



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

ÍNDICES DE SALINIDAD DE LA RED HIDROGRÁFICA
DEL ESTADO DE MORELOS, MÉXICO

JAZMIN RAMÍREZ GARCÍA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. MEXICO

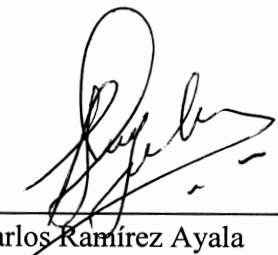
2009

La presente tesis titulada: **ÍNDICES DE SALINIDAD DE LA RED HIDROGRÁFICA DEL ESTADO DE MORELOS, MÉXICO**, realizada por la alumna: **JAZMIN RAMÍREZ GARCÍA**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS


CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO




Dr. Carlos Ramírez Ayala

ASESOR



Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar

ASESOR



Dr. Ebandro Uscanga Mortera

Montecillo, Texcoco, México, Octubre de 2009

ÍNDICES DE SALINIDAD DE LA RED HIDROGRÁFICA DEL ESTADO DE MORELOS, MÉXICO.

Jazmin Ramírez García, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2009

En la Red Hidrográfica del estado de Morelos el agua ocupa un lugar primordial, su disponibilidad y riqueza ha constituido un elemento de soporte básico para el desarrollo económico. Alrededor de 63000 hectáreas son irrigadas en Morelos y dado que las actividades agropecuarias, industriales y recreacionales compiten por este recurso, se hace necesario conocer las características químicas de las aguas y los efectos adversos sobre los terrenos en donde se aplican. Los objetivos de este trabajo fueron determinar las concentraciones iónicas del sistema y establecer índices para conocer el efecto sobre las propiedades físicas de los suelos. Se colectaron muestras de agua en 66 estaciones durante julio de 2007 y 78 en mayo de 2008 (primer y segundo muestreo respectivamente). Las mediciones comprendieron; cationes, aniones, pH, conductividad eléctrica (CE), residuo seco evaporado y calcinado (RSE y RSC), presión osmótica (PO), fosfatos, boro y las diferentes modificaciones de la relación de adsorción de sodio (RAS), las cuales fueron, RAS original, RAS_{aj} y RAS° . La conductividad eléctrica de las aguas en los orígenes fue de 107 a 186 $\mu S\ cm^{-1}$ y de 300 a 3447 $\mu S\ cm^{-1}$ cuando reciben afluentes de manantiales y aguas urbano-industriales, siendo aguas de salinidad media a muy altamente salinas. La concentración de calcio, magnesio, sodio, bicarbonatos, sulfatos, fosfatos y boro fueron de 0.36 a 16.33 $mmol_c\ L^{-1}$, 0.28 a 14.22 $mmol_c\ L^{-1}$, 0.15 a 9.02 $mmol_c\ L^{-1}$, 0.58 a 12.55 $mmol_c\ L^{-1}$, 0.02 a 28.04 $mmol_c\ L^{-1}$, 0.004 a 5.0 $mg\ L^{-1}$ y 0.0 a 3.6 $mg\ L^{-1}$, respectivamente. La variación del RAS original fue de 0.10 a 3.96, RAS_{aj} de 0.19 a 6.87 y RAS° de 0.15 a 4.46, indicando que son aguas de bajo contenido de sodio. Los valores de pH variaron de 6.79 a 8.42. Con los resultados obtenidos se hace evidente que la salinidad de las aguas de la red hidrográfica se debe principalmente a la dilución de materiales calcáreos, depósitos evaporíticos y contaminación antropogénica.

Palabras clave: calidad del agua, riego, eutrofización, sodicidad, RAS, y PSI.

INDEXES OF SALINITY FROM THE HYDROGRAPHIC SYSTEM OF STATE OF MORELOS, MEXICO.

Jazmin Ramírez García, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2009

The system hydrographic of state of Morelos, the water has a very important place, it is readiness and wealth have constituted a basic element for the economic development, due to the agricultural, industrial activities and leisure activities compete for this resource. Around 6300 ha are irrigated in Morelos, that makes necessary to know the chemical characteristics of the waters and the adverse effects on the soil where they are applied. The objectives of this work were to determine the ionic concentration of the system and know indexes about the effect on the physical properties of the soil. Water sample were collected from 66 stations in July 2007 and 78 on May 2008 (first and second sampling respectively). The measurements were cations, anions, pH, electrical conductivity (EC), dry residues evaporated and burned (RSE and RSC), osmotic pressure (OP), phosphates, boron and the sodium absorption ratio (SAR) with their respective modifications that were SAR, SAR_{aj}, SAR^o. Electrical conductivity at the sources of the water was of 107 to 186 $\mu\text{S cm}^{-1}$ and when these received the flowing of spring source and urban industrial their values were from 300 to 3447 $\mu\text{S cm}^{-1}$, these waters were of the half salinity to high salinity. The calcium concentration, magnesium, sodium, bicarbonates, sulfates, phosphates and boron were from 0.36 to 16.33 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0.28 to 14.22 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0.15 to 9.02 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0.58 to 12.55 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0.02 to 28.04 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0.004 a 5.0 mg L^{-1} and 0.0 to 3.6 mg L^{-1} , respectively. The range of the SAR was from 0.10 to 3.96, SAR_{aj} was from 0.19 to 6.87 and SAR^o was from 0.15 to 4.46, indicating that is water with low sodium concentration. The pH values were ranging from 6.79 to 8.42. The conclusion of this work is clear; the salinity of the hydrographic system is due to the dilution of calcareous materials, deposits evaporites and contribution anthropogenic.

