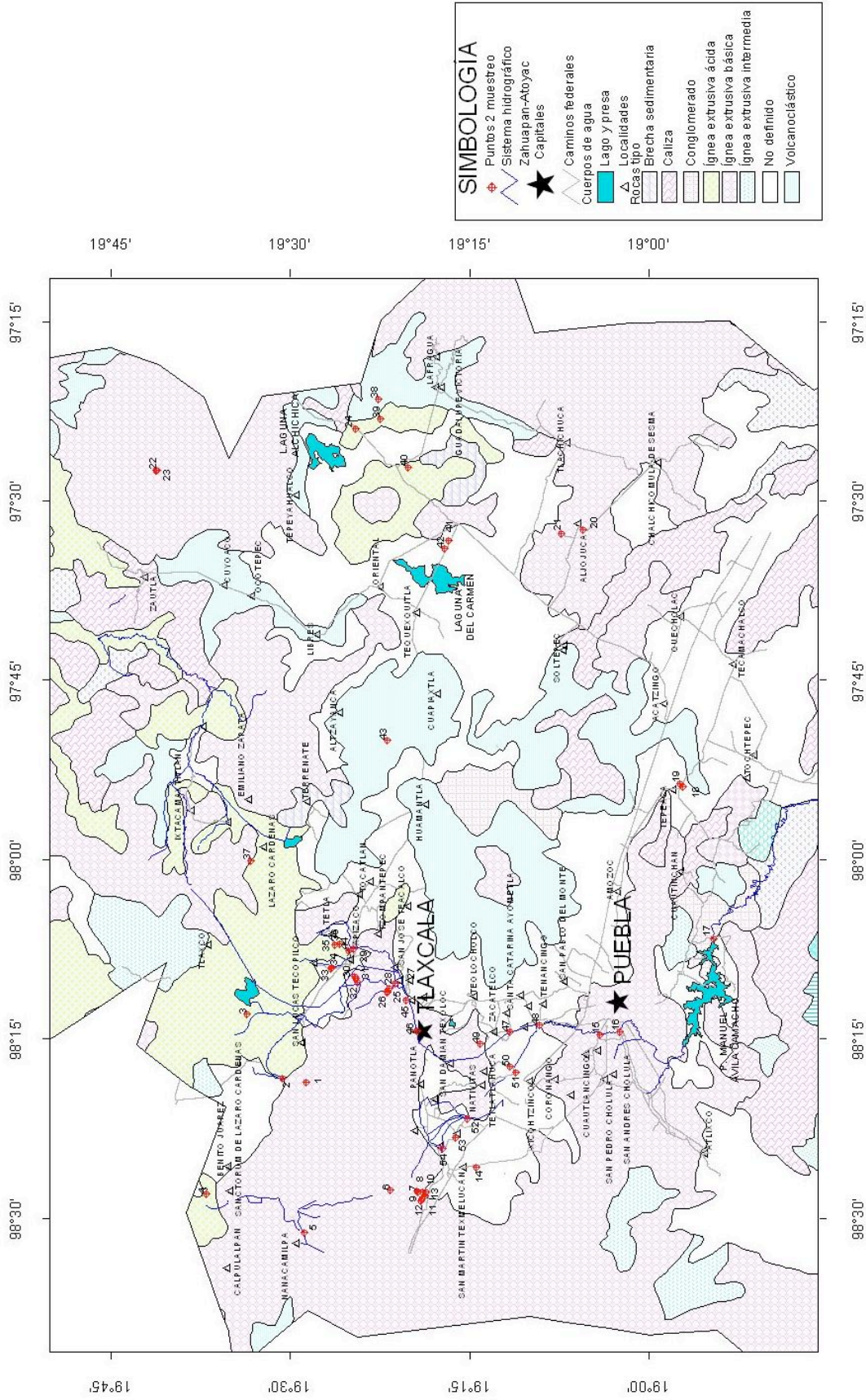


Figura 15. Mapa con los tipos de rocas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac con sitios del segundo muestreo de aguas.

Cuadro 29. Localización geográfica de las estaciones de muestreo de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No.	Descripción del sitio de muestreo	Fecha de colecta	Latitud Norte °	Longitud Oeste °	m.s.n.m	Temp. de las aguas °C
1	Laguna de Tlalpan	07/03/06	19.47794	98.30847	2623	14
2	Laguna Jalnene	07/03/06	19.55654	98.20229	2493	21
3	Laguna San Antonio de Atocha	07/03/06	19.61797	98.46235	2508	19
4	Río Zahuapan (antes de llegar a Muñoz)	07/03/06	19.28366	98.21828	2473	14
5	Manantial Apizaquito	07/03/06	19.43762	98.11666	2418	21
6	Delante de Nanacamilpa (laguna)	09/03/06	19.48075	98.51837	2684	8
7	Canal de riego Atotonilco	09/03/06	19.37110	98.46871	2337	18
8	Manantial de Atotonilco	09/03/06	19.36116	98.45856	2324	18
9	Río Atoyac	09/03/06	19.32284	98.46104	2287	10
10	Río Apepesca	09/03/06	19.31544	98.46188	2297	14
11	Canal de riego Apepesca	09/03/06	19.31248	98.46068	2304	15
12	Manantial Chautla	09/03/06	19.31807	98.47443	2312	14
13	Salida Manantial Chautla	09/03/06	19.31346	98.46734	2283	18
14	Canal de riego San Martin Texmelucan	09/03/06	19.27766	98.43121	2264	19
15	Pozo salida de Texmelucan (Puebla letrero independencia)	09/03/06	19.23623	98.42863	2268	18
16	Río Atoyac (Puente Cholula-Puebla)	09/03/06	19.06881	98.24231	2261	21
17	Río Atoyac (Salida Atlixco, puente)	09/03/06	19.04160	98.23735	2113	20
18	Presa Valsequillo (Manuel Ávila Camacho)	09/03/06	18.91101	98.10833	2074	19
19	Cascada Atlhuitzia 1	10/03/06	19.36537	98.18317	2302	15
20	Cascada Atlhuitzia 2	10/03/06	19.36502	98.18143	2275	15
21	Río Apizaquito delante de la trinidad (Amajal de Guerrero)	10/03/06	19.35464	98.16936	2277	15
22	Puente Apetitlan	10/03/06	19.33494	98.19242	2277	19
23	Río Zahuapan	10/03/06	19.34017	98.19810	2278	20
24	Pozo 1 Zacatelco	10/03/06	19.19445	98.23850	2218	18
25	Río Atoyac Panzacola	10/03/06	19.15207	98.22900	2170	22
26	San Juan a Nativitas	10/03/06	19.23307	98.25618	2211	20
27	San Juan Manantial (San Juan Chausingo)	10/03/06	19.23354	98.25501	2209	18
28	Río Atoyac( Santa Agueda 1)	10/03/06	19.18225	98.29807	2210	17
29	Río Atoyac (Santa Agueda 2)	10/03/06	19.18639	98.29479	2202	15
30	Puente Atoyatenco 1	10/03/06	19.25331	98.35909	2226	16
31	Puente Atoyatenco 2	10/03/06	19.25304	98.35764	2226	15
32	Canal de riego revestido Villa Alta	10/03/06	19.28875	98.40124	2233	16
33	Delante de Calpulalpan Pozo Chico	21/03/06	19.56457	98.50045	2579	18
34	Manantial Planta Apizaco	21/03/06	19.4111	98.16027	2382	18
35	Bajada Iglesia Monteolivo (San Benito SantoCan)	21/03/06	19.4062	98.16863	2369	18
36	Manantial de Actipan	21/03/06	19.44254	98.14954	2416	18
37	Laguna Lázaro Cardenas	21/03/06	19.55483	97.99922	2559	18
38	Descarga Drenaje de Lázaro Cardenas (rumbo)	21/03/06	19.54716	97.97177	2467	18
39	Rancho Ceron Pozitos (Ing. Luis Pimentel)	24/03/06	19.36391	97.83383	2370	33
40	Pozo Morelos	24/03/06	19.3614	97.7032	2397	21
41	Laguna del Carmen nivel freático	24/03/06	19.28729	97.56953	2353	17
42	Pozo 2 Nuevo Tlatilchuca	24/03/06	19.27414	97.55197	2360	18
43	Lago cráter Atexcac	24/03/06	19.33673	97.44993	2358	21
44	Laguna Preciosa	24/03/06	19.37449	97.38274	2342	11
45	Laguna Quecholac	24/03/06	19.37777	97.3557	2340	16
46	Laguna Alchichica	24/03/06	19.40875	97.3974	2315	16

Cuadro 30. Composición iónica de las aguas residuales de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No.	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	meq L <sup>-1</sup>										RSE mg L <sup>-1</sup> ppm	% Error	∑ mgL <sup>-1</sup> ∑ mmol	
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma				
1	6.7	0.421	1.60	1.40	0.50	0.71	4.21	0.00	2.91	1.30	0.12	4.33	327.00	1.45		
			32.06	17.01	11.50	27.76		0.00	177.57	46.09	5.97					
			0.80	0.70	0.50	0.71		0.00	2.91	1.30	0.06					
2	6.95	0.265	1.00	1.00	0.10	0.37	2.47	0.00	1.51	0.70	0.34	2.55	186.00	1.77		
			20.04	12.15	2.30	14.27		0.00	92.14	24.82	16.51					
			0.50	0.50	0.10	0.37		0.00	1.51	0.70	0.17					
3	6.8	0.465	1.40	1.04	1.50	0.81	4.75	0.00	3.10	1.20	0.62	4.92	377.00	1.78		
			28.06	12.64	34.49	31.67		0.00	189.16	42.54	29.90					
			0.70	0.52	1.50	0.81		0.00	3.10	1.20	0.31					
4	7	0.401	1.40	1.50	0.40	0.63	3.93	0.00	0.80	1.65	1.60	4.05	272.00	1.50		
			28.06	18.23	9.20	24.63		0.00	48.82	58.49	76.85					
			0.70	0.75	0.40	0.63		0.00	0.80	1.65	0.80					
5	8.05	0.191	0.60	1.00	0.30	0.28	2.18	0.00	1.12	1.00	0.11	2.23	155.00	1.23		
			12.02	12.15	6.90	10.95		0.00	68.34	35.45	5.48					
			0.30	0.50	0.30	0.28		0.00	1.12	1.00	0.06					
6	7.2	0.264	1.00	1.00	0.10	0.42	2.52	0.00	1.25	1.20	0.14	2.59	180.00	1.50		
			20.04	12.15	2.30	16.23		0.00	76.28	42.54	6.80					
			0.50	0.50	0.10	0.42		0.00	1.25	1.20	0.07					
7	6.95	0.331	1.10	1.90	0.25	0.23	3.48	0.00	2.13	1.40	0.05	3.58	249.00	1.56		
			22.04	23.09	5.75	8.80		0.00	129.97	49.63	2.64					
			0.55	0.95	0.25	0.23		0.00	2.13	1.40	0.03					
8	7.05	0.461	1.10	3.00	0.50	0.28	4.88	0.00	3.52	0.90	0.60	5.02	365.00	1.41		
			22.04	36.45	11.50	10.95		0.00	214.79	31.91	28.82					
			0.55	1.50	0.50	0.28		0.00	3.52	0.90	0.30					
9	7.95	0.255	0.80	1.50	0.20	0.19	2.69	0.00	1.50	1.20	0.07	2.77	189.00	1.63		
			16.03	18.23	4.60	7.23		0.00	91.53	42.54	3.54					
			0.40	0.75	0.20	0.19		0.00	1.50	1.20	0.04					
10	8.45	0.345	1.00	0.40	0.70	0.62	2.72	0.00	1.10	1.30	0.41	2.81	204.00	1.71		
			20.04	4.86	16.09	24.24		0.00	67.12	46.09	19.91					
			0.50	0.20	0.70	0.62		0.00	1.10	1.30	0.21					
11	7.5	0.148	0.70	0.80	0.12	0.05	1.67	0.00	1.06	0.55	0.10	1.71	121.00	1.30		
			14.03	9.72	2.76	1.96		0.00	64.68	19.50	5.00					
			0.35	0.40	0.12	0.05		0.00	1.06	0.55	0.05					
12	8.7	0.134	0.60	0.50	0.11	0.05	1.26	0.00	0.58	0.60	0.12	1.30	87.00	1.67		
			12.02	6.08	2.53	1.96		0.00	35.39	21.27	5.90					
			0.30	0.25	0.11	0.05		0.00	0.58	0.60	0.06					
13	8.05	0.179	0.60	1.10	0.14	0.05	1.89	0.00	0.75	1.10	0.09	1.94	123.00	1.30		
			12.02	13.37	3.22	1.96		0.00	45.77	39.00	4.30					
			0.30	0.55	0.14	0.05		0.00	0.75	1.10	0.04					
14	7.85	0.454	1.30	1.00	1.75	0.38	4.43	0.00	1.57	1.80	1.20	4.57	319.00	1.54		
			26.05	12.15	40.23	14.86		0.00	95.80	63.81	57.58					
			0.65	0.50	1.75	0.38		0.00	1.57	1.80	0.60					
15	8.45	0.344	1.00	1.80	0.60	0.21	3.61	0.00	1.24	1.60	0.68	3.52	235.00	1.25		
			20.04	21.87	13.79	8.02		0.00	75.66	56.72	32.47					
			0.50	0.90	0.60	0.21		0.00	1.24	1.60	0.34					

Continuación... Composición iónica de las aguas residuales de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No.	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	meq L <sup>-1</sup>										RSE mg L <sup>-1</sup> ppm	% Error	∑ mgL <sup>-1</sup> ∑ mmol	
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma				
16	7.9	1.495	3.00	3.40	8.00	0.98	15.38	0.00	6.38	5.30	4.07	15.75	1129.00	1.20		
			60.12	41.31	183.92	38.32		0.00	389.31	187.89	195.64					1096.50
			1.50	1.70	8.00	0.98		0.00	6.38	5.30	2.04					25.90
17	7.95	1.355	2.50	2.90	7.60	0.88	13.88	0.00	5.85	4.50	3.86	14.21	1025.00	1.18		
			50.10	35.24	174.72	34.21		0.00	356.97	159.53	185.24					996.00
			1.25	1.45	7.60	0.88		0.00	5.85	4.50	1.93					23.45
18	7.05	0.784	1.60	1.63	4.05	0.48	7.76	0.00	2.83	3.70	1.42	7.95	551.00	1.22		
			32.06	19.80	93.11	18.57		0.00	172.69	131.17	68.01					535.41
			0.80	0.82	4.05	0.48		0.00	2.83	3.70	0.71					13.38
19	8	0.555	0.55	1.50	3.25	0.47	5.77	0.00	2.82	2.00	1.11	5.93	431.00	1.39		
			11.02	18.23	74.72	18.38		0.00	172.08	70.90	53.44					418.76
			0.28	0.75	3.25	0.47		0.00	2.82	2.00	0.56					10.12
20	8	0.587	1.80	1.10	2.90	0.46	6.26	0.00	3.39	2.00	1.03	6.42	474.00	1.23		
			36.07	13.37	66.67	17.99		0.00	206.86	70.90	49.28					461.13
			0.90	0.55	2.90	0.46		0.00	3.39	2.00	0.51					10.71
21	7.65	1.408	1.70	1.40	10.60	0.58	14.28	0.00	4.42	9.40	0.76	14.58	985.00	1.02		
			34.07	17.01	243.69	22.68		0.00	269.71	333.23	36.28					956.67
			0.85	0.70	10.60	0.58		0.00	4.42	9.40	0.38					26.93
22	7.5	0.311	0.90	1.20	0.50	0.25	2.85	0.00	2.30	0.24	0.41	2.95	229.00	1.78		
			18.04	14.58	11.50	9.78		0.00	140.35	8.51	19.84					222.58
			0.45	0.60	0.50	0.25		0.00	2.30	0.24	0.21					4.55
23	7.95	0.906	1.70	1.60	6.00	0.47	9.77	0.00	3.81	4.80	0.81	9.42	670.00	1.82		
			34.07	19.44	137.94	18.38		0.00	232.49	170.16	38.92					651.39
			0.85	0.80	6.00	0.47		0.00	3.81	4.80	0.41					17.14
24	7.7	0.241	1.10	1.20	0.10	0.09	2.49	0.00	1.63	0.70	0.23	2.56	183.00	1.46		
			22.04	14.58	2.30	3.52		0.00	99.46	24.82	11.24					177.96
			0.55	0.60	0.10	0.09		0.00	1.63	0.70	0.12					3.79
25	7.95	0.689	1.50	1.20	3.70	0.55	6.95	0.00	3.66	2.30	1.20	7.16	529.00	1.49		
			30.06	14.58	85.06	21.51		0.00	223.33	81.54	57.64					513.71
			0.75	0.60	3.70	0.55		0.00	3.66	2.30	0.60					12.16
26	7.85	0.253	1.30	0.80	0.25	0.05	2.40	0.00	1.14	0.90	0.43	2.47	170.00	1.48		
			26.05	9.72	5.75	1.96		0.00	69.56	31.91	20.74					165.69
			0.65	0.40	0.25	0.05		0.00	1.14	0.90	0.22					3.61
27	7.8	0.373	1.40	1.70	0.25	0.05	3.40	0.00	2.15	1.00	0.36	3.51	247.00	1.65		
			28.06	20.66	5.75	1.96		0.00	131.19	35.45	17.48					240.54
			0.70	0.85	0.25	0.05		0.00	2.15	1.00	0.18					5.18
28	7.55	0.890	1.60	1.90	5.15	0.55	9.20	0.00	5.57	2.10	1.30	8.97	691.00	1.24		
			32.06	23.09	118.40	21.31		0.00	339.88	74.45	62.46					671.64
			0.80	0.95	5.15	0.55		0.00	5.57	2.10	0.65					15.77
29	7.85	0.694	1.20	1.30	3.65	0.56	6.71	0.00	3.99	1.90	1.05	6.94	522.00	1.75		
			24.05	15.80	83.91	21.70		0.00	243.47	67.36	50.64					506.92
			0.60	0.65	3.65	0.56		0.00	3.99	1.90	0.53					11.87
30	7.35	1.025	1.60	2.00	5.65	0.57	9.82	0.00	7.04	1.70	1.30	10.04	783.00	1.11		
			32.06	24.30	129.89	22.29		0.00	429.58	60.27	62.46					760.85
			0.80	1.00	5.65	0.57		0.00	7.04	1.70	0.65					17.41
31	7.55	0.690	1.20	3.40	2.10	0.34	7.04	0.00	4.49	1.60	0.77	6.86	509.00	1.33		
			24.05	41.31	48.28	13.29		0.00	273.98	56.72	36.77					494.40
			0.60	1.70	2.10	0.34		0.00	4.49	1.60	0.38					11.21
32	7.55	0.469	1.10	1.60	1.05	0.39	4.14	0.00	2.56	1.30	0.39	4.25	310.00	1.35		
			22.04	19.44	24.14	15.05		0.00	156.21	46.09	18.66					301.64
			0.55	0.80	1.05	0.39		0.00	2.56	1.30	0.19					6.84

Continuación... Composición iónica de las aguas residuales de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No.	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	meq L <sup>-1</sup>										RSE mg L <sup>-1</sup> ppm	% Error	$\sum$ mgL <sup>-1</sup> $\sum$ mmol	
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma				
33	7.5	0.329	1.30	1.70	0.15	0.05	3.20	0.00	1.97	0.60	0.71	3.28	234.00	1.18		
			26.05	20.66	3.45	1.96		0.00	120.21	21.27	33.92					
			0.65	0.85	0.15	0.05		0.00	1.97	0.60	0.35					
34	7.25	0.361	1.50	1.70	0.18	0.05	3.43	0.00	2.46	0.90	0.15	3.51	253.00	1.09		
			30.06	20.66	4.14	1.96		0.00	150.11	31.91	7.01					
			0.75	0.85	0.18	0.05		0.00	2.46	0.90	0.07					
35	6.9	1.790	5.56	2.30	10.20	0.39	18.45	0.00	8.90	2.20	6.88	17.98	1380.00	1.29		
			111.42	27.95	234.50	15.05		0.00	543.08	77.99	330.21					
			2.78	1.15	10.20	0.39		0.00	8.90	2.20	3.44					
36	6.95	0.320	1.00	1.80	0.18	0.05	3.03	0.00	2.35	0.60	0.16	3.11	226.00	1.26		
			20.04	21.87	4.14	1.96		0.00	143.40	21.27	7.56					
			0.50	0.90	0.18	0.05		0.00	2.35	0.60	0.08					
37	7.05	0.135	0.60	0.75	0.10	0.05	1.50	0.00	0.68	0.60	0.26	1.54	103.00	1.22		
			12.02	9.11	2.30	1.96		0.00	41.49	21.27	12.35					
			0.30	0.38	0.10	0.05		0.00	0.68	0.60	0.13					
38	6.9	0.836	0.84	2.00	4.48	0.68	8.00	0.00	5.88	1.60	0.32	7.80	619.00	1.26		
			16.83	24.30	103.00	26.39		0.00	358.80	56.72	15.19					
			0.42	1.00	4.48	0.68		0.00	5.88	1.60	0.16					
39	7.2	0.332	1.40	0.90	0.52	0.32	3.14	0.00	2.10	0.70	0.26	3.06	235.00	1.34		
			28.06	10.94	11.95	12.51		0.00	128.14	24.82	12.35					
			0.70	0.45	0.52	0.32		0.00	2.10	0.70	0.13					
40	7.4	0.378	1.50	1.10	0.82	0.29	3.71	0.00	3.00	0.60	0.20	3.80	296.00	1.28		
			30.06	13.37	18.85	11.14		0.00	183.06	21.27	9.64					
			0.75	0.55	0.82	0.29		0.00	3.00	0.60	0.10					
41	6.9	2.074	8.50	11.30	2.85	0.25	22.90	0.00	16.50	4.50	2.56	23.56	1680.00	1.42		
			170.34	137.30	65.52	9.58		0.00	1006.83	159.53	122.81					
			4.25	5.65	2.85	0.25		0.00	16.50	4.50	1.28					
42	7	1.706	7.80	6.00	2.05	0.17	16.02	0.00	11.71	2.70	2.17	16.58	1233.00	1.71		
			156.31	72.90	47.13	6.65		0.00	714.54	95.72	104.08					
			3.90	3.00	2.05	0.17		0.00	11.71	2.70	1.08					
43	8.15	11.218	2.10	44.70	65.72	2.21	114.73	16.00	5.10	95.00	1.94	118.04	6627.00	1.42		
			42.08	543.11	1510.90	86.22		480.00	311.20	3367.75	92.98					
			1.05	22.35	65.72	2.21		8.00	5.10	95.00	0.97					
44	8.5	2.196	1.17	12.60	7.90	0.45	22.12	3.04	9.02	9.70	1.18	22.94	1460.00	1.83		
			23.45	153.09	181.62	17.60		91.20	550.40	343.87	56.91					
			0.59	6.30	7.90	0.45		1.52	9.02	9.70	0.59					
45	8.2	0.869	0.87	4.70	3.18	0.21	8.96	2.80	3.87	2.30	0.34	9.31	591.00	1.96		
			17.43	57.11	73.11	8.02		84.00	236.15	81.54	16.44					
			0.44	2.35	3.18	0.21		1.40	3.87	2.30	0.17					
46	8.65	12.402	1.60	34.80	87.56	5.69	129.65	23.00	6.50	89.00	14.47	132.97	7855.00	1.27		
			32.06	422.82	2013.00	222.28		690.00	396.63	3155.05	695.09					
			0.80	17.40	87.56	5.69		11.50	6.50	89.00	7.24					
Media	7.59	1.14	1.67	3.81	5.61	0.52	11.60	0.97	3.66	5.96	1.27	11.86	968.48	1.11		
			33.41	46.25	128.92	20.21		29.24	223.13	211.11	60.93					
			0.83	1.90	5.61	0.52		0.49	3.66	5.96	0.63					
Mediana	7.59	0.46	1.30	1.55	0.94	0.37	4.32	0.00	2.83	1.50	0.61	4.45	499.00	1.50		
			26.05	18.83	21.50	14.56		0.00	172.38	53.18	29.36					
			0.65	0.78	0.94	0.37		0.00	2.83	1.50	0.31					
Moda	7.95		1.60	1.00	0.10	0.05				0.60	0.26		676.00			
			32.06	12.15	2.30	1.96		0.00		21.27	12.35					
			0.80	0.50	0.10	0.05		0.00		0.60	0.13					
$\sigma$	0.54	2.36	1.61	8.16	15.74	0.86	24.49	4.11	3.12	18.67	2.36	25.16	1452.85	0.23		
			32.25	99.19	361.94	33.59		123.16	190.62	661.70	113.16					
			0.80	4.08	15.74	0.86		2.05	3.12	18.67	1.18					
CV	0.07	2.08	0.96	2.14	2.81	1.65	2.11	4.23	0.85	3.13	1.86	2.12	1.50	0.21		
			0.97	2.14	2.81	1.66		4.21	0.85	3.13	1.86					
			0.97	2.14	2.81	1.66		4.21	0.85	3.13	1.86					

Cuadro 31. Localización geográfica de las estaciones de muestreo de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	Descripción del sitio de muestreo	Fecha de colecta	Latitud Norte	Longitud Oeste	m.s.n.m	Temp. de las aguas °C
1	Laguna de Tlalpan	31/01/2007	19.47794	98.30847	2637	13
2	Bordo San Fernando	31/01/2007	19.51097	98.30358	2551	13
3	Laguna Jalnene	31/01/2007	19.56075	98.21361	2501	16
4	Laguna de Apan	31/01/2007	19.61753	98.46411	2490	21
5	Delante de Nanacamilpa (laguna)	31/01/2007	19.48078	98.51833	2672	23
6	Manantial Atotonilco	31/01/2007	19.36081	98.45858	2637	23
7	Canal Atotonilco	31/01/2007	19.32369	98.46014	2283	16
8	Río Apepesca	31/01/2007	19.32272	98.46117	2279	17
9	Río Atoyac	31/01/2007	19.31542	98.46194	2289	18
10	Canal de riego Apepesca	31/01/2007	19.31144	98.46092	2295	17
11	Manantial Chautla	31/01/2007	19.31769	98.47453	2300	15
12	Mitad del puente que va al Castillo (Chautla)	31/01/2007	19.31644	98.47083	2291	18
13	Salida manantial Chautla	31/01/2007	19.31339	98.46714	2289	15
14	Pozo salida Texmelucan (pasando letrero independencia)	31/01/2007	19.24161	98.42675	2267	16
15	Río Atoyac (puente Cholula Puebla)	01/02/2007	19.06869	98.24194	2110	15
16	Río Atoyac (Salida Atlixco puente)	01/02/2007	19.04172	98.23758	2102	15
17	Presa Valsequillo (Manuel Ávila Camacho)	01/02/2007	18.91067	98.10825	2062	17
18	Pozo 304 CNA Tepeaca	01/02/2007	18.95303	97.89606	2221	25
19	Pozo 2 Tepeaca (San Pablo Aticpan Puebla)	01/02/2007	18.95703	97.89167	2232	25
20	Laguna Aljojuca	01/02/2007	19.09203	97.53733	2350	17
21	Laguna Tecuittlapa	01/02/2007	19.12258	97.54314	2399	17
22	Humeros 1	02/02/2007	19.68689	97.45511	2825	14
23	Humeros 2	02/02/2007	19.68717	97.45514	2822	45
24	Laguna Alchichica	02/02/2007	19.40897	97.39736	2321	16
25	Cascada Atlhuitzia 1	26/02/2007	19.36489	98.18131	2336	15
26	Cascada Atlhuitzia 2	26/02/2007	19.36464	98.18317	2354	15
27	Río Apizaquito delante de la trinidad (Amajal de Guerrero)	26/02/2007	19.35472	98.17000	2295	18
28	Manantial Palo Huerfano	26/02/2007	19.36244	98.17722	2312	22
29	Puente Apetitlan (para ir a Atenco)	26/02/2007	19.41225	98.12261	2358	20
30	Manantial planta Apizaco	26/02/2007	19.41114	98.16031	2389	20
31	Bajada iglesia Monte Olivo (San Benito Santo Can 1)	26/02/2007	19.40961	98.16372	2390	20
32	Bajada iglesia Monte Olivo (San Benito Santo Can 2)	26/02/2007	19.40647	98.16894	2366	26
33	Manantial de Actipan	26/02/2007	19.44375	98.14986	2430	18
34	Canal junto a Manantial de Actipan	26/02/2007	19.44200	98.14906	2437	12
35	Manantial Apizaquito	26/02/2007	19.43833	98.11656	2415	22
36	Laguna Manantial Apizaquito	26/02/2007	19.43189	98.11606	2411	19
37	Laguna Lázaro Cardenas	26/02/2007	19.55472	97.99942	2559	14
38	Laguna Quecholac	27/02/2007	19.37781	97.35569	2335	16
39	Laguna Preciosa	27/02/2007	19.37456	97.38308	2336	15
40	Lago cráter Atexcac	27/02/2007	19.33658	97.45033	2348	19
41	Pozo 2 Nuevo Tlatilchuca	27/02/2007	19.27933	97.55342	2347	18
42	Pozo Morelos	27/02/2007	19.28472	97.56450	2358	18
43	Rancho Ceron Pozitos (Ing. Luis Pimentel)	27/02/2007	19.36508	97.83197	2494	33
44	Puente Apizaquito 1	27/02/2007	19.41850	98.12447	2417	19
45	Río Zahuapan (puente La Aguanaja 2)	27/02/2007	19.33861	98.19406	2247	21
46	Río Zahuapan (puente Tlaxcala)	27/02/2007	19.32417	98.23611	2253	23
47	Pozo 1 Zacatelco	27/02/2007	19.19394	98.23817	2222	18
48	Río Atoyac Panzacola	27/02/2007	19.15231	98.22867	2177	20
49	San Juan Manantial (San Juan Chausingo)	27/02/2007	19.23528	98.25492	2188	18
50	Río Atoyac (Santa Agueda 1)	27/02/2007	19.19481	98.28647	2182	18
51	Río Atoyac (Santa Agueda 2)	27/02/2007	19.18625	98.29506	2194	15
52	Puente Atoyatenco 1	27/02/2007	19.25331	98.35908	2216	16
53	Canal después de Atoyatenco	27/02/2007	19.27028	98.38533	2233	15
54	Puente Villa Alta	27/02/2007	19.28808	98.40144	2239	17

Cuadro 32. Composición iónica de las aguas residuales de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	meq L <sup>-1</sup>										RSE mg L <sup>-1</sup> ppm	% Error	$\sum$ mgL <sup>-1</sup> $\sum$ mmol	
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma				
1	6.80	0.350	1.90	0.90	0.20	0.46	3.46	0.00	1.84	1.40	0.15	3.39	247.00	0.95		
			38.08	10.94	4.60	17.79		0.00	112.28	49.63	7.22					
			0.95	0.45	0.20	0.46		0.00	1.84	1.40	0.08					
2	7.55	0.135	0.60	0.45	0.05	0.23	1.33	0.00	0.80	0.45	0.05	1.30	97.00	1.14		
			12.02	5.47	1.15	8.99		0.00	48.82	15.95	2.40					
			0.30	0.23	0.05	0.23		0.00	0.80	0.45	0.03					
3	8.15	0.226	0.95	0.70	0.33	0.25	2.23	0.00	0.92	1.00	0.26	2.18	153.00	1.13		
			19.04	8.51	7.59	9.78		0.00	56.14	35.45	12.49					
			0.48	0.35	0.33	0.25		0.00	0.92	1.00	0.13					
4	8.60	0.316	1.20	0.60	0.91	0.43	3.14	0.20	1.16	1.10	0.61	3.07	220.00	1.06		
			24.05	7.29	20.92	16.81		6.00	70.78	39.00	29.48					
			0.60	0.30	0.91	0.43		0.10	1.16	1.10	0.31					
5	8.85	0.226	0.80	0.90	0.28	0.20	2.18	0.50	1.03	0.50	0.20	2.23	150.00	1.13		
			16.03	10.94	6.44	7.82		15.00	62.85	17.73	9.61					
			0.40	0.45	0.28	0.20		0.25	1.03	0.50	0.10					
6	8.45	0.417	1.10	1.95	0.95	0.12	4.12	0.17	3.09	0.70	0.07	4.03	303.00	1.08		
			22.04	23.69	21.84	4.69		5.10	188.55	24.82	3.47					
			0.55	0.98	0.95	0.12		0.09	3.09	0.70	0.04					
7	8.95	0.271	0.95	0.98	0.60	0.09	2.62	0.15	1.65	0.80	0.08	2.68	190.00	1.04		
			19.04	11.91	13.79	3.52		4.50	100.68	28.36	3.61					
			0.48	0.49	0.60	0.09		0.08	1.65	0.80	0.04					
8	9.30	0.237	0.90	0.99	0.40	0.06	2.35	0.25	1.02	0.90	0.13	2.30	153.00	0.91		
			18.04	12.03	9.20	2.15		7.50	62.24	31.91	6.38					
			0.45	0.50	0.40	0.06		0.13	1.02	0.90	0.07					
9	7.00	0.338	1.30	1.20	0.68	0.16	3.34	0.00	1.76	1.00	0.50	3.26	236.00	1.12		
			26.05	14.58	15.63	6.06		0.00	107.40	35.45	24.07					
			0.65	0.60	0.68	0.16		0.00	1.76	1.00	0.25					
10	8.40	0.203	0.70	0.80	0.40	0.11	2.01	0.20	0.90	0.62	0.25	1.97	136.00	1.04		
			14.03	9.72	9.20	4.30		6.00	54.92	21.98	11.93					
			0.35	0.40	0.40	0.11		0.10	0.90	0.62	0.12					
11	8.30	0.158	0.70	0.56	0.25	0.02	1.53	0.05	0.93	0.50	0.09	1.57	110.00	1.14		
			14.03	6.80	5.75	0.78		1.50	56.75	17.73	4.10					
			0.35	0.28	0.25	0.02		0.03	0.93	0.50	0.04					
12	8.50	0.158	0.70	0.54	0.30	0.02	1.56	0.08	0.73	0.60	0.11	1.52	104.00	1.45		
			14.03	6.56	6.90	0.78		2.40	44.54	21.27	5.07					
			0.35	0.27	0.30	0.02		0.04	0.73	0.60	0.05					
13	8.40	0.158	0.70	0.53	0.30	0.04	1.57	0.10	0.74	0.60	0.09	1.53	105.00	1.30		
			14.03	6.44	6.90	1.56		3.00	45.15	21.27	4.30					
			0.35	0.27	0.30	0.04		0.05	0.74	0.60	0.04					
14	8.05	0.474	1.37	1.50	1.55	0.27	4.69	0.00	2.71	1.10	0.78	4.59	343.00	1.06		
			27.45	18.23	35.63	10.56		0.00	165.36	39.00	37.53					
			0.69	0.75	1.55	0.27		0.00	2.71	1.10	0.39					
15	8.55	0.790	1.80	1.20	4.31	0.50	7.81	0.12	3.03	2.90	1.59	7.64	553.00	1.10		
			36.07	14.58	99.09	19.55		3.60	184.89	102.81	76.33					
			0.90	0.60	4.31	0.50		0.06	3.03	2.90	0.79					
16	8.55	0.790	1.82	1.31	4.00	0.52	7.65	0.15	3.17	2.90	1.60	7.82	558.00	1.12		
			36.47	15.92	91.96	20.33		4.50	193.43	102.81	77.03					
			0.91	0.66	4.00	0.52		0.08	3.17	2.90	0.80					

Continuación... Composición iónica de las aguas residuales de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	meq L <sup>-1</sup>										RSE mg L <sup>-1</sup> ppm	% Error	$\sum mgL^{-1}$ $\sum mmol$
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma			
17	8.70	0.649	2.30	2.00	1.84	0.28	6.42	0.40	2.68	2.00	1.18	6.26	439.00	1.22	
			46.09	24.30	42.30	10.95		12.00	163.53	70.90	56.91				426.99
			1.15	1.00	1.84	0.28		0.20	2.68	2.00	0.59				9.74
18	6.55	1.579	10.78	3.20	1.35	0.23	15.56	0.00	11.16	3.00	1.01	15.17	1164.00	1.26	
			216.03	38.88	31.04	8.99		0.00	680.98	106.35	48.59				1130.86
			5.39	1.60	1.35	0.23		0.00	11.16	3.00	0.51				23.24
19	6.50	1.692	11.80	3.22	1.40	0.24	16.66	0.00	12.15	3.10	0.95	16.20	1250.00	1.39	
			236.47	39.12	32.19	9.38		0.00	741.39	109.90	45.81				1214.27
			5.90	1.61	1.40	0.24		0.00	12.15	3.10	0.48				24.88
20	7.40	1.128	1.49	5.40	3.75	0.50	11.14	1.20	6.95	2.10	0.61	10.86	787.00	1.28	
			29.86	65.61	86.21	19.55		36.00	424.09	74.45	29.21				764.97
			0.75	2.70	3.75	0.50		0.60	6.95	2.10	0.30				17.65
21	8.75	2.707	0.60	1.30	23.00	1.84	26.74	3.10	17.14	4.30	1.53	26.07	2053.00	1.27	
			12.02	15.80	528.77	71.94		93.00	1045.88	152.44	73.56				1993.41
			0.30	0.65	23.00	1.84		1.55	17.14	4.30	0.77				49.55
22	7.85	0.846	0.40	0.20	7.08	0.68	8.36	0.00	3.61	3.20	1.34	8.15	3330.00	1.25	
			8.02	2.43	162.77	26.59		0.00	220.28	113.44	64.54				598.07
			0.20	0.10	7.08	0.68		0.00	3.61	3.20	0.67				15.54
23	7.45	0.620	0.60	0.40	4.87	0.28	6.15	0.00	3.89	1.10	1.03	6.02	3844.00	1.06	
			12.02	4.86	111.96	10.75		0.00	237.37	39.00	49.28				465.24
			0.30	0.20	4.87	0.28		0.00	3.89	1.10	0.51				11.15
24	8.10	12.177	1.30	33.40	81.06	4.80	120.56	0.00	12.12	90.00	15.43	117.55	7368.00	1.27	
			26.05	405.81	1863.57	187.68		0.00	739.56	3190.50	740.88				7154.05
			0.65	16.70	81.06	4.80		0.00	12.12	90.00	7.71				213.04
25	7.00	0.823	2.50	1.70	3.58	0.35	8.13	0.00	4.57	1.50	1.89	7.96	607.00	1.01	
			50.10	20.66	82.30	13.49		0.00	278.86	53.18	90.90				589.49
			1.25	0.85	3.58	0.35		0.00	4.57	1.50	0.95				13.04
26	7.20	0.764	2.20	2.50	2.53	0.33	7.56	0.00	4.35	1.50	1.52	7.37	553.00	1.29	
			44.09	30.38	58.16	12.90		0.00	265.44	53.18	72.87				537.01
			1.10	1.25	2.53	0.33		0.00	4.35	1.50	0.76				11.82
27	7.25	1.381	3.40	1.60	8.25	0.39	13.64	0.00	5.58	7.20	0.57	13.35	942.00	1.08	
			68.14	19.44	189.67	15.25		0.00	340.49	255.24	27.26				915.49
			1.70	0.80	8.25	0.39		0.00	5.58	7.20	0.28				24.20
28	7.15	0.400	1.05	1.10	1.62	0.19	3.96	0.00	3.05	0.70	0.11	3.86	304.00	1.26	
			21.04	13.37	37.24	7.43		0.00	186.11	24.82	5.34				295.35
			0.53	0.55	1.62	0.19		0.00	3.05	0.70	0.06				6.69
29	7.25	1.528	2.10	2.00	10.65	0.38	15.13	0.00	7.78	6.40	0.63	14.81	1089.00	1.06	
			42.08	24.30	244.84	14.86		0.00	474.74	226.88	30.32				1058.02
			1.05	1.00	10.65	0.38		0.00	7.78	6.40	0.32				27.58
30	7.55	0.329	0.90	1.10	1.12	0.14	3.26	0.00	2.37	0.70	0.11	3.18	244.00	1.24	
			18.04	13.37	25.75	5.47		0.00	144.62	24.82	5.27				237.33
			0.45	0.55	1.12	0.14		0.00	2.37	0.70	0.05				5.38
31	7.15	0.494	0.95	1.20	2.50	0.24	4.89	0.00	2.91	1.10	0.78	4.79	365.00	1.03	
			19.04	14.58	57.48	9.38		0.00	177.57	39.00	37.49				354.53
			0.48	0.60	2.50	0.24		0.00	2.91	1.10	0.39				8.22



Continuación... Composición iónica de las aguas residuales de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	meq L <sup>-1</sup>										RSE mg L <sup>-1</sup> ppm	% Error	$\sum$ mgL <sup>-1</sup> $\sum$ mmol
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma			
32	7.30	1.528	6.45	1.80	6.60	0.25	15.10	0.00	6.43	2.30	5.99	14.72	1106.00	1.27	
			129.26	21.87	151.73	9.78		0.00	392.36	81.54	287.70		1074.23		
			3.23	0.90	6.60	0.25		0.00	6.43	2.30	3.00		22.70		
33	7.40	0.341	0.80	0.95	1.40	0.15	3.30	0.00	2.48	0.80	0.10	3.38	257.00	1.20	
			16.03	11.54	32.19	5.87		0.00	151.33	28.36	4.80		250.12		
			0.40	0.48	1.40	0.15		0.00	2.48	0.80	0.05		5.76		
34	7.30	0.411	1.10	1.40	1.39	0.18	4.07	0.00	2.74	1.10	0.14	3.98	299.00	1.04	
			22.04	17.01	31.96	6.84		0.00	167.19	39.00	6.80		290.84		
			0.55	0.70	1.39	0.18		0.00	2.74	1.10	0.07		6.73		
35	7.00	0.388	1.05	1.25	1.38	0.16	3.84	0.00	2.91	0.70	0.13	3.74	291.00	1.32	
			21.04	15.19	31.73	6.26		0.00	177.57	24.82	6.25		282.84		
			0.53	0.63	1.38	0.16		0.00	2.91	0.70	0.07		6.37		
36	8.00	0.329	0.85	1.05	1.11	0.17	3.18	0.00	2.32	0.80	0.14	3.26	245.00	1.31	
			17.03	12.76	25.52	6.65		0.00	141.57	28.36	6.94		238.82		
			0.43	0.53	1.11	0.17		0.00	2.32	0.80	0.07		5.42		
37	8.10	0.118	0.30	0.40	0.46	0.02	1.18	0.00	0.55	0.50	0.10	1.15	80.00	1.29	
			6.01	4.86	10.58	0.78		0.00	33.56	17.73	4.80		78.32		
			0.15	0.20	0.46	0.02		0.00	0.55	0.50	0.05		1.93		
38	8.25	0.793	1.20	1.30	5.21	0.12	7.83	0.12	4.59	2.80	0.38	7.89	582.00	0.41	
			24.05	15.80	119.78	4.50		3.60	280.08	99.26	18.25		565.31		
			0.60	0.65	5.21	0.12		0.06	4.59	2.80	0.19		14.22		
39	8.40	1.998	0.80	1.20	17.45	0.33	19.78	0.20	6.97	10.00	2.12	19.29	1372.00	1.23	
			16.03	14.58	401.18	12.71		6.00	425.31	354.50	102.00		1332.30		
			0.40	0.60	17.45	0.33		0.10	6.97	10.00	1.06		36.91		
40	8.35	11.163	1.20	45.50	61.66	1.95	110.31	0.20	2.49	102.00	2.86	107.55	6161.00	1.27	
			24.05	552.83	1417.56	76.25		6.00	151.94	3615.90	137.37		5981.90		
			0.60	22.75	61.66	1.95		0.10	2.49	102.00	1.43		192.98		
41	7.10	1.880	8.17	8.50	1.85	0.09	18.61	0.00	8.62	3.80	5.72	18.14	1285.00	1.27	
			163.73	103.28	42.53	3.32		0.00	525.99	134.71	274.72		1248.27		
			4.09	4.25	1.85	0.09		0.00	8.62	3.80	2.86		25.55		
42	7.00	2.056	8.65	9.10	1.95	0.15	19.85	0.00	13.20	4.70	2.46	20.36	1460.00	1.26	
			173.35	110.57	44.83	5.87		0.00	805.46	166.62	117.95		1424.64		
			4.33	4.55	1.95	0.15		0.00	13.20	4.70	1.23		30.10		
43	7.50	0.317	1.10	1.00	0.74	0.21	3.05	0.00	2.27	0.70	0.16	3.13	237.00	1.41	
			22.04	12.15	17.01	8.02		0.00	138.52	24.82	7.77		230.32		
			0.55	0.50	0.74	0.21		0.00	2.27	0.70	0.08		5.05		
44	7.35	0.734	1.70	2.10	2.92	0.35	7.07	0.00	5.33	1.50	0.42	7.25	555.00	1.28	
			34.07	25.52	67.13	13.69		0.00	325.24	53.18	20.33		539.14		
			0.85	1.05	2.92	0.35		0.00	5.33	1.50	0.21		12.21		
45	7.30	0.999	2.20	1.70	5.65	0.32	9.87	0.00	4.61	3.90	1.14	9.65	701.00	1.12	
			44.09	20.66	129.89	12.51		0.00	281.30	138.26	54.83		681.54		
			1.10	0.85	5.65	0.32		0.00	4.61	3.90	0.57		17.00		
46	7.30	0.881	1.90	2.00	4.50	0.30	8.70	0.00	4.13	3.30	1.04	8.47	614.00	1.34	
			38.08	24.30	103.46	11.73		0.00	252.01	116.99	49.98		596.53		
			0.95	1.00	4.50	0.30		0.00	4.13	3.30	0.52		14.70		

Continuación... Composición iónica de las aguas residuales de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	meq L <sup>-1</sup>										RSE mg L <sup>-1</sup> ppm	% Error	$\sum$ mgL <sup>-1</sup> $\sum$ mmol
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma			
47	7.25	0.235	0.95	0.70	0.59	0.02	2.26	0.00	1.54	0.60	0.18	2.32	170.00	1.42	
			19.04	8.51	13.56	0.78		0.00	93.97	21.27	8.88				166.01
			0.48	0.35	0.59	0.02		0.00	1.54	0.60	0.09				3.67
48	7.25	0.823	1.60	2.00	4.15	0.38	8.13	0.00	5.08	1.60	1.24	7.92	610.00	1.26	
			32.06	24.30	95.41	14.66		0.00	309.98	56.72	59.69				592.82
			0.80	1.00	4.15	0.38		0.00	5.08	1.60	0.62				13.63
49	7.10	0.329	1.10	1.15	0.85	0.06	3.16	0.00	2.28	0.70	0.27	3.25	241.00	1.36	
			22.04	13.97	19.54	2.35		0.00	139.13	24.82	12.84				234.68
			0.55	0.58	0.85	0.06		0.00	2.28	0.70	0.13				5.15
50	7.55	0.999	2.60	2.10	4.85	0.32	9.87	0.00	6.66	2.10	0.87	9.63	745.00	1.25	
			52.10	25.52	111.50	12.51		0.00	406.39	74.45	41.65				724.12
			1.30	1.05	4.85	0.32		0.00	6.66	2.10	0.43				16.71
51	7.40	0.940	2.40	2.05	4.16	0.47	9.08	0.00	6.40	1.80	1.08	9.28	714.00	1.11	
			48.10	24.91	95.64	18.38		0.00	390.53	63.81	52.06				693.41
			1.20	1.03	4.16	0.47		0.00	6.40	1.80	0.54				15.60
52	7.50	0.705	1.20	1.30	4.16	0.31	6.97	0.00	4.24	1.60	0.96	6.80	524.00	1.23	
			24.05	15.80	95.64	12.12		0.00	258.72	56.72	46.11				509.16
			0.60	0.65	4.16	0.31		0.00	4.24	1.60	0.48				12.04
53	7.45	0.458	0.80	0.95	2.54	0.24	4.53	0.00	2.99	1.05	0.36	4.40	341.00	1.44	
			16.03	11.54	58.39	9.19		0.00	182.45	37.22	17.14				331.97
			0.40	0.48	2.54	0.24		0.00	2.99	1.05	0.18				7.87
54	9.25	1.116	1.10	1.40	8.02	0.51	11.03	0.20	6.39	2.12	2.25	10.96	847.00	0.30	
			22.04	17.01	184.38	19.94		6.00	389.92	75.15	108.24				822.69
			0.55	0.70	8.02	0.51		0.10	6.39	2.12	1.13				19.52
Media	7.75	1.15	2.02	3.08	5.81	0.40	11.30	0.14	4.28	5.47	1.21	11.10	999.13	0.93	
			40.48	37.42	133.55	15.46		4.11	261.04	193.95	58.15				744.17
			1.01	1.54	5.81	0.40		0.07	4.28	5.47	0.61				19.18
Mediana	7.50	0.63	1.15	1.28	1.85	0.25	6.28	0.00	3.04	1.45	0.61	6.14	486.00	1.14	
			23.05	15.49	42.42	9.58		0.00	185.50	51.40	29.34				446.11
			0.58	0.64	1.85	0.25		0.00	3.04	1.45	0.31				10.45
Moda	7.00	0.16	1.10	1.20	0.40	0.02	8.13	0.00	2.91	0.70	0.10		288.00		
			22.04	14.58	9.20	0.78		0.00	177.57	24.82	4.80				
			0.55	0.60	0.40	0.02		0.00	2.91	0.70	0.05				
$\sigma$	0.70	2.16	2.46	7.48	13.75	0.70	21.40	0.45	3.55	18.05	2.30	20.86	1373.46	0.20	
			49.28	90.86	316.17	27.47		13.56	216.63	639.95	110.66				1227.53
			1.23	3.74	13.75	0.70		0.23	3.55	18.05	1.15				37.71
CV	0.09	1.89	1.22	2.43	2.37	1.78	1.89	3.30	0.83	3.30	1.90	1.88	1.37	0.22	
			1.22	2.43	2.37	1.78		3.30	0.83	3.30	1.90				1.65
			1.22	2.43	2.37	1.78		3.30	0.83	3.30	1.90				1.97

## 5.1 Comprobación en la exactitud de los datos obtenidos

Todos los datos de cada muestreo son verificados antes de trabajar con los mismos. La primera verificación es el porcentaje de error que existe entre la suma de aniones y cationes. De acuerdo al Cuadro 33, estos deben estar en un intervalo admisible. Para el caso del primer muestreo, se tiene un valor promedio en la suma de cationes de 11.6 meq L<sup>-1</sup>, en la suma de aniones 11.86 meq L<sup>-1</sup> lo que da un error promedio de 1.11%, demostrándose así la exactitud en los valores.

En el segundo muestreo, se tiene un valor promedio en la suma de cationes de 11.3 meq L<sup>-1</sup>, en la suma de aniones 11.1 meq L<sup>-1</sup> en donde se tiene un error promedio de 0.93%. Así se comprueba la veracidad de los valores del segundo muestreo. El porcentaje de error en las determinaciones analíticas se calculó de acuerdo con lo siguiente:

$$\% Error = \left[ \frac{\left| \sum meqL^{-1} \text{ cationes} - \sum meqL^{-1} \text{ aniones} \right|}{\sum meqL^{-1} \text{ cationes} + \sum meqL^{-1} \text{ aniones}} \right] \times 100$$

Las soluciones salinas son electro-neutrales, los aniones y cationes son muy solubles y estos cambian muy poco en comparación a los nitratos y los fosfatos. Los fosfatos y nitratos se afectan mucho por procesos biológicos. Al ser neutrales las sales, la suma de cationes y aniones deben ser aproximadamente iguales. En el siguiente cuadro se presentan los valores permisibles para las determinaciones analíticas.

Cuadro 33. Porcentajes permisibles de diferencia en los resultados analíticos (APHA, 1995).

Suma de cationes meq L <sup>-1</sup>	% de diferencia aceptable
0.0-3.0	± 0.2
3.0-10.0	± 2.0
20-800	± 2.5

De acuerdo a (Richards *et al.*, 1959), la regresión lineal de la función que se obtiene de graficar la conductividad eléctrica con respecto a la concentración en meq L<sup>-1</sup> debe dar una pendiente alrededor de 9 a 12 dependiendo del tipo de sal, esto se expresa en la Figura 16. En los datos obtenidos del laboratorio en el primer muestreo, se tiene una pendiente promedio en las gráficas de conductividad eléctrica en función de los suma de aniones y cationes un valor

de 10.4695 (Figuras 17 y 18). De acuerdo a la Figura 16 el primer muestreo se encuentra entre las rectas de  $\text{CaSO}_4$  y  $\text{NaHCO}_3$ .

En los datos obtenidos en laboratorio del segundo muestreo, se tiene una pendiente promedio de las gráficas de la conductividad eléctrica, en función de la suma de aniones y cationes un valor de 9.7684 (Figuras 19 y 20).

De acuerdo a la Figura 16, el segundo muestreo se encuentra entre las rectas de  $\text{NaCl}$  y  $\text{NaHCO}_3$ .