Key words: quality of the water, watering, eutrophication, sodicity, SAR, ESP

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México, que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Colegio de Postgraduados, han financiado parte de mi formación.

A los doctores Manuel Ortega escobar y Carlos Ramírez Ayala por la dirección de este trabajo.

Al doctor Ebandro Uscanga Mortera por la revisión y recomendaciones hechas a este trabajo.

ÍNDICE

	Página	
1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
2.1	Objetivo general	3
2.2	Objetivo particular	3
2.3	Hipótesis	3
3.	REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1	El agua y su distribución	4
3.1.1	Distribución en el planeta	4
3.1.2	Distribución del agua en México	5
3.1.3	Usos del agua en México	5
3.1.4	Uso de agua residual	7
3.2	Composición química de las aguas	8
3.3	Composición química de la corteza terrestre	9
3.3.1	Geoquímica de los elementos	11
3.4	Origen de las sales	18
3.4.1	Solubilidad de la sales	23
3.5	Calidad del agua para riego	24
3.6	Salinidad	27
3.6.1	Presión Osmótica	28
3.6.2	Clasificación de las aguas para riego con base al peligro de salinidad	30
3.6.3	Clasificación de las aguas para riego con base a la Salinidad Efectiva	32
3.6.4	Clasificación de las aguas para riego con base a la salinidad Potencial	33
3.7	Sodicidad	34
3.7.1	Clasificación de las aguas en base al RAS	35
3.7.2	Calculo del RAS ajustado (RAS_{aj})	37
3.7.3	Calculo del RAS corregido (RAS^o)	39
3.8	Efecto de la concentración de iones CO_3^{2-} y HCO_3^-	41
3.9	Problemas de infiltración	42
3.10	Toxicidad de iones específicos	45
3.10.	Cloro	45
3.10.	Sodio	46
3.10.	Boro	47
3.10.	Fósforo	48
3.11	Dureza	49
3.13	Clasificación hidrogeoquímica	51
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	53

4.1	Ubicación del área de estudio	53
4.2	Marco físico	53
4.2.1	Aguas superficiales	53
4.2.2	Aguas subterráneas	56
4.2.3	Clima	58
4.2.4	Suelos	59
4.3	Aspectos socio-económicos	60
4.4	Usos del agua en Morelos	61
4.5	Geología del área de estudio	63
4.5.1	Estratigrafía	63
4.6	Muestreo	71
4.7	Métodos	72
4.7.1	Determinaciones físico-químicas	73
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	80
5.1	Localización geográfica de las estaciones de muestreo	80
5.2	Comprobación de la exactitud de los resultados	97
5.3	Distribución de frecuencias de los datos analíticos	110
5.4	Composición y distribución iónica de las aguas	118
5.5	Clasificación de las aguas en base a la salinidad	123
5.5.1	Presión Osmótica	123
5.5.2	Índice de salinidad	135
5.5.3	Índice de salinidad efectiva	148
5.5.4	Índice de salinidad potencial	151
5.6	Clasificación de las aguas en base a la sodicidad	154
5.7	Efecto de la concentración de iones CO_3^{2-} y HCO_3^-	166
5.7.1	Porcentaje de sodio encontrado	166
5.7.2	Porcentaje de sodio posible	170
5.7.3	Carbonato de sodio residual	173
5.8	Clasificación de las aguas en base a su efecto sobre la infiltración	176
5.9	Clasificación de las aguas por toxicidad de iones específicos	190
5.9.1	Boro	190
5.9.2	Cloruros	195
5.9.3	Sodio	198
5.8.4	Fosfatos	204
5.9	Clasificación de las aguas por su dureza	210
5.10	Clasificación hidrogeoquímica	215
6.	CONCLUSIONES	224
7.	RECOMENDACIONES	227
8.	BIBLIOGRAFÍA	228