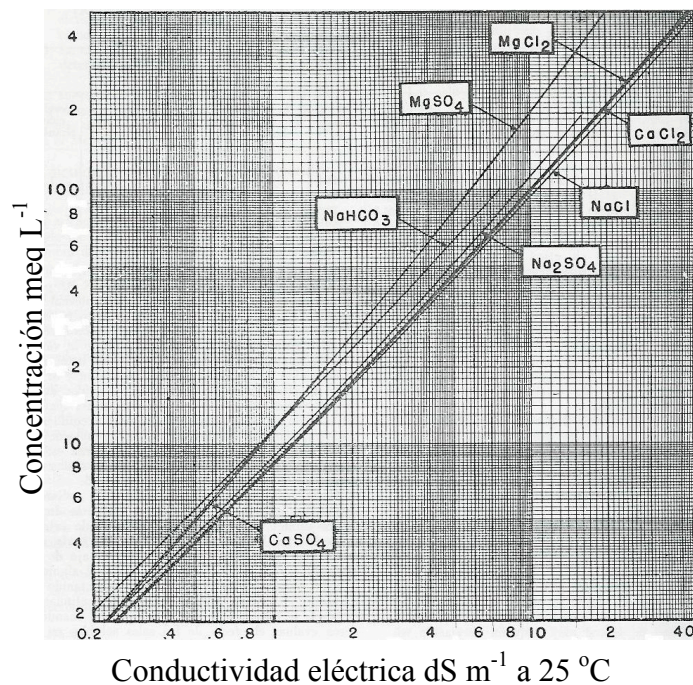


Figura 16. Concentración de soluciones con una sola sal con relación a su conductividad eléctrica (Richards *et al.*, 1959).

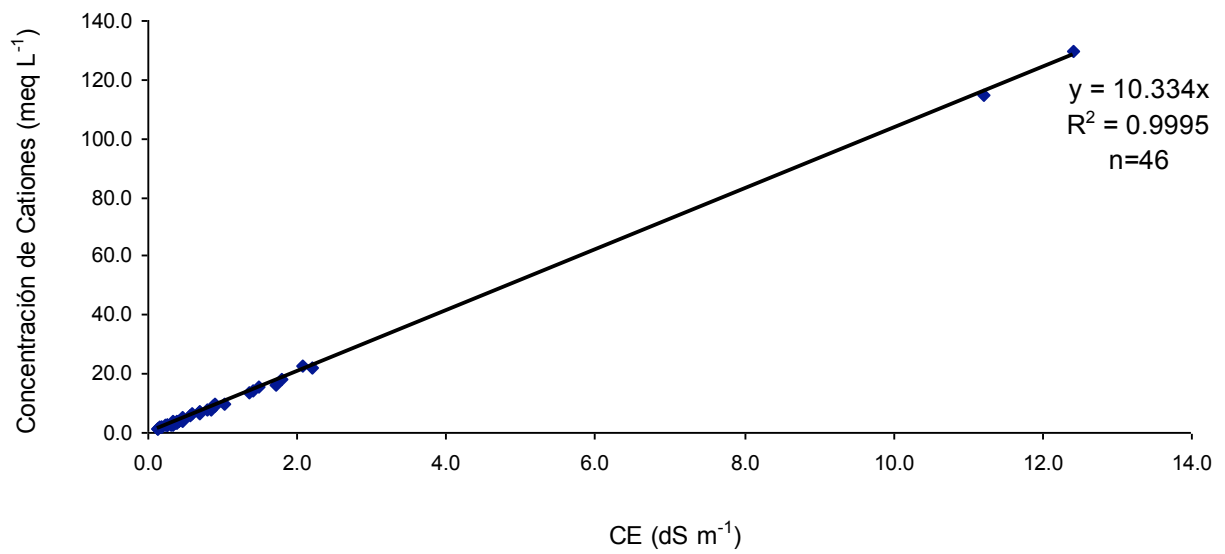


Figura 17. Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (primer muestreo).

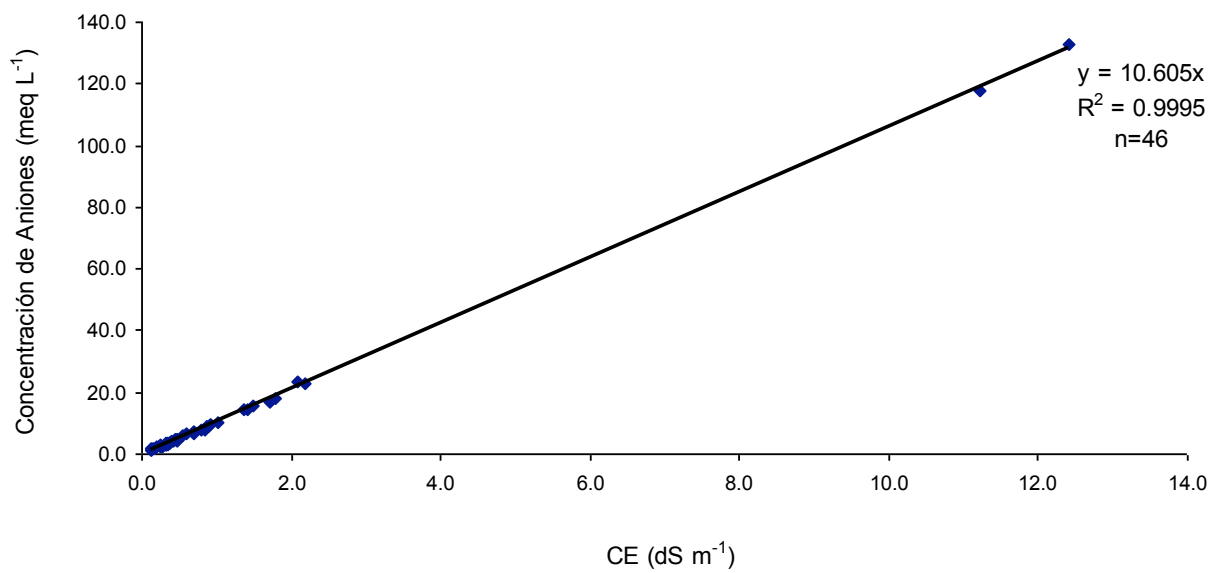


Figura 18. Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (primer muestreo).

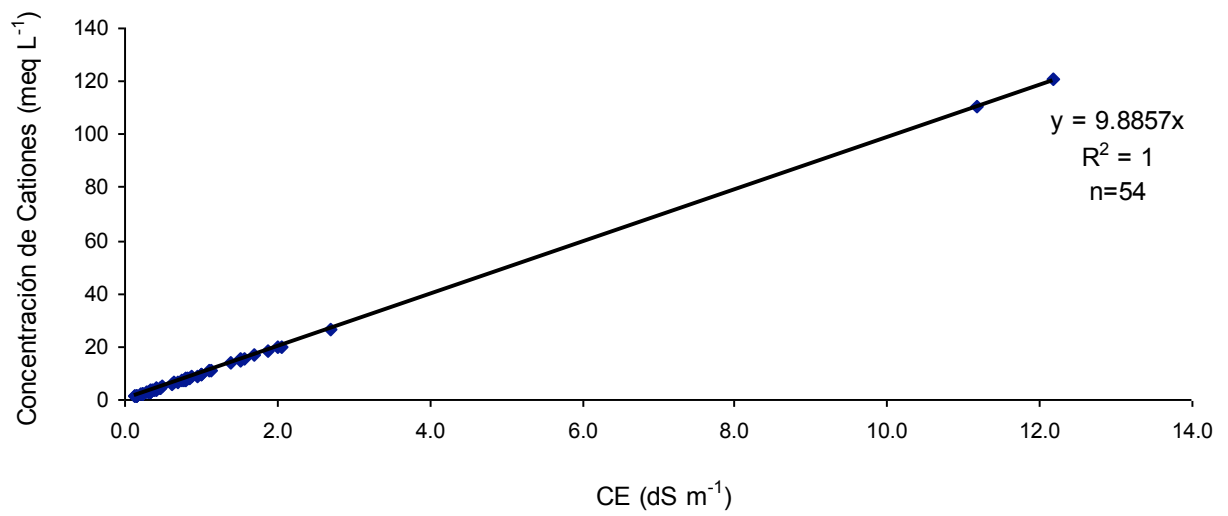


Figura 19. Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (segundo muestreo).

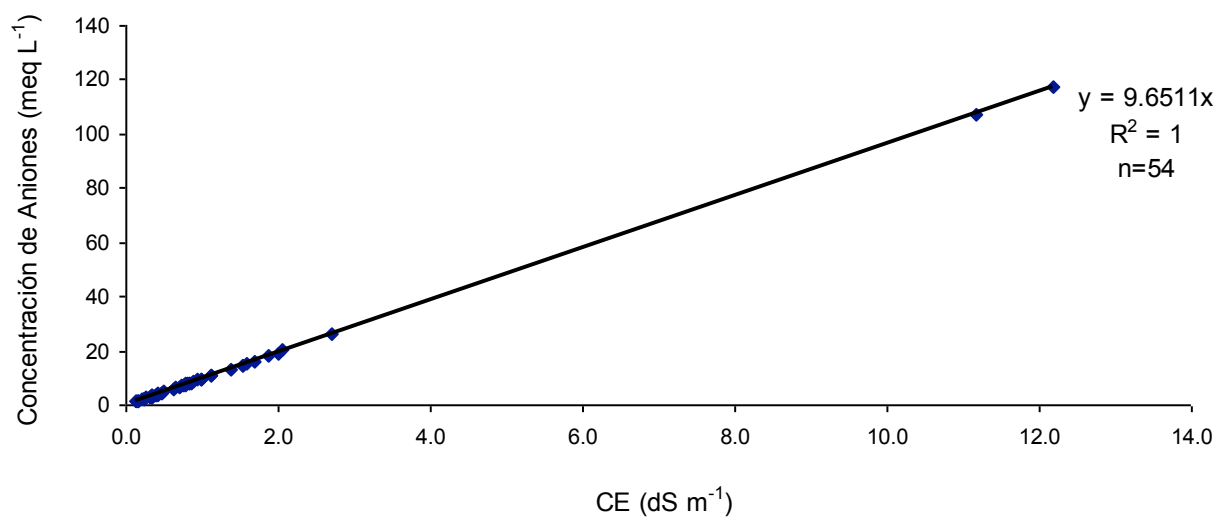


Figura 20. Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (segundo muestreo).



Para comprobar si los dos muestreos se encuentran dentro del intervalo, en lo que respecta a la gráfica de la conductividad eléctrica en función de la suma de cationes y aniones, se procedieron a graficar los 100 puntos de ambos estudios.

En la Figura 21, que es la gráfica de la suma de cationes en función de la conductividad eléctrica, se obtiene una pendiente en la regresión lineal de 10.107. Está en el intervalo recomendado, por lo que se concluye que los datos analíticos son correctos.

En la Figura 22, que es la gráfica de la suma de aniones en función de la conductividad eléctrica, se obtiene una pendiente en la regresión lineal de 10.122. También se encuentra dentro del intervalo recomendado.

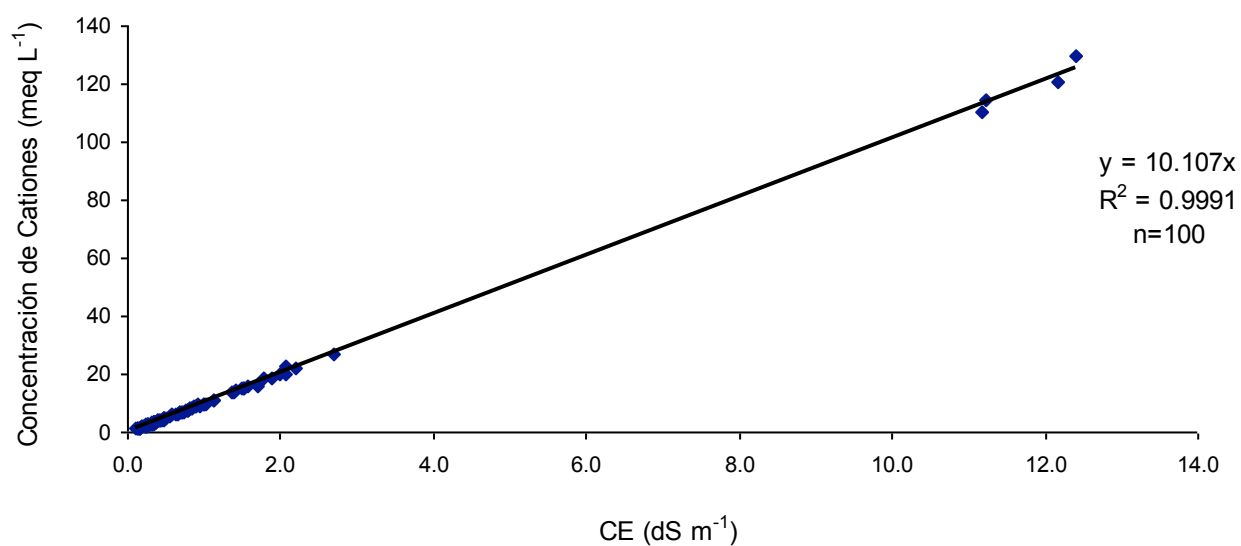


Figura 21. Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica de todos los puntos de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

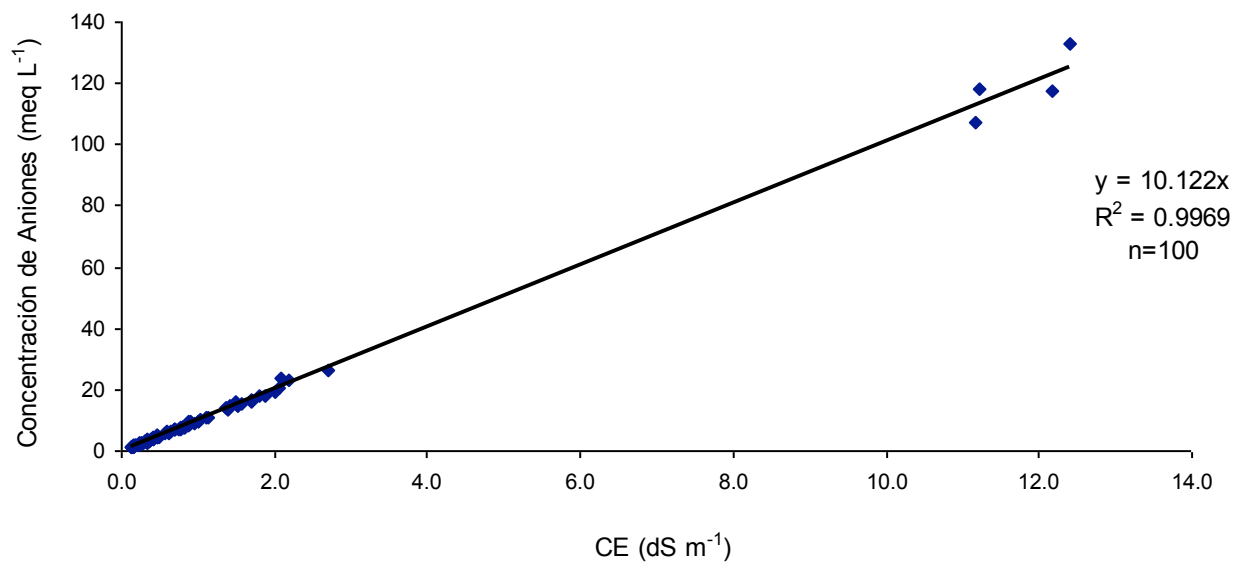


Figura 22. Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica de todos los puntos de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

Otra forma de comprobar es la relación que existe entre los sólidos totales disueltos (ppm), dividido entre la conductividad eléctrica en  $\text{dS m}^{-1}$ , este valor debe estar entre el intervalo 550 y 750 dependiendo del tipo de sal (Richards *et al.*, 1959).

El contenido total de sólidos disueltos en las soluciones está directamente relacionado con la conductividad eléctrica. Como se explicó en el capítulo 4, la conductividad eléctrica mide la concentración de electrolitos, con esta definición se puede tener una aproximación en el contenido de los sólidos disueltos.

La ecuación que expresa lo anterior es:

$$\text{STD}=640 \times \text{CE}$$

STD=Sólidos totales disueltos en  $\text{mg L}^{-1}$

CE=Conductividad eléctrica en  $\text{dS m}^{-1}$

El valor de 640, es la pendiente que se obtiene de la regresión lineal de los datos experimentales. En el primer muestreo los datos tienen una pendiente de 608.69, tal como se tiene en la Figura 23. Los datos analíticos del primer muestreo se encuentran dentro del intervalo admisible.

En el segundo muestreo, los datos analíticos tienen una pendiente de 583.93, como se aprecia en la Figura 24. Al igual que el primer muestreo, estas se encuentran dentro del intervalo.

En la Figura 25 se presenta la gráfica de la conductividad eléctrica en función de la concentración de sólidos totales de los 100 puntos de los dos muestreos, esta es otra manera de comprobar que todos los datos se encuentren dentro del intervalo correcto.

La pendiente de la regresión lineal de los 100 puntos es de 596.14.

Los datos están dentro del intervalo correcto, lo que se concluye que las determinaciones realizadas en los laboratorios están correctas.

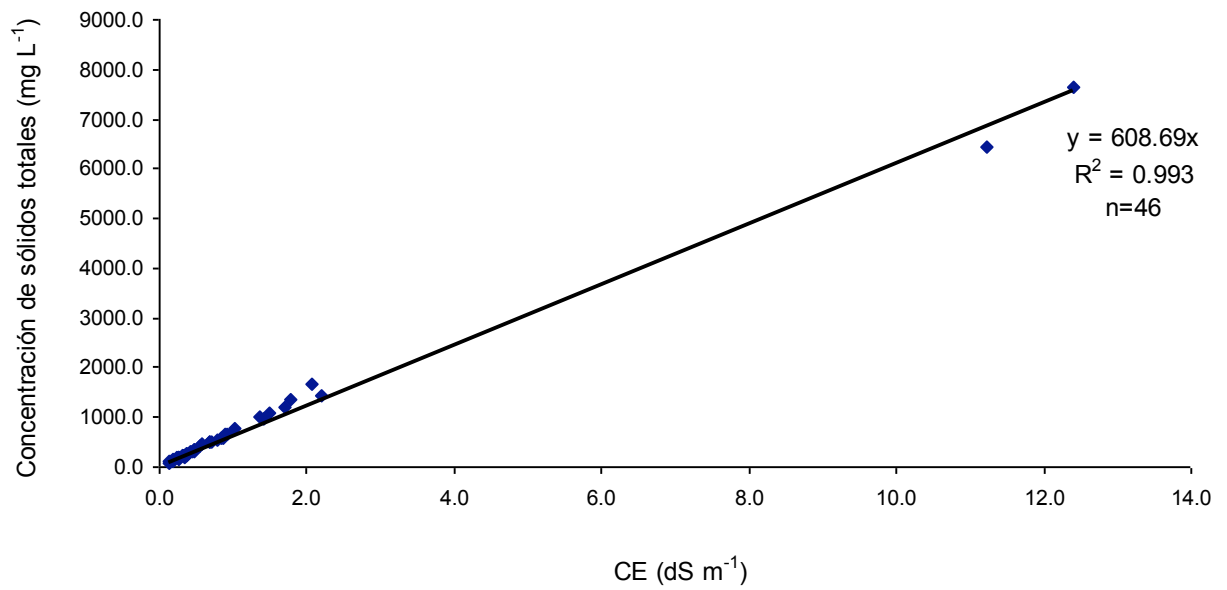


Figura 23. Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (primer muestreo).

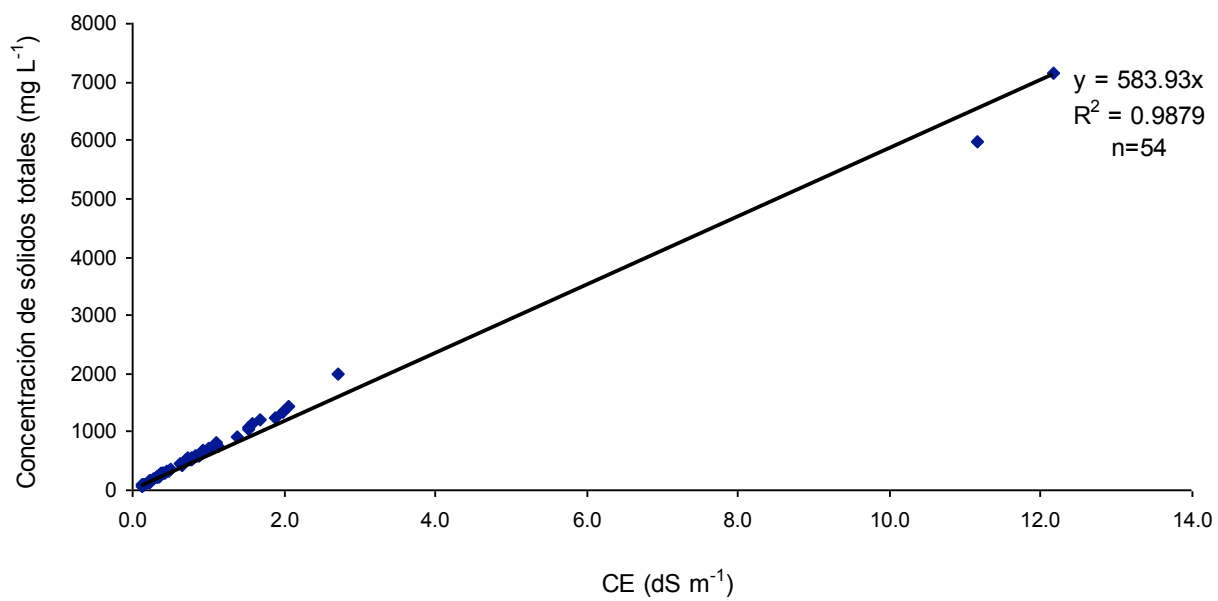


Figura 24. Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (segundo muestreo).

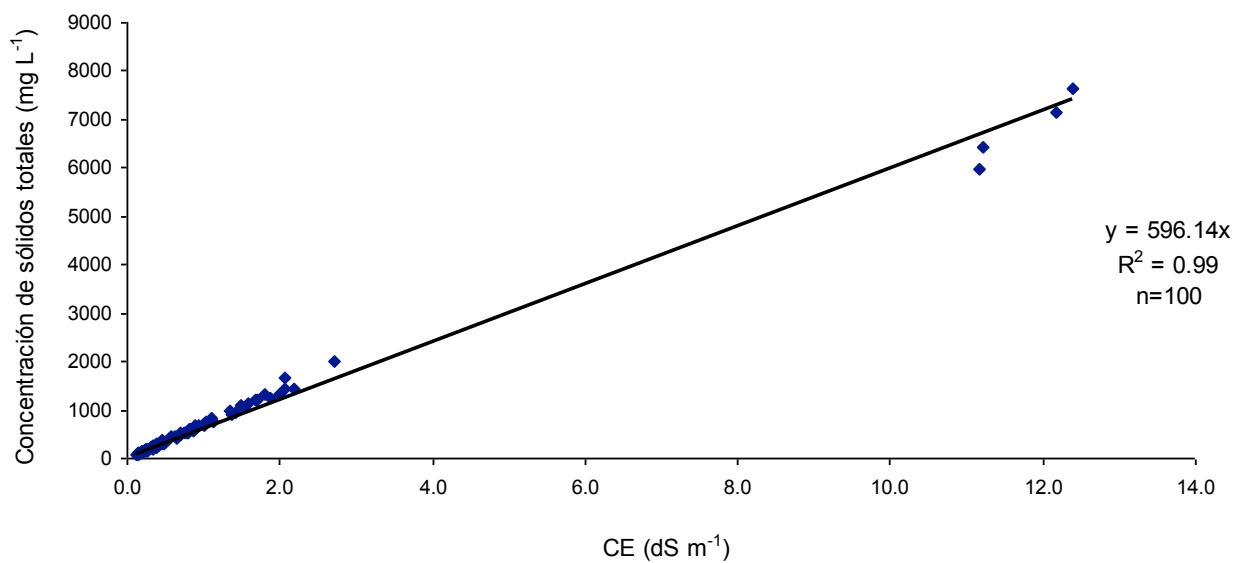


Figura 25. Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica de todos los puntos de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

La segunda manera de comprobar es la comparación entre la concentración total de sólidos disueltos medidos, con la concentración de sólidos disueltos calculado (APHA, 1995).

$$1.0 < \frac{STD_{medido}}{STD_{calculado}} < 1.2$$

Para el primer muestreo utilizando los valores promedio se tiene:

$$1.0 < \frac{753.22}{608.69 \times 1.14} < 1.2$$

$$1.0 < 1.09 < 1.2$$

El  $STD_{medido}$  se obtiene al sumar los iones en  $mg L^{-1}$  de cada estación del primer muestreo y luego se saca el promedio de todos los puntos. El  $STD_{calculado}$  es el promedio de la pendiente de las gráficas de baja y alta concentración, de la conductividad eléctrica en función de la concentración de sólidos totales en  $mg L^{-1}$ . Esta pendiente se multiplica por la conductividad eléctrica promedio en  $dS m^{-1}$ .

Para el segundo muestreo se tiene:

$$1.0 < \frac{744.17}{583.93 \times 1.15} < 1.2$$

$$1.0 < 1.108 < 1.2$$

Lo que se demuestra que los valores están correctos.

La tercera verificación, es la comparación entre la conductividad eléctrica medida y la conductividad eléctrica calculada, recomendada por (APHA, 1995).

$$0.9 < \frac{CE_{calculada}}{CE_{medida}} < 1.1$$

Cuadro 34. Factores de conductividad para iones más comunes encontrados en el agua (APHA, 1995).

Ion	Conductividad 25°C $\mu S cm^{-1}$	
	Para $meq L^{-1}$	Para $mg L^{-1}$
Bicarbonato	43.6	0.715
Calcio	52.0	2.6
Carbonato	84.6	2.82
Cloro	75.9	2.14
Magnesio	46.6	3.82
Nitrato	71.0	1.15
Potasio	72.0	1.84
Sodio	48.9	2.13
Sulfato	73.9	1.54



La  $CE_{calculada}$  sale de las gráficas de la conductividad eléctrica en función de la suma de aniones y cationes en meq L<sup>-1</sup> de baja y alta concentración. La  $CE_{medida}$  es el promedio entre cada punto de las mediciones de las estaciones de muestreo.

La pendiente promedio de las gráficas del primer muestreo es de 10.4695, entonces se tiene:

$$CE_{calculada} = \frac{\left( \sum cationes + \sum aniones \right)}{2} \cdot \frac{1}{10.4695}$$

Para el primer muestreo utilizando los valores promedio se obtiene:

$$0.9 < \frac{1.12}{1.14} < 1.1$$

$$0.9 < 0.98 < 1.1$$

La pendiente promedio de las gráficas del segundo muestreo es de 9.768 entonces se tiene:

$$CE_{calculada} = \frac{\left( \sum cationes + \sum aniones \right)}{2} \cdot \frac{1}{9.768}$$

Para el segundo muestreo utilizando los valores promedio se obtiene:

$$0.9 < \frac{1.146}{1.15} < 1.1$$

$$0.9 < 0.99 < 1.1$$

Lo que se demuestra que los valores de ambos muestreos, están correctos.

La cuarta forma de comprobar, es la comparación entre la conductividad eléctrica y la suma de cationes y aniones. Para el primer muestreo se puede ver en las Figuras 17 y 18 dando un promedio en su pendiente de 10.4695. El intervalo admisible es de 9 a 11, por lo que se concluye que los datos son correctos.

Utilizando el mismo criterio para el segundo muestreo, al observar las Figuras 19 y 20 da un promedio de la pendiente de 9.768, lo cual es aceptable.

La quinta forma, es la comparación entre los sólidos totales disueltos medidos con la conductividad eléctrica. Estos deben estar en un intervalo de 550 a 750.

Para el primer muestreo se tiene el valor de 608.69 tal como se tiene en la Figuras 23. Lo que demuestra que esta dentro del intervalo.

Para el segundo muestreo, el valor de las pendientes de la gráfica de la conductividad eléctrica en función de la concentración de sólidos totales es de 583.93, como se observan en la Figura 24, con lo que queda demostrado que es correcto.

La sexta forma de comprobar la veracidad de los datos, es la comparación entre los sólidos totales disueltos calculados, con la conductividad eléctrica. Estos deben estar en el mismo intervalo anterior.

Para el primer muestreo, se tiene el valor de 693.9066, lo que se demuestra que esta en el intervalo correcto. Para el segundo muestreo, se tiene el valor de 671.5195, e igualmente que el primer muestreo es perfecto.

## **5.2 Distribución de frecuencias de los datos analíticos**

La frecuencia con que se repiten la conductividad eléctrica y el residuo seco evaporado, ayudan a conocer en que intervalo se encuentran las más concentradas.

En el primer muestreo, tal como se aprecia en la Figura 26, se tiene que el 10.87% de los puntos están en el intervalo de la conductividad eléctrica de 0.1-0.2 y 0.2-0.3 dS m<sup>-1</sup>, cada uno de estos representa 5 sitios, la mayor cantidad de puntos con un total de 10, están en el intervalo de 0.3-0.4 dS m<sup>-1</sup> que representa el 21.74%, 6 sitios entre 0.4-0.5 dS m<sup>-1</sup> que representa el 13.04%, 2 sitios entre 0.5-0.6 dS m<sup>-1</sup> que significan el 4.35% de las muestras, 3 sitios entre 0.6-0.7 dS m<sup>-1</sup> que representa el 6.52%, 1 sitio entre 0.7-0.8 dS m<sup>-1</sup> que representa el 2.17%, 3 entre 0.8-0.9 dS m<sup>-1</sup> que representa el 6.52%, 1 sitio para los intervalos siguientes que representa el 2.17% de los puntos, estos son: 0.9-1.0, 1.0-1.1 y 1.3-1.4 dS m<sup>-1</sup>, 2 sitios para cada intervalo que representa el 4.35% de la muestras, estos son: 1.4-1.5 y 1.7-1.8 dS m<sup>-1</sup>, 1 sitio para los intervalos siguientes que representa el 2.17% de los puntos, estos son: 2.0-2.1, 2.1-2.2 dS m<sup>-1</sup> y por último se encuentra los datos de las lagunas cráter de Atexcac y

Alchichica, cuyas conductividades eléctricas están en el intervalo 11.4-11.5 y 12.4-12.5 respectivamente, estas representan el 2.17% del total.

En la Figura 27 se tiene el gráfico de frecuencias de los sólidos totales disueltos del primer muestreo (RSE), en el cual 1 sitio que representa el 2.17% está en el intervalo de 0-100 ppm, 9 sitios con el 19.6% representan a puntos que están en el intervalo de 100-200 ppm, la mayor cantidad de puntos con 11, están en el intervalo de 200-300 ppm que significan el 23.9%, 5 sitios entre 300-400 ppm que representan el 10.9%, 2 sitios entre 400-500 ppm que representan el 4.3%, 5 sitios entre 500-600 ppm que representan el 10.9%, 3 sitios entre 600-700 ppm que representan el 6.5%, 1 sitio entre 700-800 ppm que representa el 2.2%, 1 sitio para los intervalos siguientes: 900-1000, 1000-1100, 1100-1200, 1200-1300, 1300-1400, 1400-1500, 1600-1700 ppm, cada uno representa el 2.2% y, nuevamente, los datos de las lagunas cráter son los más altos, estos se encuentran entre 6600-6700 y 7800-7900 ppm que representan el 2.2% del total respectivamente.

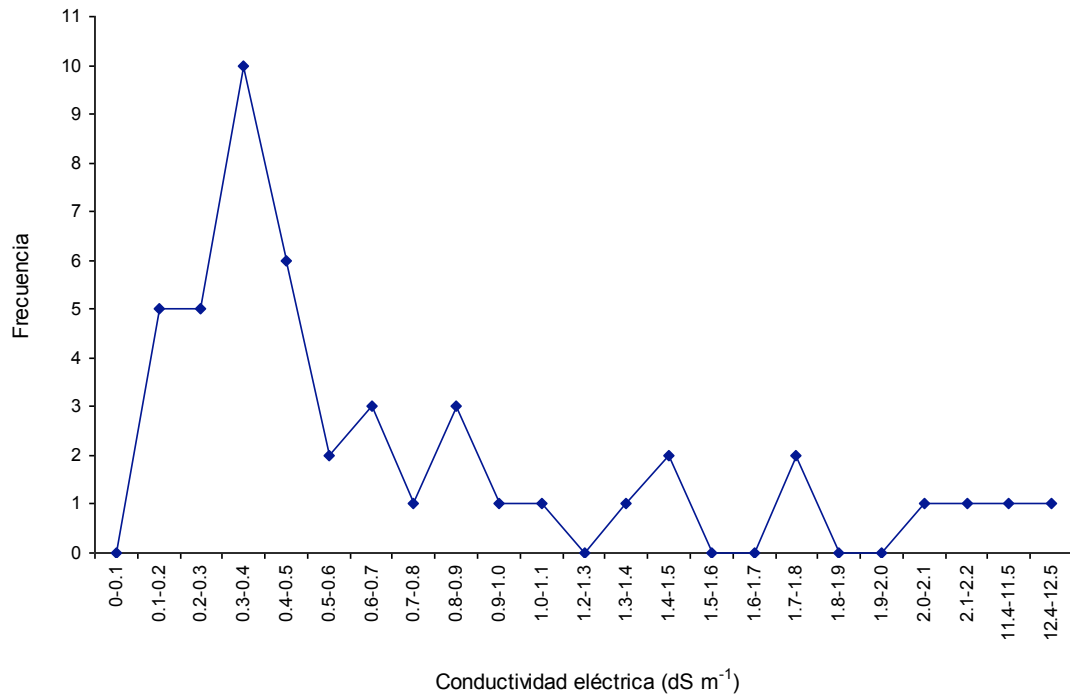


Figura 26. Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica (primer muestreo).

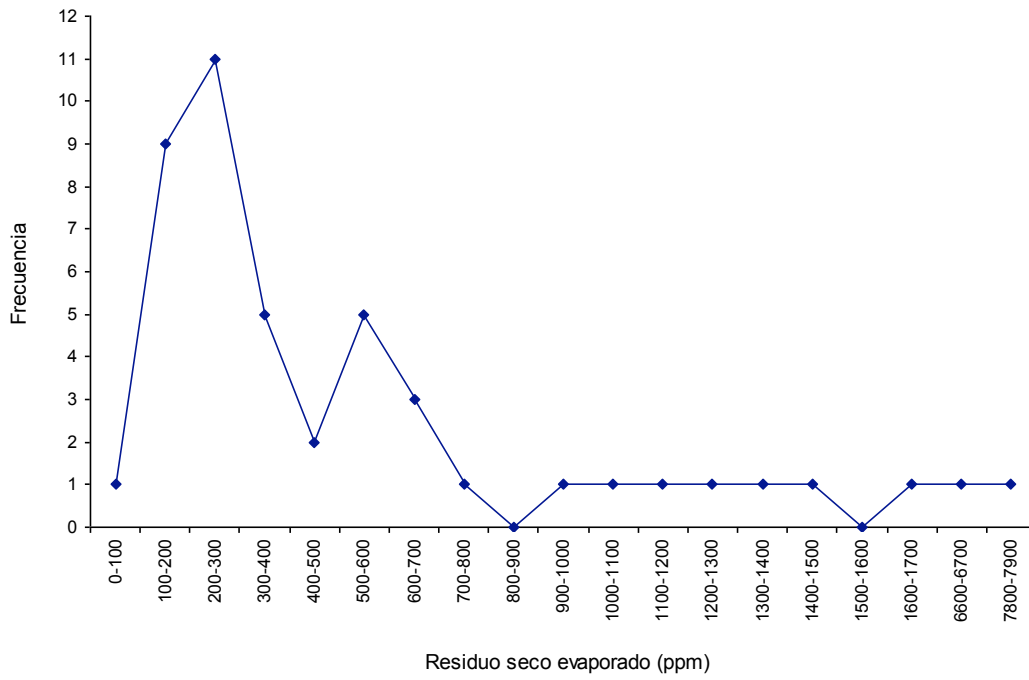


Figura 27. Distribución de frecuencias de la concentración total de sólidos disueltos (primer muestreo).

En el segundo muestreo, tal como se aprecia en la Figura 28, se tiene que el 9.26% de los puntos, están en un intervalo de la conductividad eléctrica de 0.1-0.2 y 0.4-0.5  $\text{dS m}^{-1}$ , cada uno de estos representa 5 sitios, la mayor cantidad de puntos están en el intervalo de 0.3-0.4  $\text{dS m}^{-1}$  que son 10 sitios representando el 18.52%, 6 sitios entre 0.2-0.3 y 0.7-0.8  $\text{dS m}^{-1}$  cada uno representando el 11.11%, 2 sitios entre 0.6-0.7 y 1.1-1.2,  $\text{dS m}^{-1}$  cada uno representando el 3.704% de las muestras, 4 sitios entre 0.8-0.9  $\text{dS m}^{-1}$  que representa el 7.41%, 3 sitios entre 0.9-1.0 y 1.5-1.6  $\text{dS m}^{-1}$  cada uno representando el 5.56%, 1 sitio para cada intervalo entre 1.3-1.4, 1.6-1.7, 1.8-1.9, 1.9-2.0, 2.0-2.1 y 2.7-2.8  $\text{dS m}^{-1}$  que representa el 1.85%. Por último se encuentra los datos de las lagunas cráter de Atexcac y Alchichica, cuyas conductividades eléctricas están en el intervalo 11.1-11.2 y 12.1-12.2 respectivamente, estas representan el 1.85% cada una del total.

En la Figura 29 se tiene el gráfico de frecuencias de los sólidos totales disueltos del segundo muestreo (RSE), en el cual 2 sitios se encuentran entre 0-100 ppm representando el 3.7%, 9 sitios que representa el 16.7% están en el intervalo de 100-200 ppm, la mayor cantidad de puntos están en el intervalo de 200-300 ppm con 10 sitios con una representatividad del 18.5%, 5 sitios entre 300-400 ppm que representa el 9.2%, 1 sitio entre 400-500 ppm que representa el 1.9%, 6 sitios entre 500-600 ppm que representa el 11.11%, 3 sitios entre 600-700 ppm que representa el 5.6%, 4 sitios entre 700-800 ppm que representa el 7.4%, 1 sitio para los intervalos siguientes: 800-900, 900-1000, 1000-1100, 1300-1400, 1400-1500 y 2000-2100 ppm que representa cada uno el 1.9%, entre 9000-1000 y 100-1100 ppm el 1.85%, 2 sitios para los intervalos siguientes: 1100-1200 y 1200 1300 ppm cada uno representa el 3.7%. Las estaciones localizadas en los Humeros tiene un alto valor de residuo seco evaporado, esto se debe a su origen volcánico. El silicio no transmite electricidad, es por este motivo que no se refleja en la conductividad eléctrica, pero en el residuo seco evaporado si. Estos puntos se encuentran en el intervalo de 3300-3400 y 3800-3900 ppm que representa el 1.85% cada uno. Los datos de las lagunas cráter son los más altos, estos se encuentran entre 6100-6200 y 7300-7400 ppm, que representa el 1.85% cada una del total.

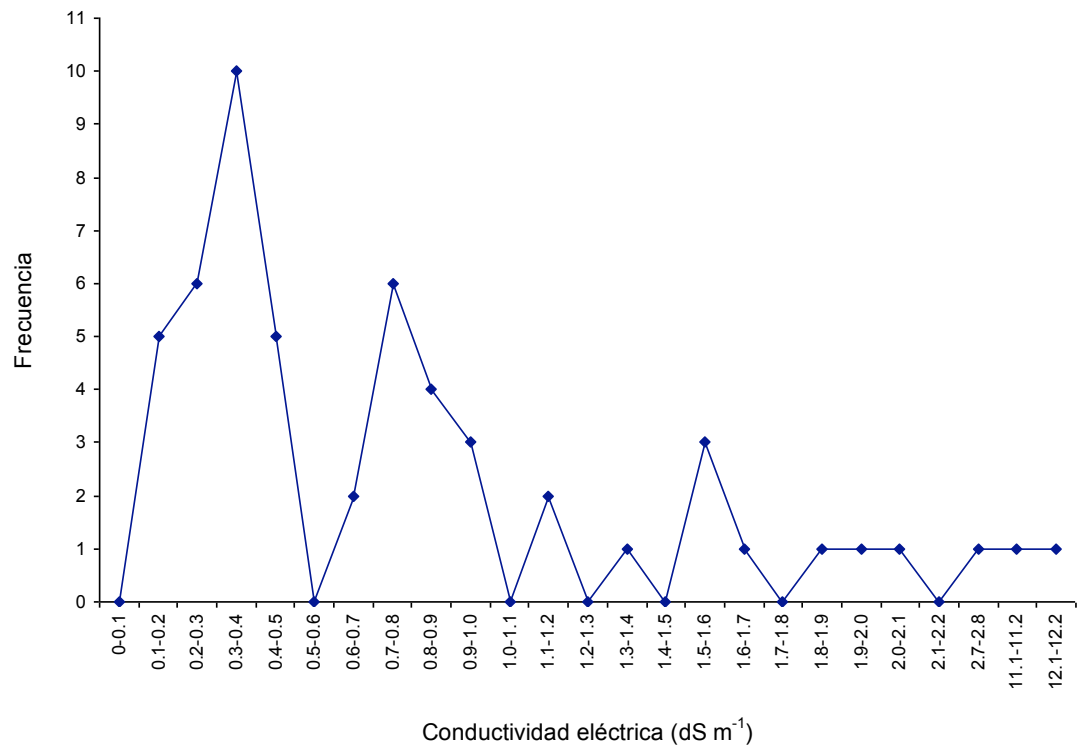


Figura 28. Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica (segundo muestreo).

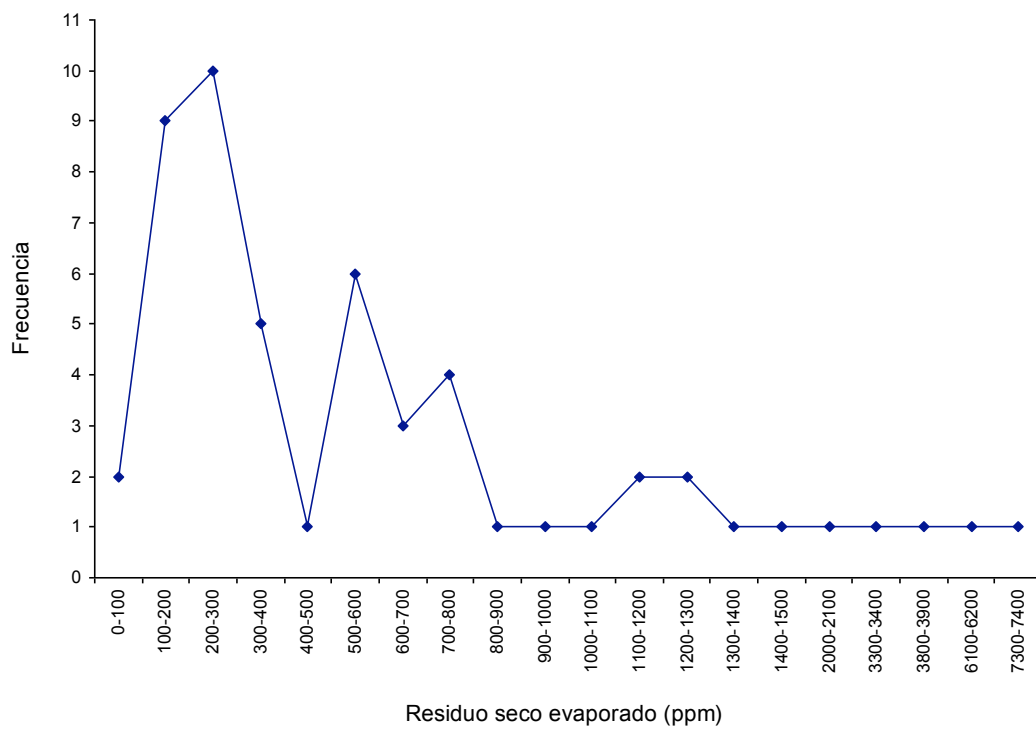


Figura 29. Distribución de frecuencias de la concentración total de sólidos disueltos (segundo muestreo).



Los gráficos de frecuencia son muy útiles, puesto que indican en intervalos específicos, la cantidad de muestras que se encuentran en los mismos. De tal manera que se los puede agrupar en datos que están sobre el límite de calidad establecidos para el riego o para cualquier otro requerimiento.

La conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos tienen un comportamiento similar, esto es correcto, puesto que ambos están relacionados directamente, exceptuando los puntos de los Humeros.

### **5.3 Distribución de aniones y cationes**

El área bajo las curvas de las Figuras 30 y 31 indican la cantidad de concentración con respecto a los otros iones del primer muestreo. En los cationes se aprecia que la concentración de sodio ( $\text{Na}^+$ ) es mayor que los otros. En los aniones son los bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) los que prevalecen. En tal virtud, la sal más común que se va a encontrar en este sistema hidrográfico es el bicarbonato de sodio que, es altamente soluble.

Se puede observar que en los primeros puntos no existen altas concentraciones, puesto que la gran mayoría son manantiales y nacimientos de agua, esto se puede apreciar en la Figura 32, en la cual todos estos puntos son los que tienen una altitud superior con respecto a los otros. En los lugares en donde se encuentran los picos de las concentraciones de iones, son los que presentan mayor cantidad de contaminación, estos se encuentran, de acuerdo con la Figura 30, en menores altitudes y corresponden en su gran mayoría al paso de centros densamente poblados.

En la Figura 31, se encuentran las concentraciones de las lagunas cráter de Atexcac y Alchichica, las cuales están altamente concentradas.

En la Figura 33 se tiene los valores de pH del primer muestreo en todo el sistema hidrográfico. El mayor valor es de 8.65 de la Laguna Alchichica, esto se debe a sus altas concentraciones de sales. Siempre que se tenga valores de pH sobre 8.2, se encuentran carbonatos que se forman por la actividad biológica y la presencia del  $\text{CO}_2$ . En la Figura 34 están los valores de la

temperatura del primer muestreo, el mayor valor se tiene en el rancho Ceron Pozitos con 33 °C, es muy probable que sus aguas estén pasando por un foco magmático.

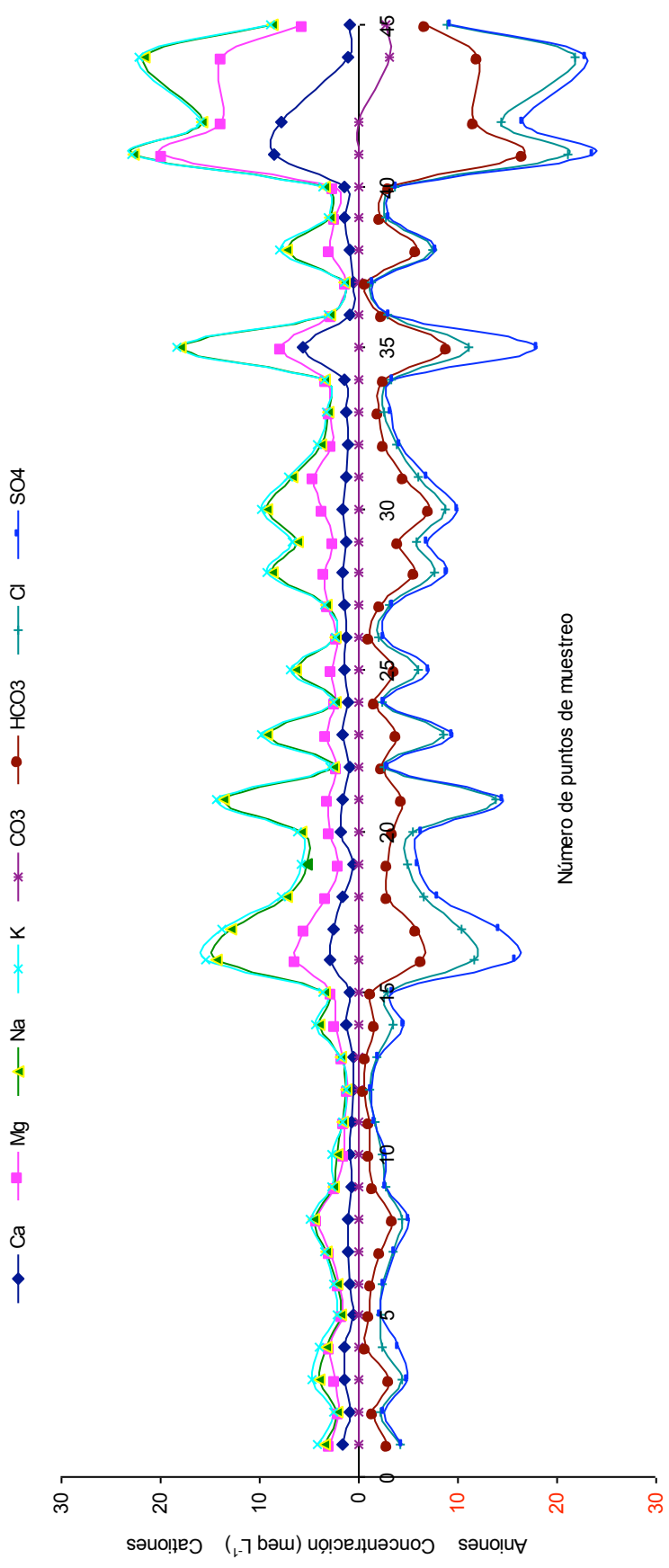


Figura 30. Composición iónica de las aguas de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo, baja concentración).

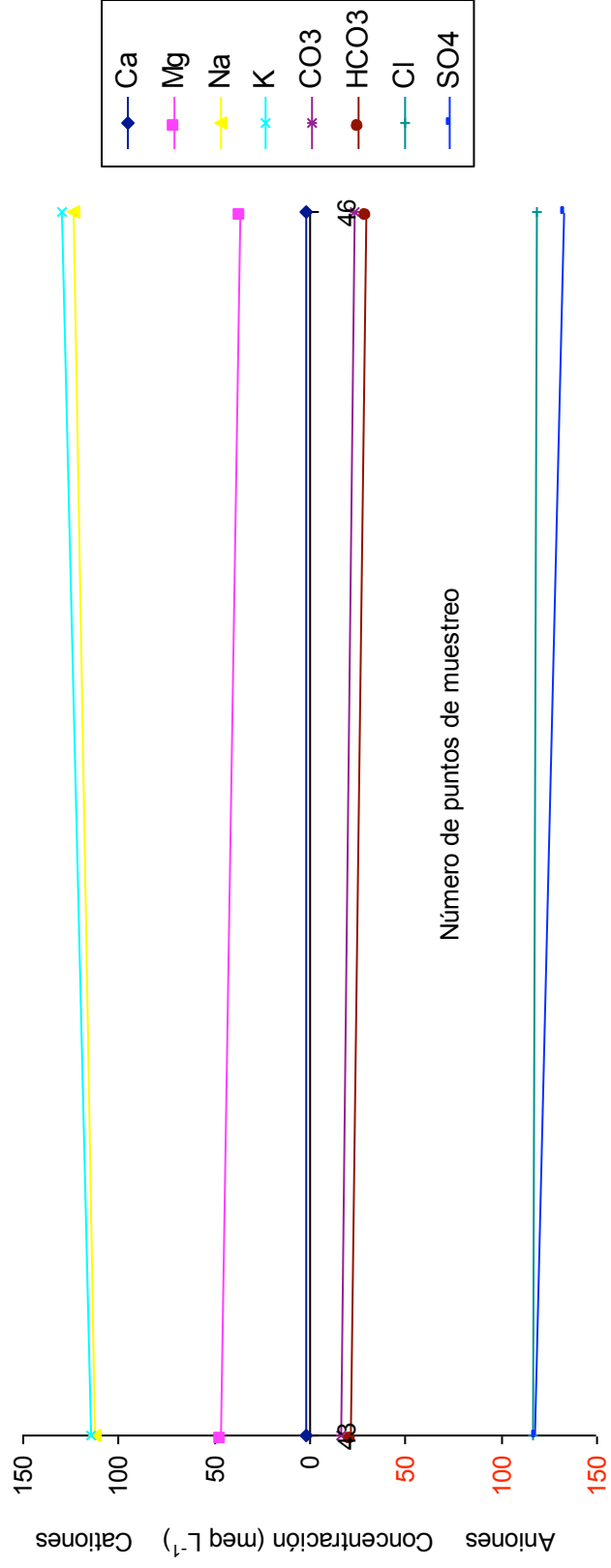


Figura 31. Composición iónica de las aguas de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo, alta concentración).

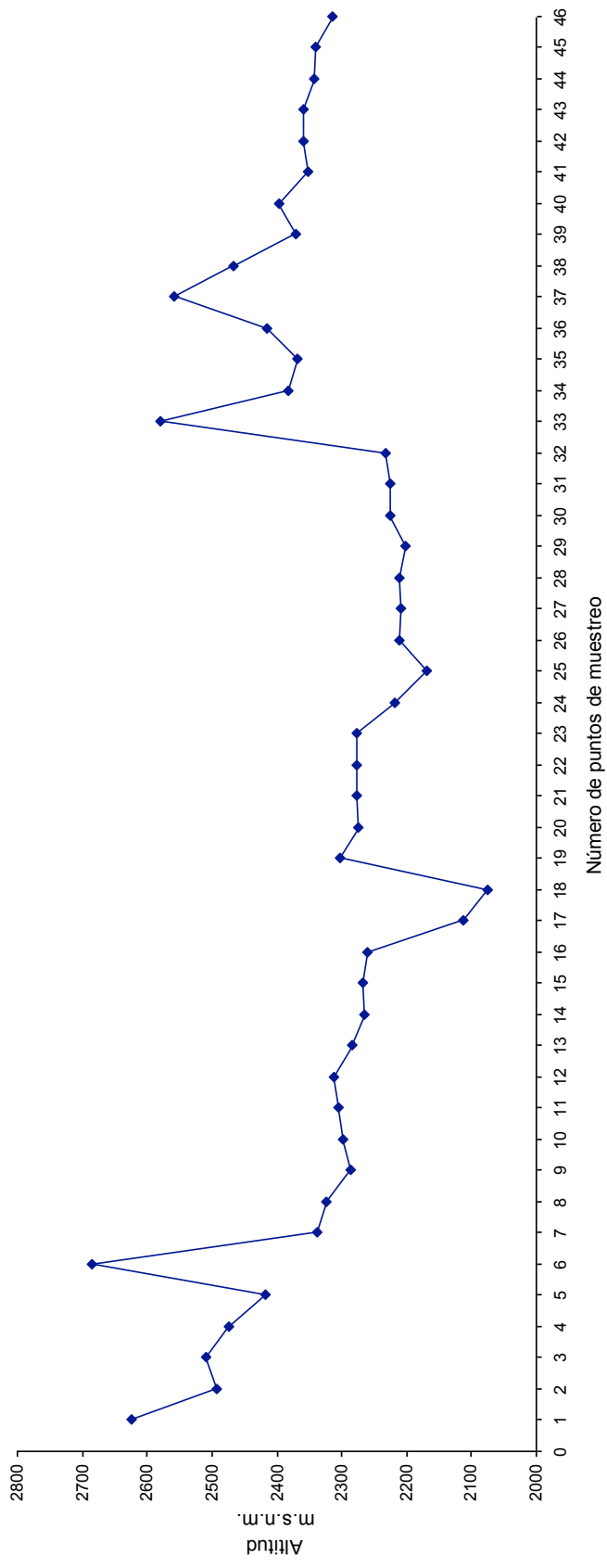


Figura 32. Perfil longitudinal de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

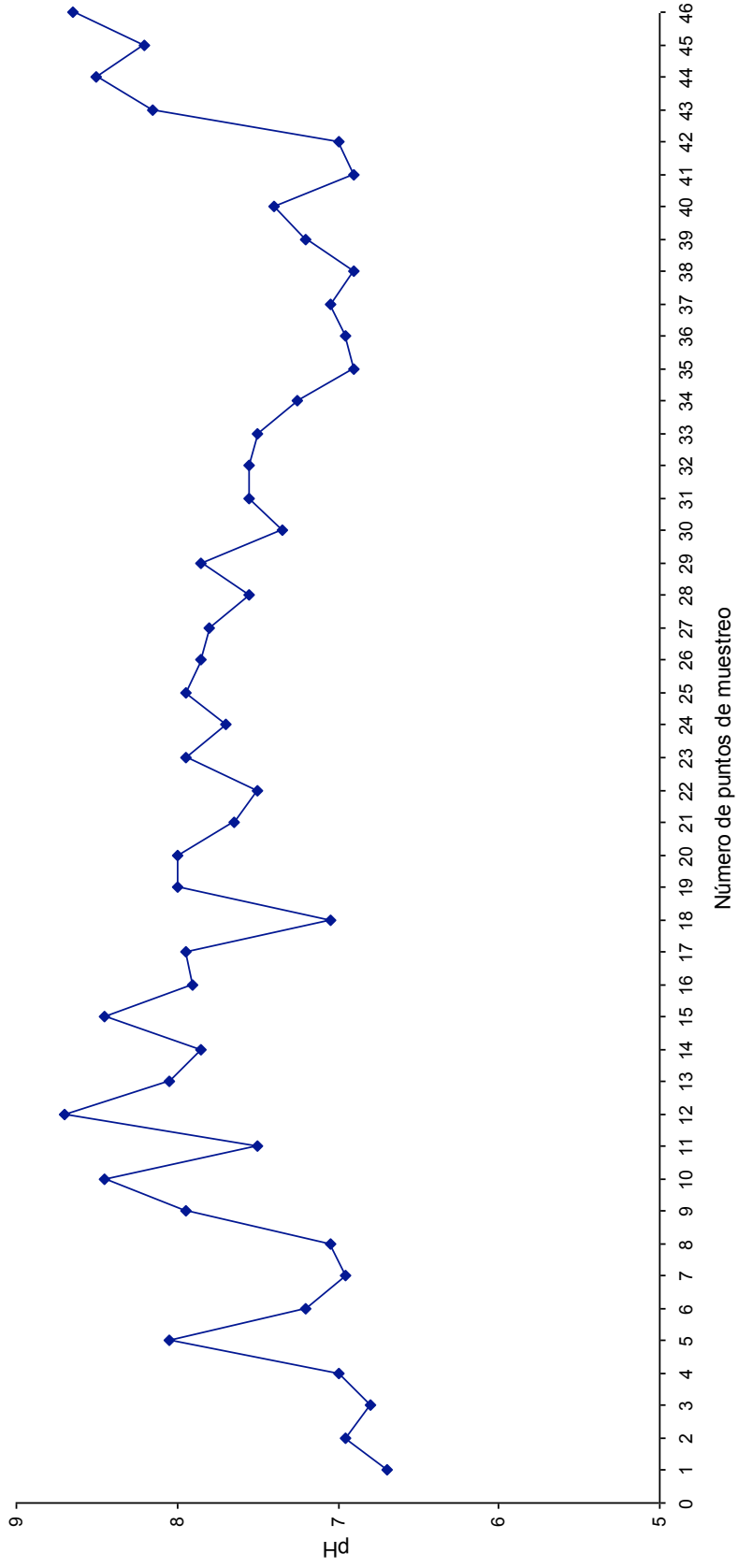


Figura 33. Perfil del pH de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

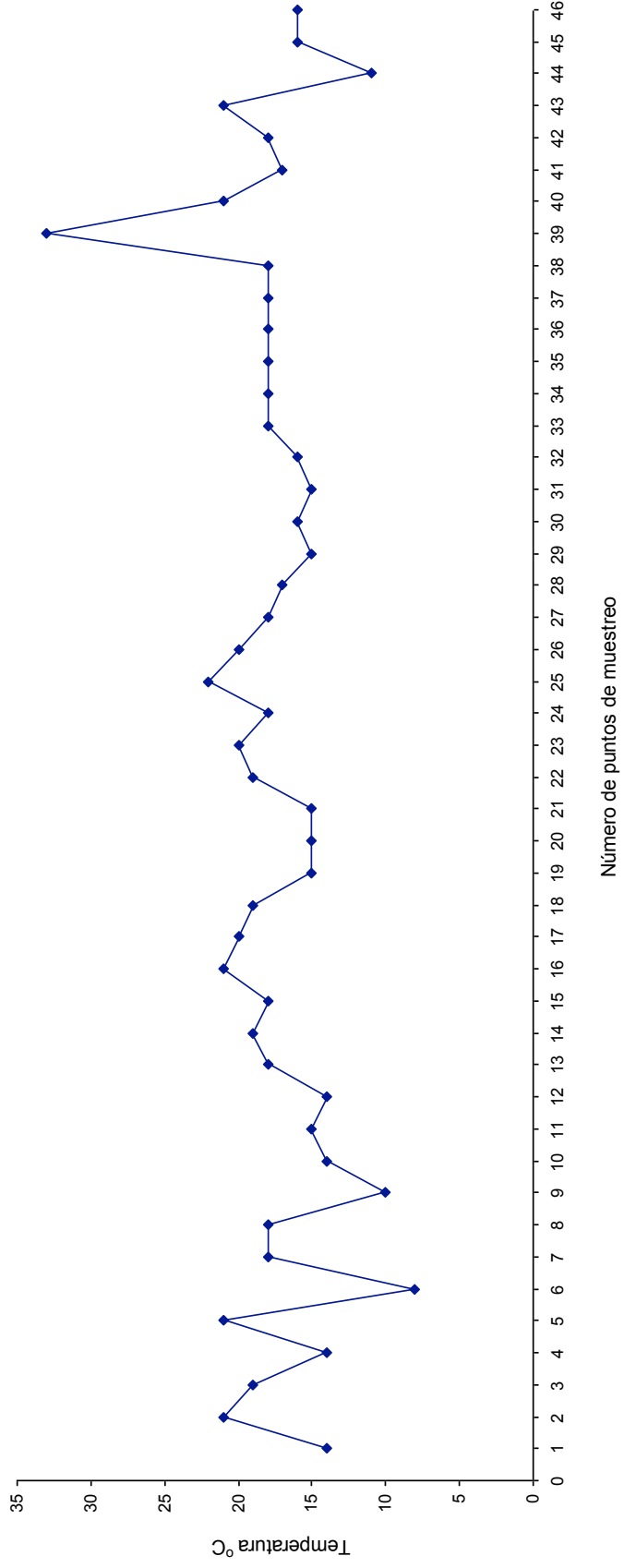


Figura 34. Perfil de la temperatura del agua de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (1er muestreo)

En las Figuras 35 y 36, se encuentran la distribución de aniones y cationes del segundo muestreo. En forma similar al primer muestreo, es innegable observar que en los primeros puntos no existen altas concentraciones, puesto que la gran mayoría son nacimientos del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, esto es evidente en la Figura 37, en la cual, todos esos puntos son los que tienen una altitud superior con respecto a los otros. En los lugares en donde se encuentran los picos de las concentraciones de iones, son los que presentan mayor cantidad de contaminación, estos se encuentran de acuerdo con la Figura 37, en menores altitudes y corresponden en su gran mayoría al paso de centros densamente poblados.

Al igual que en el primer muestreo, al calcular las área bajo las curvas de las Figuras 35 y 36 en los cationes se tiene mayor concentración de sodio y luego de calcio. En los aniones nuevamente se tiene mayor cantidad de bicarbonatos, por lo que la sal más común a encontrarse es el bicarbonato de sodio. En la Figura 36 se encuentran las concentraciones de las lagunas cráter de Atexcac y Alchichica, las cuales están altamente concentradas. Las concentraciones van aumentadas aguas abajo ya que son la acumulación de las mismas aguas arriba.

En la Figura 38 se tiene el pH a lo largo del sistema hidrográfico, están en un intervalo de 6 a 10. El pH alcalino se debe a la presencia de carbonatos que se forman con la presencia de la actividad biológica y del  $\text{CO}_2$ . Los puntos con pH alcalino, son las que presentan mayor concentración como son el río Apepesca, el río Atoyac al llegar a Puebla y el puente Villa Alta que es el mayor con un pH de 9.25. Los Manantiales también presentan un pH sobre 8, esto es por el paso de las aguas por rocas y suelos enriquecidos en minerales.

En la Figura 39 se observa la temperatura a lo largo de todo el sistema hidrográfico. La temperatura esta en función de la actividad biológica, los puntos que presentan el mayor valor son lo de los Humeros con  $45\text{ }^\circ\text{C}$ , por su origen geotérmico.



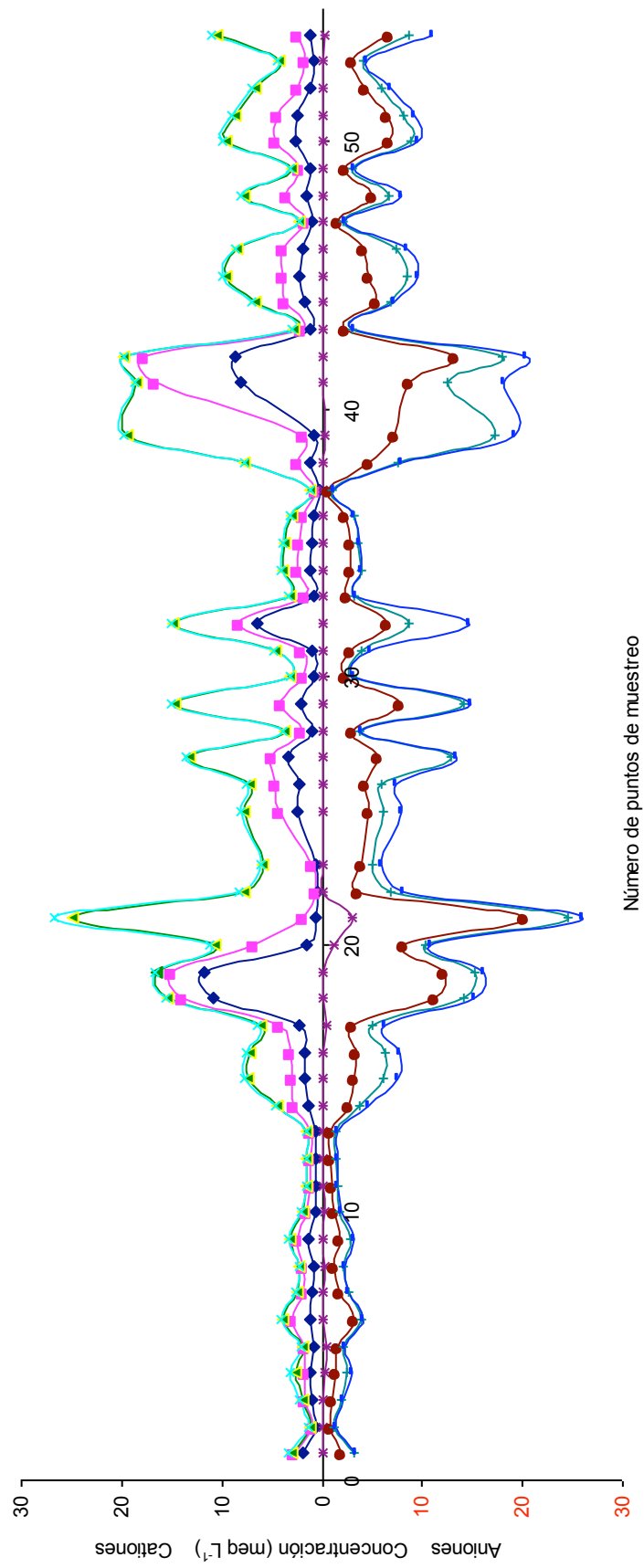


Figura 35. Composición iónica de las aguas de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo, baja concentración).

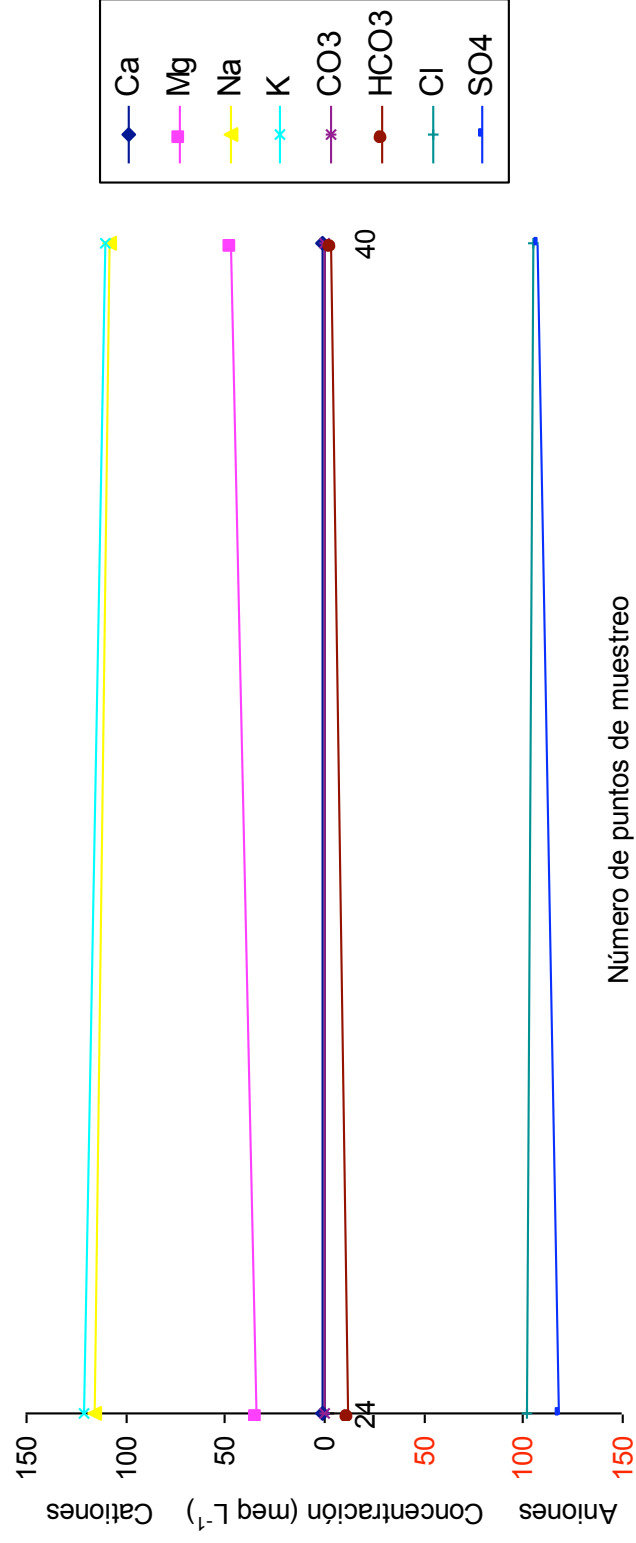


Figura 36. Composición iónica de las aguas de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo, alta concentración).

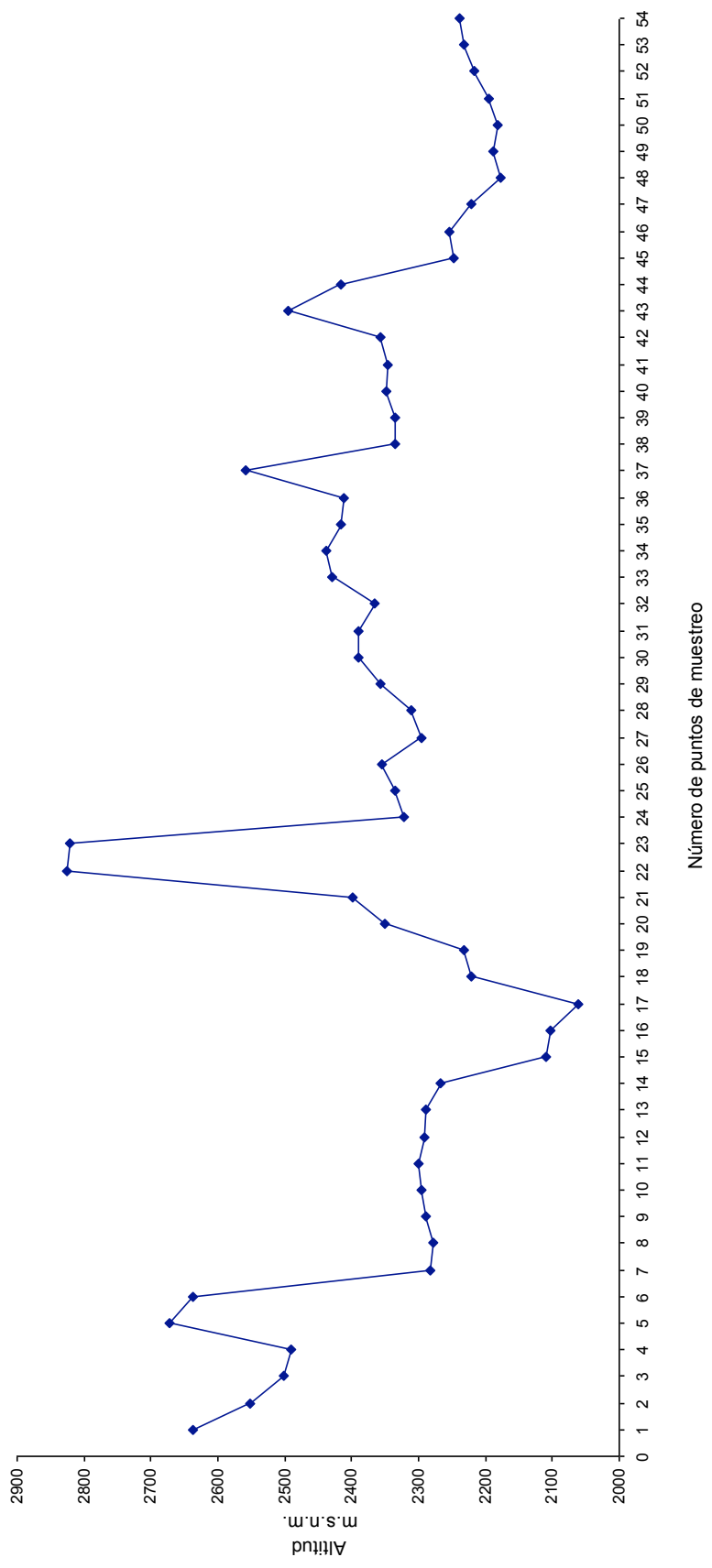


Figura 37. Perfil longitudinal de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

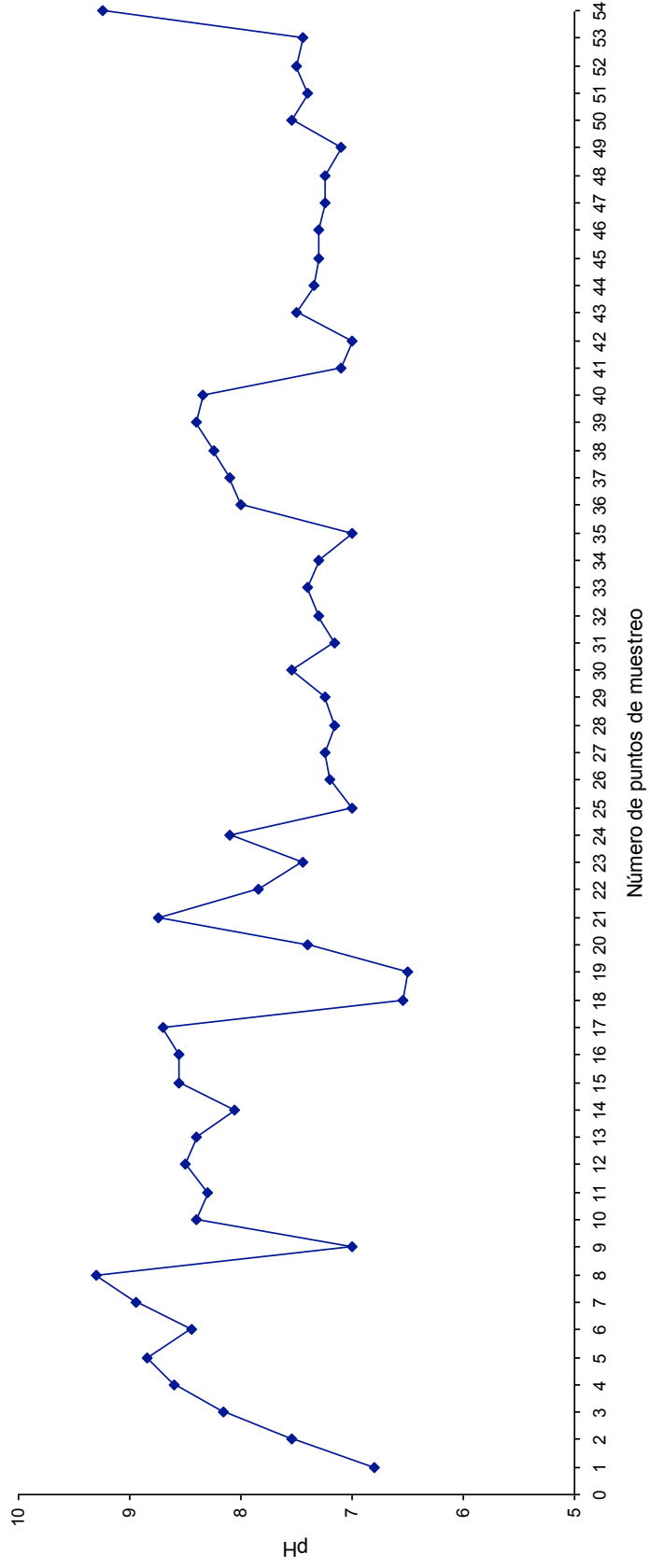


Figura 38. Perfil del pH de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

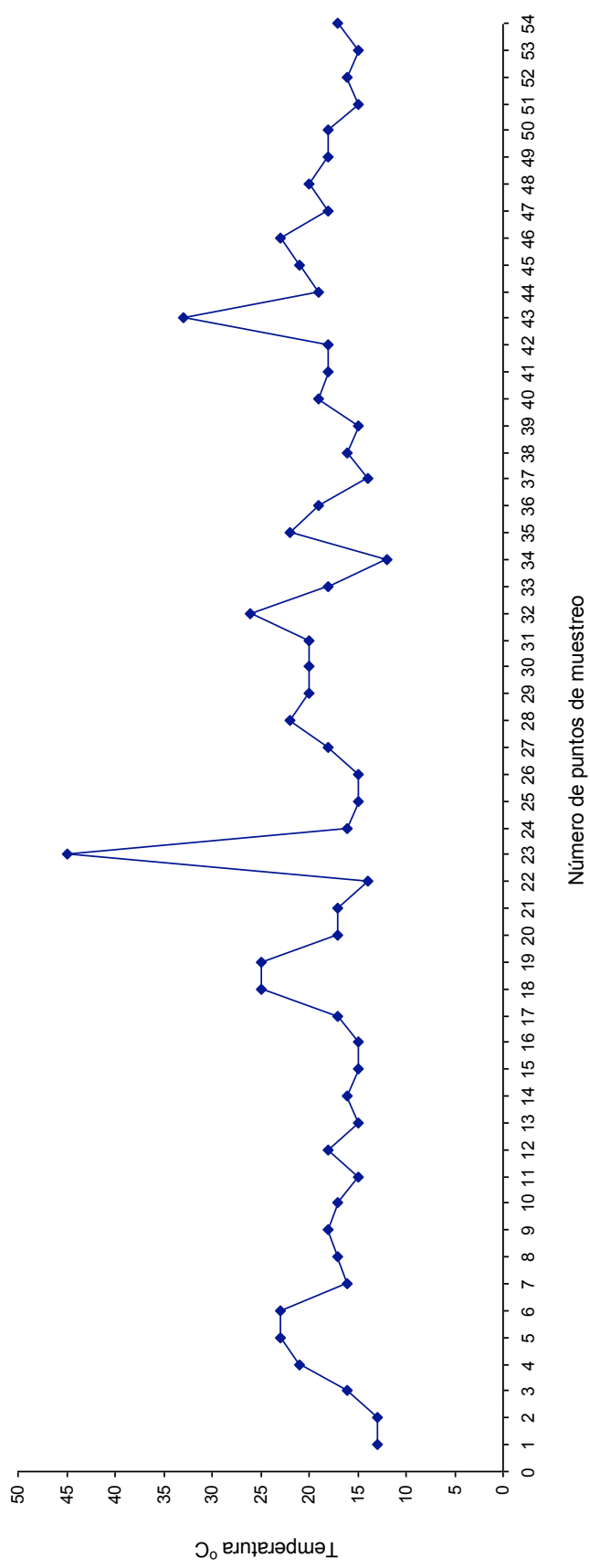


Figura 39. Perfil de la temperatura de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

## **5.4 Clasificación de las aguas con base en la salinidad**

La calidad del agua para riego tiene que evaluarse en función de los efectos perjudiciales al suelo, a los cultivos y a las personas y animales que necesitan de este recurso.

### **5.4.1 Factores que determinan la calidad del agua**

La calidad del agua se puede subdividir en dos partes: la calidad química y la calidad agronómica. La calidad química está dada por la cantidad de sales y la cantidad de iones que están presentes en solución, su estudio puede ayudar a una aproximación inicial si se puede utilizar en la industria, hogares, agricultura y ganadería. Desde el punto de vista agronómico la calidad del agua no va a especificar si esta debe ser utilizada o no, para saber con certeza necesitamos conocer la calidad química, cultivo por regar, condiciones climatológicas, métodos de riego, condiciones de drenaje del suelo y prácticas de manejo del agua, suelo y plantas.

### **5.4.2 Presión osmótica**

La presión osmótica es muy importante para el agua, suelo y plantas. Si una solución es separada del solvente puro con una membrana que bloquea al paso de moléculas del solvente pero no las del soluto, es decir, semipermeable, va a ocurrir que el solvente se moverá hacia la solución aumentando la presión en un intento de igualar la concentración en los dos lados de la membrana. El potencial del agua en la solución puede aumentar, hasta que, en teoría, ya no exista gradiente y la membrana soporte la presión. Las moléculas de agua se seguirán moviendo a través de la membrana pero en igual cantidad en ambas direcciones. La presión hidrostática que se genera se le conoce como presión osmótica. En la Figura 40 se presenta la relación entre la conductividad eléctrica medida y la presión osmótica experimental, la regresión lineal da un valor de 0.4309, de acuerdo a Richards *et al.* (1959) debe dar aproximadamente 0.360 dependiendo del tipo de sal, por lo que es correcto lo obtenido. En el Cuadro 35 se explica el cálculo de la presión osmótica del primer muestreo, en la Figura 41 se graficó la relación entre la concentración y la presión osmótica calculada del primer muestreo, esto fue necesario para elaborar el Cuadro 35.

La presión osmótica de una solución es equivalente a la presión real que puede generarse. 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 magnitud, pero de signo opuesto. El potencial osmótico puede ser expresado en términos de energía y la presión osmótica siempre se expresa en términos de presión.

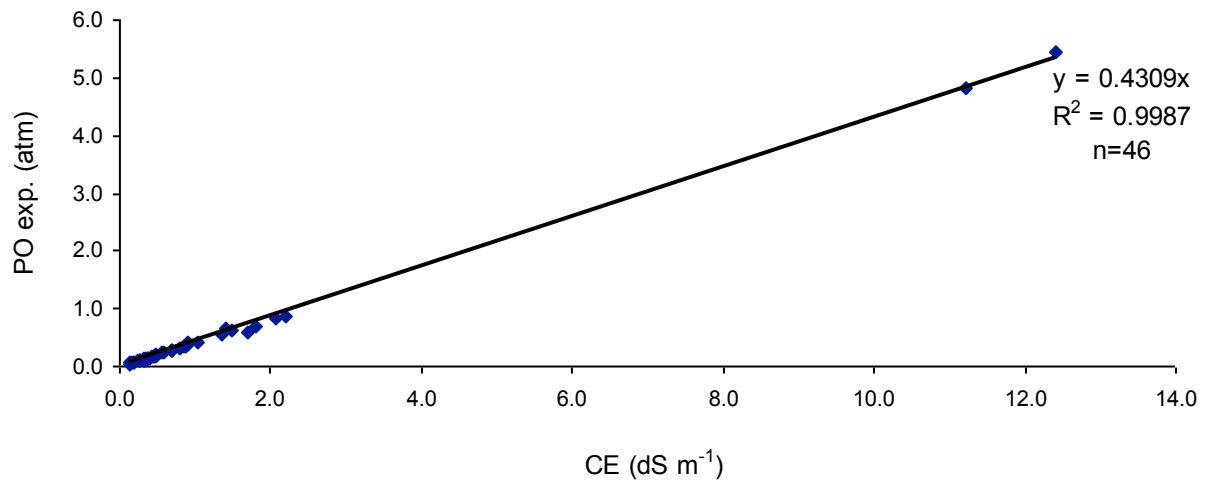


Figura 40. Relación entre la conductividad eléctrica y la presión osmótica experimental (PO exp. 1er muestreo) de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.



Cuadro 35. Presión osmótica calculada por tres métodos de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

ptos de muestreo	CE dS m <sup>-1</sup>	T °K	R J/gmol*K	mmol exp(X)	PO <sub>1</sub> =0.0241*X	$PQ_2 = \frac{n \times R \times T}{V}$	mg L <sup>-1</sup> analíticos	PO <sub>3</sub> =(mg L <sup>-1</sup> )*(0.4309/608.69)
1	0.42	293.15	8.31451	6.98	0.17	0.17	317.95	0.23
2	0.26	293.15	8.31451	3.85	0.09	0.09	182.23	0.13
3	0.47	293.15	8.31451	8.14	0.20	0.20	368.45	0.26
4	0.40	293.15	8.31451	5.73	0.14	0.14	264.27	0.19
5	0.19	293.15	8.31451	3.56	0.09	0.09	151.29	0.11
6	0.26	293.15	8.31451	4.04	0.10	0.10	176.33	0.12
7	0.33	293.15	8.31451	5.53	0.13	0.13	241.92	0.17
8	0.46	293.15	8.31451	7.55	0.18	0.18	356.45	0.25
9	0.25	293.15	8.31451	4.27	0.10	0.10	183.70	0.13
10	0.34	293.15	8.31451	4.63	0.11	0.11	198.35	0.14
11	0.15	293.15	8.31451	2.58	0.06	0.06	117.64	0.08
12	0.13	293.15	8.31451	1.95	0.05	0.05	85.14	0.06
13	0.18	293.15	8.31451	2.93	0.07	0.07	119.63	0.08
14	0.45	293.15	8.31451	7.25	0.17	0.17	310.48	0.22
15	0.34	293.15	8.31451	5.38	0.13	0.13	228.57	0.16
16	1.50	293.15	8.31451	25.90	0.62	0.62	1096.50	0.78
17	1.36	293.15	8.31451	23.45	0.57	0.56	996.00	0.71
18	0.78	293.15	8.31451	13.38	0.32	0.32	535.41	0.38
19	0.55	293.15	8.31451	10.12	0.24	0.24	418.76	0.30
20	0.59	293.15	8.31451	10.71	0.26	0.26	461.13	0.33
21	1.41	293.15	8.31451	26.93	0.65	0.65	956.67	0.68
22	0.31	293.15	8.31451	4.55	0.11	0.11	222.58	0.16
23	0.91	293.15	8.31451	17.14	0.41	0.41	651.39	0.46
24	0.24	293.15	8.31451	3.79	0.09	0.09	177.96	0.13
25	0.69	293.15	8.31451	12.16	0.29	0.29	513.71	0.36
26	0.25	293.15	8.31451	3.61	0.09	0.09	165.69	0.12
27	0.37	293.15	8.31451	5.18	0.12	0.12	240.54	0.17
28	0.89	293.15	8.31451	15.77	0.38	0.38	671.64	0.48
29	0.69	293.15	8.31451	11.87	0.29	0.29	506.92	0.36
30	1.03	293.15	8.31451	17.41	0.42	0.42	760.85	0.54
31	0.69	293.15	8.31451	11.21	0.27	0.27	494.40	0.35
32	0.47	293.15	8.31451	6.84	0.16	0.16	301.64	0.21
33	0.33	293.15	8.31451	4.62	0.11	0.11	227.51	0.16
34	0.36	293.15	8.31451	5.26	0.13	0.13	245.83	0.17
35	1.79	293.15	8.31451	29.05	0.70	0.70	1340.19	0.95
36	0.32	293.15	8.31451	4.66	0.11	0.11	220.23	0.16
37	0.14	293.15	8.31451	2.23	0.05	0.05	100.50	0.07
38	0.84	293.15	8.31451	14.21	0.34	0.34	601.23	0.43
39	0.33	293.15	8.31451	4.92	0.12	0.12	228.76	0.16
40	0.38	293.15	8.31451	6.11	0.15	0.15	287.40	0.20
41	2.07	293.15	8.31451	35.27	0.85	0.85	1671.90	1.18
42	1.71	293.15	8.31451	24.61	0.59	0.59	1197.33	0.85
44	2.20	293.15	8.31451	36.07	0.87	0.87	1418.13	1.00
45	0.87	293.15	8.31451	13.91	0.34	0.33	573.79	0.41
43	11.22	293.15	8.31451	200.39	4.83	4.82	6434.24	4.55
46	12.40	293.15	8.31451	225.68	5.44	5.43	7626.95	5.40
Media	1.14	293.15	8.31	19.60	0.47	0.47	753.22	0.53
Mediana	0.46	293.15	8.31	7.12	0.17	0.17	314.22	0.22
Moda		293.15						

En el Cuadro 35 la  $PO_1$  se obtiene de la Figura 41 al realizar la regresión lineal de la gráfica de las lecturas obtenidas en el osmómetro en función de la presión osmótica calculada con la ley de los gases ideales. La  $PO_2$  se calcula con la concentración en mmol de cada ion obtenido en el laboratorio para cada punto del primer muestreo. La  $PO_3$  se obtiene al igualar las ecuaciones siguientes:

$$PO = 0.4309 \times CE$$

*despejando*

$$CE = \frac{PO}{0.4309}$$

$$STD = 608.69 \times CE$$

*despejando*

$$CE = \frac{STD}{608.69}$$

*igualando*

$$\frac{PO}{0.4309} = \frac{STD}{608.69} \text{ despejando}$$

$$PO_3 = \frac{0.4309}{608.69} \times STD$$

Como se puede apreciar en el Cuadro 35, las tres formas de calcular la presión osmótica dan valores muy similares, por lo que se puede concluir que son correctos los datos analíticos.

En la Figura 42 se tiene el perfil de la presión osmótica promedio de las tres calculadas para el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac del primer muestreo. La mayor presión osmótica son de las lagunas Atexcac y Alchichica con 4.73 y 5.42 atmósferas respectivamente. El comportamiento del perfil es parecido al de los iones y es correcto, porque a mayores concentraciones de sales se tiene mayor presión osmótica.

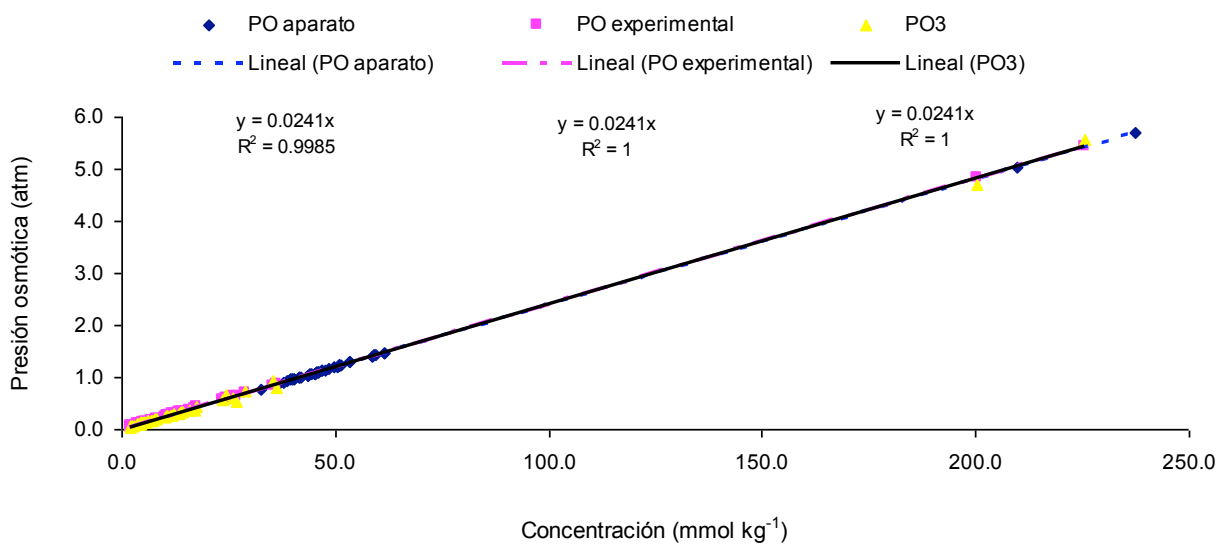


Figura 41. Relación entre la concentración y la presión osmótica calculada con tres métodos diferentes de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

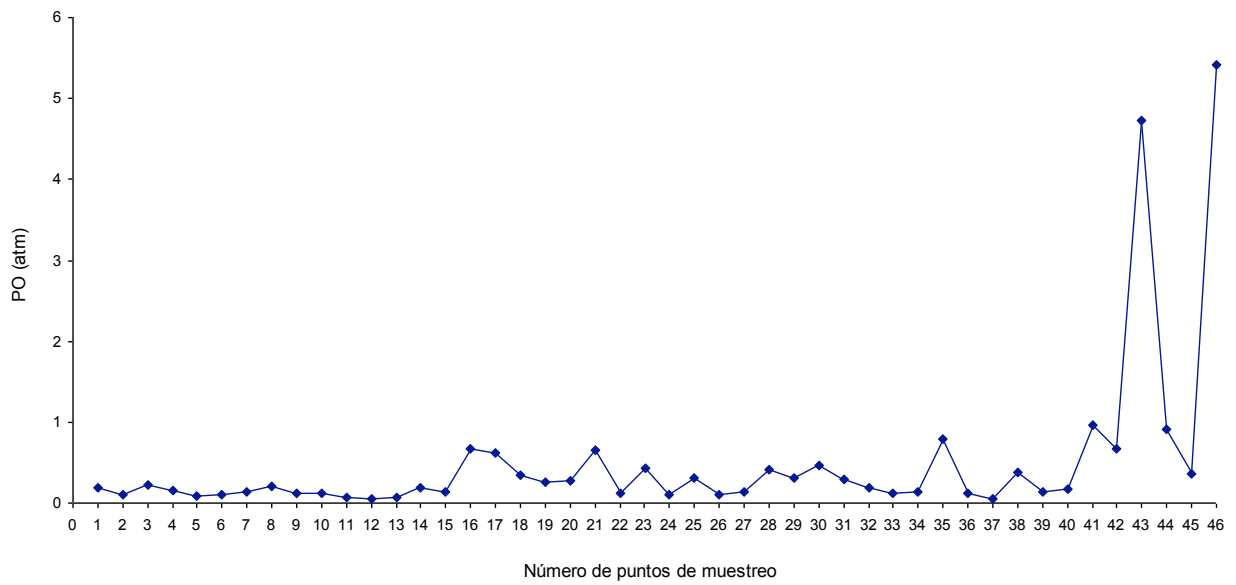


Figura 42. Perfil de la presión osmótica de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

El procedimiento para calcular la presión osmótica en el segundo muestreo es similar al explicado en el primero. En la Figura 45 se tiene el perfil de la presión osmótica promedio de las tres distintas formas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac del segundo muestreo.

En el segundo muestreo se observa en el Cuadro 36, en donde la  $PO_1$  se obtiene de la Figura 43, al realizar la regresión lineal de la gráfica de las lecturas obtenidas en el osmómetro en función de la presión osmótica calculada con la ley de los gases ideales. La  $PO_2$  se calcula con la concentración en mmol de cada ion obtenido en el laboratorio para cada punto del segundo muestreo (Figura 44). La  $PO_3$  se obtiene al igualar las ecuaciones siguientes:

$$PO = 0.4178 \times CE$$

*despejando*

$$CE = \frac{PO}{0.4178}$$

$$STD = 583.93 \times CE$$

*despejando*

$$CE = \frac{STD}{583.93}$$

*igualando*

$$\frac{PO}{0.4178} = \frac{STD}{583.93} \text{ despejando}$$

$$PO_3 = \frac{0.4178}{583.93} \times STD$$

La mayor presión osmótica son de las lagunas Atexcac y Alchichica al igual que en el primer muestreo, con 4.54 y 5.14 atmósferas respectivamente. El comportamiento del perfil es parecido al de los iones, y es correcto porque a mayores concentraciones de sales se tendrá mayor presión osmótica.

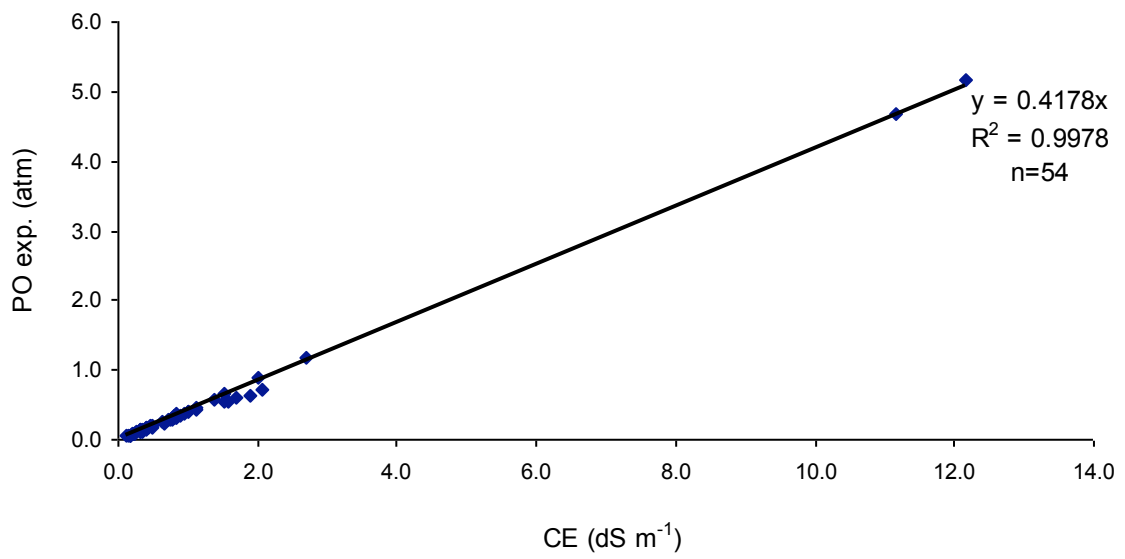


Figura 43. Relación entre la conductividad eléctrica y la presión osmótica experimental (PO exp. 2do muestreo) de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

Cuadro 36. Presión osmótica calculada por tres métodos de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

Ptos de muestreo	CE dS m <sup>-1</sup>	T °K	R J/gmol°K	mmol exp(X)	PO <sub>1</sub> =0.0242*X	PO <sub>2</sub> = $\frac{n \times R \times T}{V}$	mg L <sup>-1</sup> analíticos	PO <sub>3</sub> =(mg L <sup>-1</sup> )*(0.4178/583.93)
1	0.350	292.15	8.31451	5.37	0.13	0.13	240.52	0.17
2	0.135	292.15	8.31451	2.08	0.05	0.05	94.80	0.07
3	0.226	292.15	8.31451	3.58	0.09	0.09	153.20	0.11
4	0.316	292.15	8.31451	4.91	0.12	0.12	214.33	0.15
5	0.226	292.15	8.31451	3.21	0.08	0.08	146.41	0.10
6	0.417	292.15	8.31451	6.73	0.16	0.16	307.58	0.22
7	0.271	292.15	8.31451	4.22	0.10	0.10	185.41	0.13
8	0.237	292.15	8.31451	3.51	0.08	0.08	149.44	0.11
9	0.338	292.15	8.31451	5.10	0.12	0.12	229.24	0.16
10	0.203	292.15	8.31451	3.00	0.07	0.07	132.08	0.09
11	0.158	292.15	8.31451	2.40	0.06	0.06	107.43	0.08
12	0.158	292.15	8.31451	2.36	0.06	0.06	101.55	0.07
13	0.158	292.15	8.31451	2.39	0.06	0.06	102.66	0.07
14	0.474	292.15	8.31451	7.46	0.18	0.18	333.76	0.24
15	0.790	292.15	8.31451	13.09	0.32	0.31	536.92	0.38
16	0.790	292.15	8.31451	13.03	0.32	0.31	542.45	0.39
17	0.649	292.15	8.31451	9.74	0.24	0.23	426.99	0.31
18	1.579	292.15	8.31451	23.24	0.56	0.56	1130.86	0.81
19	1.692	292.15	8.31451	24.88	0.60	0.60	1214.27	0.87
20	1.128	292.15	8.31451	17.65	0.43	0.42	764.97	0.55
21	2.707	292.15	8.31451	49.55	1.20	1.19	1993.41	1.43
22	0.846	292.15	8.31451	15.54	0.38	0.37	598.07	0.43
23	0.620	295.15	8.31451	11.15	0.27	0.27	465.24	0.33
24	12.177	295.15	8.31451	213.04	5.16	5.16	7154.05	5.12
25	0.823	295.15	8.31451	13.04	0.32	0.32	589.49	0.42
26	0.764	295.15	8.31451	11.82	0.29	0.29	537.01	0.38
27	1.381	295.15	8.31451	24.20	0.59	0.59	915.49	0.66
28	0.400	295.15	8.31451	6.69	0.16	0.16	295.35	0.21
29	1.528	295.15	8.31451	27.58	0.67	0.67	1058.02	0.76
30	0.329	295.15	8.31451	5.38	0.13	0.13	237.33	0.17
31	0.494	295.15	8.31451	8.22	0.20	0.20	354.53	0.25
32	1.528	295.15	8.31451	22.70	0.55	0.55	1074.23	0.77
33	0.341	295.15	8.31451	5.76	0.14	0.14	250.12	0.18
34	0.411	295.15	8.31451	6.73	0.16	0.16	290.84	0.21
35	0.388	295.15	8.31451	6.37	0.15	0.15	282.84	0.20
36	0.329	295.15	8.31451	5.42	0.13	0.13	238.82	0.17
37	0.118	295.15	8.31451	1.93	0.05	0.05	78.32	0.06
38	0.793	295.15	8.31451	14.22	0.34	0.34	565.31	0.40
39	1.998	295.15	8.31451	36.91	0.89	0.89	1332.30	0.95
40	11.163	295.15	8.31451	192.98	4.67	4.67	5981.90	4.28
41	1.880	295.15	8.31451	25.55	0.62	0.62	1248.27	0.89
42	2.056	295.15	8.31451	30.10	0.73	0.73	1424.64	1.02
43	0.317	295.15	8.31451	5.05	0.12	0.12	230.32	0.16
44	0.734	295.15	8.31451	12.21	0.30	0.30	539.14	0.39
45	0.999	295.15	8.31451	17.00	0.41	0.41	681.54	0.49
46	0.881	295.15	8.31451	14.70	0.36	0.36	596.53	0.43
47	0.235	295.15	8.31451	3.67	0.09	0.09	166.01	0.12
48	0.823	295.15	8.31451	13.63	0.33	0.33	592.82	0.42
49	0.329	295.15	8.31451	5.15	0.12	0.12	234.68	0.17
50	0.999	295.15	8.31451	16.71	0.40	0.40	724.12	0.52
51	0.940	295.15	8.31451	15.60	0.38	0.38	693.41	0.50
52	0.705	295.15	8.31451	12.04	0.29	0.29	509.16	0.36
53	0.458	295.15	8.31451	7.87	0.19	0.19	331.97	0.24
54	1.116	295.15	8.31451	19.52	0.47	0.47	822.69	0.59
Media	1.15	293.93	12.75	19.18	0.46	0.46	744.50	0.53
Mediana	0.71	295.15	8.31	10.45	0.25	0.25	446.11	0.32
Moda	0.16	295.15	8.31					

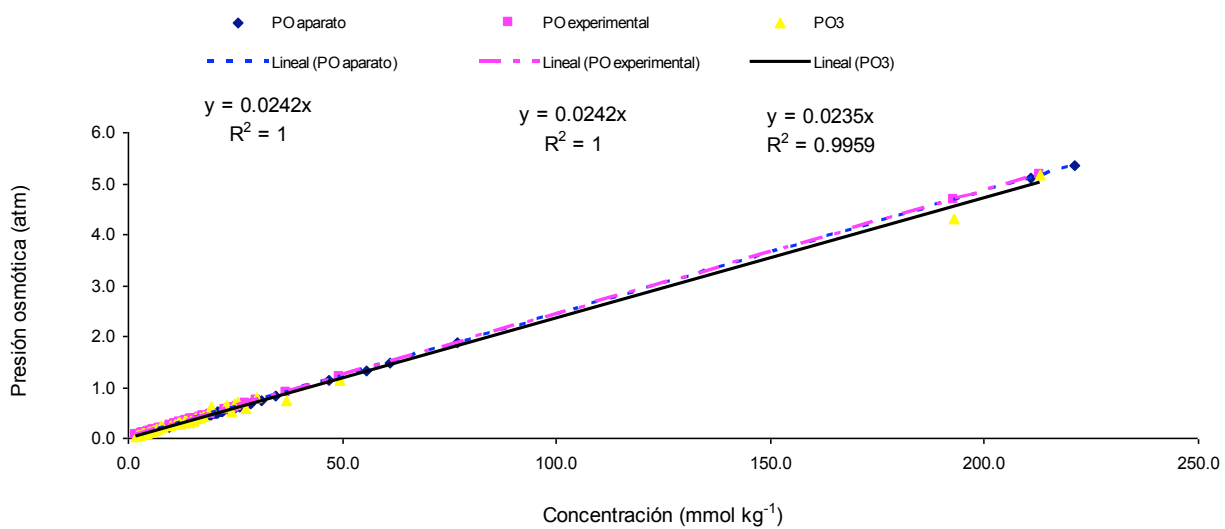


Figura 44. Relación entre la concentración y la presión osmótica calculada con tres métodos diferentes de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).



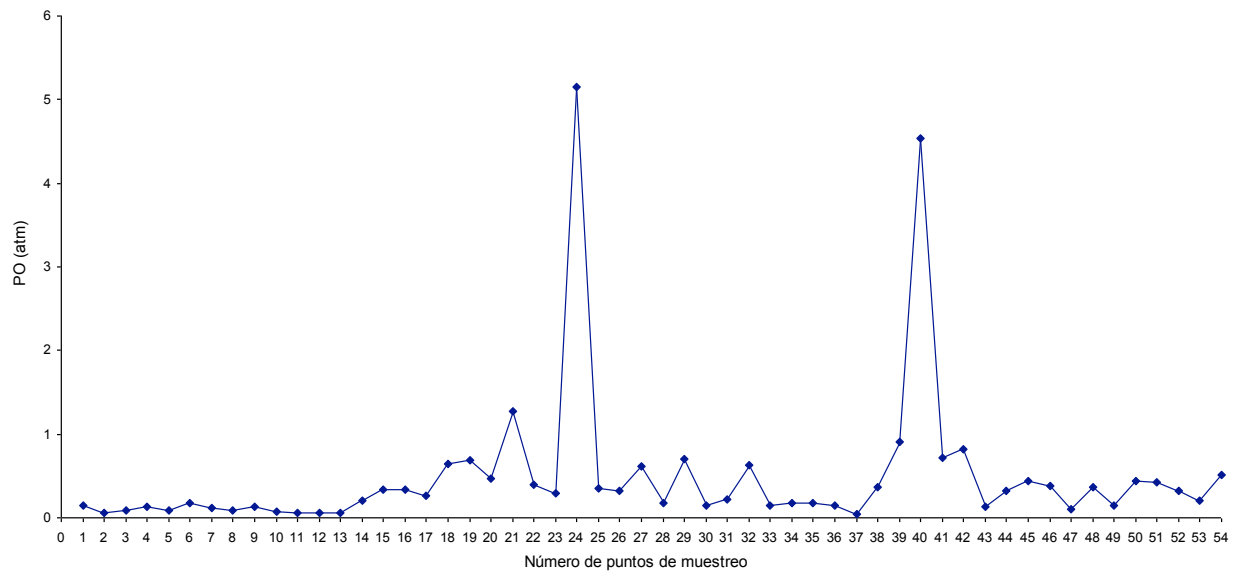


Figura 45. Perfil de la presión osmótica de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

## 5.5 Índice de salinidad

El diagrama representado en la Figura 46 es para la clasificación de las aguas para riego citado en Richards *et al.* (1959), esta en función de la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio. En los diagramas originales, las curvas representan la ley de acción de masas entre los cationes solubles y los intercambiables delimitando las clases de sodio.

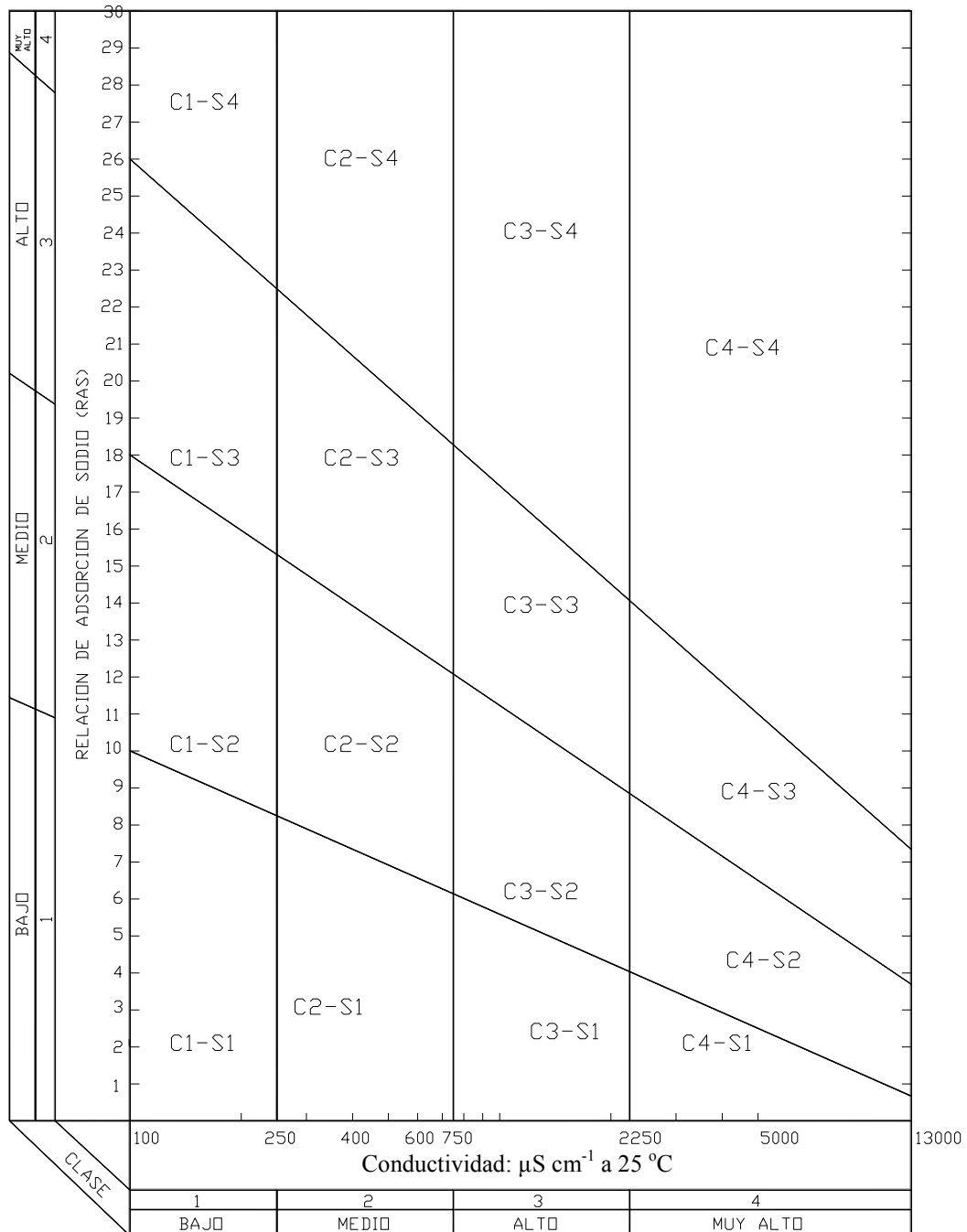


Figura 46. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego citado en (Richards *et al.*, 1959).

Las curvas de la Figura 46 se pueden construir aplicando las siguientes ecuaciones empíricas:

$$\text{Curva superior: } S = 43.75 - 8.87 \log C$$

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

$$\text{Curva inferior: } S = 18.87 - 4.44 \log C$$

en las cuales  $S = RAS$  y  $C = CE \times 10^6$

Estas ecuaciones dan una línea recta en coordenadas rectangulares cuando se usa el  $\log C$ . Las líneas se han trazado con pendiente negativa para tomar en cuenta la dependencia del peligro de sodio de la concentración total. Por ejemplo agua con  $RAS$  de 9 y  $CE$  menor de  $168 \mu S cm^{-1}$ , se clasifica con lo que respecta al peligro de sodio como agua S1. Para la misma muestra de  $RAS$  pero con una  $CE$  entre 168 y  $2250 \mu S cm^{-1}$ , el agua será S2 y si la  $CE$  es mayor de  $2250 \mu S cm^{-1}$ , el agua será S3. Las aguas con un  $RAS$  constante se les atribuyen un mayor peligro de sodio, al aumentar la concentración total. Sin embargo en esta sección se va hablar sobre la salinidad específicamente, quiere decir sobre los datos que se colocan sobre el eje de las abscisas en la Figura 46, en donde se encuentra la conductividad eléctrica. En el apartado de sodicidad se calculará los diferentes tipos de  $RAS$ .

En este trabajo utilizamos el diagrama de la Figura 46 con los tres tipos de  $RAS$  calculados. Esto es para observar su comportamiento con los diferentes conocimientos del  $RAS$  original,  $RAS_{aj}$  y  $RAS^o$ . En los Cuadros 47 y 50 se presentan los cálculos de los diferentes tipos de  $RAS$  para los dos muestreos. La clasificación  $Cn$  es en base a la conductividad eléctrica y la clasificación  $Sn$  es en base al R.A.S. El concepto de estas clasificaciones se encuentran en el Capítulo 3.

En lo que respecta a la clasificación con la conductividad eléctrica, el primer muestreo tiene 6 puntos con clasificación C1 que representa el 13%, la mayor cantidad de puntos se encuentran en la clasificación C2 con 25 puntos que representa el 54%, la clasificación C3 cuenta con 13 puntos representando el 29% y, la clasificación C4 con 2 puntos y representa el 4% (Figuras 47, 48 y 49), en el Cuadro 37 se encuentra esta clasificación y su recomendación para el uso se encuentra en el Cuadro 38. En lo que respecta a la clasificación por la conductividad eléctrica, el segundo muestreo tiene 10 puntos con clasificación C1 que representa el 19%, la clasificación C2 cuenta con 20 puntos que representa el 37%, la mayor cantidad de puntos

tienen la clasificación C3, con 21 puntos representando el 39% y, la clasificación C4 con 3 puntos que representa el 5% (Figuras 50, 51 y 52), en el Cuadro 41 se encuentra esta clasificación y su recomendación para el uso se encuentra en el Cuadro 42.

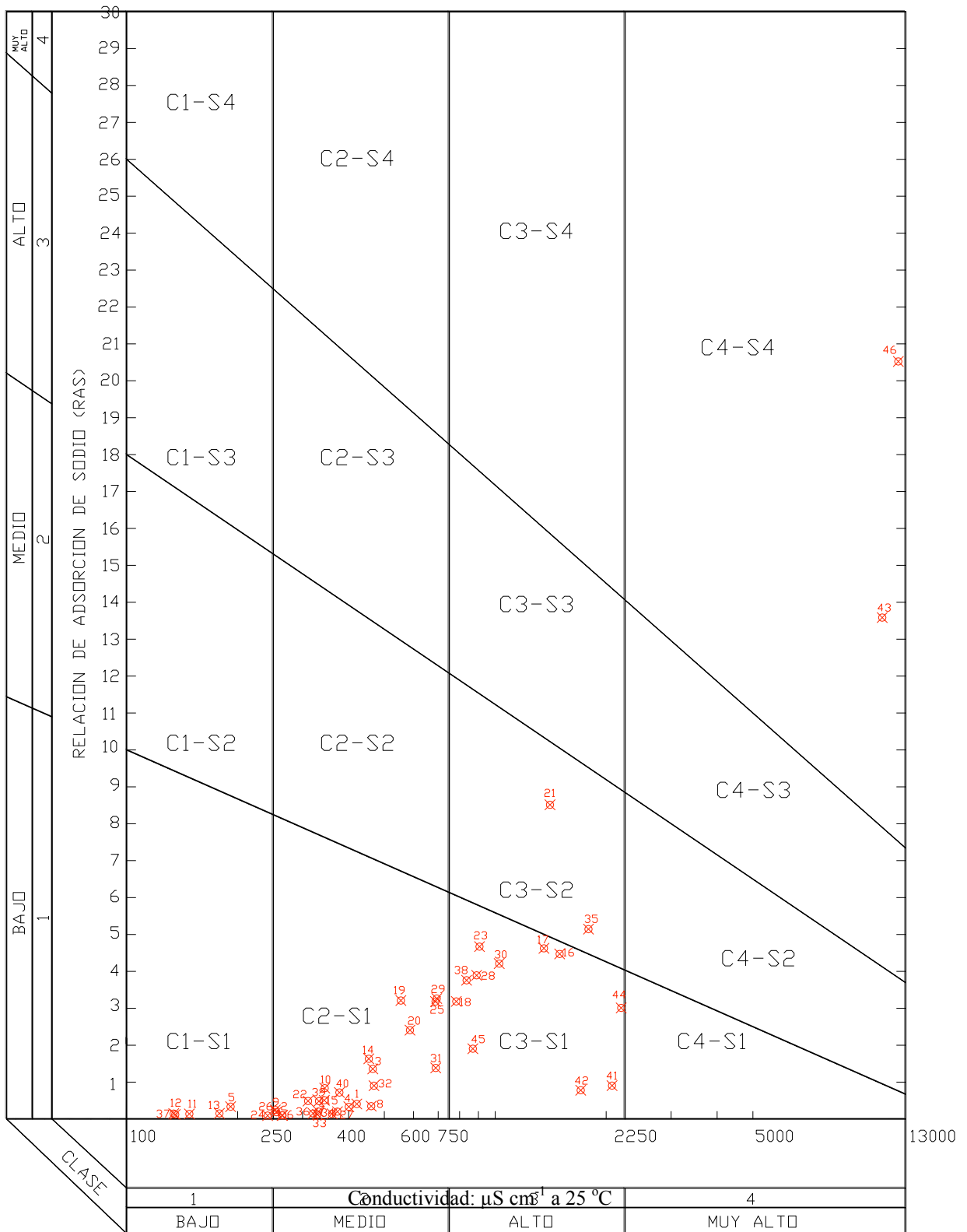


Figura 47. Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS original según Cuadro 47 (1er muestreo).  $\otimes$  Número de puntos de muestreo.

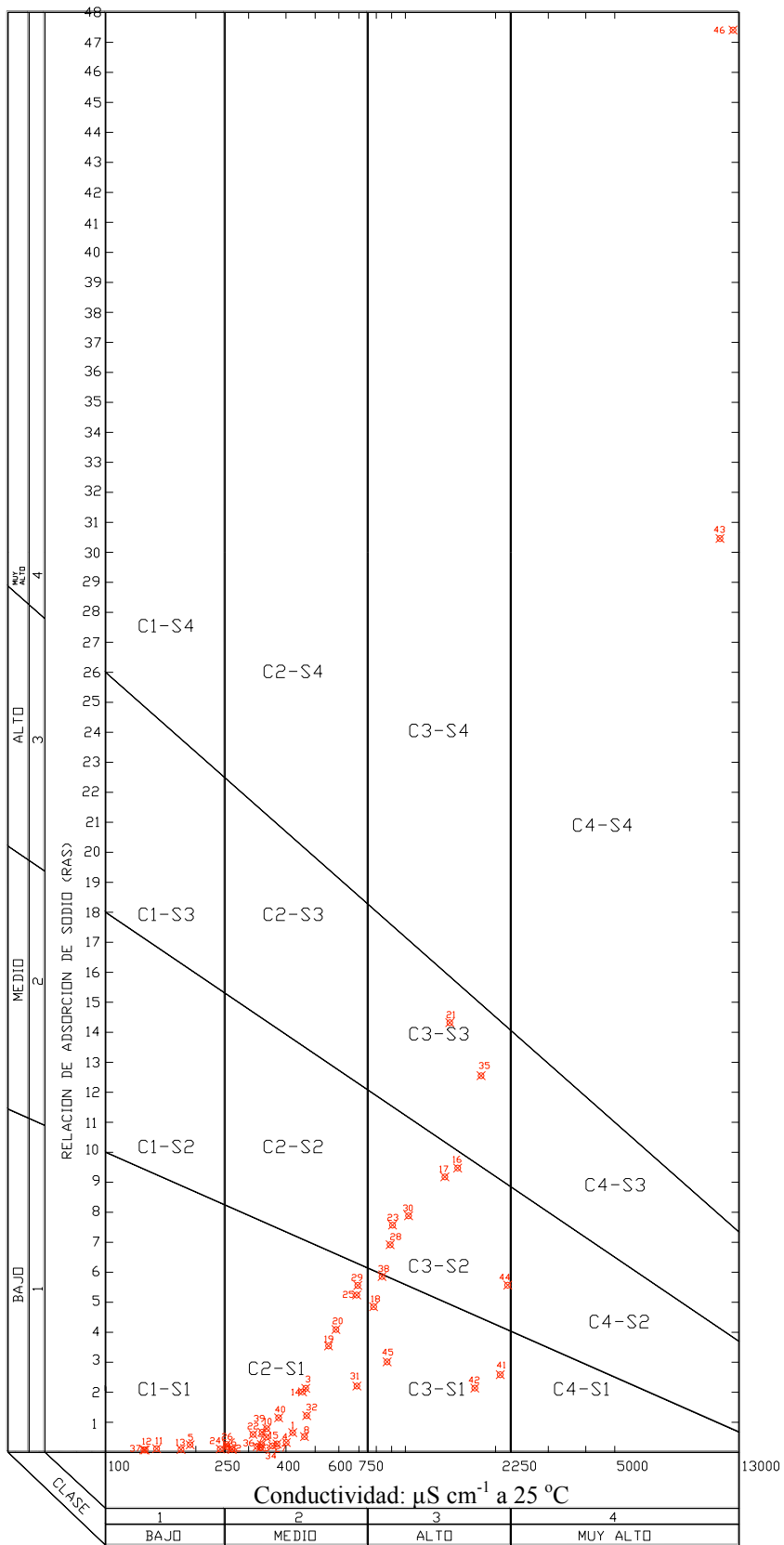


Figura 48. Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.  $\text{RAS}_{aj}$  según Cuadro 47 (1er muestreo).  $\times$  Número de puntos de muestreo.

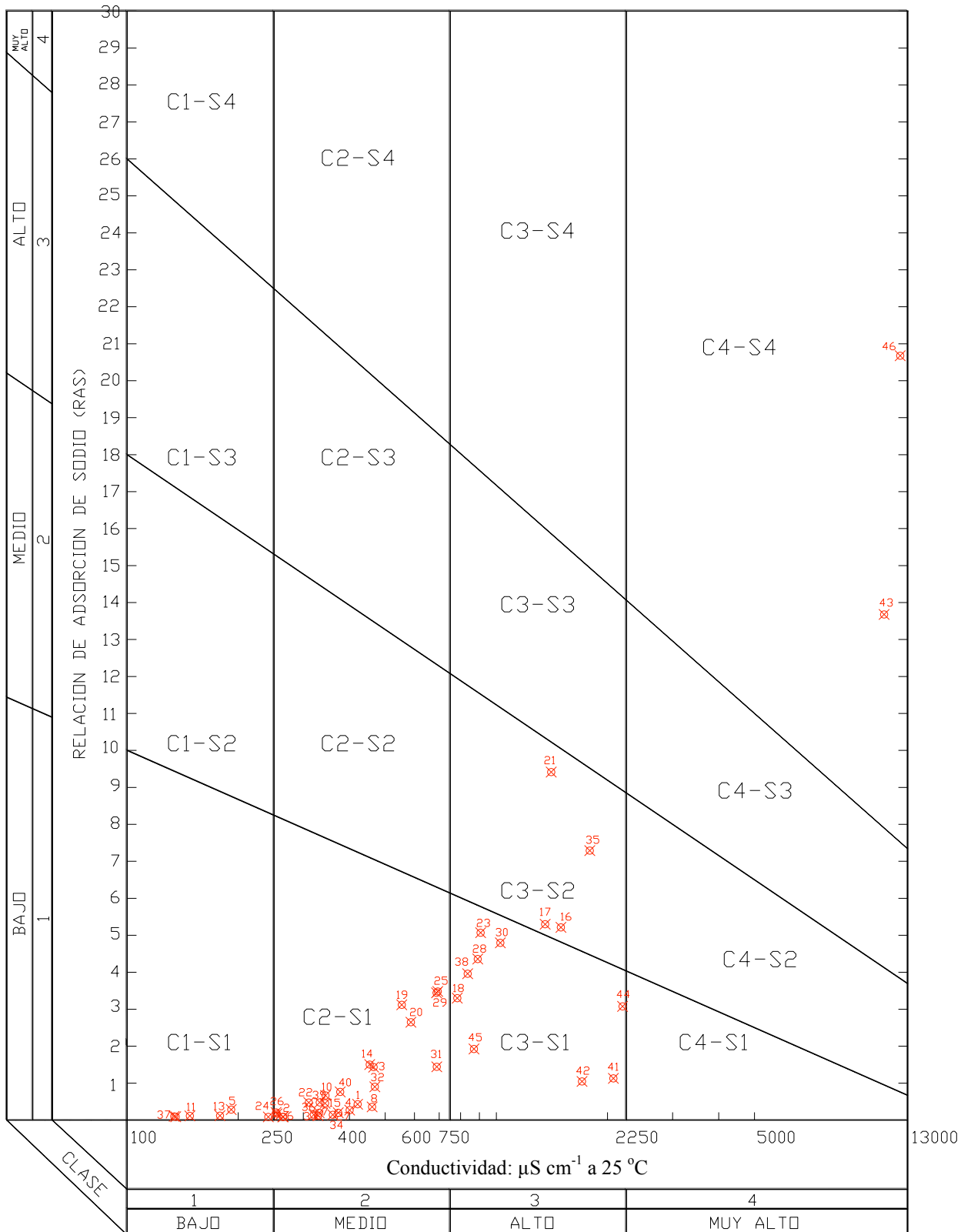


Figura 49. Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS<sup>o</sup> según Cuadro 47 (1er muestreo).  $\otimes$  Número de puntos de muestreo.

Cuadro 37. Clasificación de las aguas con base en la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No. de muestras	Clasificación en base a la C.E.	
	C.E. ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	Tipo
1	420.995	C2
2	264.885	C2
3	465.312	C2
4	400.621	C2
5	191.426	C1
6	264.013	C2
7	331.200	C2
8	460.789	C2
9	254.612	C2
10	344.649	C2
11	147.943	C1
12	134.145	C1
13	178.516	C1
14	453.985	C2
15	343.744	C2
16	1495.058	C3
17	1355.244	C3
18	783.869	C3
19	554.571	C2
20	586.939	C2
21	1407.650	C3
22	310.548	C2
23	906.304	C3
24	241.245	C1
25	688.542	C2
26	253.149	C2
27	373.106	C2
28	890.220	C3
29	693.980	C2
30	1025.164	C3
31	689.544	C2
32	468.720	C2
33	329.008	C2
34	360.674	C2
35	1790.225	C3
36	320.384	C2
37	135.453	C1
38	836.131	C3
39	332.427	C2
40	377.747	C2
41	2074.011	C3
42	1705.632	C3
43	11217.540	C4
44	2196.355	C3
45	869.434	C3
46	12402.183	C4



Cuadro 38. Clasificación de las aguas y problemas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No.	Clasificación en base a la Conductividad Eléctrica
1	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
2	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
3	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
4	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
5	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
6	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
7	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
8	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
9	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
10	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
11	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
12	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
13	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
14	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
15	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
16	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
17	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
18	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
19	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
20	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
21	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
22	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
23	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
24	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
25	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
26	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
27	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
28	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
29	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
30	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
31	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
32	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
33	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
34	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
35	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
36	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
37	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
38	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
39	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
40	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
41	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
42	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
43	C4 Aguas muy altamente salinas-Debe lavarse
44	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
45	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
46	C4 Aguas muy altamente salinas-Debe lavarse

De acuerdo al Cuadro 25 citado en Ayers y Westcot (1987), en donde se dan las directrices para interpretar la calidad del agua para riego, en base al grado de restricción de uso, al observar el Cuadro 39 para el primer muestreo, se tiene que por concepto de la conductividad eléctrica 31 puntos que son el 67% no tienen ningún grado de restricción, 13 puntos que es el 29% tienen grado de restricción de ligera a moderada y las lagunas de Atexcac y Alchichica tienen grado de restricción de uso severo y, representa el 4%.

En el Cuadro 39 de acuerdo a los sólidos totales disueltos del primer muestreo, se tiene que 27 puntos no tienen ningún grado de restricción, representa el 59%, 17 puntos que es 37% tienen grado de restricción de ligera a moderada y, también las lagunas cráter tienen grado de restricción de uso severo y, representa el 4%.

En el Cuadro 40 se tiene la clasificación para el segundo muestreo, en donde de acuerdo a la conductividad eléctrica, 28 puntos que es el 52% no tiene ningún grado de restricción, 24 puntos con el 44% tienen grado de restricción de ligera a moderada y, las lagunas de Atexcac y Alchichica tienen grado de restricción severo, representa el 4%.

En el Cuadro 40 de acuerdo a los sólidos totales disueltos del segundo muestreo, se tiene que 27 puntos que es el 50% no tienen ningún grado de restricción, 22 puntos con el 41% tienen un grado de restricción de ligera a moderada y, 5 puntos con el 9% tienen un grado de restricción de uso severo.

Cuadro 39. Clasificación de la salinidad en base al grado de restricción de uso según Ayers y Westcot (1987) de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No. de muestras	Directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego			
	C.E. (dS m <sup>-1</sup> )	STD (mg L <sup>-1</sup> )	Grado de restricción de uso para C.E.	Grado de restricción de uso para STD
1	0.421	327.0	Ninguna	Ninguna
2	0.265	186.0	Ninguna	Ninguna
3	0.465	377.0	Ninguna	Ninguna
4	0.401	272.0	Ninguna	Ninguna
5	0.191	155.0	Ninguna	Ninguna
6	0.264	180.0	Ninguna	Ninguna
7	0.331	249.0	Ninguna	Ninguna
8	0.461	365.0	Ninguna	Ninguna
9	0.255	189.0	Ninguna	Ninguna
10	0.345	204.0	Ninguna	Ninguna
11	0.148	121.0	Ninguna	Ninguna
12	0.134	87.0	Ninguna	Ninguna
13	0.179	123.0	Ninguna	Ninguna
14	0.454	319.0	Ninguna	Ninguna
15	0.344	235.0	Ninguna	Ninguna
16	1.495	1129.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
17	1.355	1025.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
18	0.784	551.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
19	0.555	431.0	Ninguna	Ninguna
20	0.587	474.0	Ninguna	Ligera a Moderada
21	1.408	985.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
22	0.311	229.0	Ninguna	Ninguna
23	0.906	670.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
24	0.241	183.0	Ninguna	Ninguna
25	0.689	529.0	Ninguna	Ligera a Moderada
26	0.253	170.0	Ninguna	Ninguna
27	0.373	247.0	Ninguna	Ninguna
28	0.890	691.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
29	0.694	522.0	Ninguna	Ligera a Moderada
30	1.025	783.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
31	0.690	509.0	Ninguna	Ligera a Moderada
32	0.469	310.0	Ninguna	Ninguna
33	0.329	234.0	Ninguna	Ninguna
34	0.361	253.0	Ninguna	Ninguna
35	1.790	1380.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
36	0.320	226.0	Ninguna	Ninguna
37	0.135	103.0	Ninguna	Ninguna
38	0.836	619.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
39	0.332	235.0	Ninguna	Ninguna
40	0.378	296.0	Ninguna	Ninguna
41	2.074	1680.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
42	1.706	1233.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
43	11.218	6627.0	Severo	Severo
44	2.196	1460.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
45	0.869	591.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
46	12.402	7855.0	Severo	Severo

Cuadro 40. Clasificación de la salinidad en base al grado de restricción de uso según Ayers y Westcot (1987) de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No. de muestras	Directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego			
	C.E. (dS m <sup>-1</sup> )	STD (mg L <sup>-1</sup> )	Grado de restricción de uso para C.E.	Grado de restricción de uso para STD
1	0.350	247.0	Ninguna	Ninguna
2	0.135	97.0	Ninguna	Ninguna
3	0.226	153.0	Ninguna	Ninguna
4	0.316	220.0	Ninguna	Ninguna
5	0.226	150.0	Ninguna	Ninguna
6	0.417	303.0	Ninguna	Ninguna
7	0.271	190.0	Ninguna	Ninguna
8	0.237	153.0	Ninguna	Ninguna
9	0.338	236.0	Ninguna	Ninguna
10	0.203	136.0	Ninguna	Ninguna
11	0.158	110.0	Ninguna	Ninguna
12	0.158	104.0	Ninguna	Ninguna
13	0.158	105.0	Ninguna	Ninguna
14	0.474	343.0	Ninguna	Ninguna
15	0.790	553.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
16	0.790	558.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
17	0.649	439.0	Ninguna	Ninguna
18	1.579	1164.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
19	1.692	1250.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
20	1.128	787.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
21	2.707	2053.0	Ligera a Moderada	Severo
22	0.846	3330.0	Ligera a Moderada	Severo
23	0.620	3844.0	Ninguna	Severo
24	12.177	7368.0	Severo	Severo
25	0.823	607.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
26	0.764	553.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
27	1.381	942.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
28	0.400	304.0	Ninguna	Ninguna
29	1.528	1089.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
30	0.329	244.0	Ninguna	Ninguna
31	0.494	365.0	Ninguna	Ninguna
32	1.528	1106.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
33	0.341	257.0	Ninguna	Ninguna
34	0.411	299.0	Ninguna	Ninguna
35	0.388	291.0	Ninguna	Ninguna
36	0.329	245.0	Ninguna	Ninguna
37	0.118	80.0	Ninguna	Ninguna
38	0.793	582.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
39	1.998	1372.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
40	11.163	6161.0	Severo	Severo
41	1.880	1285.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
42	2.056	1460.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
43	0.317	237.0	Ninguna	Ninguna
44	0.734	555.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
45	0.999	701.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
46	0.881	614.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
47	0.235	170.0	Ninguna	Ninguna
48	0.823	610.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
49	0.329	241.0	Ninguna	Ninguna
50	0.999	745.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
51	0.940	714.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
52	0.705	524.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
53	0.458	341.0	Ninguna	Ninguna
54	1.116	847.0	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada

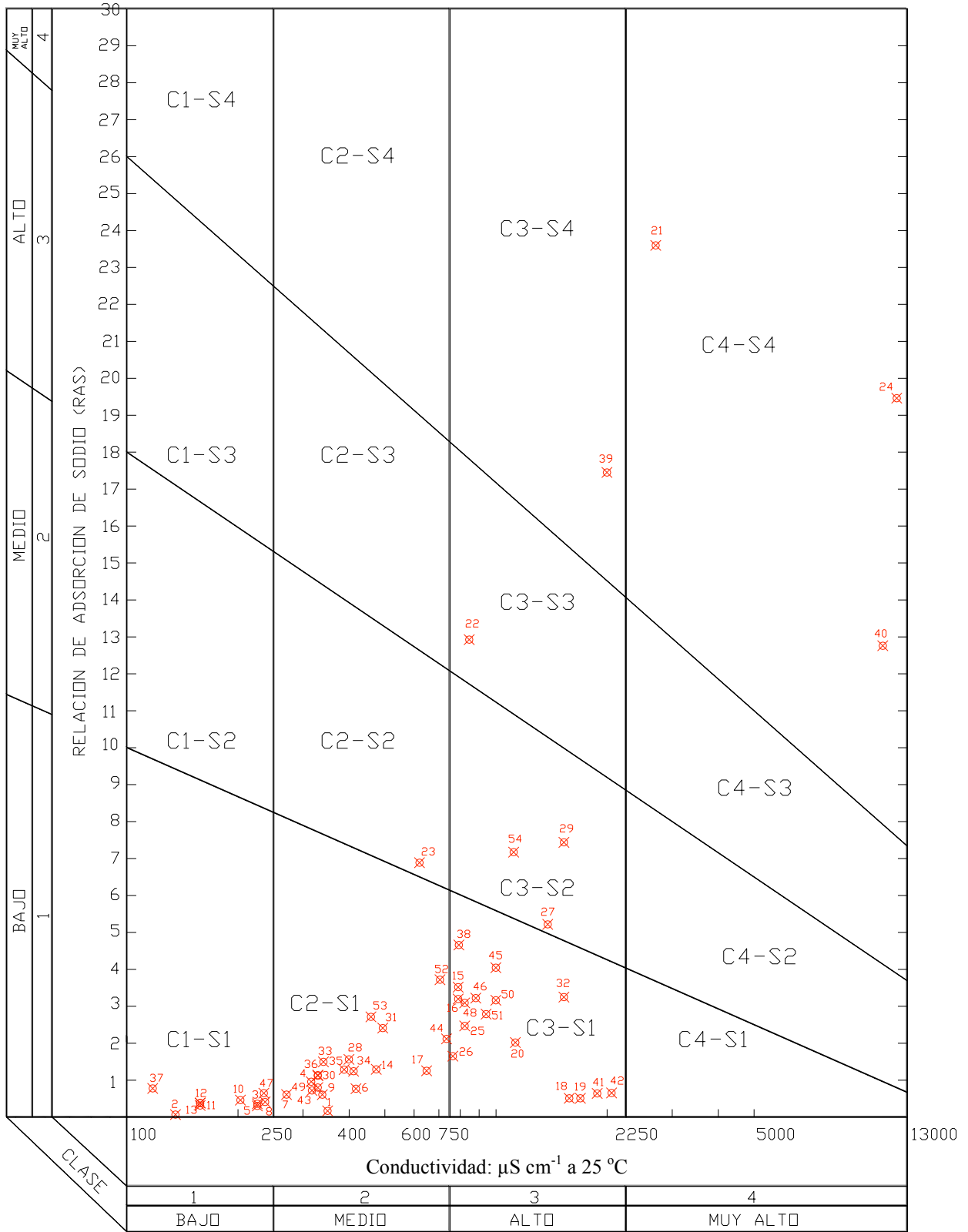


Figura 50. Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS original según Cuadro 50 (2do muestreo). x Número de puntos de muestreo.

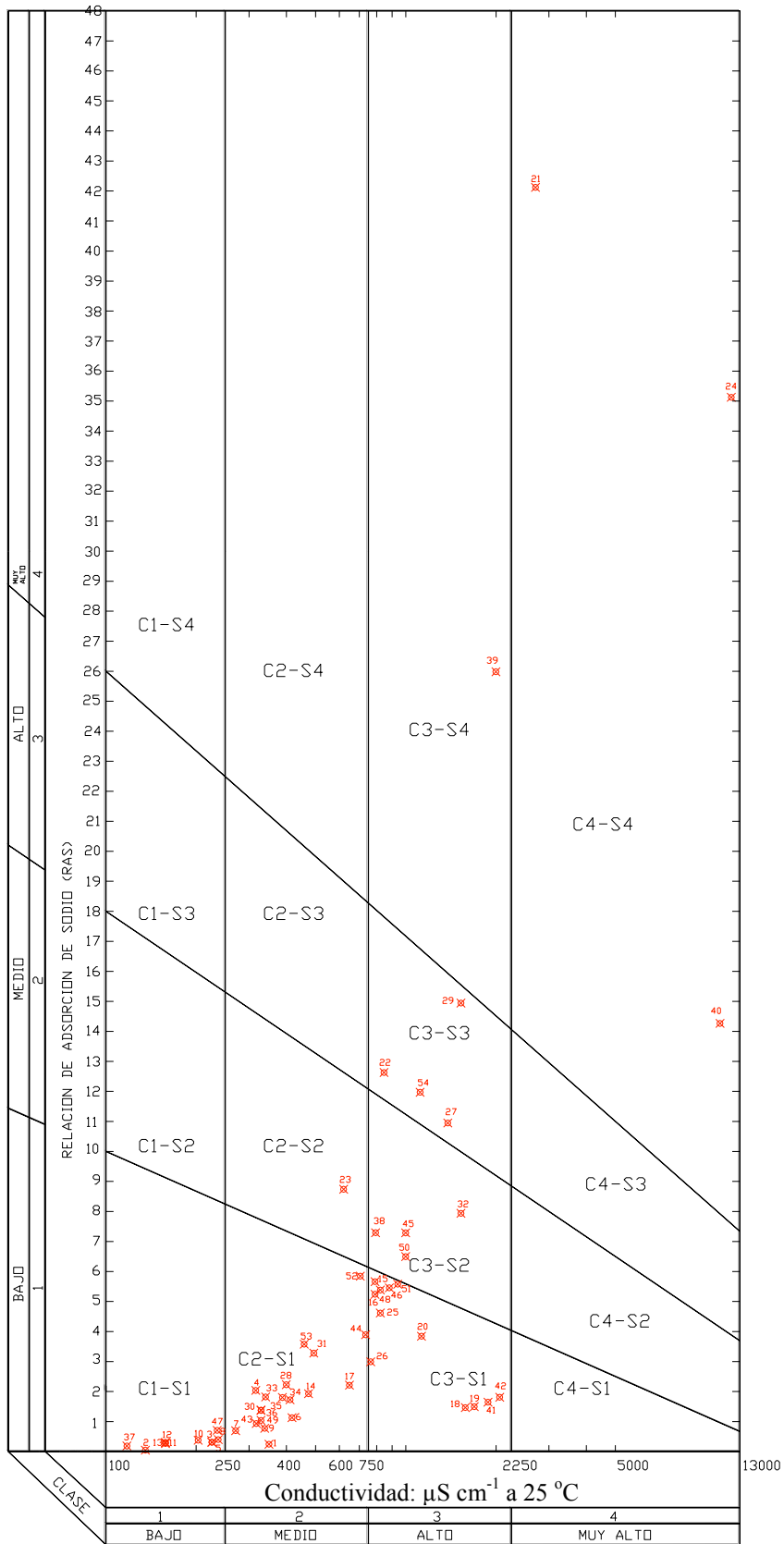


Figura 51. Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.  $\text{RAS}_{aj}$  según Cuadro 50 (2do muestreo).  $\times$  Número de puntos de muestreo.

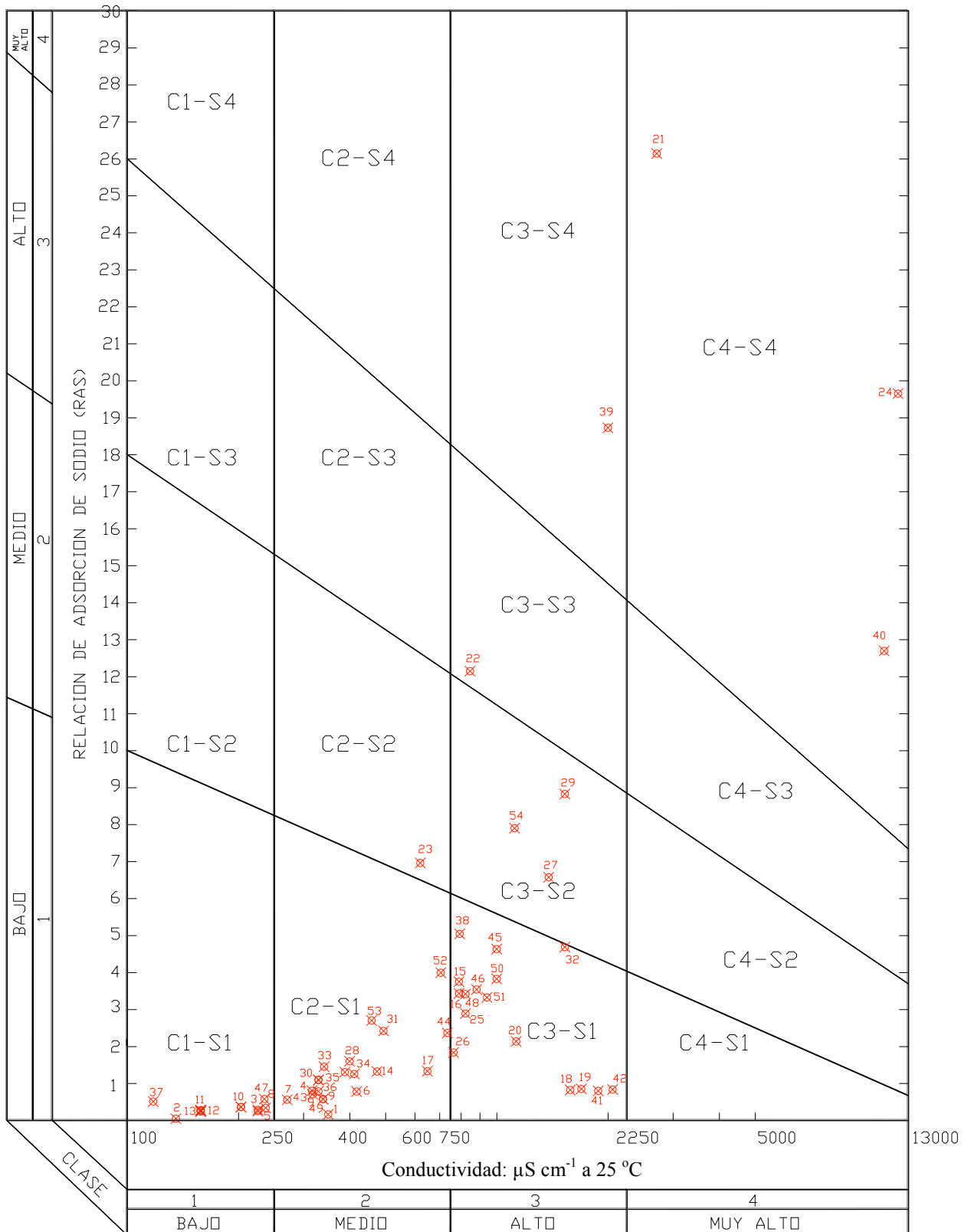


Figura 52. Clasificación de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS<sup>o</sup> según cuadro 50 (2do muestreo). <sup>42</sup> Número de puntos de muestreo.

Cuadro 41. Clasificación de las aguas con base en la conductividad eléctrica del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No. de muestras	Clasificación en base a la C.E.	
	C.E. ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	Tipo
1	349.680	C2
2	135.360	C1
3	225.600	C1
4	315.840	C2
5	225.600	C1
6	417.360	C2
7	270.720	C2
8	236.880	C1
9	338.400	C2
10	203.040	C1
11	157.920	C1
12	157.920	C1
13	157.920	C1
14	473.760	C2
15	789.600	C3
16	789.600	C3
17	648.600	C2
18	1579.200	C3
19	1692.000	C3
20	1128.000	C3
21	2707.200	C4
22	846.000	C3
23	620.400	C2
24	12177.273	C4
25	822.500	C3
26	763.750	C3
27	1380.625	C3
28	399.500	C2
29	1527.500	C3
30	329.000	C2
31	493.500	C2
32	1527.500	C3
33	340.750	C2
34	411.250	C2
35	387.750	C2
36	329.000	C2
37	117.500	C1
38	793.125	C3
39	1997.500	C3
40	11162.500	C4
41	1880.000	C3
42	2056.250	C3
43	317.250	C2
44	734.375	C2
45	998.750	C3
46	881.250	C3
47	235.000	C1
48	822.500	C3
49	329.000	C2
50	998.750	C3
51	940.000	C3
52	705.000	C2
53	458.250	C2
54	1116.250	C3



Cuadro 42. Clasificación de las aguas y problemas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. 2do muestreo

No.	Clasificación en base a la Conductividad eléctrica
1	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
2	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
3	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
4	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
5	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
6	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
7	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
8	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
9	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
10	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
11	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
12	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
13	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
14	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
15	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
16	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
17	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
18	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
19	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
20	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
21	C4 Aguas muy altamente salinas-Debe lavarse
22	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
23	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
24	C4 Aguas muy altamente salinas-Debe lavarse
25	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
26	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
27	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
28	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
29	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
30	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
31	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
32	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
33	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
34	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
35	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
36	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
37	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
38	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
39	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
40	C4 Aguas muy altamente salinas-Debe lavarse
41	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
42	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
43	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
44	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
45	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
46	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
47	C1 Agua de baja salinidad-Existe en condiciones normales de riego
48	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
49	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
50	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
51	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje
52	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
53	C2 Aguas de salinidad media-Necesita un moderado lavado
54	C3 Aguas altamente salinas-No utilizar en suelos sin drenaje

## 5.6 Índice de salinidad efectiva

Con este índice se conocen de una mejor manera los peligros de las sales que se encuentran en solución y pueden afectar a los cultivos. Toma en cuenta la precipitación de las sales menos solubles, como son el carbonato de calcio y de magnesio, así como el sulfato de calcio.

En el primer muestreo, la mayor cantidad son de clasificación buena, con 27 puntos que representan el 59%, 17 puntos son de clasificación condicionada que es el 37% y no recomendable 2 puntos que es el 4%, esto se muestra en el Cuadro 43.

En el segundo muestreo, la mayor cantidad de puntos son de clasificación buena, con un 48% de 26 puntos, la clasificación condicionada son 24 puntos representando el 44% y por último de clasificación no recomendable se tiene 4 puntos que representan el 7%, esto se aprecia en el Cuadro 44.

La mayor cantidad de puntos de ambos muestreos tienen una clasificación buena y condicionada, por lo que no representa peligro el uso de esta agua, debido al alto contenido de carbonatos y bicarbonatos en relación con el calcio y magnesio. Las aguas que tienen clasificación no recomendable, son aquellas de las lagunas altamente concentradas.

Cuadro 43. Clasificación de las aguas con base en la salinidad efectiva del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No. de muestras	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación Salinidad Efectiva
1	1.300	Buena
2	0.955	Buena
3	2.310	Buena
4	2.530	Buena
5	1.060	Buena
6	1.265	Buena
7	1.345	Buena
8	1.360	Buena
9	1.185	Buena
10	1.620	Buena
11	0.610	Buena
12	0.660	Buena
13	1.140	Buena
14	2.860	Buena
15	2.365	Buena
16	9.000	Condicionada
17	8.475	Condicionada
18	4.925	Condicionada
19	3.720	Condicionada
20	3.360	Condicionada
21	11.180	Condicionada
22	0.750	Buena
23	6.470	Condicionada
24	0.860	Buena
25	4.250	Condicionada
26	1.100	Buena
27	1.250	Buena
28	5.695	Condicionada
29	4.205	Condicionada
30	6.220	Condicionada
31	2.550	Buena
32	1.575	Buena
33	1.230	Buena
34	0.970	Buena
35	10.585	Condicionada
36	0.680	Buena
37	0.820	Buena
38	5.155	Condicionada
39	1.040	Buena
40	1.105	Buena
41	6.395	Condicionada
42	4.310	Condicionada
43	93.625	No recomendable
44	10.060	Condicionada
45	3.385	Condicionada
46	100.145	No recomendable

Cuadro 44. Clasificación de las aguas con base a la salinidad efectiva del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No. de muestras	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación Salinidad Efectiva
1	1.555	Buena
2	0.530	Buena
3	1.280	Buena
4	1.780	Buena
5	0.650	Buena
6	1.070	Buena
7	0.820	Buena
8	1.075	Buena
9	1.575	Buena
10	0.910	Buena
11	0.550	Buena
12	0.750	Buena
13	0.730	Buena
14	1.980	Buena
15	4.810	Condicionada
16	4.520	Condicionada
17	3.340	Condicionada
18	4.400	Condicionada
19	4.510	Condicionada
20	4.250	Condicionada
21	24.840	No recomendable
22	7.760	Condicionada
23	5.145	Condicionada
24	108.440	No recomendable
25	3.925	Condicionada
26	3.210	Condicionada
27	8.640	Condicionada
28	1.810	Buena
29	11.030	Condicionada
30	1.260	Buena
31	2.740	Buena
32	8.650	Condicionada
33	1.550	Buena
34	1.565	Buena
35	1.540	Buena
36	1.280	Buena
37	0.630	Buena
38	5.325	Condicionada
39	17.775	No recomendable
40	107.620	No recomendable
41	9.985	Condicionada
42	6.650	Condicionada
43	0.945	Buena
44	3.270	Condicionada
45	5.970	Condicionada
46	4.800	Condicionada
47	0.720	Buena
48	4.525	Condicionada
49	0.910	Buena
50	5.170	Condicionada
51	4.630	Condicionada
52	4.470	Condicionada
53	2.775	Buena
54	8.530	Condicionada

## **5.7 Índice de salinidad potencial**

Los cloruros y los sulfatos son las últimas sales que se quedan en solución y afectan a los cultivos cuando la humedad aprovechable disminuye considerablemente hasta llegar al 50%. Este índice precisamente evalúa este problema.

En el primer muestreo, el 76% de las aguas no tiene este problema, tienen una clasificación buena, esto es, 35 puntos, en la clasificación condicionada se tienen 9 puntos que son el 20% y la no recomendable, son las lagunas de Atexcac y Alchichica que representan el 4%, esto se aprecia en el Cuadro 45.

En el segundo muestreo, 37 estaciones son de clasificación buena que es el 69%, como clasificación condicionada se tienen 15 puntos que representan el 28% y como clasificación no recomendable se tiene nuevamente a las lagunas de Atexcac y Alchichica que representan el 3%, esto se aprecia en el Cuadro 46.

En los dos muestreos no existen problemas por los iones cloruros y sulfatos. Esto es en la gran mayoría de puntos, exceptuando, las lagunas cráter. La principal razón por lo que ocurre esto, es que la dilución de los manantiales y de nacimientos que aportan al sistema hidrográfico se ve reflejadas aguas abajo. En cambio, en las lagunas no existe ningún aporte, solamente el de las precipitaciones, pero estas son menores a las evaporaciones.

Cuadro 45. Índice de la salinidad potencial de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No. de muestras	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación Salinidad Potencial
1	1.362	Buena
2	0.872	Buena
3	1.511	Buena
4	2.450	Buena
5	1.057	Buena
6	1.271	Buena
7	1.427	Buena
8	1.200	Buena
9	1.237	Buena
10	1.507	Buena
11	0.602	Buena
12	0.661	Buena
13	1.145	Buena
14	2.399	Buena
15	1.938	Buena
16	7.337	Condicionada
17	6.428	Condicionada
18	4.408	Condicionada
19	2.556	Buena
20	2.513	Buena
21	9.778	Condicionada
22	0.447	Buena
23	5.205	Condicionada
24	0.817	Buena
25	2.900	Buena
26	1.116	Buena
27	1.182	Buena
28	2.750	Buena
29	2.427	Buena
30	2.350	Buena
31	1.983	Buena
32	1.494	Buena
33	0.953	Buena
34	0.973	Buena
35	5.638	Condicionada
36	0.679	Buena
37	0.729	Buena
38	1.758	Buena
39	0.829	Buena
40	0.700	Buena
41	5.778	Condicionada
42	3.783	Condicionada
43	95.968	No recomendable
44	10.292	Condicionada
45	2.471	Buena
46	96.236	No recomendable

Cuadro 46. Índice de la salinidad potencial de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No. de muestras	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación Salinidad Potencial
1	1.475	Buena
2	0.475	Buena
3	1.130	Buena
4	1.407	Buena
5	0.600	Buena
6	0.736	Buena
7	0.838	Buena
8	0.966	Buena
9	1.251	Buena
10	0.744	Buena
11	0.543	Buena
12	0.653	Buena
13	0.645	Buena
14	1.491	Buena
15	3.695	Condicionada
16	3.702	Condicionada
17	2.592	Buena
18	3.506	Condicionada
19	3.577	Condicionada
20	2.404	Buena
21	5.066	Condicionada
22	3.872	Condicionada
23	1.613	Buena
24	97.713	No recomendable
25	2.446	Buena
26	2.259	Buena
27	7.484	Condicionada
28	0.756	Buena
29	6.716	Condicionada
30	0.755	Buena
31	1.490	Buena
32	5.295	Condicionada
33	0.850	Buena
34	1.171	Buena
35	0.765	Buena
36	0.872	Buena
37	0.550	Buena
38	2.990	Buena
39	11.062	Condicionada
40	103.430	No recomendable
41	6.660	Condicionada
42	5.928	Condicionada
43	0.781	Buena
44	1.712	Buena
45	4.471	Condicionada
46	3.820	Condicionada
47	0.692	Buena
48	2.221	Buena
49	0.834	Buena
50	2.534	Buena
51	2.342	Buena
52	2.080	Buena
53	1.228	Buena
54	3.247	Condicionada

## 5.8 Clasificación de las aguas con base en la sodicidad

Esta clasificación esta relacionada directamente con la relación de Adsorción de sodio RAS. Los diagramas utilizados en función de la conductividad eléctrica y los tres tipos de RAS están hechos en base a la Figura 46, en el Cuadro 47 se muestran los iones determinados y el calculo del RAS por tres métodos para el primer muestreo.

En el primer muestreo, con el RAS original, el 91% de las estaciones son agua bajas en sodio con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. El 4.5% son agua medias en sodio y presenta problemas si no hay lavado y el 4.5% son aguas altas en sodio y se necesitan practicas especiales de manejo. En definitiva, en el primer muestreo, no existen problemas de sodicidad excepto en aguas de las lagunas de Atexcac y Alchichica (Cuadro 49).

En el primer muestreo, con el RAS<sub>aj</sub> el 78% son aguas bajas en sodio con poca probabilidad de que exista sodio intercambiable, el 13% de las muestras son agua medias en sodio, con problemas si no hay lavado, 4.5% son aguas altas en sodio con necesidad de prácticas especiales de manejo y, 4.5% son aguas muy altas en sodio, no recomendables para su uso, exceptuando cuando su salinidad es baja (Cuadro 49).

En el primer muestreo, con el RAS<sup>o</sup> el 87% de la estaciones son agua bajas en sodio con poca probabilidad de sodio intercambiable, el 9% son aguas medias en sodio y va a presentar problemas si no hay lavado y, el 4% son muy altas en sodio, el uso es incorrecto excepto cuando su salinidad es baja (Cuadro 49).

En definitiva, en el primer muestreo no existe problemas de sodicidad excepto en aguas de la laguna Alchichica y Atexcac.

En lo que respecta al segundo muestreo, con el RAS original, el 83% de las muestras son aguas bajas en sodio con poca probabilidad de que exista sodio intercambiable, el 7.5% son aguas medias en sodio y van a presentarse problemas si no hay lavado, el 2% son aguas altas en sodio que necesitan prácticas especiales de manejo y, el 7.5% son muy altas en sodio y necesita prácticas especiales de manejo (Cuadro 52).



En el segundo muestreo, con el  $RAS_{aj}$ , el 76% de las aguas son bajas en sodio con poca probabilidad de que exista sodio intercambiable, el 9% son aguas medias en sodio con problemas si no hay lavado, el 7.5% son altas en sodio y se necesita prácticas especiales de manejo y, el 7.5% son aguas muy altas en sodio y su uso es inadecuado, excepto cuando la salinidad es baja (Cuadro 52).

En el segundo muestreo, con el  $RAS^o$ , el 83% de las aguas son bajas en sodio con poca probabilidad de presentar sodio intercambiable, el 7.5% son medias en sodio con problemas si no hay lavado, el 2% son altas en sodio con necesidad de prácticas especiales de manejo y el 7.5% son muy altas en sodio y de uso inadecuado (Cuadro 52).

La mayoría de los puntos del segundo muestreo no tiene problemas de sodicidad, solamente las lagunas de Tecuitlapa, Preciosa, Atexcac, Alchichica y el Puente Villa Alta que presenta agua de uso inadecuado para riego.

En el primer muestreo, con el RAS original la mayor cantidad de aguas con 42 puntos, tienen la clasificación S1, esto representa el 91%, 2 puntos que representa el 4.5% tiene la clasificación S2, y también 2 puntos con la clasificación S4 representa el 4.5% (Cuadro 48). Con el  $RAS_{aj}$ , el 78% con 36 muestras tienen la clasificación S1, 6 puntos tienen la clasificación S2 que representa el 13%, 2 puntos que representa el 4.5% tiene la clasificación S3 y la clasificación S4 con 2 aguas que significan el 4.5% (Cuadro 48). El comportamiento del  $RAS^o$ , en donde la clasificación S1 es la mayor con 40 puntos que representa el 87%, S2 con 4 puntos representando el 9% y la clasificación S4 para las lagunas de Atexcac y Alchichica que representa el 4% (Cuadro 48).

El comportamiento del  $RAS_{aj}$ , en comparación con los anteriores es mayor en los mismos puntos. Esto es porque al RAS se le está añadiendo el efecto que provoca el carbonato de calcio. Los puntos en el primer muestreo: 4, 5, 10, 11, 12, 13 y 37 dan un Índice de Saturación negativo, lo que quiere decir que el carbonato de calcio se va a mantener en solución. Implica el tener cuidado con el resto de puntos porque el carbonato de calcio va a tender a precipitarse (Cuadro 47).

Cuadro 47. Cálculo del RAS por tres métodos de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac y del Índice de Saturación (IS) (1er muestreo).

No.	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	meq L <sup>-1</sup>											RAS original	PK <sub>2</sub> -PK <sub>c</sub>	pCa	p(Alk)	IS	pHc	RAS aj	HCO <sub>3</sub> /Ca	Ca°	RAS°
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma											
1	6.7	0.42	1.60	1.40	0.50	0.71	4.21	0.00	2.91	1.30	0.12	4.33	0.41	2.20	3.08	2.52	0.60	7.80	0.65	1.82	1.30	0.43	
2	7.0	0.26	1.00	1.00	0.10	0.37	2.47	0.00	1.51	0.70	0.34	2.55	0.10	2.20	3.30	2.80	0.10	8.30	0.11	1.51	1.42	0.09	
3	6.8	0.47	1.40	1.04	1.50	0.81	4.75	0.00	3.10	1.20	0.62	4.92	1.36	2.20	3.14	2.49	0.57	7.83	2.13	2.21	1.15	1.43	
4	7.0	0.40	1.40	1.50	0.40	0.63	3.93	0.00	0.80	1.65	1.60	4.05	0.33	2.20	3.14	3.08	-0.02	8.42	0.33	0.57	2.85	0.27	
5	8.1	0.19	0.60	1.00	0.30	0.28	2.18	0.00	1.12	1.00	0.11	2.23	0.34	2.18	3.52	2.95	-0.25	8.65	0.25	1.87	1.21	0.29	
6	7.2	0.26	1.00	1.00	0.10	0.42	2.52	0.00	1.25	1.20	0.14	2.59	0.10	2.20	3.30	2.90	0.00	8.40	0.10	1.25	1.61	0.09	
7	7.0	0.33	1.10	1.90	0.25	0.23	3.48	0.00	2.13	1.40	0.05	3.58	0.20	2.20	3.26	2.67	0.27	8.13	0.26	1.94	1.22	0.20	
8	7.1	0.46	1.10	3.00	0.50	0.28	4.88	0.00	3.52	0.90	0.60	5.02	0.35	2.20	3.26	2.45	0.49	7.91	0.52	3.20	0.90	0.36	
9	8.0	0.25	0.80	1.50	0.20	0.19	2.69	0.00	1.50	1.20	0.07	2.77	0.19	2.20	3.38	2.80	0.02	8.38	0.19	1.88	1.23	0.17	
10	8.5	0.34	1.00	0.40	0.70	0.62	2.72	0.00	1.10	1.30	0.41	2.81	0.84	2.20	3.30	2.96	-0.06	8.46	0.79	1.10	1.80	0.67	
11	7.5	0.15	0.70	0.80	0.12	0.05	1.67	0.00	1.06	0.55	0.10	1.71	0.14	2.12	3.44	2.98	-0.14	8.54	0.12	1.51	1.38	0.11	
12	8.7	0.13	0.60	0.50	0.11	0.05	1.26	0.00	0.58	0.60	0.12	1.30	0.15	2.10	3.52	3.24	-0.46	8.86	0.08	0.97	1.86	0.10	
13	8.1	0.18	0.60	1.10	0.14	0.05	1.89	0.00	0.75	1.10	0.09	1.94	0.15	2.17	3.52	3.10	-0.39	8.79	0.09	1.25	1.58	0.12	
14	7.9	0.45	1.30	1.00	1.75	0.38	4.43	0.00	1.57	1.80	1.20	4.57	1.63	2.20	3.18	2.79	0.23	8.17	2.01	1.21	1.71	1.50	
15	8.5	0.34	1.00	1.80	0.60	0.21	3.61	0.00	1.24	1.60	0.68	3.52	0.51	2.20	3.30	2.90	0.00	8.40	0.51	1.24	1.65	0.46	
16	7.9	1.50	3.00	3.40	8.00	0.98	15.38	0.00	6.38	5.30	4.07	15.75	4.47	2.30	2.80	2.18	1.12	7.28	9.48	2.13	1.31	5.21	
17	8.0	1.36	2.50	2.90	7.60	0.88	13.88	0.00	5.85	4.50	3.86	14.21	4.63	2.30	2.90	2.22	0.99	7.42	9.18	2.34	1.21	5.30	
18	7.1	0.78	1.60	1.63	4.05	0.48	7.76	0.00	2.83	3.70	1.42	7.95	3.19	2.26	3.08	2.53	0.52	7.88	4.85	1.77	1.38	3.30	
19	8.0	0.55	0.55	1.50	3.25	0.47	5.77	0.00	2.82	2.00	1.11	5.93	3.21	2.20	3.56	2.54	0.10	8.30	3.54	5.13	0.67	3.12	
20	8.0	0.59	1.80	1.10	2.90	0.46	6.26	0.00	3.39	2.00	1.03	6.42	2.41	2.20	3.04	2.46	0.70	7.70	4.09	1.88	1.30	2.65	
21	7.7	1.41	1.70	1.40	10.60	0.58	14.28	0.00	4.42	9.40	0.76	14.58	8.51	2.30	3.06	2.36	0.68	7.72	14.32	2.60	1.14	9.41	
22	7.5	0.31	0.90	1.20	0.50	0.25	2.85	0.00	2.30	0.24	0.41	2.95	0.49	2.20	3.34	2.64	0.22	8.18	0.60	2.56	1.01	0.48	
23	8.0	0.91	1.70	1.60	6.00	0.47	9.77	0.00	3.81	4.80	0.81	9.42	4.67	2.30	3.06	2.42	0.62	7.78	7.57	2.24	1.20	5.07	
24	7.7	0.24	1.10	1.20	0.10	0.09	2.49	0.00	1.63	0.70	0.23	2.56	0.09	2.20	3.26	2.77	0.17	8.23	0.11	1.48	1.44	0.09	
25	8.0	0.69	1.50	1.20	3.70	0.55	6.95	0.00	3.66	2.30	1.20	7.16	3.18	2.22	3.10	2.43	0.65	7.75	5.24	2.44	1.11	3.44	
26	7.9	0.25	1.30	0.80	0.25	0.05	2.40	0.00	1.14	0.90	0.43	2.47	0.24	2.20	3.18	2.94	0.08	8.32	0.26	0.88	2.06	0.21	
27	7.8	0.37	1.40	1.70	0.25	0.05	3.40	0.00	2.15	1.00	0.36	3.51	0.20	2.20	3.14	2.67	0.39	8.01	0.28	1.54	1.44	0.20	
28	7.6	0.89	1.60	1.90	5.15	0.55	9.20	0.00	5.57	2.10	1.30	8.97	3.89	2.30	3.08	2.24	0.78	7.62	6.92	3.48	0.89	4.36	
29	7.9	0.69	1.20	1.30	3.65	0.56	6.71	0.00	3.99	1.90	1.05	6.94	3.26	2.08	3.22	2.40	0.70	7.70	5.56	3.33	0.90	3.48	
30	7.4	1.03	1.60	2.00	5.65	0.57	9.82	0.00	7.04	1.70	1.30	10.04	4.21	2.30	3.08	2.15	0.87	7.53	7.88	4.40	0.78	4.80	
31	7.6	0.69	1.20	3.40	2.10	0.34	7.04	0.00	4.49	1.60	0.77	6.86	1.38	2.24	3.22	2.35	0.59	7.81	2.21	3.74	0.84	1.44	
32	7.6	0.47	1.10	1.60	1.05	0.39	4.14	0.00	2.56	1.30	0.39	4.25	0.90	2.20	3.26	2.59	0.35	8.05	1.22	2.33	1.11	0.90	
33	7.5	0.33	1.30	1.70	0.15	0.05	3.20	0.00	1.97	0.60	0.71	3.28	0.12	2.20	3.18	2.71	0.31	8.09	0.16	1.52	1.44	0.12	
34	7.3	0.36	1.50	1.70	0.18	0.05	3.43	0.00	2.46	0.90	0.15	3.51	0.14	2.20	3.10	2.61	0.49	7.91	0.21	1.64	1.38	0.15	
35	6.9	1.79	5.56	2.30	10.20	0.39	18.45	0.00	8.90	2.20	6.88	17.98	5.15	2.36	2.54	2.06	1.44	6.96	12.55	1.60	1.62	7.29	
36	7.0	0.32	1.00	1.80	0.18	0.05	3.03	0.00	2.35	0.60	0.16	3.11	0.15	2.20	3.30	2.63	0.27	8.13	0.19	2.35	1.07	0.15	
37	7.1	0.14	0.60	0.75	0.10	0.05	1.50	0.00	0.68	0.60	0.26	1.54	0.12	2.10	3.52	3.16	-0.38	8.78	0.08	1.13	1.68	0.09	
38	6.9	0.84	0.84	2.00	4.48	0.68	8.00	0.00	5.88	1.60	0.32	7.80	3.76	2.27	3.36	2.21	0.56	7.84	5.86	7.00	0.56	3.96	
39	7.2	0.33	1.40	0.90	0.52	0.32	3.14	0.00	2.10	0.70	0.26	3.06	0.48	2.20	3.14	2.68	0.38	8.02	0.67	1.50	1.45	0.48	
40	7.4	0.38	1.50	1.10	0.82	0.29	3.71	0.00	3.00	0.60	0.20	3.80	0.72	2.20	3.10	2.50	0.60	7.80	1.15	2.00	1.21	0.76	
41	6.9	2.07	8.50	11.30	2.85	0.25	22.90	0.00	16.50	4.50	2.56	23.56	0.91	2.40	2.38	1.77	1.86	6.55	2.59	1.94	1.44	1.13	
42	7.0	1.71	7.80	6.00	2.05	0.17	16.02	0.00	11.71	2.70	2.17	16.58	0.78	2.32	2.41	1.93	1.74	6.66	2.14	1.50	1.67	1.05	
43	8.2	11.22	2.10	44.70	65.72	2.21	114.73	16.00	5.10	95.00	1.94	118.04	13.59	2.50	2.98	1.68	1.24	7.16	30.46	2.43	1.50	13.67	
44	8.5	2.20	1.17	12.60	7.90	0.45	22.12	3.04	9.02	9.70	1.18	22.94	3.01	2.40	3.23	1.92	0.85	7.55	5.57	7.71	0.59	3.08	
45	8.2	0.87	0.87	4.70	3.18	0.21	8.96	2.80	3.87	2.30	0.34	9.31	1.91	2.30	3.35	2.17	0.58	7.82	3.01	4.45	0.76	1.93	
46	8.7	12.40	1.60	34.80	87.56	5.69	129.65	23.00	6.50	89.00	14.47	132.97	20.52	2.50	3.08	1.51	1.31	7.09	47.41	4.06	1.06	20.68	

Cuadro 48. Clasificación de las aguas por tres métodos del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No.	Clasificación		
	RAS original	RAS ajustado	RAS corregido
1	S1	S1	S1
2	S1	S1	S1
3	S1	S1	S1
4	S1	S1	S1
5	S1	S1	S1
6	S1	S1	S1
7	S1	S1	S1
8	S1	S1	S1
9	S1	S1	S1
10	S1	S1	S1
11	S1	S1	S1
12	S1	S1	S1
13	S1	S1	S1
14	S1	S1	S1
15	S1	S1	S1
16	S1	S2	S2
17	S1	S2	S2
18	S1	S1	S1
19	S1	S1	S1
20	S1	S1	S1
21	S2	S3	S2
22	S1	S1	S1
23	S1	S2	S1
24	S1	S1	S1
25	S1	S1	S1
26	S1	S1	S1
27	S1	S1	S1
28	S1	S2	S1
29	S1	S1	S1
30	S1	S2	S1
31	S1	S1	S1
32	S1	S1	S1
33	S1	S1	S1
34	S1	S1	S1
35	S2	S3	S2
36	S1	S1	S1
37	S1	S1	S1
38	S1	S1	S1
39	S1	S1	S1
40	S1	S1	S1
41	S1	S1	S1
42	S1	S1	S1
43	S4	S4	S4
44	S1	S2	S1
45	S1	S1	S1
46	S4	S4	S4

Cuadro 49. Clasificación de las aguas y problemas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No. de muestras	Clasificación		
	RAS original	RAS ajustado	RAS corregido
1	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
2	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
3	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
4	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
5	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
6	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
7	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
8	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
9	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
10	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
11	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
12	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
13	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
14	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
15	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
16	Poca probabilidad de PSI	Presenta problemas si no hay lavado	Presenta problemas si no hay lavado
17	Poca probabilidad de PSI	Presenta problemas si no hay lavado	Presenta problemas si no hay lavado
18	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
19	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
20	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
21	Presenta problemas si no hay lavado	Necesita prácticas especiales de manejo	Presenta problemas si no hay lavado
22	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
23	Poca probabilidad de PSI	Presenta problemas si no hay lavado	Poca probabilidad de PSI
24	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
25	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
26	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
27	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
28	Poca probabilidad de PSI	Presenta problemas si no hay lavado	Poca probabilidad de PSI
29	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
30	Poca probabilidad de PSI	Presenta problemas si no hay lavado	Poca probabilidad de PSI
31	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
32	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
33	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
34	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
35	Presenta problemas si no hay lavado	Necesita prácticas especiales de manejo	Presenta problemas si no hay lavado
36	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
37	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
38	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
39	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
40	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
41	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
42	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
43	Inadecuada excepto cuando es su salinidad baja	Inadecuada excepto cuando es su salinidad baja	Inadecuada excepto cuando es su salinidad baja
44	Poca probabilidad de PSI	Presenta problemas si no hay lavado	Poca probabilidad de PSI
45	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
46	Inadecuada excepto cuando es su salinidad baja	Inadecuada excepto cuando es su salinidad baja	Inadecuada excepto cuando es su salinidad baja

En el segundo muestreo, aplicando el RAS original, se tiene que el 83% que representan 45 muestras tienen clasificación S1, 4 puntos tienen la clasificación S2 que significa 7.5%, 1 punto con el 2% tiene clasificación S3 y 4 muestras tienen la clasificación S4 con el 7.5% (Cuadro 51).

En el estudio aplicando la teoría del  $RAS_{aj}$ , en el segundo muestreo, se tiene 41 puntos con la clasificación S1 que representa el 76%, la clasificación S2 tiene 5 puntos con un valor del 9%, la clasificación S3 tiene 4 puntos con el 7.5% y, S4 tiene 4 puntos que representa el 7.5% del total (Cuadro 51).

Aplicando la teoría del  $RAS^o$ , se tiene en el segundo muestreo, con la clasificación S1 45 puntos con el 83% de representatividad, la clasificación S2 tiene 4 puntos con el 7.5%, la clasificación S3 con 1 punto que representa el 2% y, S4 con 4 puntos que representa el 7.5% (Cuadro 51).

El RAS original y el  $RAS^o$  tienen igual comportamiento exceptuando algunos puntos en donde cambia la clasificación de la sodificación de los suelos, pero la gran mayoría de aguas no presenta problemas solamente las lagunas altamente concentradas.

Los puntos en el segundo muestreo: 2, 3, 8, 10, 11, 12, 13, 22 y 37 va a tener el carbonato de calcio en solución, esto quiere decir que el resto de puntos va a precipitar esta sal, por lo que hay que tener cuidado y mas si el riego va a ser por goteo, puesto que va a ocasionar su taponamiento (Cuadro 50).

Cuadro 50. Cálculo del RAS por tres métodos de muestras de agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac y del Índice de Saturación (IS) (2do muestreo).

No.	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	meq L <sup>-1</sup>										RAS original	PK <sub>c</sub> -PK <sub>e</sub>	pCa	p(Alk)	IS	pHc	RAS aj	HCO <sub>3</sub> /Ca	Ca°	RAS°
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma										
1	6.8	0.35	1.90	0.90	0.20	0.46	3.46	0.00	1.84	1.40	0.15	3.39	0.17	2.20	3.02	2.73	0.45	7.95	0.24	0.97	1.96	0.17
2	7.6	0.14	0.60	0.45	0.05	0.23	1.33	0.00	0.80	0.45	0.05	1.30	0.07	2.10	3.52	3.08	-0.30	8.70	0.05	1.33	1.51	0.05
3	8.2	0.23	0.95	0.70	0.33	0.25	2.23	0.00	0.92	1.00	0.26	2.18	0.36	2.20	3.32	3.03	-0.15	8.55	0.31	0.97	1.91	0.29
4	8.6	0.32	1.20	0.60	0.91	0.43	3.14	0.20	1.16	1.10	0.61	3.07	0.96	2.20	3.22	1.86	1.12	7.28	2.04	0.97	1.95	0.81
5	8.9	0.23	0.80	0.90	0.28	0.20	2.18	0.50	1.03	0.50	0.20	2.23	0.30	2.20	3.38	2.79	0.03	8.37	0.31	1.29	1.57	0.25
6	8.5	0.42	1.10	1.95	0.95	0.12	4.12	0.17	3.09	0.70	0.07	4.03	0.77	2.20	3.26	2.47	0.47	7.93	1.13	2.81	0.97	0.79
7	9.0	0.27	0.95	0.98	0.60	0.09	2.62	0.15	1.65	0.80	0.08	2.68	0.61	2.20	3.32	2.74	0.14	8.26	0.70	1.74	1.30	0.56
8	9.3	0.24	0.90	0.99	0.40	0.06	2.35	0.25	1.02	0.90	0.13	2.30	0.41	2.20	3.34	2.89	-0.03	8.43	0.40	1.13	1.73	0.34
9	7.0	0.34	1.30	1.20	0.68	0.16	3.34	0.00	1.76	1.00	0.50	3.26	0.61	2.20	3.18	2.75	0.27	8.13	0.77	1.35	1.56	0.58
10	8.4	0.20	0.70	0.80	0.40	0.11	2.01	0.20	0.90	0.62	0.25	1.97	0.46	2.18	3.44	2.96	-0.18	8.58	0.38	1.29	1.56	0.37
11	8.3	0.16	0.70	0.56	0.25	0.02	1.53	0.05	0.93	0.50	0.09	1.57	0.31	2.10	3.44	3.01	-0.15	8.55	0.27	1.33	1.51	0.25
12	8.5	0.16	0.70	0.54	0.30	0.02	1.56	0.08	0.73	0.60	0.11	1.52	0.38	2.11	3.44	3.08	-0.22	8.62	0.30	1.04	1.79	0.28
13	8.4	0.16	0.70	0.53	0.30	0.04	1.57	0.10	0.74	0.60	0.09	1.53	0.38	2.11	3.44	3.06	-0.21	8.61	0.30	1.06	1.77	0.28
14	8.1	0.47	1.37	1.50	1.55	0.27	4.69	0.00	2.71	1.10	0.78	4.59	1.29	2.20	3.15	2.56	0.49	7.91	1.93	1.98	1.23	1.33
15	8.6	0.79	1.80	1.20	4.31	0.50	7.81	0.12	3.03	2.90	1.59	7.64	3.52	2.27	3.04	2.49	0.61	7.79	5.66	1.68	1.44	3.75
16	8.6	0.79	1.82	1.31	4.00	0.52	7.65	0.15	3.17	2.90	1.60	7.82	3.20	2.26	3.04	2.47	0.64	7.76	5.24	1.74	1.40	3.44
17	8.7	0.65	2.30	2.00	1.84	0.28	6.42	0.40	2.68	2.00	1.18	6.26	1.25	2.21	2.94	2.49	0.76	7.64	2.21	1.17	1.81	1.33
18	6.6	1.58	10.78	3.20	1.35	0.23	15.56	0.00	11.16	3.00	1.01	15.17	0.51	2.31	2.27	1.95	1.87	6.53	1.47	1.04	2.12	0.83
19	6.5	1.69	11.80	3.22	1.40	0.24	16.66	0.00	12.15	3.10	0.95	16.20	0.51	2.33	2.23	1.91	1.93	6.47	1.50	1.03	2.15	0.85
20	7.4	1.13	1.49	5.40	3.75	0.50	11.14	1.20	6.95	2.10	0.61	10.86	2.02	2.30	3.10	2.09	0.90	7.50	3.84	4.66	0.75	2.14
21	8.8	2.71	0.60	1.30	23.00	1.84	26.74	3.10	17.14	4.30	1.53	26.07	23.60	2.40	3.52	1.70	0.79	7.62	42.12	28.57	0.25	26.14
22	7.9	0.85	0.40	0.20	7.08	0.68	8.36	0.00	3.61	3.20	1.34	8.15	12.93	2.28	3.70	2.44	-0.02	8.42	12.63	9.03	0.48	12.15
23	7.5	0.62	0.60	0.40	4.87	0.28	6.15	0.00	3.89	1.10	1.03	6.02	6.89	2.20	3.52	2.41	0.27	8.13	8.74	6.48	0.58	6.96
24	8.1	12.18	1.30	33.40	81.06	4.80	120.56	0.00	12.12	90.00	15.43	117.55	19.46	2.50	3.18	1.92	0.81	7.60	35.13	9.32	0.62	19.66
25	7.0	0.82	2.50	1.70	3.58	0.35	8.13	0.00	4.57	1.50	1.89	7.96	2.47	2.29	2.90	2.34	0.87	7.53	4.61	1.83	1.36	2.89
26	7.2	0.76	2.20	2.50	2.53	0.33	7.56	0.00	4.35	1.50	1.52	7.37	1.65	2.26	2.96	2.37	0.81	7.59	2.99	1.98	1.28	1.84
27	7.3	1.38	3.40	1.60	8.25	0.39	13.64	0.00	5.58	7.20	0.57	13.35	5.22	2.30	2.76	2.24	1.10	7.30	10.95	1.64	1.55	6.58
28	7.2	0.40	1.05	1.10	1.62	0.19	3.96	0.00	3.05	0.70	0.11	3.86	1.56	2.20	3.28	2.50	0.43	7.98	2.23	2.90	0.95	1.60
29	7.3	1.53	2.10	2.00	10.65	0.38	15.13	0.00	7.78	6.40	0.63	14.81	7.44	2.30	2.98	2.11	1.01	7.39	14.94	3.70	0.91	8.83
30	7.6	0.33	0.90	1.10	1.12	0.14	3.26	0.00	2.37	0.70	0.11	3.18	1.12	2.20	3.34	2.63	0.23	8.17	1.38	2.63	1.00	1.09
31	7.2	0.49	0.95	1.20	2.50	0.24	4.89	0.00	2.91	1.10	0.78	4.79	2.41	2.20	3.32	2.52	0.36	8.04	3.28	3.06	0.93	2.42
32	7.3	1.53	6.45	1.80	6.60	0.25	15.10	0.00	6.43	2.30	5.99	14.72	3.25	2.30	2.48	2.18	1.44	6.96	7.94	1.00	2.16	4.69
33	7.4	0.34	0.80	0.95	1.40	0.15	3.30	0.00	2.48	0.80	0.10	3.38	1.50	2.20	3.38	2.60	0.22	8.18	1.82	3.10	0.90	1.46
34	7.3	0.41	1.10	1.40	1.39	0.18	4.07	0.00	2.74	1.10	0.14	3.98	1.24	2.20	3.26	2.55	0.39	8.01	1.73	2.49	1.05	1.26
35	7.0	0.39	1.05	1.25	1.38	0.16	3.84	0.00	2.91	0.70	0.13	3.74	1.29	2.20	3.28	2.52	0.40	8.00	1.80	2.77	0.98	1.31
36	8.0	0.33	0.85	1.05	1.11	0.17	3.18	0.00	2.32	0.80	0.14	3.26	1.14	2.20	3.36	2.64	0.20	8.20	1.37	2.73	0.98	1.10
37	8.1	0.12	0.30	0.40	0.46	0.02	1.18	0.00	0.55	0.50	0.10	1.15	0.78	2.10	3.80	3.26	-0.76	9.16	0.19	1.83	1.21	0.51
38	8.3	0.79	1.20	1.30	5.21	0.12	7.83	0.12	4.59	2.80	0.38	7.89	4.66	2.29	3.22	2.33	0.57	7.84	7.29	3.83	0.83	5.05
39	8.4	2.00	0.80	1.20	17.45	0.33	19.78	0.20	6.97	10.00	2.12	19.29	17.45	2.39	3.38	2.14	0.49	7.91	25.98	8.71	0.54	18.73
40	8.4	11.16	1.20	45.50	61.66	1.95	110.31	0.20	2.49	102.00	2.86	107.55	12.76	2.50	3.22	2.56	0.12	8.28	14.27	2.08	1.66	12.70
41	7.1	1.88	8.17	8.50	1.85	0.09	18.61	0.00	8.62	3.80	5.72	18.14	0.64	2.37	2.39	2.07	1.57	6.83	1.65	1.06	2.14	0.80
42	7.0	2.06	8.65	9.10	1.95	0.15	19.85	0.00	13.20	4.70	2.46	20.36	0.65	2.39	2.37	1.87	1.77	6.63	1.81	1.53	1.69	0.84
43	7.5	0.32	1.10	1.00	0.74	0.21	3.05	0.00	2.27	0.70	0.16	3.13	0.72	2.20	3.26	2.65	0.29	8.11	0.93	2.06	1.17	0.71
44	7.4	0.73	1.70	2.10	2.92	0.35	7.07	0.00	5.33	1.50	0.42	7.25	2.12	2.24	3.06	2.27	0.84	7.56	3.89	3.14	0.94	2.37
45	7.3	1.00	2.20	1.70	5.65	0.32	9.87	0.00	4.61	3.90	1.14	9.65	4.05	2.30	2.96	2.34	0.80	7.60	7.29	2.10	1.27	4.64
46	7.3	0.88	1.90	2.00	4.50	0.30	8.70	0.00	4.13	3.30	1.04	8.47	3.22	2.30	3.02	2.39	0.69	7.71	5.46	2.17	1.23	3.54
47	7.3	0.24	0.95	0.70	0.59	0.02	2.26	0.00	1.54	0.60	0.18	2.32	0.65	2.20	3.32	2.79	0.09	8.31	0.71	1.62	1.36	0.58
48	7.3	0.82	1.60	2.00	4.15	0.38	8.13	0.00	5.08	1.60	1.24	7.92	3.09	2.29	3.08	2.29	0.74	7.66	5.38	3.18	0.94	3.42
49	7.1	0.33	1.10	1.15	0.85	0.06	3.16	0.00	2.28	0.70	0.27	3.25	0.80	2.20	3.26	2.64	0.30	8.10	1.04	2.07	1.17	0.79
50	7.6	1.00	2.60	2.10	4.85	0.32	9.87	0.00	6.66	2.10	0.87	9.63	3.16	2.30	2.88	2.17	1.05	7.35	6.50	2.56	1.11	3.83
51	7.4	0.94	2.40	2.05	4.16	0.47	9.08	0.00	6.40	1.80	1.08	9.28	2.79	2.30	2.92	2.18	1.00	7.40	5.58	2.67	1.07	3.33
52	7.5	0.71	1.20	1.30	4.16	0.31	6.97	0.00	4.24	1.60	0.96	6.80	3.72	2.23	3.22	2.38	0.57	7.83	5.85	3.53	0.87	4.00
53	7.5	0.46	0.80	0.95	2.54	0.24	4.53	0.00	2.99	1.05	0.36	4.40	2.72	2.20	3.38	2.50	0.32	8.08	3.58	3.74	0.81	2.71
54	9.3	1.12	1.10	1.40	8.02	0.51	11.03	0.20	6.39	2.12	2.25	10.96	7.17	2.30	3.26	2.17	0.67	7.73	11.97	5.81	0.66	7.90

Cuadro 51. Clasificación de las aguas por tres métodos del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	Clasificación		
	RAS	RAS	RAS
	original	ajustado	corregido
1	S1	S1	S1
2	S1	S1	S1
3	S1	S1	S1
4	S1	S1	S1
5	S1	S1	S1
6	S1	S1	S1
7	S1	S1	S1
8	S1	S1	S1
9	S1	S1	S1
10	S1	S1	S1
11	S1	S1	S1
12	S1	S1	S1
13	S1	S1	S1
14	S1	S1	S1
15	S1	S1	S1
16	S1	S1	S1
17	S1	S1	S1
18	S1	S1	S1
19	S1	S1	S1
20	S1	S1	S1
21	S4	S4	S4
22	S3	S3	S3
23	S2	S2	S2
24	S4	S4	S4
25	S1	S1	S1
26	S1	S1	S1
27	S2	S3	S2
28	S1	S1	S1
29	S2	S3	S2
30	S1	S1	S1
31	S1	S1	S1
32	S1	S2	S1
33	S1	S1	S1
34	S1	S1	S1
35	S1	S1	S1
36	S1	S1	S1
37	S1	S1	S1
38	S1	S2	S1
39	S4	S4	S4
40	S4	S4	S4
41	S1	S1	S1
42	S1	S1	S1
43	S1	S1	S1
44	S1	S1	S1
45	S1	S2	S1
46	S1	S1	S1
47	S1	S1	S1
48	S1	S1	S1
49	S1	S1	S1
50	S1	S2	S1
51	S1	S1	S1
52	S1	S1	S1
53	S1	S1	S1
54	S2	S3	S2

Cuadro 52. Clasificación de las aguas y problemas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	Clasificación		
	RAS original	RAS ajustado	RAS corregido
1	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
2	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
3	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
4	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
5	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
6	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
7	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
8	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
9	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
10	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
11	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
12	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
13	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
14	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
15	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
16	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
17	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
18	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
19	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
20	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
21	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja
22	Necesita prácticas especiales de manejo	Necesita prácticas especiales de manejo	Necesita prácticas especiales de manejo
23	Presenta problemas si no hay lavado	Presenta problemas si no hay lavado	Presenta problemas si no hay lavado
24	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja
25	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
26	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
27	Presenta problemas si no hay lavado	Necesita prácticas especiales de manejo	Presenta problemas si no hay lavado
28	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
29	Presenta problemas si no hay lavado	Necesita prácticas especiales de manejo	Presenta problemas si no hay lavado
30	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
31	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
32	Poca probabilidad de PSI	Presenta problemas si no hay lavado	Poca probabilidad de PSI
33	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
34	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
35	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
36	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
37	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
38	Poca probabilidad de PSI	Presenta problemas si no hay lavado	Poca probabilidad de PSI
39	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja
40	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja	Inadecuada excepto cuando su salinidad es baja
41	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
42	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
43	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
44	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
45	Poca probabilidad de PSI	Presenta problemas si no hay lavado	Poca probabilidad de PSI
46	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
47	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
48	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
49	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
50	Poca probabilidad de PSI	Presenta problemas si no hay lavado	Poca probabilidad de PSI
51	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
52	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
53	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI	Poca probabilidad de PSI
54	Presenta problemas si no hay lavado	Necesita prácticas especiales de manejo	Presenta problemas si no hay lavado



### **5.8.1 Porcentaje de sodio posible**

En el primer muestreo, el 59% de las aguas tienen clasificación buena y el 41% son condicionadas, esto quiere decir que hay que estudiar más a detalle los tipos de cultivos y suelos que van a ser regados con las mismas, esto se aprecia en el Cuadro 53.

En el segundo muestreo, el 44% de las estaciones tiene una clasificación buena y 56% son condicionadas, esto se observa en el Cuadro 54.

El signo negativo de porcentaje de sodio posible quiere decir que existe mayor cantidad de bicarbonatos en relación con calcio, magnesio y sodio. En efecto, al observar el comportamiento de las aguas en los dos muestreos, es claro notar que se tratan de aguas bicarbonatadas.

Cuadro 53. Porcentaje de sodio posible de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo)

No. de muestras	Porcentaje de Na posible	Clasificación
1	-0.820	Buena
2	-0.244	Buena
3	-10.714	Buena
4	0.333	Buena
5	-1.364	Buena
6	-0.667	Buena
7	-0.450	Buena
8	-0.543	Buena
9	-0.500	Buena
10	3.889	Condicionada
11	-0.455	Buena
12	1.467	Condicionada
13	35.000	Condicionada
14	1.182	Condicionada
15	0.714	Condicionada
16	0.336	Buena
17	0.407	Buena
18	0.754	Condicionada
19	1.248	Condicionada
20	1.813	Condicionada
21	0.875	Condicionada
22	-0.625	Buena
23	0.801	Condicionada
24	-0.244	Buena
25	1.623	Condicionada
26	0.694	Condicionada
27	-0.769	Buena
28	0.886	Condicionada
29	1.867	Condicionada
30	0.964	Condicionada
31	0.545	Condicionada
32	4.773	Condicionada
33	-0.361	Buena
34	-0.275	Buena
35	0.507	Condicionada
36	-0.175	Buena
37	-20.000	Buena
38	1.143	Condicionada
39	-2.241	Buena
40	-1.371	Buena
41	0.118	Buena
42	0.244	Buena
43	0.023	Buena
44	0.089	Buena
45	0.348	Buena
46	0.029	Buena

Cuadro 54. Porcentaje de sodio posible de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No. de muestras	Porcentaje de Na posible	Clasificación
1	0.833	Condicionada
2	-0.282	Buena
3	1.264	Condicionada
4	2.358	Condicionada
5	-0.586	Buena
6	-3.089	Buena
7	-2.290	Buena
8	15.385	Condicionada
9	1.910	Condicionada
10	-5.000	Buena
11	-1.786	Buena
12	5.769	Condicionada
13	15.789	Condicionada
14	1.574	Condicionada
15	1.128	Condicionada
16	1.070	Condicionada
17	0.634	Condicionada
18	0.343	Buena
19	0.337	Buena
20	0.276	Buena
21	2.242	Condicionada
22	-3.946	Buena
23	-3.629	Buena
24	0.030	Buena
25	0.891	Condicionada
26	0.606	Condicionada
27	0.749	Condicionada
28	-7.431	Buena
29	0.682	Condicionada
30	-4.706	Buena
31	2.404	Condicionada
32	0.555	Condicionada
33	-4.000	Buena
34	4.542	Condicionada
35	-10.222	Buena
36	-3.645	Buena
37	-6.970	Buena
38	1.597	Condicionada
39	1.198	Condicionada
40	0.022	Buena
41	0.121	Buena
42	0.148	Buena
43	-1.721	Buena
44	1.167	Condicionada
45	0.785	Condicionada
46	0.665	Condicionada
47	-3.333	Buena
48	0.861	Condicionada
49	-4.198	Buena
50	0.792	Condicionada
51	0.919	Condicionada
52	1.757	Condicionada
53	11.390	Condicionada
54	1.398	Condicionada

### 5.8.2 Porcentaje de sodio intercambiable (XNa)

En el primer muestreo, el 41% de las aguas tendrá poca probabilidad de generar suelos sódicos, en tanto que la mayor cantidad de aguas (59%) tienen probabilidad de formar suelos sódicos, esto se aprecia en el Cuadro 55.

En el segundo muestreo, el 13% de las aguas no provocará suelos sódicos y, al igual que el primer muestreo, el resto de aguas (87%) pueden causar suelos sódicos, esto se aprecia en el cuadro 56.

Los manantiales y nacimientos del río Zahuapan y Atoyac tienen baja concentración de sales, en sus orígenes, pero conforme se van desarrollando los cauces aguas abajo, las aportaciones de los diferentes afluentes de un sinnúmero de pequeñas poblaciones, hace que las sales tiendan a aumentar, en especial de sodio, que causa serios problemas en los cultivos y a los suelos. La ecuación siguiente se utilizó para predecir el porcentaje de sodio intercambiable considerando la precipitación del  $\text{CaCO}_3$ .

$$PSI = 2RAS \left[ + \left( 4 - pH_c \right) \right]$$

Cuadro 55. Efecto posible del porcentaje de sodio intercambiable de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No. de muestras	Porcentaje de XNa intercambiable	Clasificación
1	14.286	No hay problema de suelos sódicos
2	4.762	No hay problema de suelos sódicos
3	38.071	Probabilidad de suelos sódicos
4	12.121	No hay problema de suelos sódicos
5	15.789	Probabilidad de suelos sódicos
6	4.762	No hay problema de suelos sódicos
7	7.692	No hay problema de suelos sódicos
8	10.870	No hay problema de suelos sódicos
9	8.000	No hay problema de suelos sódicos
10	33.333	Probabilidad de suelos sódicos
11	7.407	No hay problema de suelos sódicos
12	9.091	No hay problema de suelos sódicos
13	7.609	No hay problema de suelos sódicos
14	43.210	Probabilidad de suelos sódicos
15	17.647	Probabilidad de suelos sódicos
16	55.556	Probabilidad de suelos sódicos
17	58.462	Probabilidad de suelos sódicos
18	55.632	Probabilidad de suelos sódicos
19	61.321	Probabilidad de suelos sódicos
20	50.000	Probabilidad de suelos sódicos
21	77.372	Probabilidad de suelos sódicos
22	19.231	Probabilidad de suelos sódicos
23	64.516	Probabilidad de suelos sódicos
24	4.167	No hay problema de suelos sódicos
25	57.813	Probabilidad de suelos sódicos
26	10.638	No hay problema de suelos sódicos
27	7.463	No hay problema de suelos sódicos
28	59.538	Probabilidad de suelos sódicos
29	59.350	Probabilidad de suelos sódicos
30	61.081	Probabilidad de suelos sódicos
31	31.343	Probabilidad de suelos sódicos
32	28.000	Probabilidad de suelos sódicos
33	4.762	No hay problema de suelos sódicos
34	5.325	No hay problema de suelos sódicos
35	56.478	Probabilidad de suelos sódicos
36	6.040	No hay problema de suelos sódicos
37	6.897	No hay problema de suelos sódicos
38	61.202	Probabilidad de suelos sódicos
39	18.440	Probabilidad de suelos sódicos
40	23.977	Probabilidad de suelos sódicos
41	12.583	No hay problema de suelos sódicos
42	12.934	No hay problema de suelos sódicos
43	58.407	Probabilidad de suelos sódicos
44	36.456	Probabilidad de suelos sódicos
45	36.343	Probabilidad de suelos sódicos
46	70.636	Probabilidad de suelos sódicos

Cuadro 56. Efecto posible del porcentaje de sodio intercambiable de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No. de muestras	Porcentaje de XNa intercambiable	Clasificación
1	6.667	No hay problema de suelos sódicos
2	4.545	No hay problema de suelos sódicos
3	16.667	Probabilidad de suelos sódicos
4	33.579	Probabilidad de suelos sódicos
5	14.141	No hay problema de suelos sódicos
6	23.750	Probabilidad de suelos sódicos
7	23.715	Probabilidad de suelos sódicos
8	17.467	Probabilidad de suelos sódicos
9	21.384	Probabilidad de suelos sódicos
10	21.053	Probabilidad de suelos sódicos
11	16.556	Probabilidad de suelos sódicos
12	19.481	Probabilidad de suelos sódicos
13	19.608	Probabilidad de suelos sódicos
14	35.068	Probabilidad de suelos sódicos
15	58.960	Probabilidad de suelos sódicos
16	56.101	Probabilidad de suelos sódicos
17	29.967	Probabilidad de suelos sódicos
18	8.806	No hay problema de suelos sódicos
19	8.526	No hay problema de suelos sódicos
20	35.244	Probabilidad de suelos sódicos
21	92.369	Probabilidad de suelos sódicos
22	92.188	Probabilidad de suelos sódicos
23	82.964	Probabilidad de suelos sódicos
24	70.024	Probabilidad de suelos sódicos
25	46.015	Probabilidad de suelos sódicos
26	34.993	Probabilidad de suelos sódicos
27	62.264	Probabilidad de suelos sódicos
28	42.971	Probabilidad de suelos sódicos
29	72.203	Probabilidad de suelos sódicos
30	35.897	Probabilidad de suelos sódicos
31	53.763	Probabilidad de suelos sódicos
32	44.444	Probabilidad de suelos sódicos
33	44.444	Probabilidad de suelos sódicos
34	35.733	Probabilidad de suelos sódicos
35	37.500	Probabilidad de suelos sódicos
36	36.877	Probabilidad de suelos sódicos
37	39.655	Probabilidad de suelos sódicos
38	67.575	Probabilidad de suelos sódicos
39	89.717	Probabilidad de suelos sódicos
40	56.903	Probabilidad de suelos sódicos
41	9.989	No hay problema de suelos sódicos
42	9.898	No hay problema de suelos sódicos
43	26.056	Probabilidad de suelos sódicos
44	43.452	Probabilidad de suelos sódicos
45	59.162	Probabilidad de suelos sódicos
46	53.571	Probabilidad de suelos sódicos
47	26.339	Probabilidad de suelos sódicos
48	53.548	Probabilidad de suelos sódicos
49	27.419	Probabilidad de suelos sódicos
50	50.785	Probabilidad de suelos sódicos
51	48.316	Probabilidad de suelos sódicos
52	62.462	Probabilidad de suelos sódicos
53	59.207	Probabilidad de suelos sódicos
54	76.236	Probabilidad de suelos sódicos

### **5.8.3 Carbonato de sodio residual (C.S.R.)**

Si Los carbonatos y bicarbonatos tienen una concentración mayor al calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se formen otras sales como el carbonato de sodio. Esta sal es altamente soluble y desplaza fácilmente al ion calcio y al ion magnesio del complejo de intercambio catiónico de los suelos.

En el primer muestreo, solamente el 4% de las aguas son altas en carbonato de sodio residual y no son buenas para el riego, el 7% de las aguas son medias en carbonato de sodio residual y son dudosas para el riego. La mayor cantidad de estaciones son aguas bajas en carbonato de sodio residual con el 89% y son buenas para el riego, esto se aprecia en el Cuadro 57.

En el segundo muestreo, el 11% de las aguas son altas en carbonato de sodio residual y no son buenas para el riego, el 13% son aguas medias en carbonato de sodio residual, además, dudosas para el riego. Al igual que el primer muestreo, la totalidad de las aguas son bajas en carbonato de sodio residual y bueno para el riego, esto se aprecia en el Cuadro 58.

En ambos muestreos la mayor cantidad de aguas no presentan problemas por el carbonato de sodio residual, esto se debe a que el sistema hidrográfico no tiene concentraciones de carbonato, salvo algunos puntos. La poca cantidad que existe de carbonato, se combina con el calcio y se precipita, no hay cantidad suficiente para que se combine con el sodio, excepto en algunos puntos, en especial, en donde hay descargas urbano industriales y en las aguas geotérmicas de los Humeros que tienen alta concentración de carbonatos, precisamente por su origen.

Cuadro 57. Carbonato de sodio residual de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No. de muestras	Carbonato sodio residual (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	Clasificación
1	-0.09	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
2	-0.49	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
3	0.66	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
4	-2.10	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
5	-0.48	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
6	-0.75	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
7	-0.87	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
8	-0.58	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
9	-0.80	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
10	-0.30	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
11	-0.44	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
12	-0.52	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
13	-0.95	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
14	-0.73	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
15	-1.56	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
16	-0.02	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
17	0.45	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
18	-0.40	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
19	0.77	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
20	0.49	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
21	1.32	C2 Aguas medias en C.S.R.-Dudosas para el riego
22	0.20	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
23	0.51	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
24	-0.67	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
25	0.96	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
26	-0.96	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
27	-0.95	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
28	2.07	C2 Aguas medias en C.S.R.-Dudosas para el riego
29	1.49	C2 Aguas medias en C.S.R.-Dudosas para el riego
30	3.44	C1 Aguas altas en C.S.R.-No son buenas para el riego
31	-0.11	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
32	-0.14	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
33	-1.03	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
34	-0.74	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
35	1.04	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
36	-0.45	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
37	-0.67	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
38	3.04	C1 Aguas altas en C.S.R.-No son buenas para el riego
39	-0.20	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
40	0.40	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
41	-3.30	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
42	-2.09	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
43	-25.70	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
44	-1.71	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
45	1.10	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
46	-6.90	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego



Cuadro 58. Carbonato de sodio residual de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No. de muestras	Carbonato de sodio residual (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	Clasificación
1	-0.96	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
2	-0.25	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
3	-0.73	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
4	-0.44	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
5	-0.17	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
6	0.21	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
7	-0.13	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
8	-0.62	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
9	-0.74	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
10	-0.40	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
11	-0.28	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
12	-0.43	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
13	-0.39	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
14	-0.16	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
15	0.15	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
16	0.19	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
17	-1.22	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
18	-2.82	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
19	-2.87	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
20	1.26	C2 Aguas medias en C.S.R.-Dudosas para el riego
21	18.34	C1 Aguas altas en C.S.R.-No son buenas para el riego
22	3.01	C1 Aguas altas en C.S.R.-No son buenas para el riego
23	2.89	C1 Aguas altas en C.S.R.-No son buenas para el riego
24	-22.58	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
25	0.37	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
26	-0.35	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
27	0.58	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
28	0.90	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
29	3.68	C1 Aguas altas en C.S.R.-No son buenas para el riego
30	0.37	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
31	0.76	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
32	-1.82	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
33	0.73	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
34	0.24	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
35	0.61	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
36	0.42	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
37	-0.15	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
38	2.21	C2 Aguas medias en C.S.R.-Dudosas para el riego
39	5.17	C1 Aguas altas en C.S.R.-No son buenas para el riego
40	-44.01	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
41	-8.05	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
42	-4.55	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
43	0.17	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
44	1.53	C2 Aguas medias en C.S.R.-Dudosas para el riego
45	0.71	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
46	0.23	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
47	-0.11	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
48	1.48	C2 Aguas medias en C.S.R.-Dudosas para el riego
49	0.03	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
50	1.96	C2 Aguas medias en C.S.R.-Dudosas para el riego
51	1.95	C2 Aguas medias en C.S.R.-Dudosas para el riego
52	1.74	C2 Aguas medias en C.S.R.-Dudosas para el riego
53	1.24	C3 Aguas bajas en C.S.R.-Buenas para el riego
54	4.09	C1 Aguas altas en C.S.R.-No son buenas para el riego

## 5.9 Clasificación de las aguas por su dureza

La dureza define la cantidad de sales presentes en el agua, por ejemplo en los suelos de arenisca, basalto y granito las aguas son muy blandas, mientras que las aguas que están en contacto con cal, yeso y dolomita pueden ser muy duras. La dureza es un parámetro muy significativo de las aguas, aún no se conocen con exactitud los problemas que producen las aguas blandas y duras en el organismo, sin embargo hay estudios que dicen que en lugares en donde existen aguas blandas se producen mayor cantidad de enfermedades cardiovasculares, además de la disolución de tuberías de abastecimiento de agua con el peligro de producir intoxicaciones en los usuarios. La forma de evitarlo pueden ser filtrándolas, o por ósmosis inversa.

En el primer muestreo, el 63% de las aguas son de clasificación blanda según su dureza; el 28% de las aguas son moderadamente duras, el 5% son duras y el 4% de las aguas son muy duras, esto se observa en el Cuadro 59.

En el segundo muestreo, al igual que en el primero, la mayor cantidad de aguas son de clasificación blanda con el 65%, el 24% de las estaciones son moderadamente duras, el 2% son duras y el 9% de las aguas son muy duras, esto se observa en el Cuadro 60.

En el primer muestreo, la laguna del Carmen y el pozo en Tlatilchuca, son los puntos que tienen mayor concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ , como carbonato de calcio. Esto se debe a los estratos que pasan estas aguas enriquecidos con minerales de este tipo, e incluso en Tlatilchuca, se tiene un olor de azufre debido a su paso por antiguos bosques sepultados que están en descomposición, así como de otros organismos.

En el segundo muestreo, los puntos con mayor concentración son los de pozos de Tepeaca, Morelos y Tlatilchuca que también tienen un olor fuerte a azufre. La cantidad que se tiene es debida a los minerales que se encuentran en solución y, además, están en una zona con un pasado geotectónico muy intenso.

Cuadro 59. Clasificación de las aguas por su dureza en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No. de muestras	Ca mg L <sup>-1</sup>	Ca como CaCO <sub>3</sub> mg L <sup>-1</sup>	Clasificación
1	32.06	80.07	Moderadamente dura
2	20.04	50.05	Blanda
3	28.06	70.06	Blanda
4	28.06	70.06	Blanda
5	12.02	30.03	Blanda
6	20.04	50.05	Blanda
7	22.04	55.05	Blanda
8	22.04	55.05	Blanda
9	16.03	40.04	Blanda
10	20.04	50.05	Blanda
11	14.03	35.03	Blanda
12	12.02	30.03	Blanda
13	12.02	30.03	Blanda
14	26.05	65.06	Blanda
15	20.04	50.05	Blanda
16	60.12	150.14	Dura
17	50.10	125.11	Moderadamente dura
18	32.06	80.07	Moderadamente dura
19	11.02	27.52	Blanda
20	36.07	90.08	Moderadamente dura
21	34.07	85.08	Moderadamente dura
22	18.04	45.04	Blanda
23	34.07	85.08	Moderadamente dura
24	22.04	55.05	Blanda
25	30.06	75.07	Moderadamente dura
26	26.05	65.06	Blanda
27	28.06	70.06	Blanda
28	32.06	80.07	Moderadamente dura
29	24.05	60.05	Blanda
30	32.06	80.07	Moderadamente dura
31	24.05	60.05	Blanda
32	22.04	55.05	Blanda
33	26.05	65.06	Blanda
34	30.06	75.07	Moderadamente dura
35	111.42	278.25	Dura
36	20.04	50.05	Blanda
37	12.02	30.03	Blanda
38	16.83	42.04	Blanda
39	28.06	70.06	Blanda
40	30.06	75.07	Moderadamente dura
41	170.34	425.38	Muy dura
42	156.31	390.35	Muy dura
43	42.08	105.09	Moderadamente dura
44	23.45	58.55	Blanda
45	17.43	43.54	Blanda
46	32.06	80.07	Moderadamente dura

Cuadro 60. Clasificación de las aguas por su dureza en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No. de muestras	Ca mg L <sup>-1</sup>	Ca como CaCO <sub>3</sub> mg L <sup>-1</sup>	Clasificación
1	38.08	95.09	Moderadamente dura
2	12.02	30.03	Blanda
3	19.04	47.54	Blanda
4	24.05	60.05	Blanda
5	16.03	40.04	Blanda
6	22.04	55.05	Blanda
7	19.04	47.54	Blanda
8	18.04	45.04	Blanda
9	26.05	65.06	Blanda
10	14.03	35.03	Blanda
11	14.03	35.03	Blanda
12	14.03	35.03	Blanda
13	14.03	35.03	Blanda
14	27.45	68.56	Blanda
15	36.07	90.08	Moderadamente dura
16	36.47	91.08	Moderadamente dura
17	46.09	115.10	Moderadamente dura
18	216.03	539.49	Muy dura
19	236.47	590.53	Muy dura
20	29.86	74.57	Blanda
21	12.02	30.03	Blanda
22	8.02	20.02	Blanda
23	12.02	30.03	Blanda
24	26.05	65.06	Blanda
25	50.10	125.11	Moderadamente dura
26	44.09	110.10	Moderadamente dura
27	68.14	170.15	Dura
28	21.04	52.55	Blanda
29	42.08	105.09	Moderadamente dura
30	18.04	45.04	Blanda
31	19.04	47.54	Blanda
32	129.26	322.79	Muy dura
33	16.03	40.04	Blanda
34	22.04	55.05	Blanda
35	21.04	52.55	Blanda
36	17.03	42.54	Blanda
37	6.01	15.01	Blanda
38	24.05	60.05	Blanda
39	16.03	40.04	Blanda
40	24.05	60.05	Blanda
41	163.73	408.87	Muy dura
42	173.35	432.89	Muy dura
43	22.04	55.05	Blanda
44	34.07	85.08	Moderadamente dura
45	44.09	110.10	Moderadamente dura
46	38.08	95.09	Moderadamente dura
47	19.038	47.54	Blanda
48	32.064	80.07	Moderadamente dura
49	22.044	55.05	Blanda
50	52.104	130.12	Moderadamente dura
51	48.096	120.11	Moderadamente dura
52	24.048	60.05	Blanda
53	16.032	40.04	Blanda
54	22.044	55.05	Blanda

## 5.10 Clasificación de las aguas en base a su efecto sobre la infiltración

La infiltración depende de la cantidad total de sales y la relación entre las concentraciones de sodio en relación con el calcio y magnesio. La infiltración aumenta con la salinidad y disminuye con una reducción de salinidad. Para entender mejor el comportamiento se graficaron con los tres tipos de RAS. En los Cuadros 61 y 62 se tiene la clasificación de las aguas en base al efecto sobre la infiltración del primer y segundo muestreo respectivamente.

En el primer muestreo, con el RAS original, se tiene el 17% sin reducción de infiltración, en el 83% de los casos, la mayor cantidad de aguas son de reducción ligera o moderada en la infiltración, no hay aguas que se ubiquen en la zona de reducción severa (Figuras 53 y 56). En el primer muestreo, con el RAS<sub>aj</sub>, esto es, con la consideración de la disponibilidad del calcio, se tiene que el 11% de las aguas son sin reducción, la mayor cantidad de puntos tiene una reducción ligera o moderada (89%) y no hay estaciones con reducción severa (Figuras 54 y 56). En el primer muestreo, con el RAS<sup>o</sup> esto es considerando los problemas de infiltración por altas concentraciones de sodio y bajas de calcio, se tiene que el 17% de las aguas son sin reducción de infiltración, el 83% son aguas de reducción ligera o moderada y no hay ninguna agua de reducción severa (Figuras 55 y 56).

En el segundo muestreo, con el RAS original, se tiene que el 17% de las aguas son sin reducción en la infiltración, el 11% de las aguas son de reducción severa en la infiltración y la mayor cantidad de aguas, que son el 72%, tienen reducción ligera o moderada (Figuras 57 y 60). En el segundo muestreo, con el RAS<sub>aj</sub>, el 13% de las aguas son sin reducción, el 15% son de reducción severa y el 72% de aguas son de reducción ligera o moderada (Figuras 58 y 60). En el segundo muestreo, con el RAS<sup>o</sup>, se tiene que el 15% son aguas sin reducción, el 11% son aguas de reducción severa y el 74% son aguas de reducción ligera o moderada (Figuras 59 y 60). En los dos muestreos la mayor cantidad de aguas se encuentran en reducción ligera o moderada de la infiltración, es necesario hacer notar que este gráfico esta considerando la cantidad de sales totales y no el tipo de sal, es decir, que si se tiene gran concentración de sales de sodio, va aparecer en la zona de sin reducción en la infiltración, pero esto no es tan cierto, por los efectos ya estudiados que produce el sodio en los suelos en relación con el calcio.

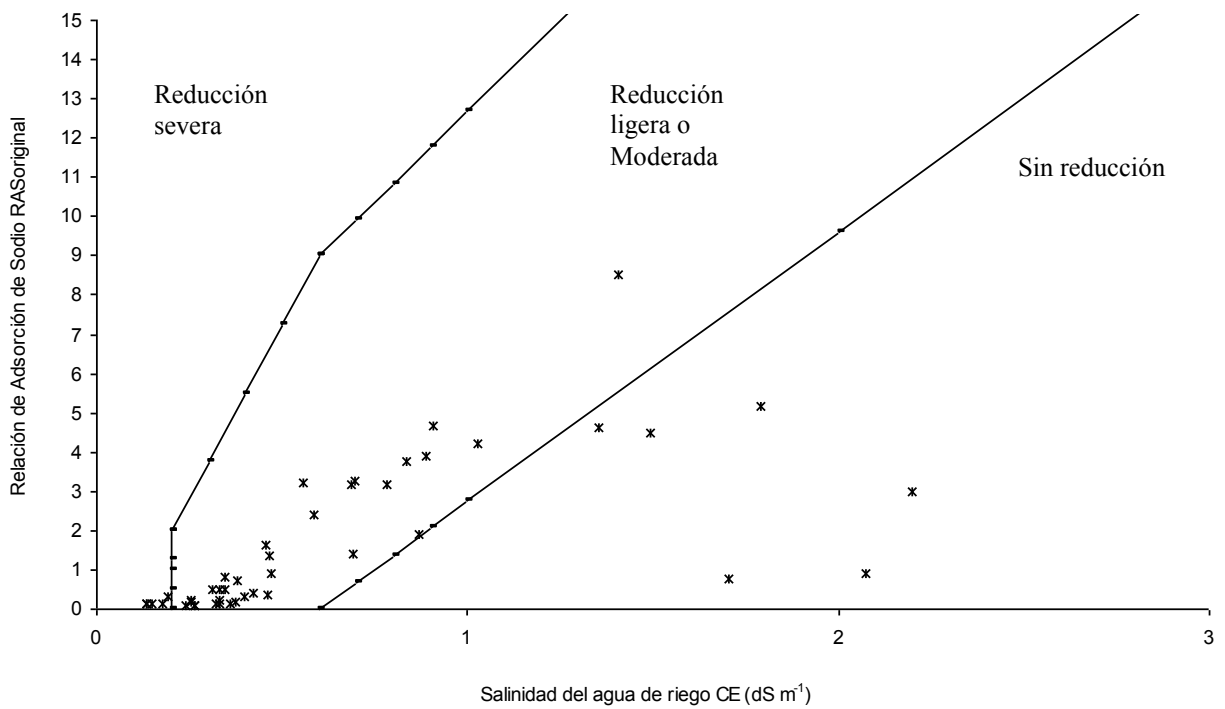


Figura 53. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS original (1er muestreo, baja concentración) según Figura 5.

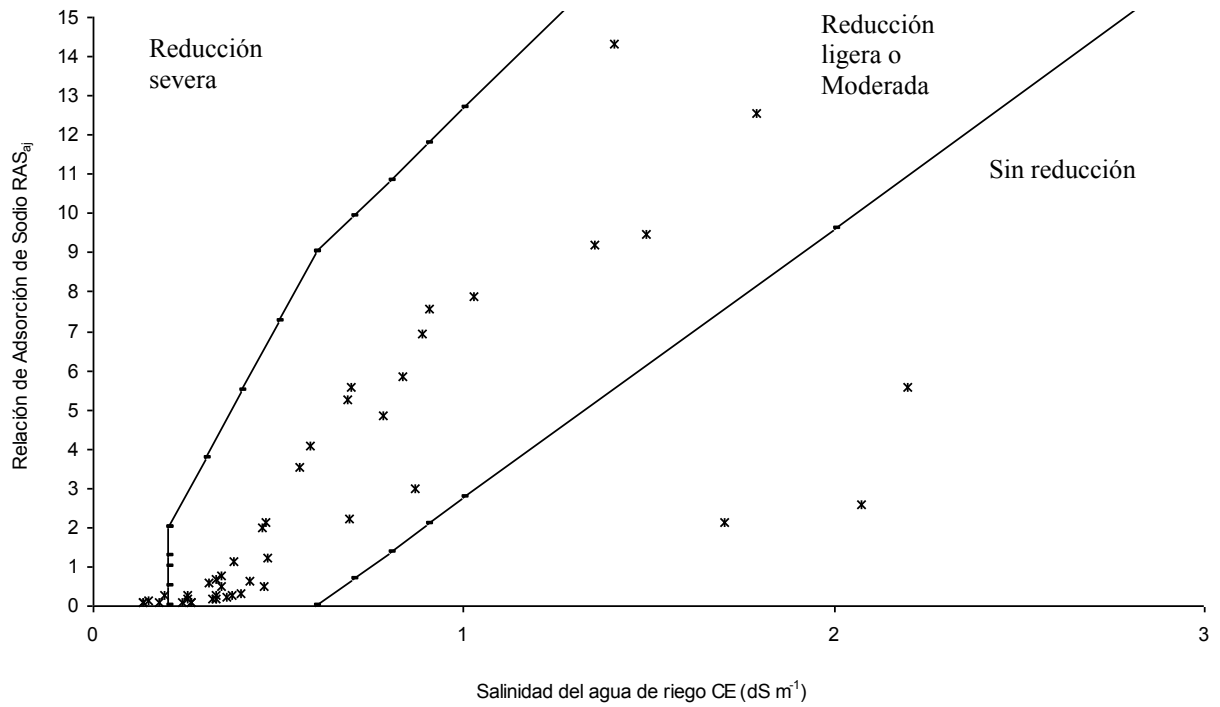


Figura 54. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS<sub>aj</sub> (1er muestreo, baja concentración) según Figura 5.

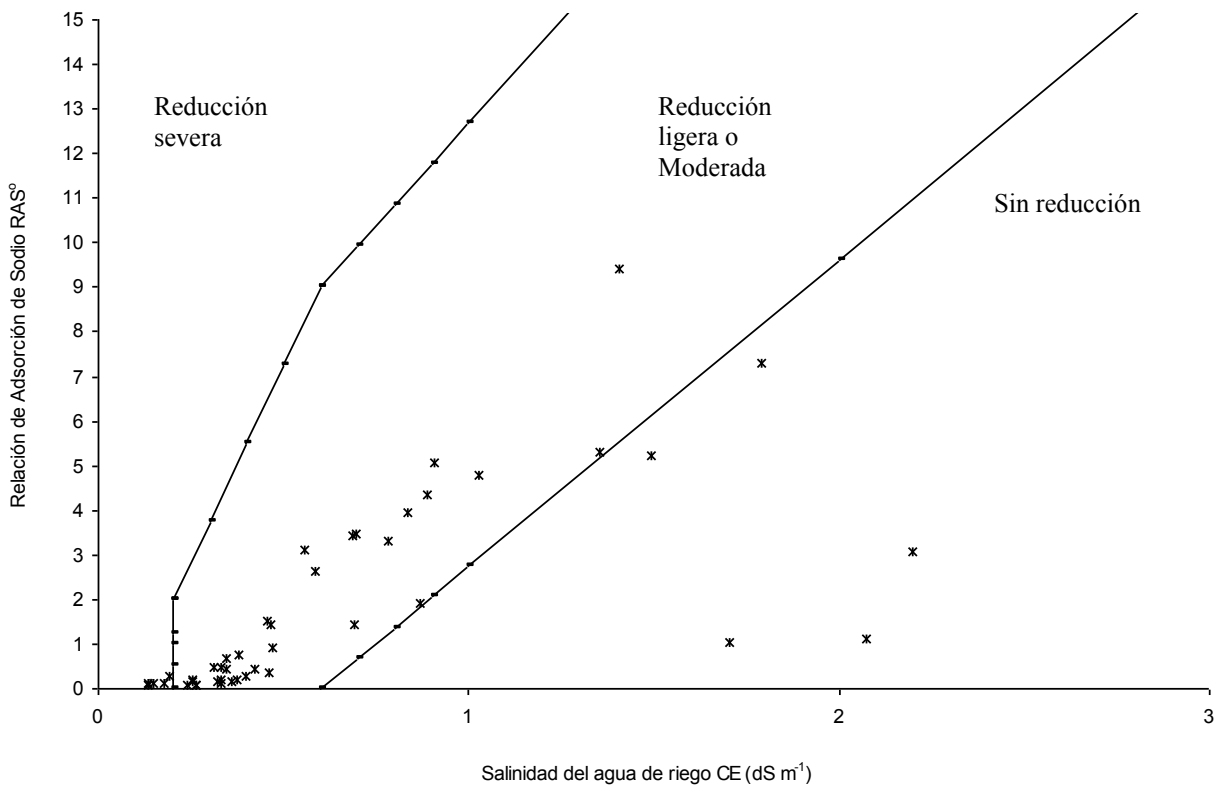


Figura 55. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS° (1er muestreo, baja concentración) según Figura 5.



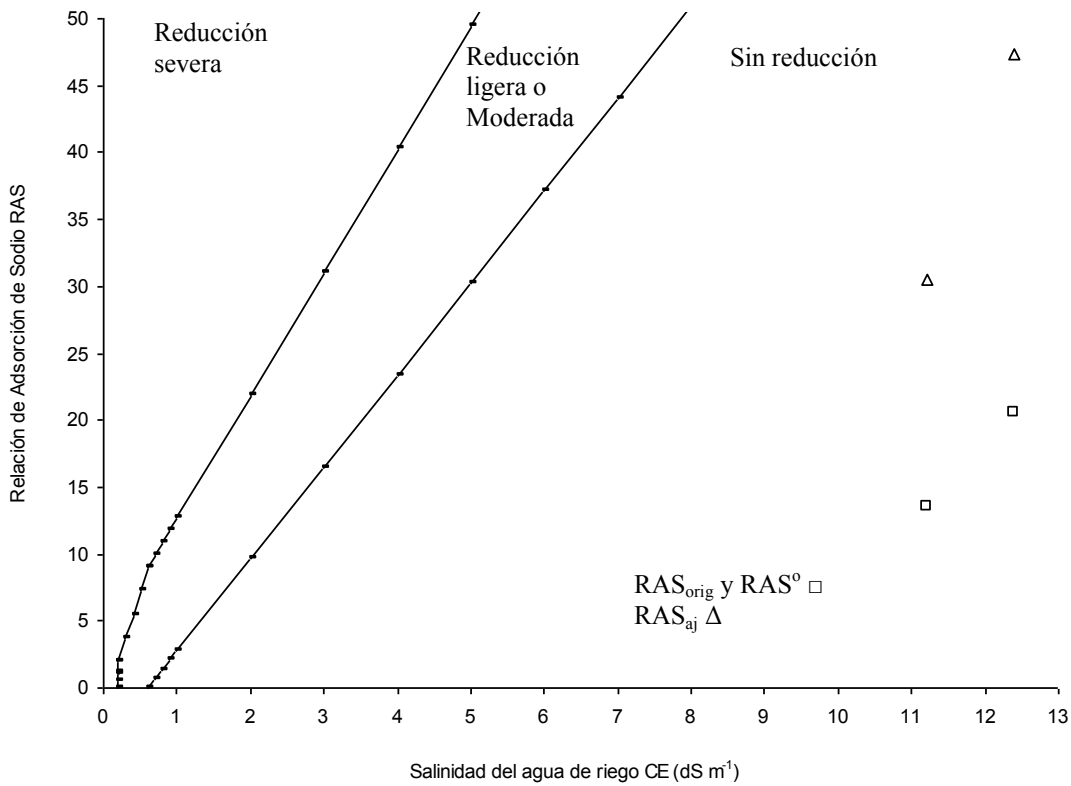


Figura 56. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo, alta concentración) según Figura 5.



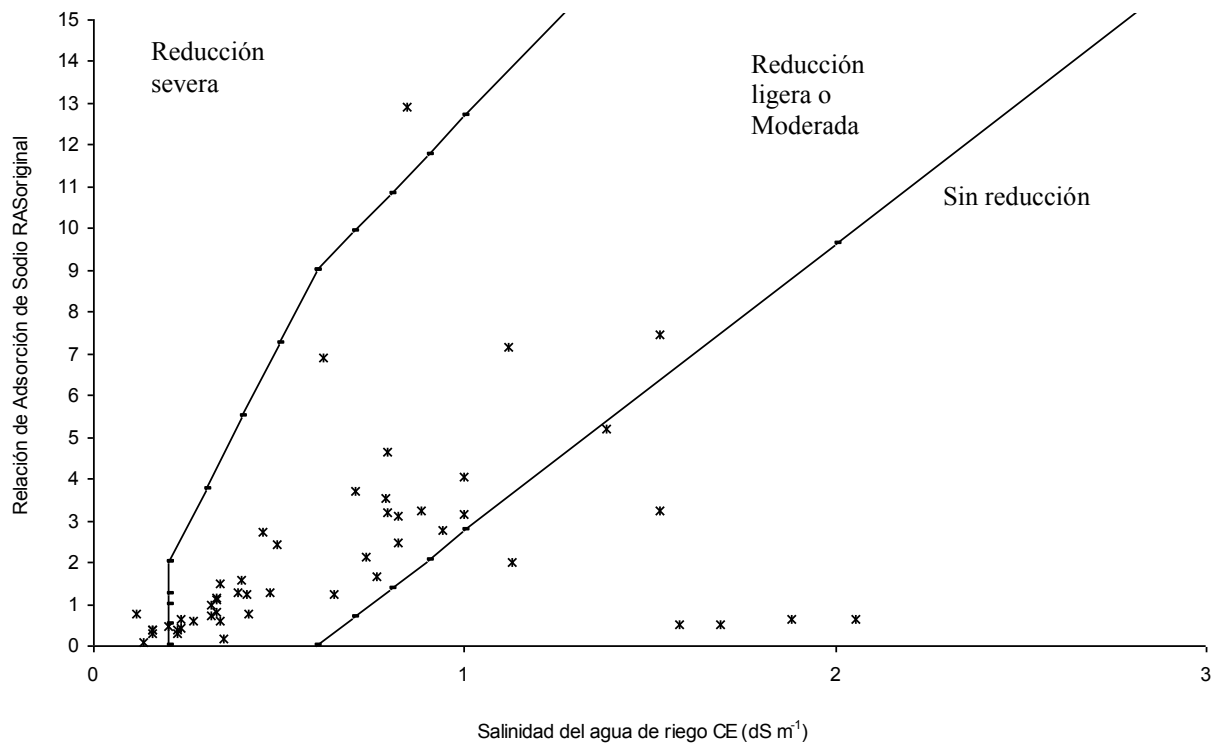


Figura 57. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS original (2do muestreo, baja concentración) según Figura 5.

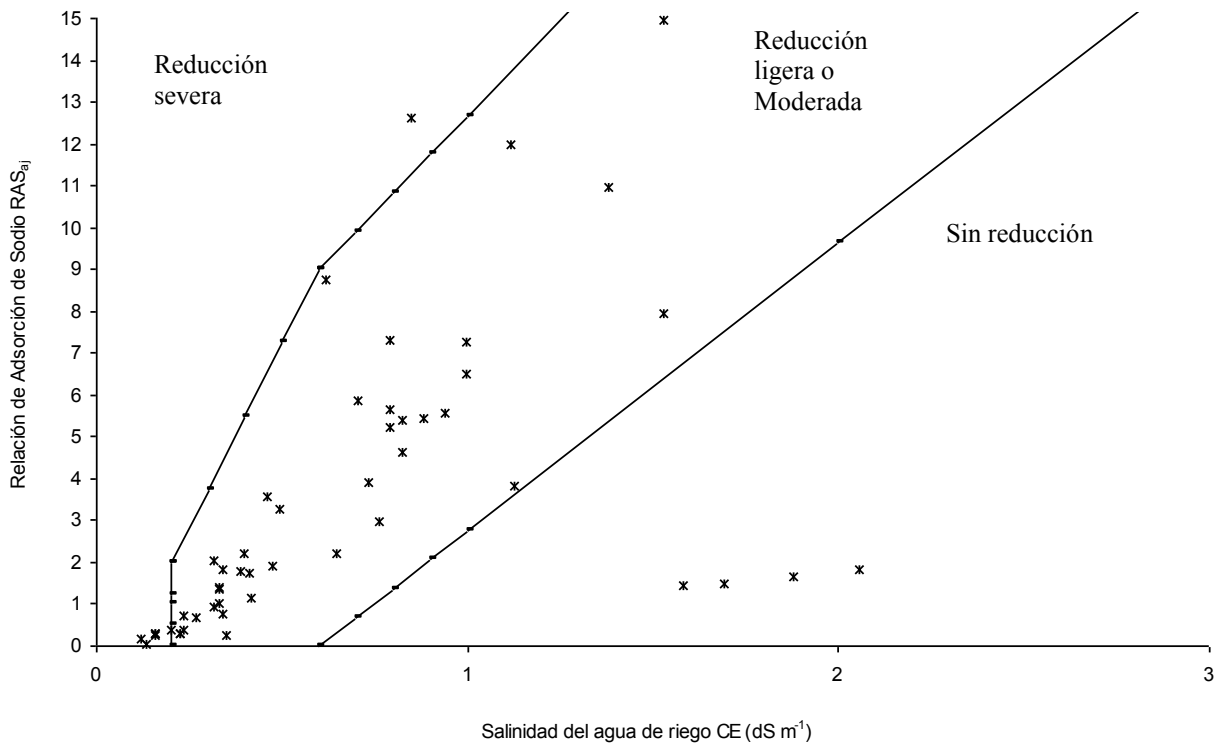


Figura 58. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS<sub>aj</sub> (2do muestreo, baja concentración) según Figura 5.

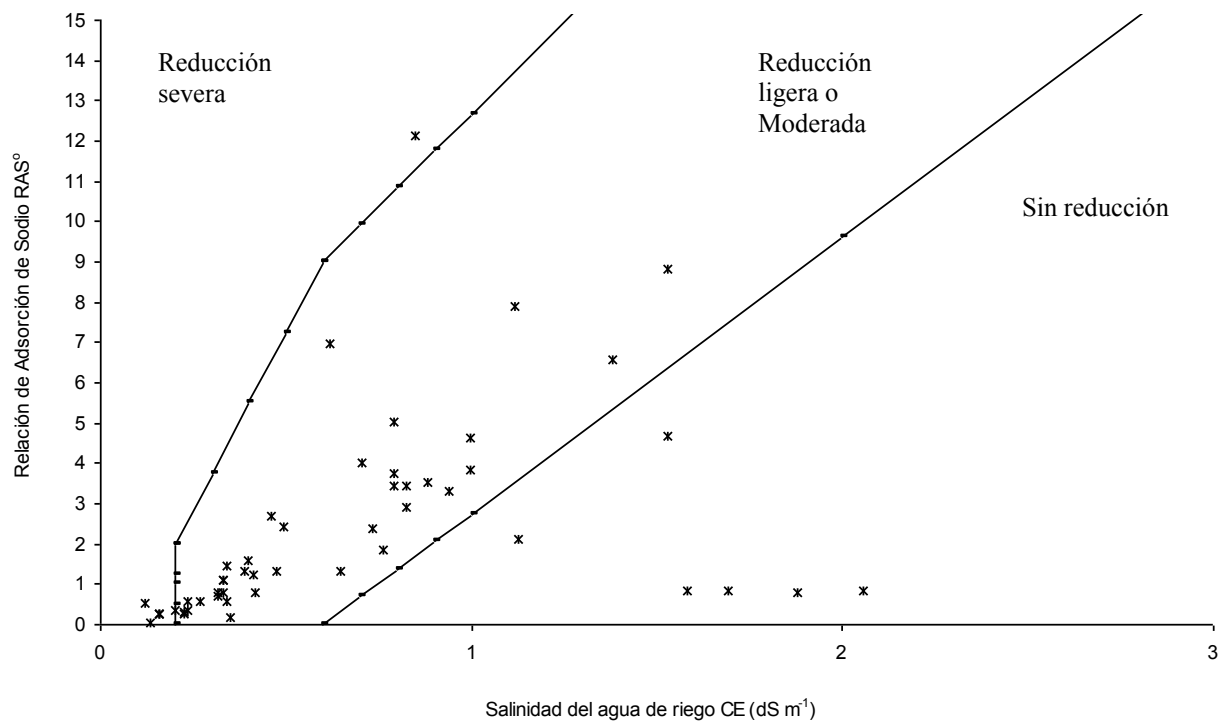


Figura 59. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. RAS<sup>o</sup> (2do muestreo, baja concentración) según Figura 5.

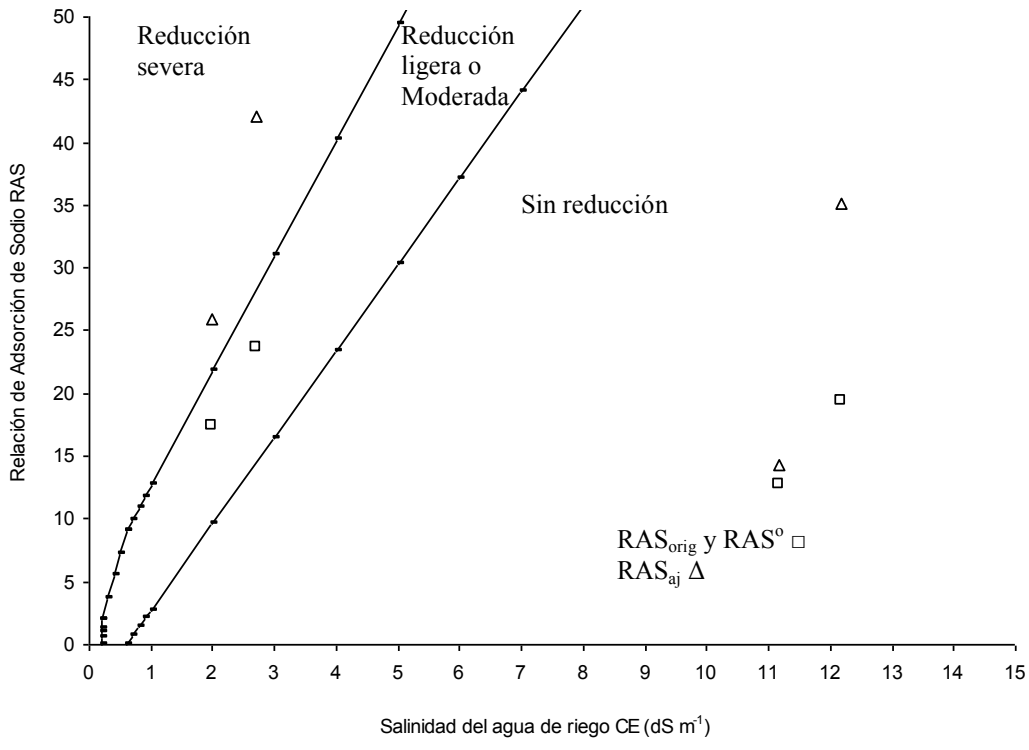


Figura 60. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo, alta concentración) según Figura 5.



### **5.11 Efecto del ion cloro**

La toxicidad es un problema diferente al de la salinidad. La toxicidad del ion cloro es muy frecuente, contenido en el agua de riego. Este no es retenido en las partículas del suelo, por lo que cuando se riega entra en solución y es disponible para la planta.

En el primer muestreo, el 28% de agua son de clasificación buena, es decir no tienen problemas de toxicidad por el ion cloro, el 61% de aguas son de clasificación condicionada y el 11% no son recomendables para riego, esto se aprecia en el Cuadro 63.

En el segundo muestreo, el 33% de las aguas son de clasificación buena, la mayor cantidad de puntos con el 57% son de clasificación condicionada y el 10% no son recomendables para riego, esto se aprecia en el Cuadro 64.

En ambos muestreos la mayor cantidad de aguas son de clasificación condicionada, es decir que hay que tener en cuenta el cultivo a regar y si este es tolerante a la concentración aplicada.

En el primer y segundo muestreo, las estaciones con mayor concentración de cloro son el río Zahuapan en Puebla, es evidente que esto se debe a las aguas urbano industriales. También se tienen altas concentraciones en las lagunas cráter, por su elevada evaporación en comparación con la precipitación.



Cuadro 63. Clasificación del contenido de cloruros de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No.	Cl <sup>-</sup> meq L <sup>-1</sup>	Clasificación
1	1.30	Condicionada
2	0.70	Buena
3	1.20	Condicionada
4	1.65	Condicionada
5	1.00	Condicionada
6	1.20	Condicionada
7	1.40	Condicionada
8	0.90	Buena
9	1.20	Condicionada
10	1.30	Condicionada
11	0.55	Buena
12	0.60	Buena
13	1.10	Condicionada
14	1.80	Condicionada
15	1.60	Condicionada
16	5.30	No recomendable
17	4.50	Condicionada
18	3.70	Condicionada
19	2.00	Condicionada
20	2.00	Condicionada
21	9.40	No recomendable
22	0.24	Buena
23	4.80	Condicionada
24	0.70	Buena
25	2.30	Condicionada
26	0.90	Buena
27	1.00	Condicionada
28	2.10	Condicionada
29	1.90	Condicionada
30	1.70	Condicionada
31	1.60	Condicionada
32	1.30	Condicionada
33	0.60	Buena
34	0.90	Buena
35	2.20	Condicionada
36	0.60	Buena
37	0.60	Buena
38	1.60	Condicionada
39	0.70	Buena
40	0.60	Buena
41	4.50	Condicionada
42	2.70	Condicionada
43	95.00	No recomendable
44	9.70	No recomendable
45	2.30	Condicionada
46	89.00	No recomendable

Cuadro 64. Clasificación del contenido de cloruros de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	Cl <sup>-</sup> meq L <sup>-1</sup>	Clasificación
1	1.40	Condicionada
2	0.45	Buena
3	1.00	Condicionada
4	1.10	Condicionada
5	0.50	Buena
6	0.70	Buena
7	0.80	Buena
8	0.90	Buena
9	1.00	Condicionada
10	0.62	Buena
11	0.50	Buena
12	0.60	Buena
13	0.60	Buena
14	1.10	Condicionada
15	2.90	Condicionada
16	2.90	Condicionada
17	2.00	Condicionada
18	3.00	Condicionada
19	3.10	Condicionada
20	2.10	Condicionada
21	4.30	Condicionada
22	3.20	Condicionada
23	1.10	Condicionada
24	90.00	No recomendable
25	1.50	Condicionada
26	1.50	Condicionada
27	7.20	No recomendable
28	0.70	Buena
29	6.40	No recomendable
30	0.70	Buena
31	1.10	Condicionada
32	2.30	Condicionada
33	0.80	Buena
34	1.10	Condicionada
35	0.70	Buena
36	0.80	Buena
37	0.50	Buena
38	2.80	Condicionada
39	10.00	No recomendable
40	102.00	No recomendable
41	3.80	Condicionada
42	4.70	Condicionada
43	0.70	Buena
44	1.50	Condicionada
45	3.90	Condicionada
46	3.30	Condicionada
47	0.6	Buena
48	1.6	Condicionada
49	0.7	Buena
50	2.1	Condicionada
51	1.8	Condicionada
52	1.6	Condicionada
53	1.05	Condicionada
54	2.12	Condicionada

## 5.12 Efecto del ion boro

El boro es un elemento indispensable para los cultivos en cantidades pequeñas y es tóxico cuando sobrepasa este nivel. Su efecto depende si el cultivo es tolerante o no, sin embargo, el Cuadro 65 sirve como referencia para estudiar su efecto, citado por (Can, 2005). En las Figuras 61 y 62 se tiene la distribución del contenido de boro en el primer y segundo muestreo respectivamente.

Cuadro 65. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo al contenido de boro (Can, 2005).

Clase	Contenido de boro en ppm
Buena	<0.3
Condicionada	0.3-4.0
No recomendable	>4.0

En el primer muestreo, la mayor cantidad de aguas con el 74% son de clasificación buena, es decir que no tienen problema de toxicidad por boro, el 22% son de clasificación condicionada y el 4% son no recomendadas, estas, precisamente, son las de las lagunas cráter de Atexcac y Alchichica, esto se aprecia en el Cuadro 66.

En el segundo muestreo, el 72% de las aguas no tienen problemas de toxicidad, son de clasificación buena, el 20% son de clasificación condicionada y el 8% son no recomendadas para la agricultura, esto se aprecia en el cuadro 67. En el segundo muestreo se tiene altísimas concentraciones de boro en las estaciones de los Humeros. Gonzales *et al.* (2001) estudiaron los manantiales aledaños a los Humeros y varios pozos; comprobaron que los manantiales aledaños son del tipo bicarbonatado sódico, este carácter geoquímico quiere decir que se tratan de aguas de origen meteórico, de reciente infiltración, que han circulado a través de la roca volcánica. La zona de los Humeros son de volcanismo reciente y esto lo comprobaron con el estudio de los gases que se detectan en el área, estos son de origen magmático y el ácido clorhídrico no ha sido totalmente neutralizado por los feldespatos y las micas. Todo lo anteriormente citado, también se comprueba con la gran cantidad de Boro que se encontró en este trabajo en las aguas de los Humeros. Este sistema es de origen reciente y lo mismo sucede con las lagunas cráter. Los pozos más profundos tienen una composición iónica cloruro sódico y, los pozos más someros tienen una composición iónica bicarbonatada sódica.

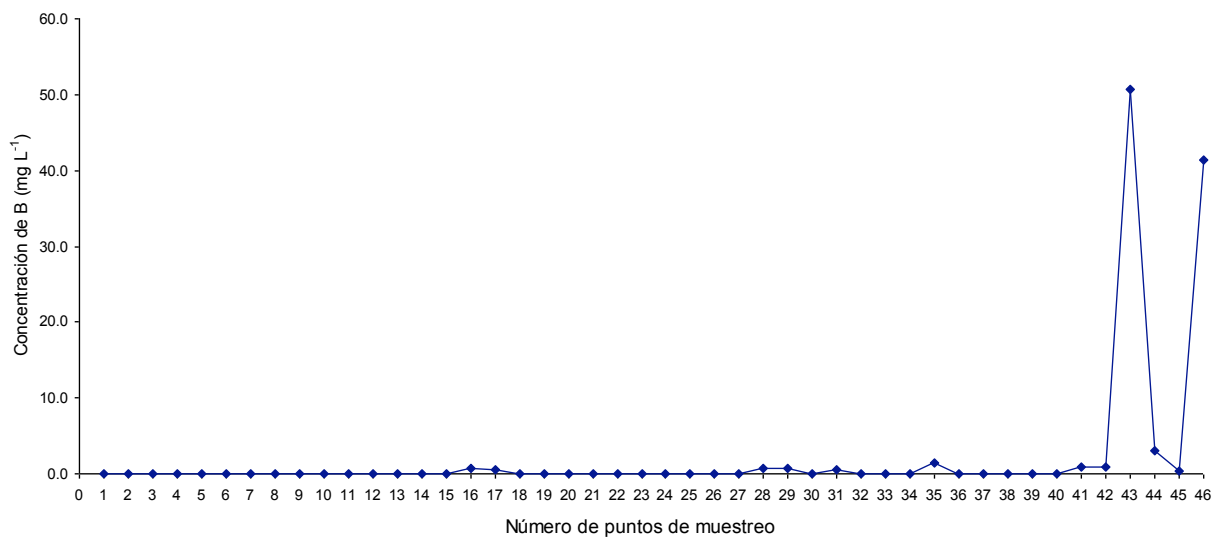


Figura 61. Distribución del contenido de boro en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

Cuadro 66. Clasificación del contenido de boro de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

<b>No.</b>	<b>B mg L<sup>-1</sup></b>	<b>Clasificación</b>
1	0.000	Buena
2	0.000	Buena
3	0.000	Buena
4	0.000	Buena
5	0.000	Buena
6	0.000	Buena
7	0.000	Buena
8	0.000	Buena
9	0.000	Buena
10	0.000	Buena
11	0.000	Buena
12	0.000	Buena
13	0.000	Buena
14	0.000	Buena
15	0.000	Buena
16	0.724	Condicionada
17	0.451	Condicionada
18	0.000	Buena
19	0.000	Buena
20	0.000	Buena
21	0.000	Buena
22	0.000	Buena
23	0.000	Buena
24	0.000	Buena
25	0.000	Buena
26	0.000	Buena
27	0.000	Buena
28	0.716	Condicionada
29	0.655	Condicionada
30	0.000	Buena
31	0.590	Condicionada
32	0.000	Buena
33	0.000	Buena
34	0.000	Buena
35	1.482	Condicionada
36	0.000	Buena
37	0.000	Buena
38	0.000	Buena
39	0.000	Buena
40	0.000	Buena
41	0.863	Condicionada
42	0.845	Condicionada
43	50.700	No recomendable
44	3.094	Condicionada
45	0.317	Condicionada
46	41.397	No recomendable

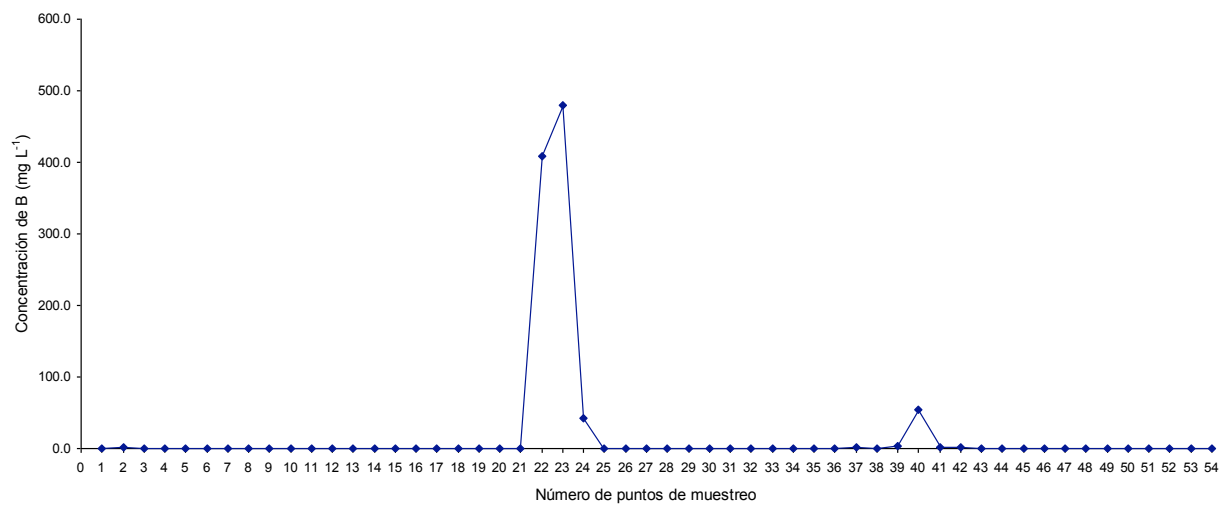


Figura 62. Distribución del contenido de boro en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

Cuadro 67. Clasificación del contenido de boro de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	B mg L <sup>-1</sup>	Clasificación
1	0.000	Buena
2	1.240	Condicionada
3	0.000	Buena
4	0.000	Buena
5	0.000	Buena
6	0.000	Buena
7	0.000	Buena
8	0.000	Buena
9	0.000	Buena
10	0.000	Buena
11	0.000	Buena
12	0.000	Buena
13	0.000	Buena
14	0.000	Buena
15	0.000	Buena
16	0.000	Buena
17	0.000	Buena
18	0.690	Condicionada
19	0.720	Condicionada
20	0.000	Buena
21	0.000	Buena
22	408.990	No recomendable
23	480.254	No recomendable
24	42.047	No recomendable
25	0.000	Buena
26	0.000	Buena
27	0.000	Buena
28	0.000	Buena
29	0.000	Buena
30	0.000	Buena
31	0.000	Buena
32	0.382	Condicionada
33	0.000	Buena
34	0.000	Buena
35	0.000	Buena
36	0.000	Buena
37	0.854	Condicionada
38	0.000	Buena
39	2.548	Condicionada
40	54.339	No recomendable
41	1.842	Condicionada
42	1.218	Condicionada
43	0.000	Buena
44	0.430	Condicionada
45	0.000	Buena
46	0.000	Buena
47	0.000	Buena
48	0.001	Buena
49	0.000	Buena
50	0.347	Condicionada
51	0.408	Condicionada
52	0.000	Buena
53	0.000	Buena
54	0.261	Buena

### 5.13 Composición química de las sales hipotéticas

El cálculo de las sales hipotéticas se fundamenta en la solubilidad de las sales. La cronología de la formación de las sales esta en función de cual sal se solubiliza primero, por ejemplo el cloruro de sodio será una de las primeras en formarse por su alta solubilidad, entonces la carga de cloro y sodio se combinan para formarla y el resto estará disponible para formar otra sal, como el cloruro de potasio y el bicarbonato de sodio y así, sucesivamente, con cada tipo ion para formar la sal de la mas soluble a la menos soluble.

La geología y los tipos de suelos que se tienen a lo largo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, también son un dato importante para generar las sales hipotéticas, según el tipo de rocas y minerales se podrá prever que tipos sales se tienen.

En el primer muestreo (Cuadro 68), se tienen en las altas concentraciones, una mayor cantidad de cloruro de sodio y magnesio, carbonato de sodio y carbonato de potasio. En las bajas concentraciones, en relación con las otras sales, se tiene mayor cantidad de cloruro de sodio, bicarbonato de sodio y calcio lo que reafirma que el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac es bicarbonatado en la mayoría de sus aguas, precisamente por el tipo de rocas que se tienen en su lecho (Figuras 63 y 64).

En el segundo muestreo (Cuadro 69), en las altas concentraciones se tiene gran cantidad de cloruro de sodio, cloruro de magnesio y bicarbonato de magnesio. En las bajas concentraciones, al igual que el primer muestreo, se tiene gran cantidad de cloruro de sodio, bicarbonato de sodio y calcio, lo que refuerza lo dicho en el primer muestreo. En las bajas concentraciones, la mayor cantidad lo tiene la laguna de Tecuitlapa, tiene gran cantidad de bicarbonato de sodio lo que afirma su origen volcánico reciente, hablando geológicamente. La laguna de Tecuitlapa esta junto a la de Aljojuca, sin embargo la concentración de esta es menor. Probablemente esto ocurre, porque esta laguna esta conectado al nivel freático, en cambio, la de Tecuitlapa esta comportándose como las lagunas cráter que son completamente cerradas (Figuras 65 y 66).



Cuadro 68. Composición química de las sales hipotéticas de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No.	meq L <sup>-1</sup>														Suma
	CaSO <sub>4</sub>	KCl	NaCl	CaCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	
1	0.00	0.71	0.50	0.00	0.09	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	1.19	1.60	0.00	0.00	4.21
2	0.00	0.37	0.10	0.00	0.33	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.33	1.00	0.00	0.00	2.47
3	0.00	0.81	0.39	0.00	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	0.49	1.04	1.40	0.00	0.00	4.75
4	0.68	0.63	0.40	0.00	0.62	0.00	0.00	0.88	0.00	0.00	0.00	0.68	0.00	0.00	3.89
5	0.00	0.28	0.30	0.00	0.42	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.47	0.60	0.00	0.00	2.18
6	0.00	0.42	0.10	0.00	0.68	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.18	1.00	0.00	0.00	2.52
7	0.00	0.23	0.25	0.00	0.92	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.93	1.10	0.00	0.00	3.48
8	0.00	0.28	0.50	0.00	0.12	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	2.28	1.10	0.00	0.00	4.88
9	0.00	0.19	0.20	0.00	0.81	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.62	0.80	0.00	0.00	2.69
10	0.00	0.62	0.68	0.00	0.00	0.00	0.02	0.39	0.00	0.00	0.01	1.00	0.00	0.00	2.72
11	0.00	0.05	0.12	0.00	0.38	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.32	0.70	0.00	0.00	1.67
12	0.06	0.05	0.11	0.00	0.44	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00	0.00	1.26
13	0.00	0.05	0.14	0.00	0.91	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.10	0.60	0.00	0.00	1.89
14	0.47	0.38	1.42	0.00	0.00	0.00	0.33	1.00	0.00	0.00	0.00	0.83	0.00	0.00	4.43
15	0.00	0.21	0.60	0.00	0.79	0.00	0.00	0.68	0.00	0.00	0.33	1.00	0.00	0.00	3.61
16	0.00	0.98	4.32	0.00	0.00	0.00	3.68	0.39	0.00	0.00	3.01	3.00	0.00	0.00	15.38
17	0.00	0.88	3.62	0.00	0.00	0.00	3.86	0.00	0.00	0.12	2.90	2.50	0.00	0.00	13.88
18	0.00	0.48	3.42	0.00	0.00	0.00	0.63	0.79	0.00	0.00	0.84	1.60	0.00	0.00	7.76
19	0.00	0.47	1.53	0.00	0.00	0.00	1.11	0.00	0.00	0.61	1.50	0.55	0.00	0.00	5.77
20	0.00	0.46	1.54	0.00	0.00	0.00	1.03	0.00	0.00	0.33	1.10	1.80	0.00	0.00	6.26
21	0.00	0.58	8.82	0.00	0.00	0.00	0.76	0.00	0.00	1.02	1.40	1.70	0.00	0.00	14.28
22	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.01	0.40	0.00	0.00	0.10	1.20	0.90	0.00	0.00	2.85
23	0.00	0.47	4.33	0.00	0.00	0.00	0.81	0.86	0.00	0.00	1.60	1.70	0.00	0.00	9.77
24	0.00	0.09	0.10	0.00	0.51	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.46	1.10	0.00	0.00	2.49
25	0.00	0.55	1.75	0.00	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	0.75	1.20	1.50	0.00	0.00	6.95
26	0.23	0.05	0.25	0.00	0.60	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	1.07	0.00	0.00	2.40
27	0.00	0.05	0.25	0.00	0.70	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.64	1.40	0.00	0.00	3.40
28	0.00	0.55	1.55	0.00	0.00	0.00	1.30	0.00	0.00	2.30	1.90	1.60	0.00	0.00	9.20
29	0.00	0.56	1.34	0.00	0.00	0.00	1.05	0.00	0.00	1.26	1.30	1.20	0.00	0.00	6.71
30	0.00	0.57	1.13	0.00	0.00	0.00	1.30	0.00	0.00	3.22	2.00	1.60	0.00	0.00	9.82
31	0.00	0.34	1.26	0.00	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00	0.07	3.40	1.20	0.00	0.00	7.04
32	0.00	0.39	0.91	0.00	0.00	0.00	0.14	0.25	0.00	0.00	1.35	1.10	0.00	0.00	4.14
33	0.00	0.05	0.15	0.00	0.40	0.00	0.00	0.71	0.00	0.00	0.59	1.30	0.00	0.00	3.20
34	0.00	0.05	0.18	0.00	0.67	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.88	1.50	0.00	0.00	3.43
35	0.00	0.39	1.81	0.00	0.00	0.00	6.88	0.00	0.00	1.57	2.30	5.56	0.00	0.00	18.51
36	0.00	0.05	0.18	0.00	0.37	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	1.27	1.00	0.00	0.00	3.03
37	0.00	0.05	0.10	0.00	0.45	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	0.04	0.60	0.00	0.00	1.50
38	0.00	0.68	0.92	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	3.24	2.00	0.84	0.00	0.00	8.00
39	0.00	0.32	0.38	0.00	0.00	0.00	0.14	0.12	0.00	0.00	0.78	1.40	0.00	0.00	3.14
40	0.00	0.29	0.31	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.31	1.10	1.50	0.00	0.00	3.71
41	0.00	0.25	2.85	0.00	1.40	0.00	0.00	2.56	0.00	0.00	7.34	8.50	0.00	0.00	22.90
42	0.00	0.17	2.05	0.00	0.48	0.00	0.00	2.17	0.00	0.00	3.35	7.80	0.00	0.00	16.02
44	0.00	0.45	4.86	0.00	4.39	0.00	0.00	1.18	3.04	0.00	7.03	1.17	0.00	0.00	22.12
45	0.00	0.21	0.38	0.00	1.71	0.00	0.00	0.34	2.80	0.00	2.65	0.87	0.00	0.00	8.96
43	0.00	2.21	49.72	0.31	42.76	0.00	0.00	1.94	16.00	0.00	0.00	1.79	0.00	0.00	114.73
46	0.00	5.69	64.56	0.00	18.75	0.00	0.00	14.47	23.00	0.00	1.58	1.60	0.00	0.00	129.65

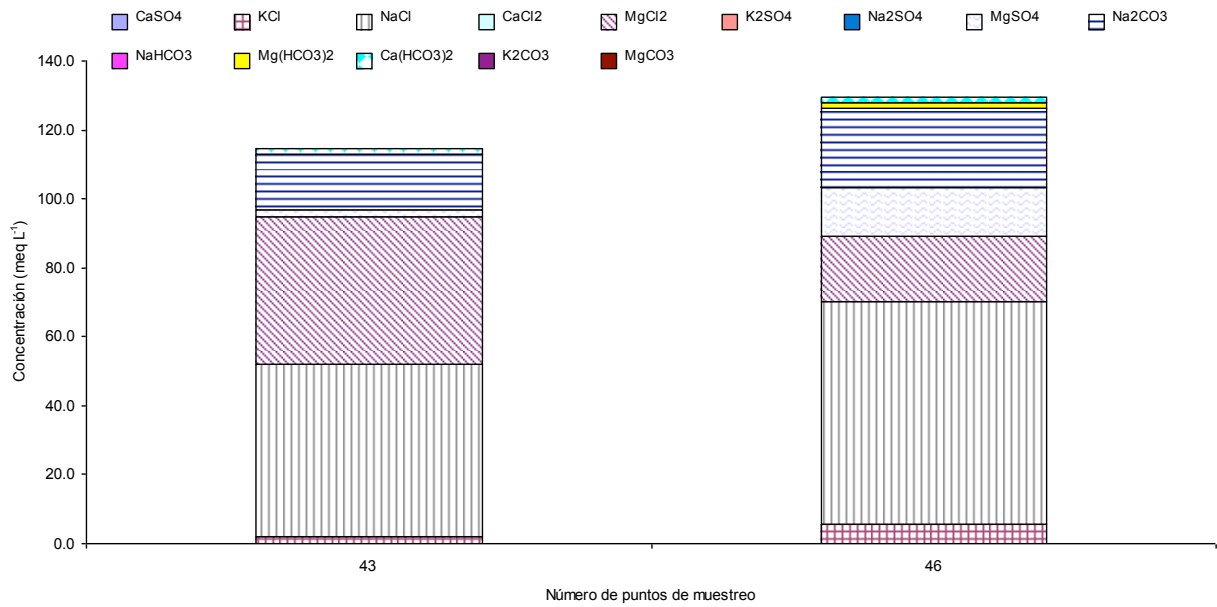


Figura 63. Distribución de las sales hipotéticas en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo, alta concentración).

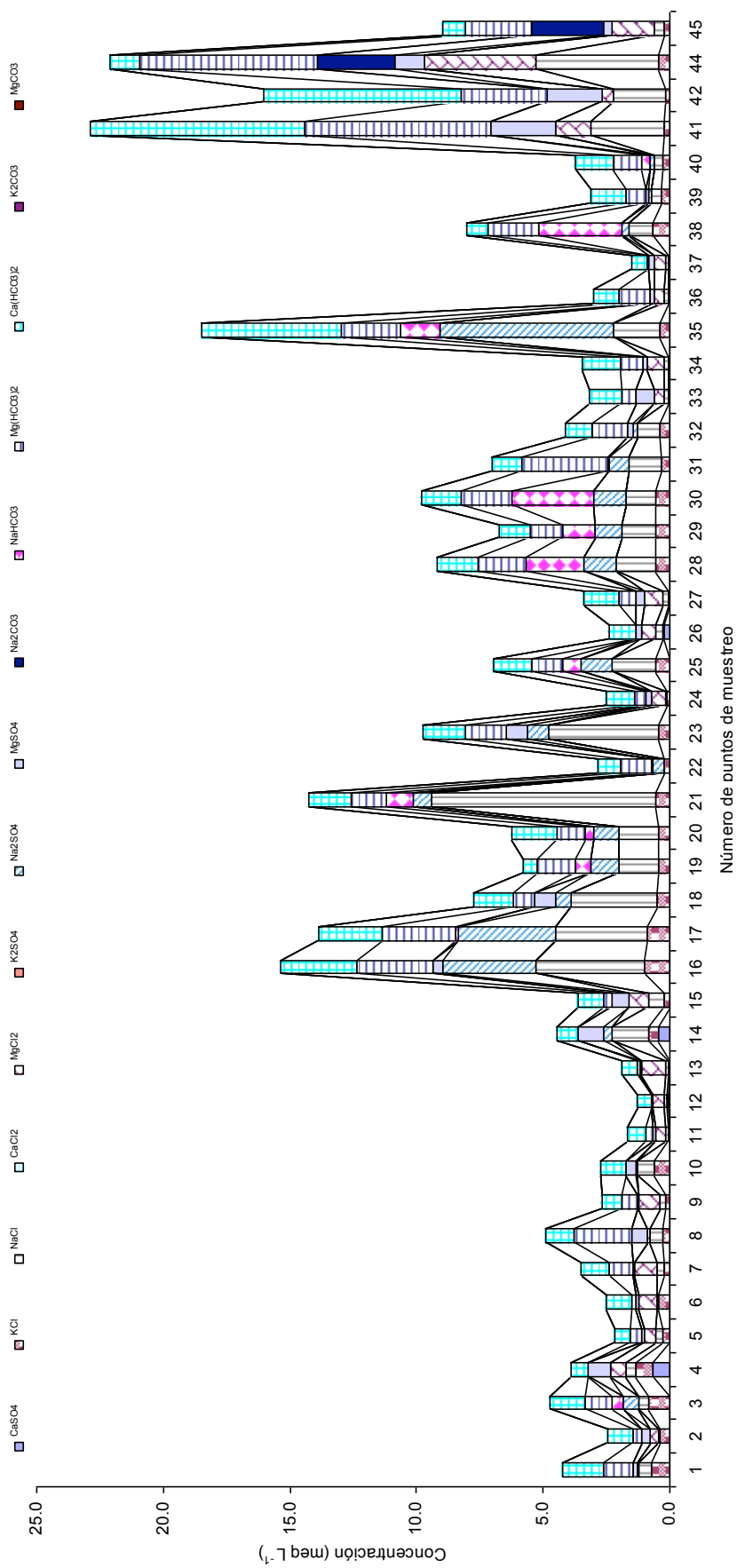


Figura 64. Distribución de las sales hipotéticas en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo, baja concentración).

Cuadro 69. Composición química de las sales hipotéticas de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	meq L <sup>-1</sup>														Suma
	CaSO <sub>4</sub>	KCl	NaCl	CaCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	
1	0.00	0.46	0.20	0.94	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.75	0.96	0.00	0.00	3.46
2	0.00	0.23	0.05	0.17	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.40	0.43	0.00	0.00	1.33
3	0.00	0.25	0.33	0.42	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	0.44	0.53	0.00	0.00	2.23
4	0.00	0.39	0.71	0.00	0.00	0.04	0.00	0.57	0.20	0.00	0.03	1.20	0.00	0.00	3.14
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.20	0.28	0.00	0.18	0.80	0.20	0.02	2.18
6	0.00	0.12	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.17	0.20	1.88	1.10	0.00	0.00	4.12
7	0.00	0.09	0.45	0.00	0.26	0.00	0.00	0.08	0.15	0.00	0.64	0.95	0.00	0.00	2.62
8	0.00	0.06	0.15	0.00	0.69	0.00	0.00	0.13	0.25	0.00	0.17	0.90	0.00	0.00	2.35
9	0.00	0.16	0.68	0.00	0.16	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.54	1.30	0.00	0.00	3.34
10	0.00	0.11	0.20	0.00	0.31	0.00	0.00	0.25	0.20	0.00	0.34	0.70	0.00	0.00	2.11
11	0.00	0.02	0.20	0.00	0.28	0.00	0.00	0.09	0.05	0.00	0.19	0.70	0.00	0.00	1.53
12	0.00	0.02	0.22	0.00	0.36	0.00	0.00	0.11	0.08	0.00	0.07	0.70	0.00	0.00	1.56
13	0.00	0.04	0.20	0.00	0.36	0.00	0.00	0.09	0.10	0.00	0.08	0.70	0.00	0.00	1.57
14	0.00	0.27	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	0.00	0.72	0.72	1.37	0.00	0.00	4.69
15	0.00	0.50	2.40	0.00	0.00	0.00	0.00	1.59	0.12	0.20	1.20	1.80	0.00	0.00	7.81
16	0.00	0.52	2.38	0.00	0.00	0.00	1.47	0.13	0.15	0.00	1.18	1.82	0.00	0.00	7.65
17	0.00	0.28	1.44	0.00	0.28	0.00	0.00	1.18	0.40	0.00	0.54	2.30	0.00	0.00	6.42
18	0.00	0.23	1.35	0.00	1.42	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.77	10.78	0.00	0.00	15.56
19	0.00	0.24	1.40	0.00	1.46	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.81	11.80	0.00	0.00	16.66
20	0.00	0.50	0.00	0.00	1.60	0.00	0.31	0.00	1.20	2.24	3.80	1.49	0.00	0.00	11.14
21	0.00	1.84	2.46	0.00	0.00	0.00	1.53	0.00	3.10	15.91	1.30	0.60	0.00	0.00	26.74
22	0.00	0.68	2.52	0.00	0.00	0.00	1.34	0.00	0.00	3.22	0.20	0.40	0.00	0.00	8.36
23	0.00	0.28	0.82	0.00	0.00	0.00	1.03	0.00	0.00	3.02	0.40	0.60	0.00	0.00	6.15
25	0.00	0.35	1.15	0.00	0.00	0.00	1.89	0.00	0.00	0.54	1.70	2.50	0.00	0.00	8.13
26	0.00	0.33	1.17	0.00	0.00	0.00	1.36	0.16	0.00	0.00	2.34	2.20	0.00	0.00	7.56
27	0.00	0.39	6.81	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.87	1.60	3.40	0.00	0.00	13.64
28	0.00	0.19	0.51	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	1.00	1.10	1.05	0.00	0.00	3.96
29	0.00	0.38	6.02	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00	4.00	2.00	2.10	0.00	0.00	15.13
30	0.00	0.14	0.56	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.45	1.10	0.90	0.00	0.00	3.26
31	0.00	0.24	0.86	0.00	0.00	0.00	0.78	0.00	0.00	0.86	1.20	0.95	0.00	0.00	4.89
32	0.00	0.25	2.05	0.00	0.00	0.00	4.55	1.44	0.00	0.00	0.36	6.45	0.00	0.00	15.10
33	0.00	0.15	0.65	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.65	0.95	0.80	0.00	0.00	3.30
34	0.00	0.18	0.92	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.33	1.40	1.10	0.00	0.00	4.07
35	0.00	0.16	0.54	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.71	1.25	1.05	0.00	0.00	3.84
36	0.00	0.17	0.63	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.34	1.05	0.85	0.00	0.00	3.18
37	0.00	0.02	0.46	0.00	0.02	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.28	0.30	0.00	0.00	1.18
38	0.00	0.12	2.68	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00	0.12	2.13	1.30	1.20	0.00	0.00	7.83
39	0.00	0.33	9.67	0.00	0.00	0.00	2.12	0.00	0.20	5.46	1.20	0.80	0.00	0.00	19.78
41	0.00	0.09	1.85	0.00	1.86	0.00	0.00	5.72	0.00	0.00	0.92	8.17	0.00	0.00	18.61
42	0.00	0.15	1.95	0.00	2.60	0.00	0.00	2.46	0.00	0.00	4.04	8.65	0.00	0.00	19.85
43	0.00	0.21	0.49	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.09	1.00	1.10	0.00	0.00	3.05
44	0.00	0.35	1.15	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	0.00	1.35	2.10	1.70	0.00	0.00	7.07
45	0.00	0.32	3.58	0.00	0.00	0.00	1.14	0.00	0.00	0.93	1.70	2.20	0.00	0.00	9.87
46	0.00	0.30	3.00	0.00	0.00	0.00	1.04	0.00	0.00	0.46	2.00	1.90	0.00	0.00	8.70
47	0.00	0.02	0.58	0.00	0.00	0.00	0.01	0.17	0.00	0.00	0.53	0.95	0.00	0.00	2.26
48	0.00	0.38	1.22	0.00	0.00	0.00	1.24	0.00	0.00	1.69	2.00	1.60	0.00	0.00	8.13
49	0.00	0.06	0.64	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.06	1.09	1.10	0.00	0.00	3.16
50	0.00	0.32	1.78	0.00	0.00	0.00	0.87	0.00	0.00	2.20	2.10	2.60	0.00	0.00	9.87
51	0.00	0.47	0.61	0.00	0.00	0.00	1.08	0.00	0.00	2.47	2.05	2.40	0.00	0.00	9.08
52	0.00	0.31	1.29	0.00	0.00	0.00	0.96	0.00	0.00	1.91	1.30	1.20	0.00	0.00	6.97
53	0.00	0.24	0.81	0.00	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	1.37	0.95	0.80	0.00	0.00	4.53
54	0.00	0.51	1.61	0.00	0.00	0.00	2.25	0.00	0.00	4.16	1.40	1.10	0.00	0.00	11.03
24	0.00	4.80	81.06	0.00	5.14	0.00	0.00	15.43	0.00	0.00	12.83	1.30	0.00	0.00	120.56
40	0.00	1.95	61.46	0.00	38.59	0.00	0.00	2.86	0.20	0.00	4.05	1.20	0.00	0.00	110.31

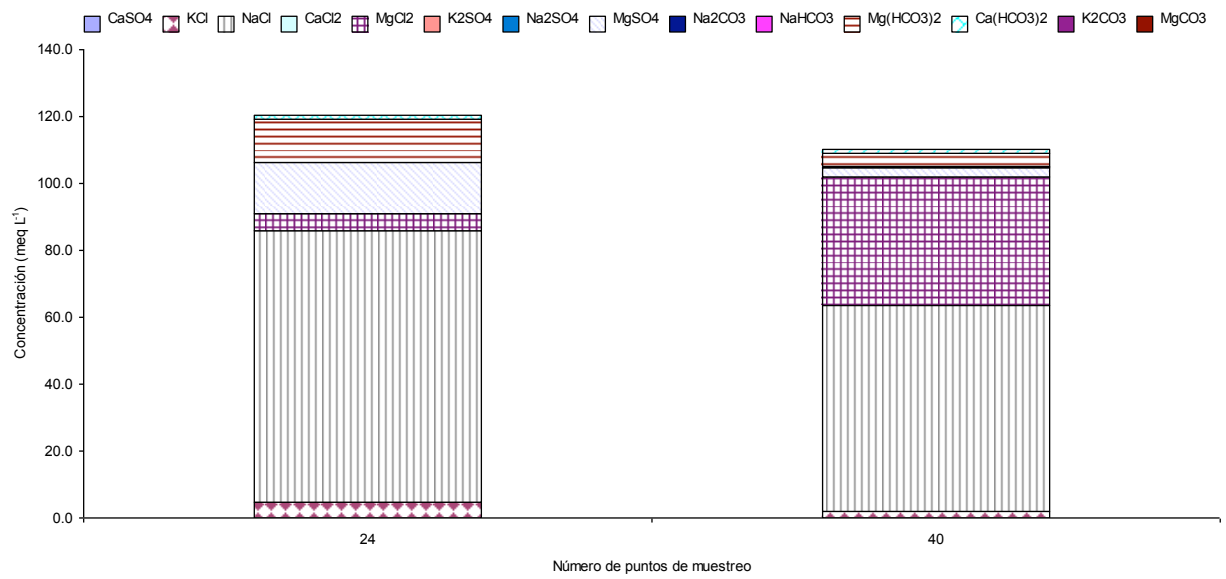


Figura 65. Distribución de las sales hipotéticas en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo, alta concentración).

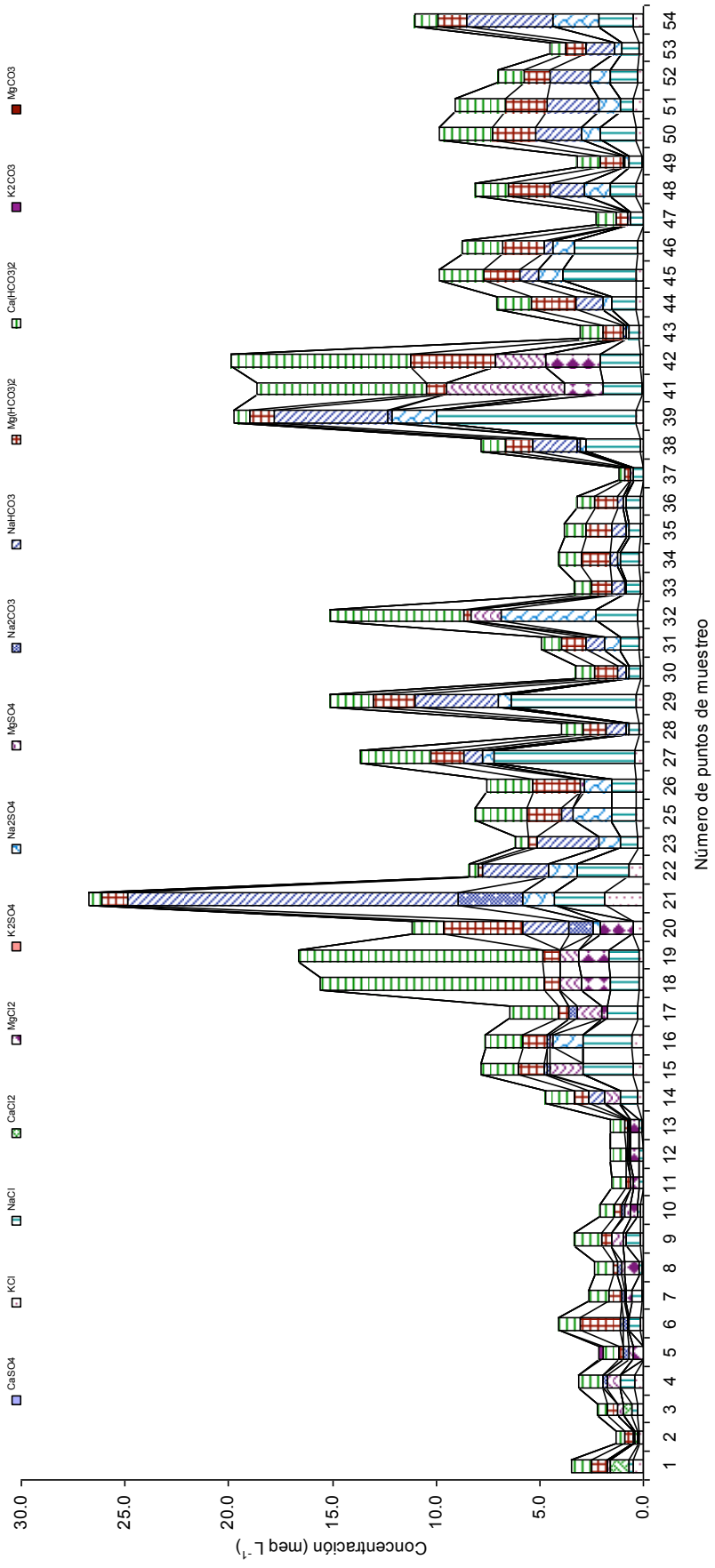


Figura 66. Distribución de las sales hipotéticas en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo, baja concentración).

## 5.14 Efecto del ion fósforo

En este trabajo se determinaron los fosfatos en forma de ortofosfatos, esto es porque son los más comunes en la naturaleza, sobre todo, en forma de apatita. Los fosfatos forman una parte importante en las aguas urbano-industriales, pueden ser eliminados por métodos físico-químicos como el usado con el cloruro férrico o se pueden retener en los lodos activados.

Según Ayers y Westcot (1987), las concentraciones de fósforo están entre 0 y 2 mg L<sup>-1</sup>, en el primer muestreo (Cuadro 70) se tiene la mayor concentración de 1.649 mg L<sup>-1</sup> en el punto 38, lo que coincide con lo antes dicho. Sin embargo esta concentración esta sobre las 90 ppb o 0.09 ppm que es cuando empieza a acelerar la eutrofización.

En el segundo muestreo (Cuadro 71), la mayor cantidad de fósforo se encuentra en el punto 27 en el río Apizaquito, delante de la trinidad (Amajal de Guerrero), con una concentración de 2.572 mg L<sup>-1</sup>, sumamente alto si tomamos de base las 90 ppb en donde se acelera la eutrofización.

En las Figuras 67 y 68 se tiene la distribución de los ortofosfatos en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac del primer y segundo muestreo respectivamente. En el primer y segundo muestreo, en el 48% de los puntos va a suceder eutrofización.

Cuadro 70. Problemas de eutrofización de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No.	mg L <sup>-1</sup> PO <sub>4</sub>	mg L <sup>-1</sup> P	Clasificación
1	0.157	0.051	No hay eutrofización
2	0.124	0.040	No hay eutrofización
3	0.284	0.093	Acelera la eutrofización
4	0.331	0.108	Acelera la eutrofización
5	0.000	0.000	No hay eutrofización
6	0.088	0.029	No hay eutrofización
7	0.030	0.010	No hay eutrofización
8	0.052	0.017	No hay eutrofización
9	0.240	0.078	No hay eutrofización
10	2.447	0.798	Acelera la eutrofización
11	0.237	0.077	No hay eutrofización
12	0.000	0.000	No hay eutrofización
13	0.143	0.047	No hay eutrofización
14	3.254	1.061	Acelera la eutrofización
15	0.348	0.113	Acelera la eutrofización
16	3.881	1.266	Acelera la eutrofización
17	3.672	1.198	Acelera la eutrofización
18	2.173	0.709	Acelera la eutrofización
19	2.988	0.974	Acelera la eutrofización
20	3.622	1.181	Acelera la eutrofización
21	3.579	1.167	Acelera la eutrofización
22	2.454	0.800	Acelera la eutrofización
23	3.449	1.125	Acelera la eutrofización
24	0.179	0.058	No hay eutrofización
25	3.946	1.287	Acelera la eutrofización
26	1.214	0.396	Acelera la eutrofización
27	0.132	0.043	No hay eutrofización
28	4.011	1.308	Acelera la eutrofización
29	2.793	0.911	Acelera la eutrofización
30	2.901	0.946	Acelera la eutrofización
31	2.086	0.680	Acelera la eutrofización
32	2.476	0.807	Acelera la eutrofización
33	0.000	0.000	No hay eutrofización
34	0.014	0.005	No hay eutrofización
35	1.582	0.516	Acelera la eutrofización
36	0.064	0.021	No hay eutrofización
37	0.119	0.039	No hay eutrofización
38	5.057	1.649	Acelera la eutrofización
39	0.036	0.012	No hay eutrofización
40	0.008	0.003	No hay eutrofización
41	0.000	0.000	No hay eutrofización
42	0.000	0.000	No hay eutrofización
43	0.000	0.000	No hay eutrofización
44	0.135	0.044	No hay eutrofización
45	0.058	0.019	No hay eutrofización
46	0.014	0.005	No hay eutrofización



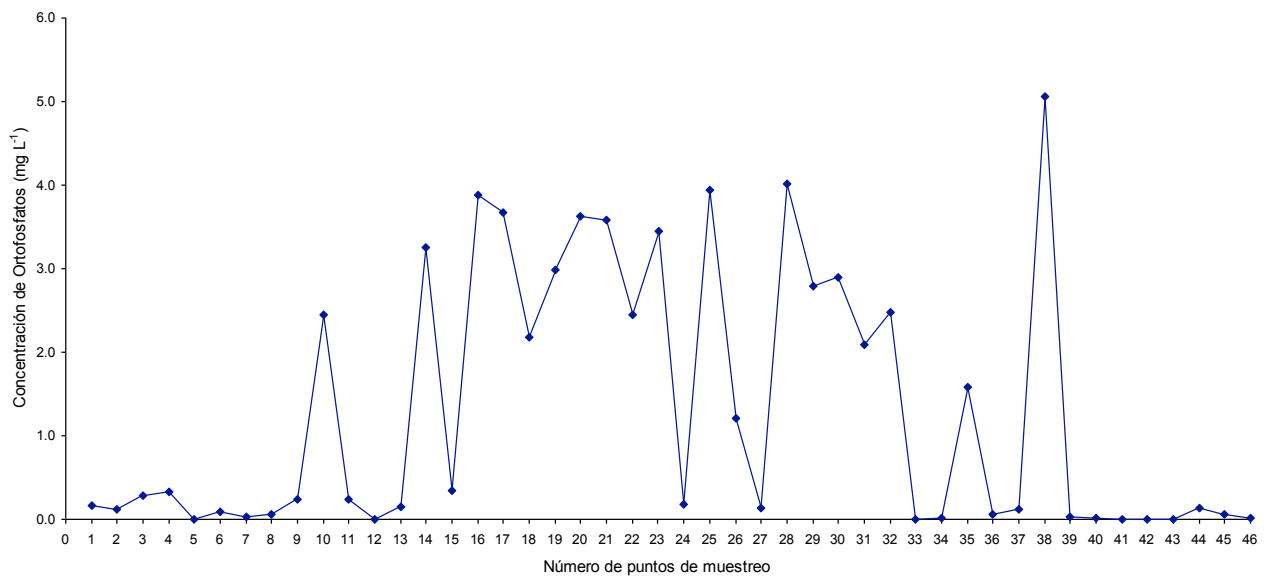


Figura 67. Distribución de los ortofosfatos en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

Cuadro 71. Problemas de eutrofización de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	mg L <sup>-1</sup> PO <sub>4</sub>	mg L <sup>-1</sup> P	Clasificación
1	0.251	0.082	No hay eutrofización
2	0.268	0.087	No hay eutrofización
3	0.199	0.065	No hay eutrofización
4	0.201	0.066	No hay eutrofización
5	0.102	0.033	No hay eutrofización
6	0.044	0.014	No hay eutrofización
7	0.182	0.059	No hay eutrofización
8	0.502	0.164	Acelera la eutrofización
9	2.670	0.871	Acelera la eutrofización
10	2.159	0.704	Acelera la eutrofización
11	0.033	0.011	No hay eutrofización
12	0.141	0.046	No hay eutrofización
13	0.146	0.048	No hay eutrofización
14	0.119	0.039	No hay eutrofización
15	4.523	1.475	Acelera la eutrofización
16	4.862	1.585	Acelera la eutrofización
17	2.959	0.965	Acelera la eutrofización
18	0.000	0.000	No hay eutrofización
19	0.008	0.003	No hay eutrofización
20	0.160	0.052	No hay eutrofización
21	0.279	0.091	Acelera la eutrofización
22	3.153	1.028	Acelera la eutrofización
23	3.939	1.284	Acelera la eutrofización
24	0.011	0.004	No hay eutrofización
25	7.097	2.313	Acelera la eutrofización
26	4.956	1.616	Acelera la eutrofización
27	7.890	2.572	Acelera la eutrofización
28	0.132	0.043	No hay eutrofización
29	3.990	1.301	Acelera la eutrofización
30	0.008	0.003	No hay eutrofización
31	2.476	0.807	Acelera la eutrofización
32	4.768	1.554	Acelera la eutrofización
33	0.179	0.058	No hay eutrofización
34	1.308	0.426	Acelera la eutrofización
35	0.135	0.044	No hay eutrofización
36	0.030	0.010	No hay eutrofización
37	0.000	0.000	No hay eutrofización
38	0.047	0.015	No hay eutrofización
39	0.030	0.010	No hay eutrofización
40	0.006	0.002	No hay eutrofización
41	0.052	0.017	No hay eutrofización
42	0.050	0.016	No hay eutrofización
43	0.022	0.007	No hay eutrofización
44	5.828	1.900	Acelera la eutrofización
45	5.172	1.686	Acelera la eutrofización
46	3.168	1.033	Acelera la eutrofización
47	0.000	0.000	No hay eutrofización
48	3.687	1.202	Acelera la eutrofización
49	0.314	0.103	Acelera la eutrofización
50	6.462	2.107	Acelera la eutrofización
51	4.199	1.369	Acelera la eutrofización
52	3.773	1.230	Acelera la eutrofización
53	1.704	0.556	Acelera la eutrofización
54	4.083	1.331	Acelera la eutrofización

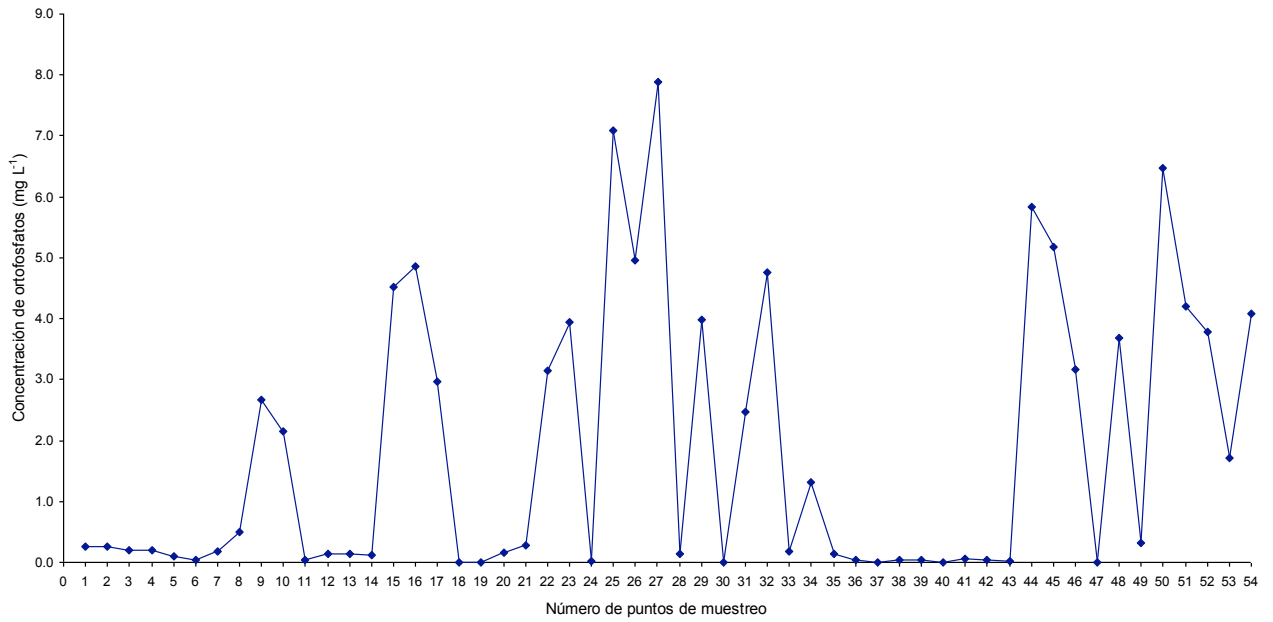


Figura 68. Distribución de los ortofosfatos en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

## 5.15 Número de partículas

Utilizando la teoría expuesta en las propiedades coligativas de las soluciones y la ley de los gases ideales entre otros conceptos, se puede calcular la cantidad de partículas presentes en cada sitio de muestreo. Como se puede apreciar en las Figuras 69-76, se tienen cantidades enormes que están en el orden de  $10^{19}$  y  $10^{23}$ . Es lógico pensar que cuando se tiene mayor concentración, también se tendrá mayor cantidad de partículas, esto es cierto, sin embargo, se puede observar, que a pesar de las diferencia de concentraciones entre los nacimientos del sistema hidrográfico y las aguas más contaminadas, el número de partículas no excede un intervalo establecido.

Es interesante observar, que a pesar de las diferentes variaciones de concentración, que hoy en día llaman contaminación, no se excede el intervalo a pesar de los billones de años que tiene de formación nuestro planeta. Los ciclos que tienen todos los elementos de la naturaleza, equitativamente, hacen este efecto, no existe acumulación de ninguna especie, todo es parte de un ciclo, así por ejemplo, se ha estudiado que una gota de agua inicia un nuevo ciclo cada 2000 años.

Las siguientes igualdades sirven para determinar el número de partículas.

1 gramo-elemento=Número de Avogadro

1 gramo-átomo=Número de Avogadro

1 gramo-ion=Número de Avogadro

1 gramo-mol=Número de Avogadro

1 gramo-equivalente=Número de Avogadro

Si comparamos el número de partículas calculada en el Cuadro 14 con base en el Cuadro 12 de Taylor y McLennan (1985), concluimos que los intervalos encontrados en este trabajo son correctos y demuestran la universalidad de los elementos en sus ciclos respectivos. En los Cuadros 72 y 73 se tienen el número de partículas en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac del primer y segundo muestreo respectivamente.

Cuadro 72. Número de partículas de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No.	No. Part. Ca <sup>2+</sup>	No. Part. Mg <sup>2+</sup>	No. Part. Na <sup>+</sup>	No. Part. K <sup>+</sup>	No. Part. CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	No. Part. HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	No. Part. Cl <sup>-</sup>	No. Part. SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
1	9.64.E+20	8.43.E+20	3.01.E+20	4.28.E+20	0.00.E+00	1.75.E+21	7.83.E+20	7.48.E+19
2	6.02.E+20	6.02.E+20	6.02.E+19	2.20.E+20	0.00.E+00	9.09.E+20	4.22.E+20	2.07.E+20
3	8.43.E+20	6.26.E+20	9.03.E+20	4.88.E+20	0.00.E+00	1.87.E+21	7.23.E+20	3.75.E+20
4	8.43.E+20	9.03.E+20	2.41.E+20	3.79.E+20	0.00.E+00	4.82.E+20	9.94.E+20	9.64.E+20
5	3.61.E+20	6.02.E+20	1.81.E+20	1.69.E+20	0.00.E+00	6.74.E+20	6.02.E+20	6.87.E+19
6	6.02.E+20	6.02.E+20	6.02.E+19	2.50.E+20	0.00.E+00	7.53.E+20	7.23.E+20	8.53.E+19
7	6.62.E+20	1.14.E+21	1.51.E+20	1.35.E+20	0.00.E+00	1.28.E+21	8.43.E+20	3.31.E+19
8	6.62.E+20	1.81.E+21	3.01.E+20	1.69.E+20	0.00.E+00	2.12.E+21	5.42.E+20	3.61.E+20
9	4.82.E+20	9.03.E+20	1.20.E+20	1.11.E+20	0.00.E+00	9.03.E+20	7.23.E+20	4.44.E+19
10	6.02.E+20	2.41.E+20	4.22.E+20	3.73.E+20	0.00.E+00	6.62.E+20	7.83.E+20	2.50.E+20
11	4.22.E+20	4.82.E+20	7.23.E+19	3.01.E+19	0.00.E+00	6.38.E+20	3.31.E+20	6.27.E+19
12	3.61.E+20	3.01.E+20	6.62.E+19	3.01.E+19	0.00.E+00	3.49.E+20	3.61.E+20	7.40.E+19
13	3.61.E+20	6.62.E+20	8.43.E+19	3.01.E+19	0.00.E+00	4.52.E+20	6.62.E+20	5.40.E+19
14	7.83.E+20	6.02.E+20	1.05.E+21	2.29.E+20	0.00.E+00	9.45.E+20	1.08.E+21	7.22.E+20
15	6.02.E+20	1.08.E+21	3.61.E+20	1.23.E+20	0.00.E+00	7.47.E+20	9.64.E+20	4.07.E+20
16	1.81.E+21	2.05.E+21	4.82.E+21	5.90.E+20	0.00.E+00	3.84.E+21	3.19.E+21	2.45.E+21
17	1.51.E+21	1.75.E+21	4.58.E+21	5.27.E+20	0.00.E+00	3.52.E+21	2.71.E+21	2.32.E+21
18	9.64.E+20	9.82.E+20	2.44.E+21	2.86.E+20	0.00.E+00	1.70.E+21	2.23.E+21	8.53.E+20
19	3.31.E+20	9.03.E+20	1.96.E+21	2.83.E+20	0.00.E+00	1.70.E+21	1.20.E+21	6.70.E+20
20	1.08.E+21	6.62.E+20	1.75.E+21	2.77.E+20	0.00.E+00	2.04.E+21	1.20.E+21	6.18.E+20
21	1.02.E+21	8.43.E+20	6.38.E+21	3.49.E+20	0.00.E+00	2.66.E+21	5.66.E+21	4.55.E+20
22	5.42.E+20	7.23.E+20	3.01.E+20	1.51.E+20	0.00.E+00	1.39.E+21	1.45.E+20	2.49.E+20
23	1.02.E+21	9.64.E+20	3.61.E+21	2.83.E+20	0.00.E+00	2.29.E+21	2.89.E+21	4.88.E+20
24	6.62.E+20	7.23.E+20	6.02.E+19	5.42.E+19	0.00.E+00	9.82.E+20	4.22.E+20	1.41.E+20
25	9.03.E+20	7.23.E+20	2.23.E+21	3.31.E+20	0.00.E+00	2.20.E+21	1.39.E+21	7.23.E+20
26	7.83.E+20	4.82.E+20	1.51.E+20	3.01.E+19	0.00.E+00	6.87.E+20	5.42.E+20	2.60.E+20
27	8.43.E+20	1.02.E+21	1.51.E+20	3.01.E+19	0.00.E+00	1.29.E+21	6.02.E+20	2.19.E+20
28	9.64.E+20	1.14.E+21	3.10.E+21	3.28.E+20	0.00.E+00	3.35.E+21	1.26.E+21	7.83.E+20
29	7.23.E+20	7.83.E+20	2.20.E+21	3.34.E+20	0.00.E+00	2.40.E+21	1.14.E+21	6.35.E+20
30	9.64.E+20	1.20.E+21	3.40.E+21	3.43.E+20	0.00.E+00	4.24.E+21	1.02.E+21	7.83.E+20
31	7.23.E+20	2.05.E+21	1.26.E+21	2.05.E+20	0.00.E+00	2.70.E+21	9.64.E+20	4.61.E+20
32	6.62.E+20	9.64.E+20	6.32.E+20	2.32.E+20	0.00.E+00	1.54.E+21	7.83.E+20	2.34.E+20
33	7.83.E+20	1.02.E+21	9.03.E+19	3.01.E+19	0.00.E+00	1.19.E+21	3.61.E+20	4.25.E+20
34	9.03.E+20	1.02.E+21	1.08.E+20	3.01.E+19	0.00.E+00	1.48.E+21	5.42.E+20	8.79.E+19
35	3.35.E+21	1.39.E+21	6.14.E+21	2.32.E+20	0.00.E+00	5.36.E+21	1.32.E+21	4.14.E+21
36	6.02.E+20	1.08.E+21	1.08.E+20	3.01.E+19	0.00.E+00	1.42.E+21	3.61.E+20	9.48.E+19
37	3.61.E+20	4.52.E+20	6.02.E+19	3.01.E+19	0.00.E+00	4.09.E+20	3.61.E+20	1.55.E+20
38	5.06.E+20	1.20.E+21	2.70.E+21	4.06.E+20	0.00.E+00	3.54.E+21	9.64.E+20	1.91.E+20
39	8.43.E+20	5.42.E+20	3.13.E+20	1.93.E+20	0.00.E+00	1.26.E+21	4.22.E+20	1.55.E+20
40	9.03.E+20	6.62.E+20	4.94.E+20	1.72.E+20	0.00.E+00	1.81.E+21	3.61.E+20	1.21.E+20
41	5.12.E+21	6.80.E+21	1.72.E+21	1.48.E+20	0.00.E+00	9.94.E+21	2.71.E+21	1.54.E+21
42	4.70.E+21	3.61.E+21	1.23.E+21	1.02.E+20	0.00.E+00	7.05.E+21	1.63.E+21	1.30.E+21
44	7.05.E+20	7.59.E+21	4.76.E+21	2.71.E+20	1.83.E+21	5.43.E+21	5.84.E+21	7.14.E+20
45	5.24.E+20	2.83.E+21	1.91.E+21	1.23.E+20	1.69.E+21	2.33.E+21	1.39.E+21	2.06.E+20
43	1.26.E+21	2.69.E+22	3.96.E+22	1.33.E+21	9.64.E+21	3.07.E+21	5.72.E+22	1.17.E+21
46	9.64.E+20	2.10.E+22	5.27.E+22	3.42.E+21	1.39.E+22	3.91.E+21	5.36.E+22	8.72.E+21

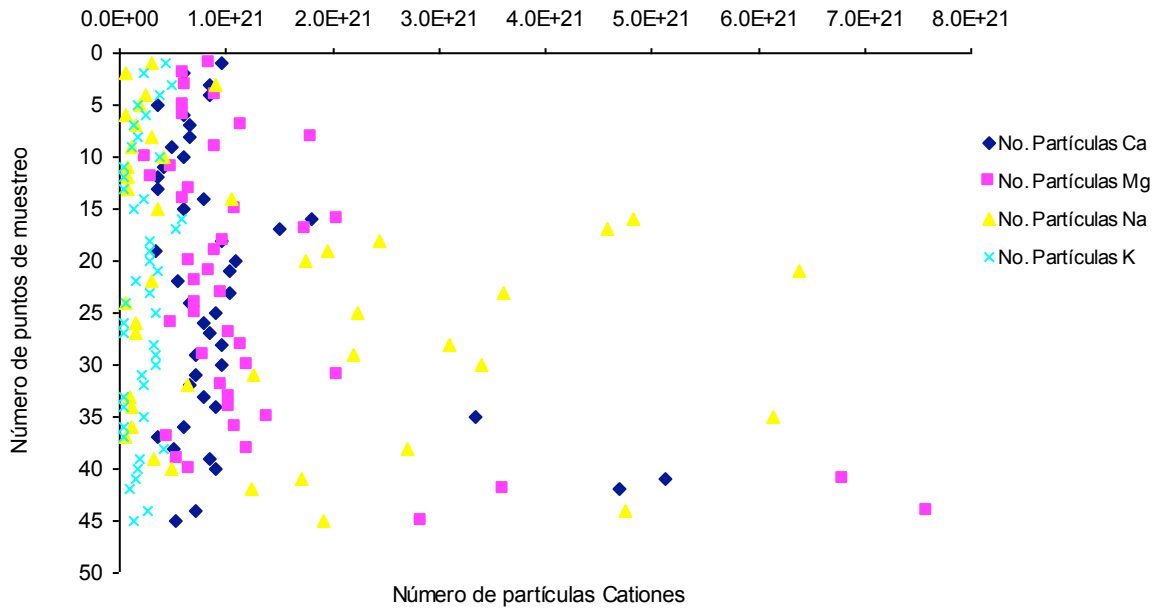


Figura 69. Distribución del número de partículas (cationes baja concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

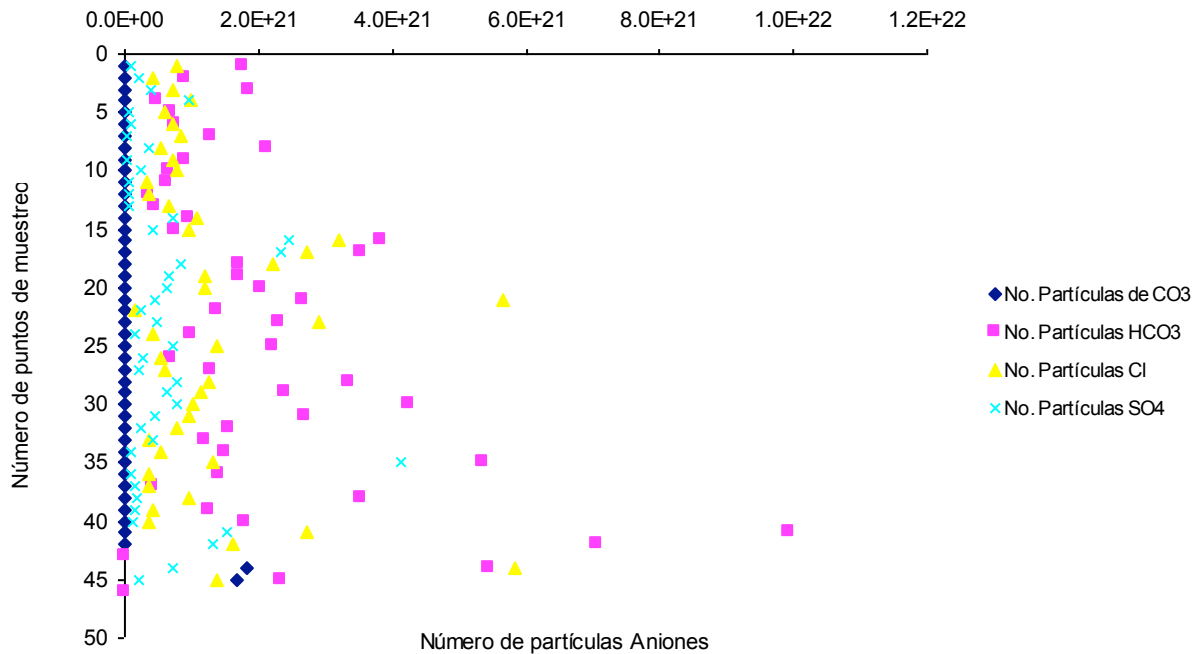


Figura 70. Distribución del número de partículas (aniones baja concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

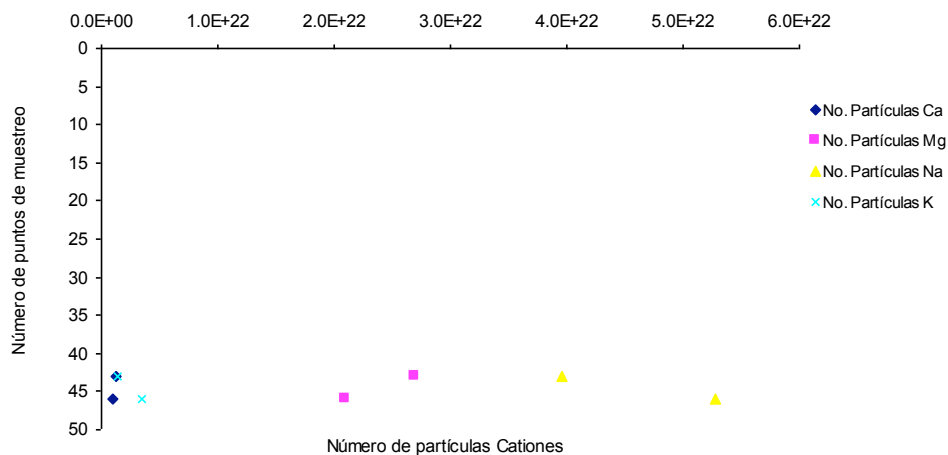


Figura 71. Distribución del número de partículas (cationes alta concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

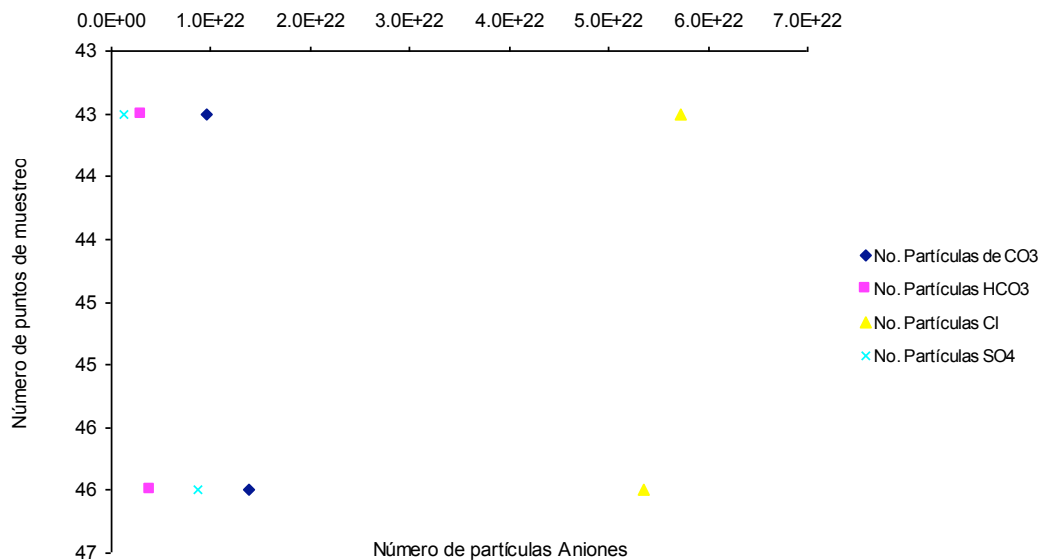


Figura 72. Distribución del número de partículas (aniones alta concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

Cuadro 73. Número de partículas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	No. Part. Ca <sup>2+</sup>	No. Part. Mg <sup>2+</sup>	No. Part. Na <sup>+</sup>	No. Part. K <sup>+</sup>	No. Part. CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	No. Part. HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	No. Part. Cl <sup>-</sup>	No. Part. SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
1	1.14.E+21	5.42.E+20	1.20.E+20	2.74.E+20	0.00.E+00	1.11.E+21	8.43.E+20	9.05.E+19
2	3.61.E+20	2.71.E+20	3.01.E+19	1.39.E+20	0.00.E+00	4.82.E+20	2.71.E+20	3.01.E+19
3	5.72.E+20	4.22.E+20	1.99.E+20	1.51.E+20	0.00.E+00	5.54.E+20	6.02.E+20	1.57.E+20
4	7.23.E+20	3.61.E+20	5.48.E+20	2.59.E+20	1.20.E+20	6.99.E+20	6.62.E+20	3.70.E+20
5	4.82.E+20	5.42.E+20	1.69.E+20	1.20.E+20	3.01.E+20	6.20.E+20	3.01.E+20	1.20.E+20
6	6.62.E+20	1.17.E+21	5.72.E+20	7.23.E+19	1.02.E+20	1.86.E+21	4.22.E+20	4.35.E+19
7	5.72.E+20	5.90.E+20	3.61.E+20	5.42.E+19	9.03.E+19	9.94.E+20	4.82.E+20	4.53.E+19
8	5.42.E+20	5.96.E+20	2.41.E+20	3.31.E+19	1.51.E+20	6.14.E+20	5.42.E+20	8.01.E+19
9	7.83.E+20	7.23.E+20	4.09.E+20	9.33.E+19	0.00.E+00	1.06.E+21	6.02.E+20	3.02.E+20
10	4.22.E+20	4.82.E+20	2.41.E+20	6.62.E+19	1.20.E+20	5.42.E+20	3.73.E+20	1.50.E+20
11	4.22.E+20	3.37.E+20	1.51.E+20	1.20.E+19	3.01.E+19	5.60.E+20	3.01.E+20	5.14.E+19
12	4.22.E+20	3.25.E+20	1.81.E+20	1.20.E+19	4.82.E+19	4.40.E+20	3.61.E+20	6.35.E+19
13	4.22.E+20	3.19.E+20	1.81.E+20	2.41.E+19	6.02.E+19	4.46.E+20	3.61.E+20	5.40.E+19
14	8.25.E+20	9.03.E+20	9.33.E+20	1.63.E+20	0.00.E+00	1.63.E+21	6.62.E+20	4.71.E+20
15	1.08.E+21	7.23.E+20	2.60.E+21	3.01.E+20	7.23.E+19	1.82.E+21	1.75.E+21	9.57.E+20
16	1.10.E+21	7.89.E+20	2.41.E+21	3.13.E+20	9.03.E+19	1.91.E+21	1.75.E+21	9.66.E+20
17	1.39.E+21	1.20.E+21	1.11.E+21	1.69.E+20	2.41.E+20	1.61.E+21	1.20.E+21	7.14.E+20
18	6.49.E+21	1.93.E+21	8.13.E+20	1.39.E+20	0.00.E+00	6.72.E+21	1.81.E+21	6.09.E+20
19	7.11.E+21	1.94.E+21	8.43.E+20	1.45.E+20	0.00.E+00	7.32.E+21	1.87.E+21	5.74.E+20
20	8.97.E+20	3.25.E+21	2.26.E+21	3.01.E+20	7.23.E+20	4.19.E+21	1.26.E+21	3.66.E+20
21	3.61.E+20	7.83.E+20	1.39.E+22	1.11.E+21	1.87.E+21	1.03.E+22	2.59.E+21	9.22.E+20
22	2.41.E+20	1.20.E+20	4.26.E+21	4.09.E+20	0.00.E+00	2.17.E+21	1.93.E+21	8.09.E+20
23	3.61.E+20	2.41.E+20	2.93.E+21	1.66.E+20	0.00.E+00	2.34.E+21	6.62.E+20	6.18.E+20
25	1.51.E+21	1.02.E+21	2.16.E+21	2.08.E+20	0.00.E+00	2.75.E+21	9.03.E+20	1.14.E+21
26	1.32.E+21	1.51.E+21	1.52.E+21	1.99.E+20	0.00.E+00	2.62.E+21	9.03.E+20	9.14.E+20
27	2.05.E+21	9.64.E+20	4.97.E+21	2.35.E+20	0.00.E+00	3.36.E+21	4.34.E+21	3.42.E+20
28	6.32.E+20	6.62.E+20	9.76.E+20	1.14.E+20	0.00.E+00	1.84.E+21	4.22.E+20	6.70.E+19
29	1.26.E+21	1.20.E+21	6.41.E+21	2.29.E+20	0.00.E+00	4.69.E+21	3.85.E+21	3.80.E+20
30	5.42.E+20	6.62.E+20	6.74.E+20	8.43.E+19	0.00.E+00	1.43.E+21	4.22.E+20	6.61.E+19
31	5.72.E+20	7.23.E+20	1.51.E+21	1.45.E+20	0.00.E+00	1.75.E+21	6.62.E+20	4.70.E+20
32	3.88.E+21	1.08.E+21	3.97.E+21	1.51.E+20	0.00.E+00	3.87.E+21	1.39.E+21	3.61.E+21
33	4.82.E+20	5.72.E+20	8.43.E+20	9.03.E+19	0.00.E+00	1.49.E+21	4.82.E+20	6.02.E+19
34	6.62.E+20	8.43.E+20	8.37.E+20	1.05.E+20	0.00.E+00	1.65.E+21	6.62.E+20	8.53.E+19
35	6.32.E+20	7.53.E+20	8.31.E+20	9.64.E+19	0.00.E+00	1.75.E+21	4.22.E+20	7.83.E+19
36	5.12.E+20	6.32.E+20	6.68.E+20	1.02.E+20	0.00.E+00	1.40.E+21	4.82.E+20	8.70.E+19
37	1.81.E+20	2.41.E+20	2.77.E+20	1.20.E+19	0.00.E+00	3.31.E+20	3.01.E+20	6.02.E+19
38	7.23.E+20	7.83.E+20	3.14.E+21	6.93.E+19	7.23.E+19	2.76.E+21	1.69.E+21	2.29.E+20
39	4.82.E+20	7.23.E+20	1.05.E+22	1.96.E+20	1.20.E+20	4.20.E+21	6.02.E+21	1.28.E+21
41	4.92.E+21	5.12.E+21	1.11.E+21	5.12.E+19	0.00.E+00	5.19.E+21	2.29.E+21	3.44.E+21
42	5.21.E+21	5.48.E+21	1.17.E+21	9.03.E+19	0.00.E+00	7.95.E+21	2.83.E+21	1.48.E+21
43	6.62.E+20	6.02.E+20	4.46.E+20	1.23.E+20	0.00.E+00	1.37.E+21	4.22.E+20	9.74.E+19
44	1.02.E+21	1.26.E+21	1.76.E+21	2.11.E+20	0.00.E+00	3.21.E+21	9.03.E+20	2.55.E+20
45	1.32.E+21	1.02.E+21	3.40.E+21	1.93.E+20	0.00.E+00	2.78.E+21	2.35.E+21	6.87.E+20
46	1.14.E+21	1.20.E+21	2.71.E+21	1.81.E+20	0.00.E+00	2.49.E+21	1.99.E+21	6.27.E+20
47	5.72.E+20	4.22.E+20	3.55.E+20	1.20.E+19	0.00.E+00	9.27.E+20	3.61.E+20	1.11.E+20
48	9.64.E+20	1.20.E+21	2.50.E+21	2.26.E+20	0.00.E+00	3.06.E+21	9.64.E+20	7.48.E+20
49	6.62.E+20	6.93.E+20	5.12.E+20	3.61.E+19	0.00.E+00	1.37.E+21	4.22.E+20	1.61.E+20
50	1.57.E+21	1.26.E+21	2.92.E+21	1.93.E+20	0.00.E+00	4.01.E+21	1.26.E+21	5.22.E+20
51	1.45.E+21	1.23.E+21	2.51.E+21	2.83.E+20	0.00.E+00	3.85.E+21	1.08.E+21	6.53.E+20
52	7.23.E+20	7.83.E+20	2.51.E+21	1.87.E+20	0.00.E+00	2.55.E+21	9.64.E+20	5.78.E+20
53	4.82.E+20	5.72.E+20	1.53.E+21	1.42.E+20	0.00.E+00	1.80.E+21	6.32.E+20	2.15.E+20
54	6.62.E+20	8.43.E+20	4.83.E+21	3.07.E+20	1.20.E+20	3.85.E+21	1.28.E+21	1.36.E+21
24	7.83.E+20	2.01.E+22	4.88.E+22	2.89.E+21	0.00.E+00	7.30.E+21	5.42.E+22	9.29.E+21
40	7.23.E+20	2.74.E+22	3.71.E+22	1.17.E+21	1.20.E+20	1.50.E+21	6.14.E+22	1.72.E+21



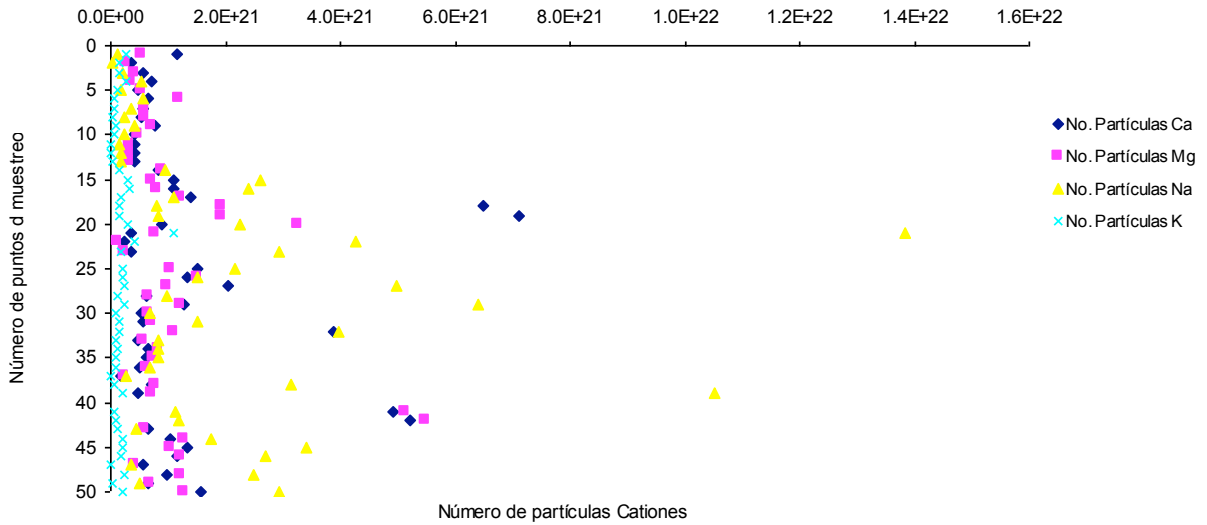


Figura 73. Distribución del número de partículas (cationes baja concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

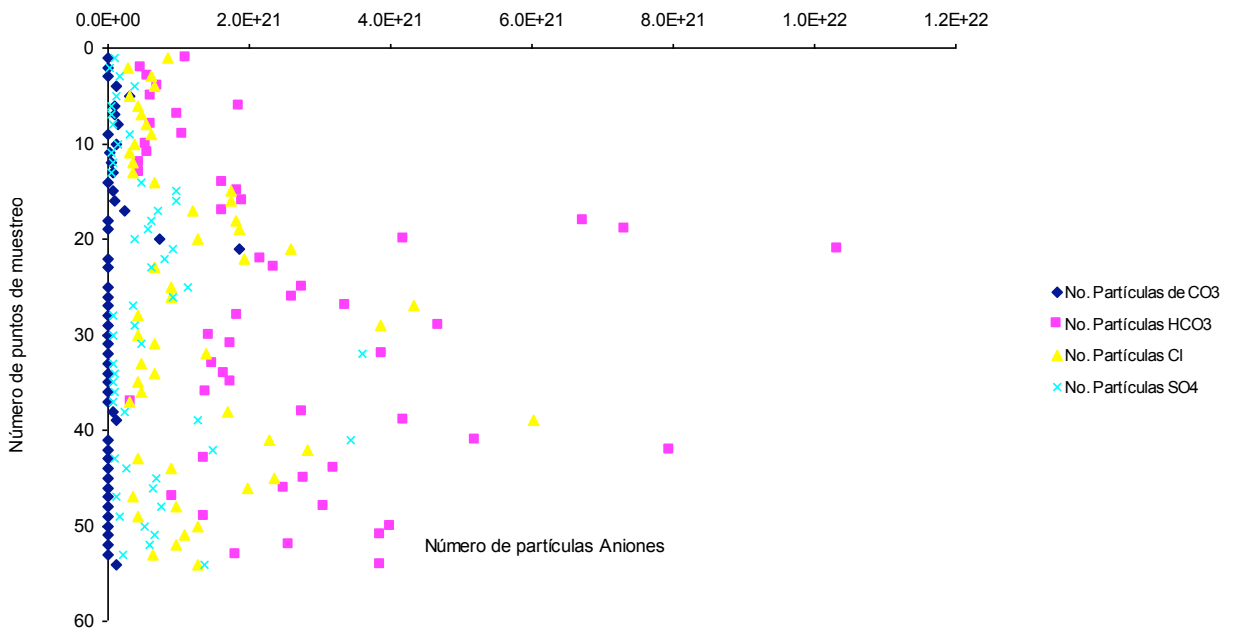


Figura 74. Distribución del número de partículas (aniones baja concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

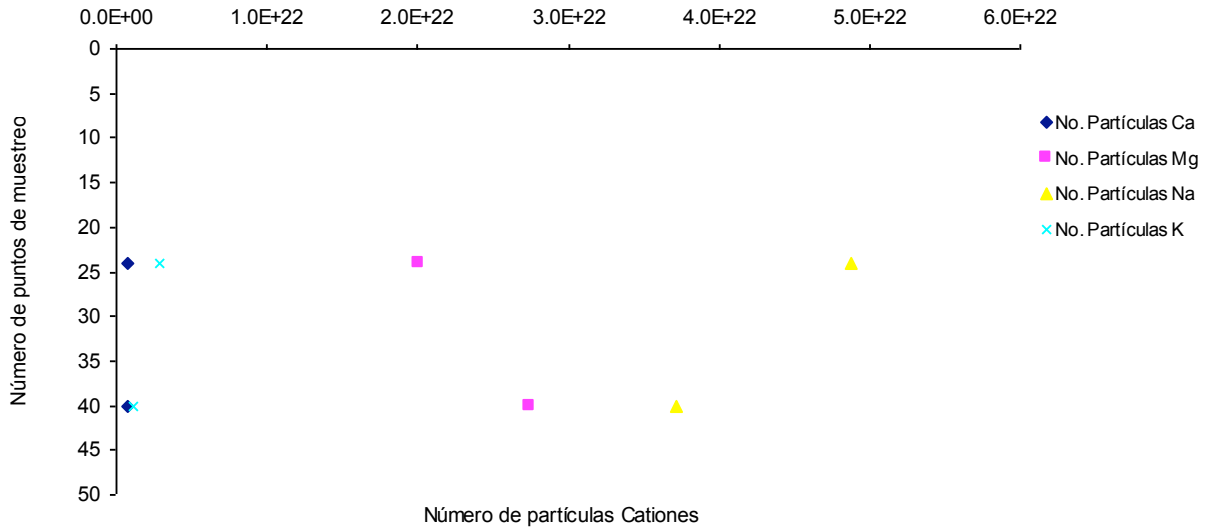


Figura 75. Distribución del número de partículas (cationes alta concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

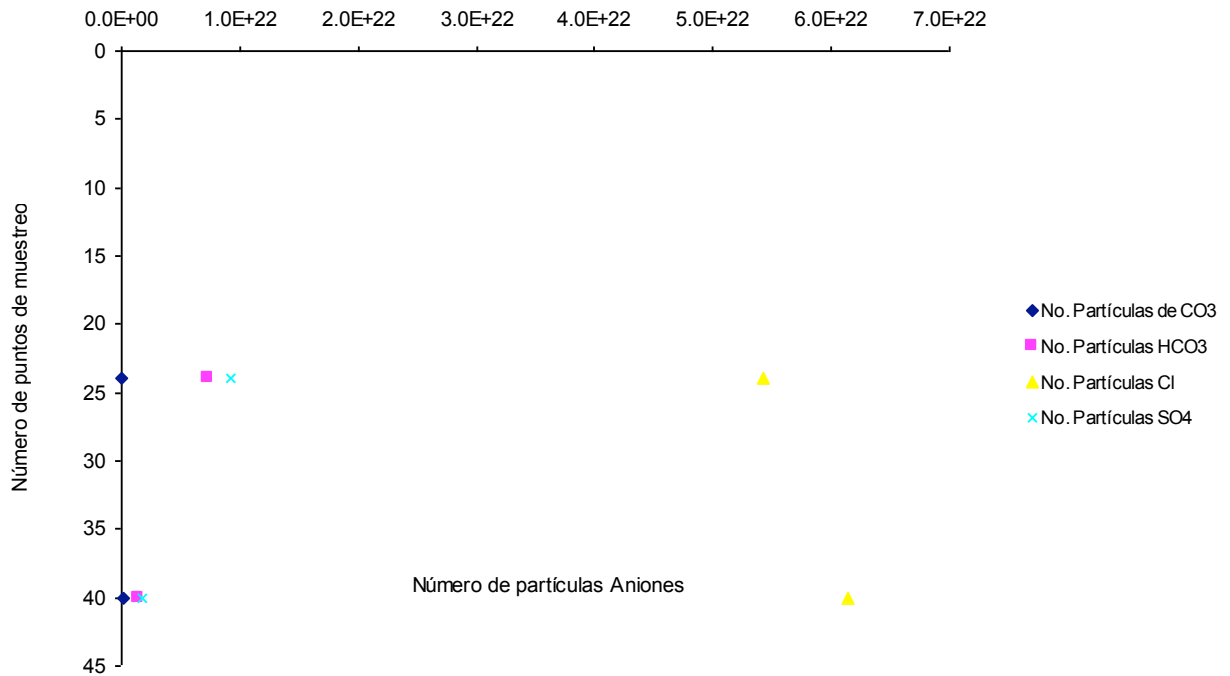


Figura 76. Distribución del número de partículas (aniones alta concentración) en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

## 5.16 Clasificación hidrogeoquímica

Este gráfico es una buena herramienta para saber sobre el origen de los datos analíticos y las fuentes de los constituyentes disueltos en el agua, de tal manera que se conocen los problemas geoquímicos presentes.

En el primer muestreo (Figura 77), en la clasificación de cationes se tiene el 2% como dominante el calcio, el 20% son de tipo dominante por el magnesio, el 33% son del tipo sodio o potasio y de ningún tipo dominante es el 45%. En la clasificación de aniones el 59% son predominantes por el bicarbonato, el 11% son del tipo cloruro y el 30% no tienen ningún tipo dominante. En la clasificación hidrogeoquímica se tiene el 13% de  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ , el 2% son de  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^{-}+\text{SO}_4^{2-}$ , el 57% son del tipo  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ , el 28% son del tipo  $\text{Cl}^{-}+\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$ .

En conclusión se observa que en el primer muestreo la mayor cantidad de aguas no tienen un catión dominante, sin embargo se tiene una cantidad importante del tipo de sodio o potasio, magnesio y en muy poca cantidad el calcio. En lo que respecta con los aniones, el predominante es el bicarbonato, después en cantidad no se tiene ningún tipo dominante y por último se tienen los cloruros. En la clasificación total la mayor cantidad de aguas están en el campo del bicarbonato de calcio o magnesio, inmediatamente les siguen los cloruros o sulfatos de sodio o potasio y por último se tienen las sales formados por el calcio y magnesio conjuntamente con el cloruro y sulfato.

Con lo expuesto, en el primer muestreo se puede deducir el tipo de roca que esta en contacto con las aguas del sistema hidrográfico. Las rocas graníticas y basálticas son típicas de esta caracterización hidrogeoquímica.

En el segundo muestreo (Figura 78), en la clasificación del tipo de catión predominante se tiene que el 6% son del tipo calcio, el 37% son del tipo de sodio o potasio y el 57% no tienen ningún catión dominante. En la clasificación de aniones el 72% son del tipo bicarbonatos, el 7% son del tipo cloruros y el 21% no tienen ningún anión dominante. En la clasificación hidrogeoquímica se tienen que el 4% son del tipo  $\text{Cl}^{-}+\text{SO}_4^{2-}$ , el 61% son del tipo de  $\text{HCO}_3^{-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ , el 6% son del tipo  $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$  y el 29% son del tipo  $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$ ,  $\text{Cl}^{-}+\text{SO}_4^{2-}$ .

En el segundo muestreo en definitiva se tiene que la mayor cantidad de aguas no tienen un catión dominante, después, en importancia, se tiene el sodio, potasio y en menor cantidad el calcio. Al igual que en el primer muestreo se tiene que el mayor anión dominante es el bicarbonato y con esto queda comprobado que el sistema hidrográfico es del tipo bicarbonatado. En la clasificación final se tiene obviamente mayor cantidad de aguas con bicarbonato de calcio o magnesio y por último se tienen las sales de cloro, sodio y sulfato.

Con las clasificaciones del segundo muestreo se asevera que las rocas que están en contacto con esta agua son del tipo graníticas basálticas de actividades volcánicas recientes. En los Cuadros 74 y 75 se tiene la clasificación hidrogeoquímica de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, en el primer y segundo muestreo respectivamente.

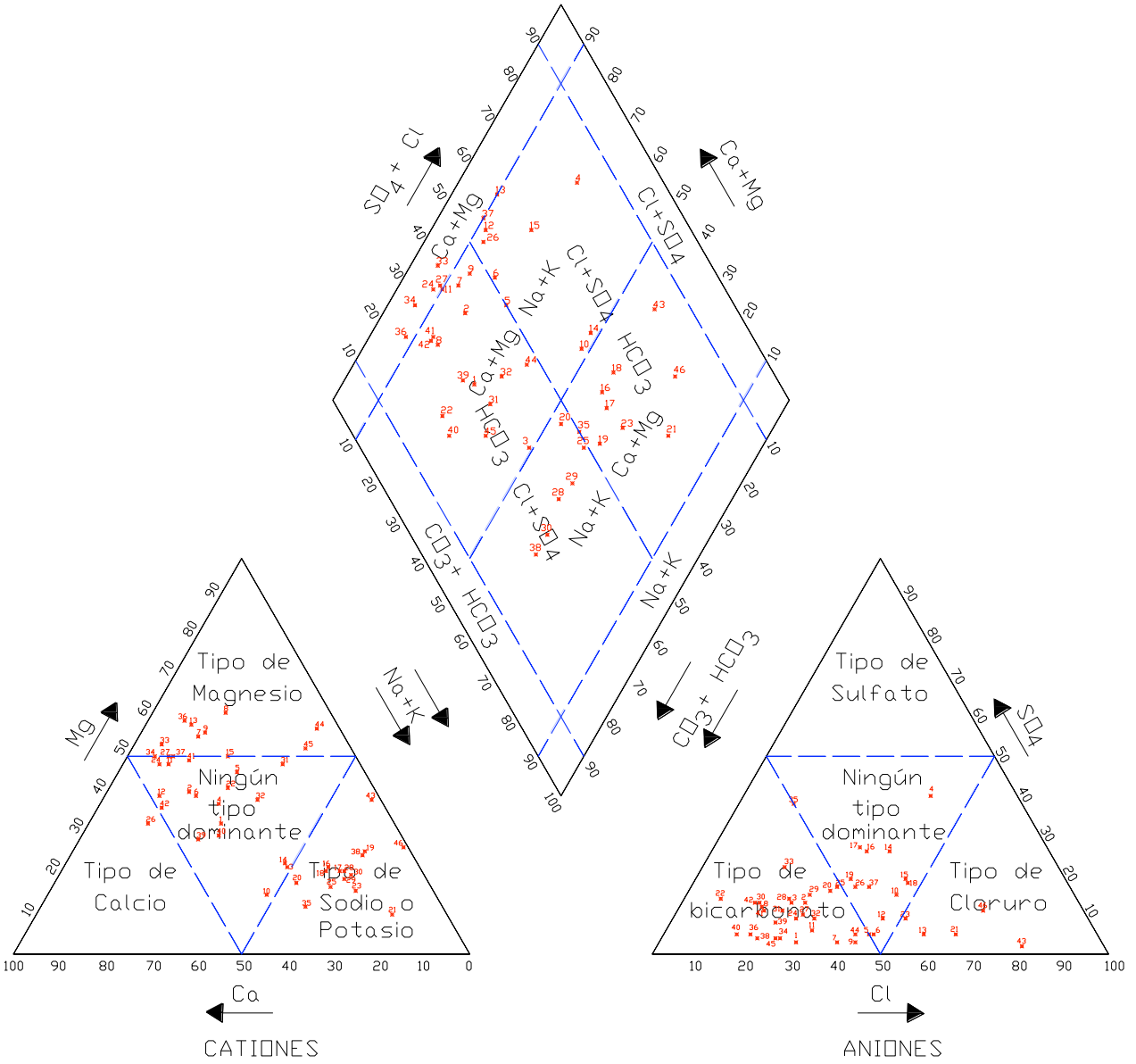


Figura 77. Clasificación hidrogeoquímica en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).  
 Número de puntos de muestreo.

Cuadro 74. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (1er muestreo).

No.	Clasificación		
	Cationes	Aniones	Hidrogeoquímica
1	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
2	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
3	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
4	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
5	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
6	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
7	Tipo de magnesio	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
8	Tipo de magnesio	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
9	Tipo de magnesio	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
10	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
11	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
12	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
13	Tipo de magnesio	Tipo de cloruro	$\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
14	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
15	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
16	Tipo de sodio o potasio	Ningún tipo dominante	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
17	Tipo de sodio o potasio	Ningún tipo dominante	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
18	Tipo de sodio o potasio	Ningún tipo dominante	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
19	Tipo de sodio o potasio	Ningún tipo dominante	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
20	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
21	Tipo de sodio o potasio	Tipo de cloruro	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
22	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
23	Tipo de sodio o potasio	Tipo de cloruro	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
24	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
25	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
26	Tipo de calcio	Ningún tipo dominante	$\text{Na}+\text{K}$ , $\text{Cl}+\text{SO}_4$
27	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
28	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
29	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
30	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
31	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
32	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
33	Tipo de magnesio	Tipo de bicarbonato	$\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
34	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
35	Tipo de sodio o potasio	Ningún tipo dominante	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
36	Tipo de magnesio	Tipo de bicarbonato	$\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
37	Tipo de magnesio	Ningún tipo dominante	$\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
38	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	$\text{Na}^++\text{K}^+$ , $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$
39	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
40	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
41	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
42	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
43	Tipo de sodio o potasio	Tipo de cloruro	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
44	Tipo de magnesio	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
45	Tipo de magnesio	Tipo de bicarbonato	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$
46	Tipo de sodio o potasio	Tipo de cloruro	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$

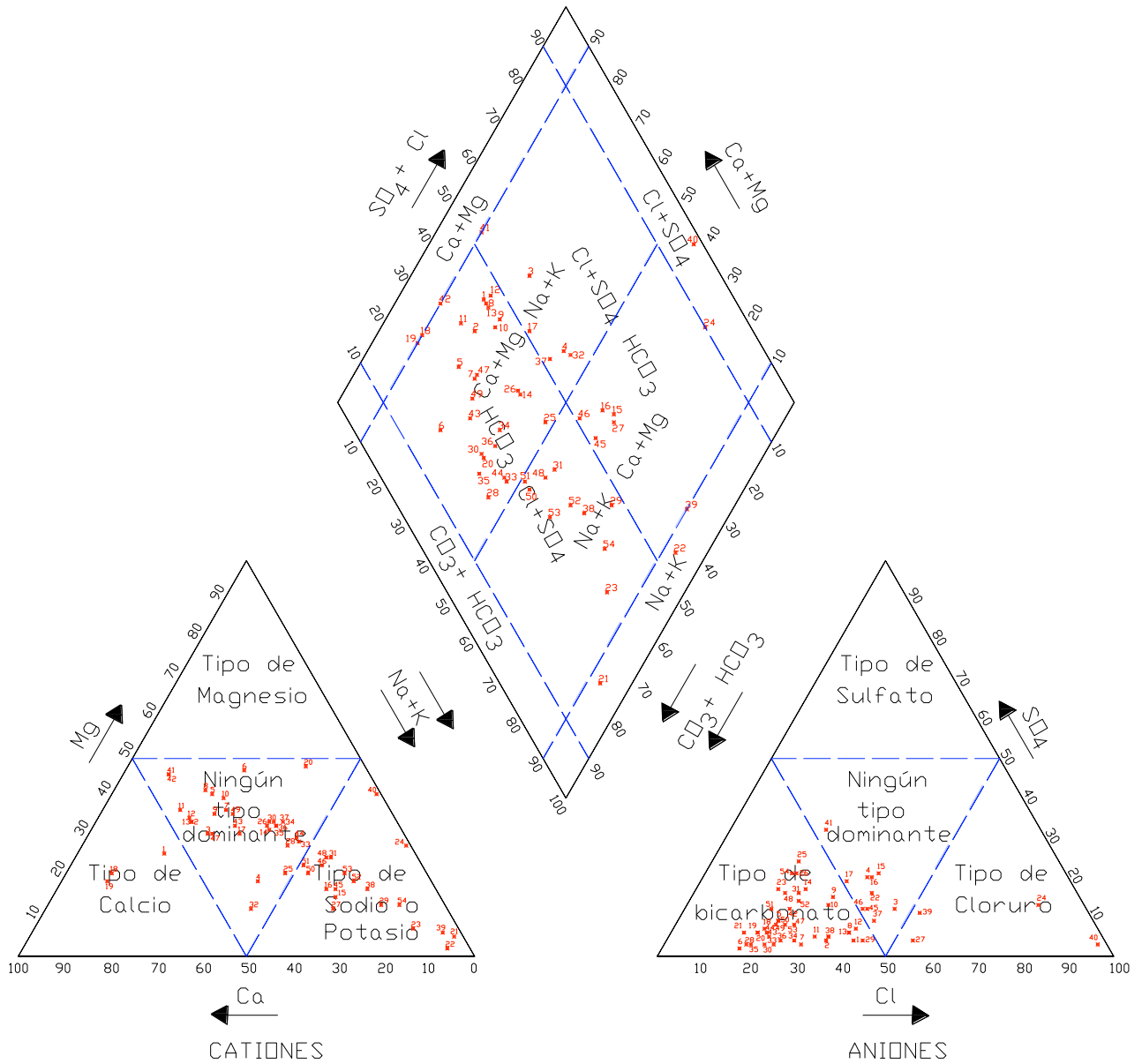


Figura 78. Clasificación hidrogeoquímica en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo). 48 Número de puntos de muestreo.

Cuadro 75. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac (2do muestreo).

No.	Clasificación		
	Cationes	Aniones	Hidrogeoquímica
1	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
2	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
3	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
4	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
5	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
6	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
7	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
8	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
9	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
10	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
11	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
12	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
13	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
14	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
15	Tipo de sodio o potasio	Ningún tipo dominante	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
16	Tipo de sodio o potasio	Ningún tipo dominante	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
17	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
18	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
19	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
20	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
21	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>
22	Tipo de sodio o potasio	Ningún tipo dominante	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>
23	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
24	Tipo de sodio o potasio	Tipo de cloruro	Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
25	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
26	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
27	Tipo de sodio o potasio	Tipo de cloruro	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
28	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
29	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
30	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
31	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
32	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
33	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
34	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
35	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
36	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
37	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
38	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
39	Tipo de sodio o potasio	Tipo de cloruro	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>
40	Tipo de sodio o potasio	Tipo de cloruro	Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
41	Ningún tipo dominante	Ningún tipo dominante	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
42	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
43	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
44	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
45	Tipo de sodio o potasio	Ningún tipo dominante	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
46	Tipo de sodio o potasio	Ningún tipo dominante	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
47	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
48	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
49	Ningún tipo dominante	Tipo de bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
50	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
51	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
52	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
53	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
54	Tipo de sodio o potasio	Tipo de bicarbonato	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>



## 6. CONCLUSIONES

Los nacimientos del río Atoyac son producidos por las infiltraciones del Popocatepetl y el Iztaccihuatl, brotando los manantiales por los centros poblados Calpulalpan, Nanacamilpa, San Martín Texmelucan y Cholula. Toda esta zona tienen rocas del tipo ígnea extrusiva básica, al igual que al norte de Emiliano Zapata. La predominancia del ion bicarbonato ocurre en este tipo de cauces por efecto del intemperismo.

Las rocas ígneas extrusivas son las más importantes en el nacimiento de este sistema, sin embargo, en la zona intermedia, entre las ciudades de Tlaxcala y Puebla, se tiene rocas del tipo sedimentarios al igual que aguas abajo de la presa Manuel Ávila Camacho. Estas se forman por la precipitación de los productos disueltos por el intemperismo, en tal virtud se tienen aguas con altas concentraciones de sodio en relación con el calcio.

La formación reciente del cauce es evidente al ser un sistema bicarbonatado, otra forma de aseverarlo, es la formación de las rocas volcanoclásticas o piroclásticas que se encuentran al sur de Huamantla y al norte de Cupixtla y Soltepec. Estas rocas se forman por una explosión, el magma cuando se enfría se fragmenta y se obtiene un material suelto, tal como se observa en la zona de estudio. El Cenozoico es la era geológica en los nacimientos del río, mientras tanto al Sur de la presa Valsequillo, se tiene predominancia de la era Mesozoica.

La presa Manuel Ávila Camacho recoge las aguas de los ríos Zahuapan y Atoyac. De acuerdo a La Comisión Nacional del Agua (CNA), el río Atoyac tiene un caudal promedio anual de  $9.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , generando un volumen promedio anual, incluyendo las descargas de aguas urbano-industriales, de 53 millones de  $\text{m}^3$ . El color del agua en la presa es verde lo que indica un gran contenido de materia orgánica y nutrientes como fósforo, nitrógeno y sedimentos contaminantes de origen industrial. El exceso de los nutrientes hace que proliferen el crecimiento del lirio acuático.

Al Norte de Apizaco en las estaciones 35 y 31 del primer y segundo muestreo respectivamente, en la zona de la bajada de la iglesia Monte Olivo (San Benito Santo Can 1), se tienen las mayores concentraciones del río porque se vierten grandes cantidades de celulosa,

las cuales demoran mucho en degradarse. El paso de los cauces por las capitales de Tlaxcala y Puebla, no llegan a los extremos que se tiene en este punto.

De acuerdo a la clasificación de Richards *et al.* (1959), en el primer muestreo, la mayor cantidad de aguas con el 54% tienen la clasificación C2 por concepto de la conductividad eléctrica, quiere decir que son de salinidad media y se puede utilizar siempre que haya un moderado lavado, sin un control de salinidad riguroso. En el segundo muestreo, la mayor cantidad de aguas, con el 39% tienen la clasificación C3 por concepto de la conductividad eléctrica, significa que son altamente salinas y no se las puede utilizar en suelos sin drenaje. Por efecto de las aguas urbano-industriales, se observa la tendencia de salinización de los suelos que se riegan con las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

De acuerdo a la clasificación de Ayers y Westcot (1987) en el primer muestreo, por concepto de la conductividad eléctrica, el 67% de las aguas no tienen ningún grado de restricción, de acuerdo a los sólidos totales disueltos, el 37% de las aguas tienen grado de restricción de ligera a moderada. En el segundo muestreo, por la conductividad eléctrica el 52% de las aguas no tienen ningún grado de restricción, por los sólidos totales disueltos el 50% no tienen ningún grado de restricción.

Por concepto de la salinidad efectiva, esto es considerando las sales que se encuentran en solución y están disponibles para los cultivos, el 59% de aguas en el primer muestreo no tendrá problemas e igual manera en el segundo muestreo con el 48%. Es importante observar, que aproximadamente la mitad de aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac presentará problemas por salinidad efectiva si es deficiente su drenaje. Por la salinidad potencial, aproximadamente el 75% de aguas de ambos muestreos no tendrán problemas.

En ambos muestreos, aproximadamente el 80% de las aguas son bajas en sodio con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable, esto se debe a la topografía que provoca un buen drenaje, sin embargo en los sitios en donde se acumulan las aguas si existe problemas de sodicidad. Aproximadamente la mitad de las aguas, de ambos muestreos son condicionadas de acuerdo al porcentaje de sodio posible, quiere decir que hay que estudiar a detalle los tipos de cultivos y suelos que se van a utilizar para la agricultura. Por concepto de sodio intercambiable, al utilizar la definición del RAS y la precipitación de la

calcita, más de la mitad de las aguas de ambos muestreos tienen probabilidad de formar suelos sódicos. Al ser un cauce con un pasado volcánico, la presencia de carbonatos y bicarbonatos son importantes en este sistema hidrográfico. De acuerdo al carbonato de sodio residual, la mayor cantidad de aguas en ambos muestreos no tiene problemas. Por concepto de la dureza, más de la mitad de las aguas son blandas en ambos muestreos.

La mayor cantidad de aguas en ambos muestreos tienen una reducción ligera a moderada en la infiltración, esto es muy importante ya que está evitando una salinización acelerada de los suelos, sin embargo es preocupante porque se puede apreciar una tendencia a que exista problemas de infiltración en los suelos por efecto de las aguas urbano-industriales. En el primer y segundo muestreo, aproximadamente el 60% son condicionadas para el uso de acuerdo al efecto tóxico del ion cloro, este es muy peligroso para los cultivos.

De acuerdo a los diferentes índices de clasificación de las aguas para riego, la mayoría de estas aguas son aceptables. Sin embargo se observa el crecimiento en las concentraciones de los iones bicarbonatos y sodio, esto puede causar una salinización acelerada de los suelos si no se toman medidas al respecto.

Al observar el gráfico de la clasificación hidrogeoquímica, nuevamente salta a la vista la importancia de las aguas bicarbonatadas en este sistema, en combinación con el sodio e inmediatamente se encuentran los cloruros y los sulfatos. En las lagunas de Alchichica y Atexcac, la sal más abundante es el cloruro de sodio, los procesos de evaporación que se tienen en los lagos cráter propician un aumento en la concentración de sales.

En la zona de los Humeros se tienen aguas con concentraciones excesivas de boro, lo que hace muy difícil su uso para el riego con fines agrícolas; un poco menos de la mitad de las aguas van a causar eutrofización en los lugares en donde se acumulen los nutrientes.

Al comparar las concentraciones del primer muestreo con los del segundo, se observa que en el último son ligeramente menores, esto se debe a la dilución de las aguas por efecto de las lluvias.

En la época de la colonia, el río Zahuapan era conocido por sus dones curativos, de hecho esta palabra significa “el que cura los granos”, todas las aguas de origen volcánico tienen estas propiedades por los minerales radioactivos que va disolviendo en todo su trayecto.

## 7. RECOMENDACIONES

Es necesario conocer a ciencia cierta el tipo de cultivo y si es tolerante o no al tipo de agua, es verdad que los índices son buenos orientadores, pero habrá casos en donde se deberá afinar más su efecto sobre el suelo y cultivo, por ejemplo se deberá determinar  $kg$ , que depende del tipo de suelo, para utilizar la ecuación de Gapon. La gran totalidad de aguas de este sistema son bicarbonatadas, de tal manera que el calcio va a tender a precipitarse y a perder en relación con el sodio, con las consecuencias adversas que esto conlleva.

De las lagunas cráter Atexcac y Alchichica, por su alta concentración, no es recomendable utilizar la clasificación normal de las aguas para riego, por ejemplo en el grafico de infiltración resulta que no tienen problema de infiltración pero esto no es verdad. Los índices se deben usar hasta una concentración de  $50 \text{ meq L}^{-1}$ .

El uso del RAS en las tres definiciones es indispensable, por ejemplo en riego por goteo se deberá tener más cuidado al usar el  $RAS_{aj}$  para conocer si existe precipitación que en el futuro causara el taponamiento del mismo.

Los problemas de eutrofización que se tienen en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac son severos, la forma de evitarlo, es instalando plantas de tratamiento de aguas residuales con lodos activados o algo similar, en los lodos se retiene el fósforo y se pueden utilizar para hacer fertilizantes, sin embargo en la actualidad se están empleando mucho los biofiltros, hay que tener en consideración la temperatura del lugar, ya que el rendimiento del biofiltro esta directamente ligado a ello, por lo que en la zona de estudio no sería muy recomendable. Es indispensable el instalar plantas de tratamiento, en la zona hay cerca de 30, pero la mayoría no están funcionando, es necesario que la población apoye los gastos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento. Las poblaciones que vierten las aguas residuales al sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, tienen alcantarillado combinado, es necesario crear un sistema separado, de esta manera los caudales que se envían a las plantas de tratamiento serán menores y obviamente los costos de operación se reducirán considerablemente. También los ríos se recuperarían inmediatamente, ya que las aguas pluviales no se mezclarían con las aguas residuales. En definitiva se puede realizar un proyecto completo de tratamiento de aguas.

Para mejorar las tierras que se encuentran con peligro de salinidad, es necesario nivelarlas, la dificultad en el control de la salinidad es mayor cuando la topografía del terreno no permite la distribución uniforme de la infiltración del agua aplicada. Inmediatamente es recomendable ejecutar trabajos de arado para destruir la compactación que provoca la maquinaria pesada y favorecer la infiltración. Cuando existe un nivel freático alto, se tienen problemas de salinidad, la forma de controlarlo es mediante un sistema de drenaje que permita bajar el nivel freático. En los estratos de arcilla y arena es recomendable romperlos a través de arados profundos para que con el riego se puedan lixiviar las sales. En la lixiviación de recuperación por inundación, la lámina de agua necesaria depende de la salinidad del suelo y del método de lixiviación.

En el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac existen aguas de buena calidad y de mala calidad, el reemplazo de agua de mala calidad por otra buena, es una solución simple al problema de la salinidad. Una alternativa más práctica es el mezclar las aguas y así contar con mayor agua para los cultivos. La mezcla de aguas no disminuye la cantidad de sales, pero se permite un área de riego mayor, es necesario evaluar esta agua resultante con las directrices del Cuadro 25, también es necesario tener en cuenta que la cantidad de agua requerida para lavar las sales no sea inferior a la cantidad del nuevo requerimiento de el agua resultante. La calidad de la mezcla final puede estimarse mediante la siguiente relación según (Ayers y Westcot, 1987).

$$C_{nf} = \left( C_{na} \times \frac{Q_a}{Q_t} \right) + \left( C_{nb} \times \frac{Q_b}{Q_t} \right)$$

$C_{nf}$  = Concentración final de la mezcla, dS m<sup>-1</sup> o meq L<sup>-1</sup>

$C_{na}$  = Concentración del agua "a", dS m<sup>-1</sup> o meq L<sup>-1</sup>

$C_{nb}$  = Concentración del agua "b", dS m<sup>-1</sup> o meq L<sup>-1</sup>

$Q_a$  = Cantidad de agua "a", cm

$Q_b$  = Cantidad de agua "b", cm

$Q_t$  = Cantidad total de agua ( $Q_a + Q_b$ ), cm

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. Aceves N., E. 1979. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México, México. p. 382
2. Aguilera C., M. y R. Martinez. 1996. Relaciones agua suelo planta atmósfera. Universidad Autónoma Chapingo. México. p. 256.
3. Antipov K., I. N. and G. Kader. 1961. Sobre la evaluación del agua de riego que posee reacción alcalina. *Soviet Soil Sci.* 3:60-65.
4. Alperovich, N., I. Shainberg and J. D. Rhoades. 1986. Effect of mineral weathering on the response of sodic soils to exchangeable magnesium. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:901-904.
5. Alvarez L., J. A. 1993. Primer Informe de Gobierno del Estado de Tlaxcala. Gobierno del Estado.
6. APHA. American Public Health Association. 1995. Standard Methods for the examination of water and wastewater 19<sup>th</sup> edition. Publication office American Public Health Association, Washington D.C. Chapter 1 p. 45; Chapter 2 p. 88; Chapter 3 p. 106 and Chapter 4 p. 124.
7. Arora, H. S. and N. T. Coleman. 1979. The influence of electrolyte concentration on flocculation of clay suspensions. *Soil Sci.* 127: 134-239.
8. ASTM, 2006. American Society for testing and Materials. Guide. <http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/index.shtml?E+mystore>. (Julio 2006).
9. 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. Trad. Al español por J.F. Alfaro de: Water quality and use in agriculture. p. 175.
10. Bahri, A. 1988. Treated wastewater and sewage sludge in Tunisia. In: Wastewater reclamation and reuse. FAO Regional Office for The Near East. El Cairo, Egypt.
11. Bakker, N., M. Dubbeling, S. Guendel, U. Sabel-Koschella, y H. de Zeeuw (eds.), 2000, Growing Cities, Growing Food: urban agriculture on the policy agenda, Feldafing, Germany.
12. Bazilevich, N. I. 1965. The geochemistry of soda soils. *Israel Prog. of Scientific Trans.* Jerusalem 1970. p 349.
13. Bawer, G. 1987. Influence of the agricultural crops irrigation on the underground water. *J. of Irrigation and Drainage Eng.* 1:4-15.
14. 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.

15. Bower, C. A. and J. O. Goertzen 1958. Replacement of adsorbed sodium in soils by hydrolysis of calcium carbonate. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 22:33-35.
16. Bower, C. A. and J. T. Hatcher. 1962. Characterization of salt affected soils with respect to sodium. *Soil Sci.* 93: 275-280.
17. Bower, C. A., L. V. Wilcox, G. W. Akin and M. G. Keyes. 1965. An index of the tendency of  $\text{CaCO}_3$  to precipitate from irrigation waters. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29:91-92.
18. Bower, C. A. and L. V. Wilcox. 1965. Precipitation and solution of calcium carbonate in irrigation operations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29:93-94.
19. Brooks, R. H., J. O. Goertzen and C. A. Bower. 1958. Prediction of changes in the compositions of the dissolved and exchangeable cations in soils upon irrigation with high-sodium waters. *Soil Sci. Soc. Am.* 22:122-124.
20. Buol, S., F. Hole. y R. Mc Cracken. 1998. Génesis y Clasificación de Suelos. Capítulo 14. Editorial Trillas. Mexico.
21. Can C., A. 2005. Evaluación de la Relación de adsorción de Sodio en las aguas del cauce del río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. p. 198.
22. Carrillo, R., J. J. y A. Cardona. 1998. Relación agua subterránea y ambiente. Memoria Simposio Internacional de aguas Subterráneas. León, Gto. Mex. pp. 122-136.
23. CEN, 2002. Dentro de 23 años los alimentos pueden quedar fuera del alcance de varias personas, debido a la escasez del agua. Boletín 089/02. Mexico
24. CNA. 1993. Aprovechamiento de aguas residuales en la agricultura. Situación actual en México. Cuernavaca. Comisión Nacional del Agua.
25. Cintora, M. y Ortega M. 2005. Boro, fósforo e índices de salinidad en las aguas residuales para riego agrícola en el valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, México. p. 106.
26. CONABIO, 2006. <http://www.conabio.gob.mx>. (Julio 2006).
27. Curtin, D., F. Selles and H. Steppuhn. 1992. Influence of salt concentration and sodicity on the solubility of phosphate in soils. *Soil Sci.* 153:409-416.
28. Custodio, E. y M.R. Llamas. 1983. Hidrología subterránea. Ed Omega. 2ª. Ed. Cap. 10 Hidrogeoquímica. pp. 1003-1095.



29. Dan Región Association of towns. 2003. For sewage and Environmental Issues. Tel Aviv. Israel. Mey Ezor Dan-Agricultural Cooperative Water Society L.T.D. Dan Region Association of Towns Environment.
30. Dean, V. 1991. Water and Wastewater Examination Manual. Lewis Publisher, INC. Estados Unidos. p. 246.
31. Del Valle C., H. 1983. Los procesos de acumulación de sales e intemperismo en cubetas lacustres, en una zona de transición del ex – lago Texcoco. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México, México. p. 556.
32. Díaz M., J.A. 1990. Variabilidad de cuatro características de calidad de agua en el río Tula (tramo Presa Requena-Ixmiquilpan). Tesis M.C. Centro de Edafología-CP. Montecillo, Mex. p. 181
33. Díaz M., J. A. 1999. Evaluación del nivel de contaminación del agua de riego en el Valle del Mezquital, Hgo. En: Memorias IX Cong. Nal. de Irrigación. Culiacán Sin. 27-29 oct. p. 215-222.
34. Domenico P. y F. Schwartz. 1990. Physical and chemical hydrogeology. Copyright by John Wiley & Sons, Inc. Printed in Singapore. Chapter 11. p. 387-421.
35. Doneen, L.D. 1975. Water quality for irrigated agriculture. Springer Verlag, New York. Ecological Studies No. 15.
36. Drever, I.J. 1988. The geochemistry of natural waters. 2ª. Ed. Prentice Hall. Englewood Cliffe, New Jersey.
37. Eaton, F.M. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. Soil Sci. 69:123-133.
38. Eaton, A. D. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19<sup>th</sup> edition. Washington, D.C.
39. Espino de la O., E. 1981. Reuse of municipal wastewater for industrial purposes in Mexico City. In: Dìtri F.M., J. Aguirre, M.M. Athié (eds). Municipal wastewater in agricultura. Academia Press. N.Y. pp. 75-88.
40. ESRI, 2006. <http://www.esri.com>. (Julio 2006).
41. Fersman, A. E. 1934. Geochemistry. Leningrad.
42. Fersman, A. 1971. Geoquímica Recreativa. Ediciones Martínez Roca. p. 343.
43. Fersman, A. 1973. In Irrigation/Drainage and Salinity. An international source books. Chapter 5 FAO/UNESCO.

44. Fetter, C. 1988. Applied Hydrogeology. University of Wisconsin-Oshkosh. Merrill Publishing Company a Bell & Howell Information Company. Columbus, Ohio. p. 354-357.
45. Garza, V. 1994. La Legislación ambiental en México en referencia a la generación y uso de aguas residuales. Salud Fronteriza. 1994. VII(1): 11-16.
46. Girdhar, I.K. and J.S.P. Yadav. 1982. Effect of magnesium-rich waters on soil properties, yield and chemical composition of wheat. Soil Sci. 134:348-353.
47. Gonzáles, E., E. Tello y M. Pal. 2001. Interacción agua geotérmica-manantiales en el campo geotérmico de los Humeros, Puebla, México. Ingeniería Hidráulica en México. México. Vol XVI, núm 2, abril-junio 2001. p. 185-194.
48. González G., R. 1982. Establecimiento de relaciones funcionales entre láminas de lavado, sales desplazados y sales residuales en los suelos salinos. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México, México. p.141.
49. Haruvy, N. 1997. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide cost-benefit analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment. 10(1):69-79
50. Hernández, A., M. Ascanio, M. Morales, J. Bojórquez, N. García y J. García. 2006. El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo. Universidad Autonoma de Nayarit. México.
51. Hernandez, A. y M. Ascanio. 2006. La historia de la clasificación de los suelos en Cuba. Editorial Felix Varela. La Habana. Cuba. p. 135.
52. Huez L., M. 1985. Caracterización de algunas propiedades físico químicas de los suelos y espesores subyacentes del predio Montecillos. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México, México. p. 245.
53. INEGI. 2006. <http://www.inegi.gob.mx>. (Julio 2006).
54. Jurinak, J.J., C. Amrhein and R. J. Wagenet. 1984. Sodic hazard: The effect of SAR and salinity in soils and overburden materials. Soil Sci. 137:152-159.
55. Keith T., D. 1967. Ground Water Hidrology. Sixth printing by John Wiley and sons. Printed in USA. p. 336.
56. Kovda, V. 1973. In Irrigation/Drainage and Salinity. An international source book. Chapter 5-7. FAO/UNESCO.
57. Levi, L.E. 1988. Historia del desagüe del Valle de México. Ingeniería Hidráulica en México. Sep-Dic:60-68.

58. Mara, D. y S. Cairncross. 1990. Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura: medidas de protección y salud pública. Ginebra: Organización Mundial de la Salud. p. 212
59. Mott, R. 1996. Mecánica de fluidos aplicada. Cuarta edición. Original english language edition Publisher by Perentice-Hall Inc. Impreso en México. p. 583.
60. Miyamoto, S. and W. Mueller. 1994. Irrigation with saline water: certain environmental implications. Transac. On 15<sup>th</sup> World Cong. of Soil Sci. Acapulco, Mex. July 10-16 1994 Vol.3. pp. 256-277.
61. Novozamsky, I. and J. Beek. 1991. In The Soil A. Basic Elements. Chapter 6. Edited by G. H. Bolt and M. G. M. Bruggenwert. Netherlands.
62. Oppenheimer, A. 2006. ¿Un mundo sin agua? .Miami, Estados Unidos. The Miami Herald.
63. Ortega E., H. 1976. Cambios físico-químicos de suelos del vaso del ex-lago tezcoco, sujetos a lavado con diferentes soluciones. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México, México. p. 109.
64. Oster, J. D. and F. W. Schroer. 1979. Infiltration as influenced by irrigation water quality. Soil Sci. Soc. Am. J. 43:444-447.
65. Oster, J. D. 1994. Irrigation with poor quality water. Agric. Water Manag. 25:271-297.
66. Page, A. L. 1982. Methods of Soil Analysis, Part 2 Chemical and microbiological properties. Agronomy Monograph No. 9. Ed Madison, Wisconsin USA.
67. Peña F., J. 1997. Los límites del riego agrícola con aguas negras en el Valle del Mezquital. Tesis de Maestría, U.I.A, Mex. 241 p.
68. Pescod, M. B. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. Cap.9 pp. 114-117. FAO irrigation and Drainage Paper 47. Rome.
69. Polynov, B. 1973. In Irrigation/Drainage and Salinity. An international source book. Chapter 5-7. FAO/UNESCO.
70. PRONAR, Programa Nacional de Aprovechamiento de Aguas Residuales. 1989. Evaluación de los efectos de las aguas residuales en suelo y acuíferos. IMTA-SARH. Juitepec, Morelos, Mex.
71. Richards, L. A. (Editor) 1959. Suelos Salinos y Sódicos. Personal del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. Manual de Agricultura No. 60. p. 172
72. Risacher, F. y B. Fritz. 1995. La génesis de los lagos salados. Mundo Científico No.159, Volumen 15. pp 626-632.

73. Rhoades, J. D., D. B. Krueger and M. J. Reed. 1968. The effect of soil-mineral weathering on the sodium hazard of irrigation water. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 643-647.
74. Rhoades, J. D. 1972. Quality of water for irrigation. *Soil Sci.* 113:277-284.
75. Rodier, J. 1978. *Análisis de las aguas*. Ediciones Omega. Barcelona, España. p. 186-191.
76. Rodríguez, C. R. Arias y J. Quiñones. 1994. Efecto de la frecuencia de poda y el nivel de fertilización nitrogenada, sobre el rendimiento y calidad de la biomasa de Morera (*Morus* sp.) en el trópico seco de Guatemala. En: *Arboles y arbustos forrajeros en América Central* (Editor: J E Benavides). Turrialba, Costa Rica.
77. Ruiz V., V. M. 1995. Respuesta del frijol (*phaseolus vulgaris* L.) a la salinidad sulfático-clorhídrica en diferentes etapas de crecimiento. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. p. 138.
78. Santana S., R. 1989. Determinación experimental de la formación de soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$ ) mediante el camino biológico en espesores subyacentes de tres cuencas endorreicas: Cuitzeo, Texcoco y el Carmen. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. p. 369.
79. Santillan, J. L. 1990. *Cálculos Químicos para la preparación de soluciones*. Editorial Trillas. México. p. 240.
80. SEMARNAP. 2000. Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. p. 71.
81. SEMARNAP. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
82. SEMARNAT Y CONAGUA. 2006. Estadísticas Agrícolas de las unidades de riego. Año agrícola 2004-2005. p 511.
83. Sharpley, A. N. and P. Withers. 1994. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus. Netherlands. *Fertilizer Research* Vol. 39:133-146.
84. Talibudeen, O. 1981. In *The Chemistry of soil processes*. Chapter 3. Edited by D. J. Greenland and M. H. B. Hayes. Northern Ireland.
85. Taylor, S. and S. McLennan. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell. p 307.
86. User's manual. 1995. Vapor Pressure Osmometer. VAPRO model 5520. USA

87. Vasquez, E. 1984. Evaluación de las reservas de sales en los suelos salinos. Tesis de Ingeniero Agrícola. UNAM. Edo. Mexico. México. p. 181.

88. Velázquez, M. M., M. Ortega, A. Martínez, J Kohashi y N. Garcia. 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Terra. Vol. 20 4:459-464

89. Verrujit, A. 1970. Theory of Groundwater Flow. Macmillan Civil Engineering Hydraulics Series. Printed in Great Britain. p. 190

90. Wilcox, L. V., G.V. Blair and G.A. Coger. 1954. Effect of bicarbonato on suitability of water for irrigation. Soil Sci. 77:259-266.

# ANEXO



1. Laguna de Tlalpan (No. 1 IM; No. 1 IIM)



2. Bordo San Fernando (No 2. IIM)



3. Laguna de Jalnene (No. 2 IM; No 3. IIM)



4. Laguna de Apan (No 3 IM; No. 4 IIM)



5. Laguna de Jalnene (No. 2 IM; No 3 IIM)



6. Manantial Atotonilco (No 8 IM; No. 6 IIM)



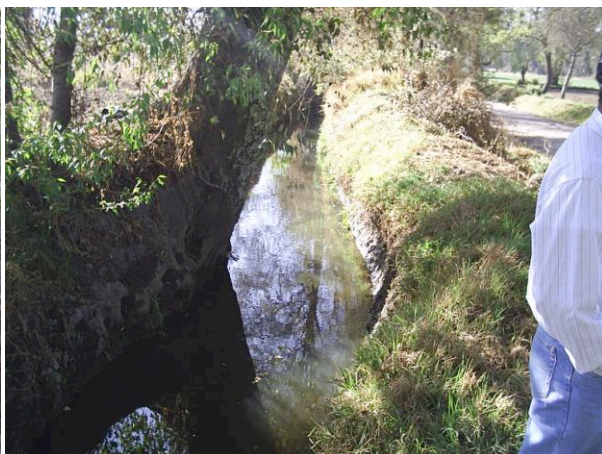
7. Canal Atotonilco (No. 7 IM; No. 7 IIM)



8. Río Apepesca (No 10 IM; No. 8 IIM)



9. Río Atoyac (No. 9 IM; No. 9 IIM)



10. Canal de riego Apepesca (No 11 IM; No. 10 IIM)



11. Manantial Chautla (No. 1 IM; No. 11 IIM)



12. Mitad del puente que va al castillo (Chautla) (No 12. IIM)





13. Salida manantial Chautla (No. 13 IM; No. 13 IIM)



14. Pozo salida Texmelucan(No 15 IM; No 14 IIM)



15. Río Atoyac puente Cholula Puebla  
(No. 16 IM; No. 15 IIM)



16. Río Atoyac (salida Atlixco puente)  
(No.17 IM; No. 16 IIM)



17. Presa Valsequillo (Manuel Ávila Camacho  
(No. 18 IM; No. 17 IIM)



18. Pozo 304 CNA Tepeaca (No.18 IIM)



19. Pozo 2 Tepeaca (San Pablo Actipan Puebla)  
(No. 19 IIM)



20. Laguna Aljojuca (No. 20 IIM)



21. Laguna Tecuitlapa (No. 21 IIM)



22. Humeros 1 (No. 22 IIM)



23. Humeros 2 (No. 23 IIM)



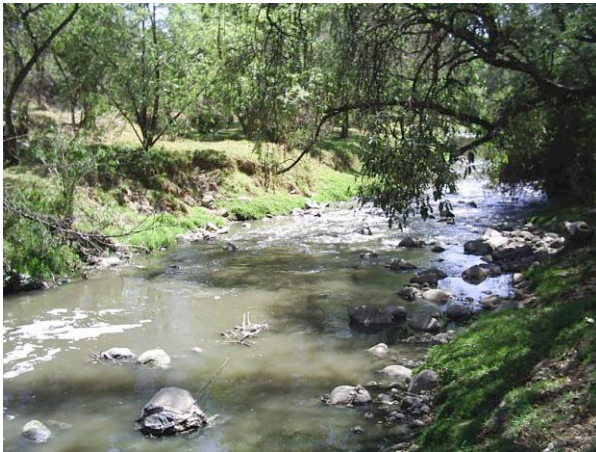
24. Laguna Alchichica (No. 46 IM; No 24 IIM)



25. Cascada Altihuitzia 1 (No. 19 IM; No. 25 IIM)



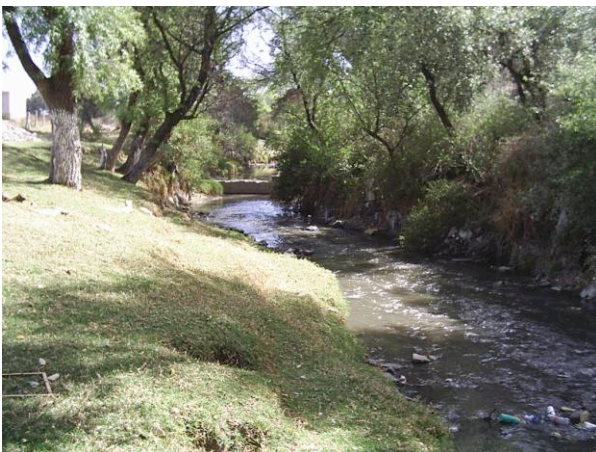
26. Cascada Altihuitzia 2 (No. 29 IM; No.26 IIM)



27. Río Apizaquito delante de la trinidad  
(Amajal de Guerrero) (No. 21 IM; No. 27 IIM)



28. Manantial Palo Huerfano (No. 28 IM)



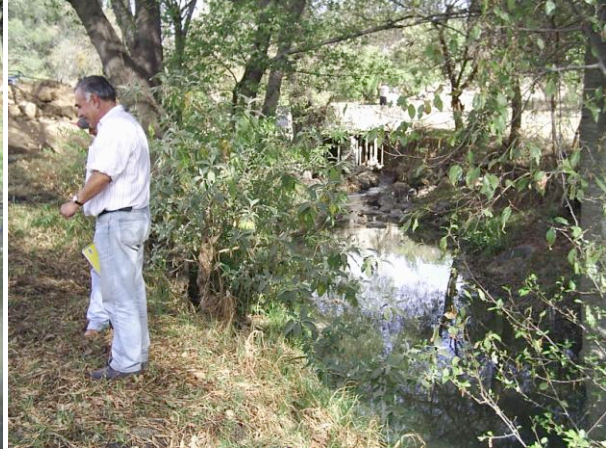
29. Puente Apetitlan (para ir a Atenco)  
(No. 22 IM; No. 29 IIM)



30. Manantial Planta Apizaco  
(No. 34 IM; No. 30 IIM)



31. Bajada iglesia Monte Olivo (San Benito Santo Can 1)  
(No. 35 IM; No. 31 IIM)



32. Baja iglesia Monte Olivo  
(San Benito Santo Can 2)(No. 32 IIM)



33. Manantial de Actipan (No. 36 IM; No 33 IIM)



34. Canal junto a Manantial de Actipan (No. 34 IIM)



35. Manantial Apizaquito  
(No. 5 IM; No. 35 IIM)



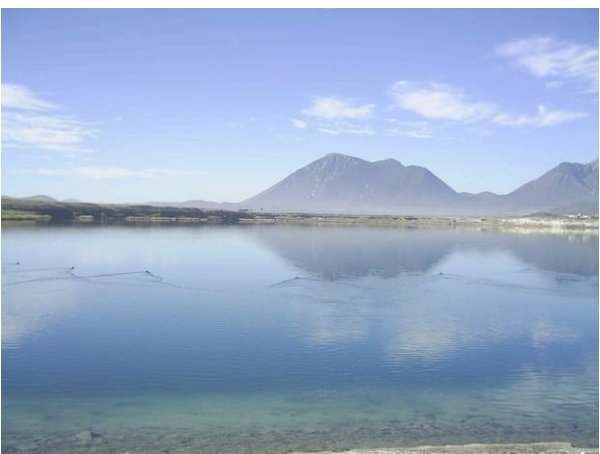
36. Laguna Manantial Apizaquito (No. 36 IIM)



37. Laguna Lázaro Cárdenas  
(No. 37 IM; No. 37 IIM)



38. Laguna Quecholac (No. 45 IM; No. 38 IIM)



39. Laguna Preciosa  
(No. 44 IM; No. 39 IIM)



40. Lago cráter Atexcac (No. 43 IM; No 40 IIM)



41. Pozo 2 Nuevo Tlatilchuca  
(No. 42 IM; No. 41 IIM)



42. Pozo Morelos (No. 40 IM; No. 42 IIM)



43. Rancho Ceron Pozitos  
(No. 39 IM; No. 43 IIM)



44. Puente Apizaquito 1(No. 44 IIM)



45. Río Zahuapan (puente La Aguanaja 2)  
(No. 23 IM; No. 45 IIM)



46. Río Zahuapan (Tlaxcala) (No. 46 IIM)



47. Pozo 1 Zacatelco (No. 24. IM; No.47. IIM)  
(No. 24 IM; No. 47 IIM)



48. Río Atoyac Panzacola (No. 25 IM; No 48 IIM)



49. San Juan Manantial (San Juan Chausingo)  
(No. 27 IM; No. 49 IIM)



50. Río Atoyac (Santa Agueda 1)  
(No. 28 IM; No. 50 IIM)



51. Río Atoyac (Santa Agueda 2)  
(No. 29. IM; No. 51 IIM)



52. Puente Atoyatenco 1  
(No. 30 IM; No. 52 IIM)



53. Laguna del Carmen (nivel freático)  
(No. 41 IM)



54. San Juan a Nativitas  
(No. 26 IM)