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Usos Consuntivos y su fuente de extracción (CNA, 2007).	6
Cuadro 2. Composición Media de las rocas (Holmes y Holmes, 1987).	10
Cuadro 3. Secuencia de extracción de algunos iones durante el intemperismo (Fersman, 1973).	22
Cuadro 4. Directrices para interpretar de la calidad del las agua para el riego (Ayers y Westcot, 1987).	26
Cuadro 5. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo a la salinidad efectiva (Coras, 1996).	33
Cuadro 6. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo a la salinidad potencial (Coras, 1996).	33
Cuadro 7. Procedimiento para calcular pHc teórico de las aguas, (Ayers y Wescot, 1987).	38
Cuadro 8. Concentración de calcio (Ca^0) en el agua del suelo, contenida cerca de la superficie del suelo, que resulta de regar con aguas de determinado valor $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ y CE en dS m^{-1} .	40
Cuadro 9. Clasificación de la calidad de agua de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual (Richards <i>et al.</i> , 1959).	42
Cuadro 10. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo a su contenido de cloruros (Coras, 1996).	46
Cuadro 11. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo a su contenido de boro (Coras, 1996).	48
Cuadro 12. Clasificación de las aguas por su dureza, en base al CaCO_3 (Keith, 1967).	50
Cuadro 13. Determinaciones físico-químicas para aguas.	72
Cuadro 14. Localización geográfica de las estaciones del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	81
Cuadro 15. Concentración iónica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	84
Cuadro 16. Localización geográfica de las estaciones del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	90

Cuadro 17.	Concentración iónica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	92
Cuadro 18.	Porcentaje permisible de diferencia en los resultados analíticos (APHA, 1995).	97
Cuadro 19.	Presión osmótica calculada por tres métodos para las estaciones del primer muestro de la red hidrográfica del estado de Morelos.	126
Cuadro 20.	Presión osmótica calculada por tres métodos para las estaciones del primer muestro de la red hidrográfica del estado de Morelos.	131
Cuadro 21.	Clasificación de las aguas de acuerdo a la salinidad del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	136
Cuadro 22.	Clasificación de las aguas de acuerdo a la salinidad del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	139
Cuadro 23.	Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, de acuerdo a la salinidad y grado de restricción para su uso (Ayers y Westcot, 1987).	142
Cuadro 24.	Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, de acuerdo a la salinidad y grado de restricción para su uso (Ayers y Westcot, 1987).	144
Cuadro 25.	Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la salinidad efectiva.	149
Cuadro 26.	Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la salinidad efectiva.	150
Cuadro 27.	Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la salinidad potencial.	152
Cuadro 28.	Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la salinidad potencial.	153
Cuadro 29.	Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la sodicidad.	155
Cuadro 30.	Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la sodicidad	161
Cuadro 31.	Efecto posible del porcentaje de sodio encontrado de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	168
Cuadro 32.	Efecto posible del porcentaje de sodio encontrado de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	169
Cuadro 33.	Porcentaje de sodio posible de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	171

Cuadro 34.	Porcentaje de sodio posible de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	172
Cuadro 35.	Carbonato de sodio residual de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	174
Cuadro 36.	Carbonato de sodio residual de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	175
Cuadro 37.	Clasificación de las aguas en base al efecto sobre la infiltración del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	180
Cuadro 38.	Clasificación de las aguas en base al efecto sobre la infiltración, del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	187
Cuadro 39.	Clasificación del contenido de boro de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	193
Cuadro 40.	Clasificación del contenido de boro de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	194
Cuadro 41.	Clasificación del contenido de cloruros de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	196
Cuadro 42.	Clasificación del contenido de cloruros de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	197
Cuadro 43.	Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos de acuerdo al contenido de sodio y su grado de restricción para el riego.	200
Cuadro 44.	Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos de acuerdo al contenido de sodio y su grado de restricción para el riego.	202
Cuadro 45.	Clasificación de acuerdo al contenido de fosfatos de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	206
Cuadro 46.	Clasificación de acuerdo al contenido de fosfatos de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	208
Cuadro 47.	Clasificación de las aguas por su dureza del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	212
Cuadro 48.	Clasificación de las aguas por su dureza del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	213
Cuadro 49.	Clasificación hidrogeoquímica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	216
Cuadro 50.	Clasificación hidrogeoquímica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	221

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Distribución de los volúmenes de agua para usos consuntivos, 2006 (CNA, 2007).	6
Figura 2. Solubilidad de diferentes sales en función de la temperatura (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).	24
Figura 3. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego citado en (Richards <i>et al.</i> , 1959).	36
Figura 4. 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)].	44
Figura 5. Diagrama trilineal para representar resultados de estudios de química del agua (Martínez <i>et al.</i> , 2006).	52
Figura 6. Mapa de la ubicación de la red hidrográfica del estado de Morelos.	55
Figura 7. Mapa con los tipos de rocas de la red hidrográfica del estado de Morelos.	70
Figura 8. Localización geográfica de las estaciones del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	83
Figura 9. Localización geográfica de las estaciones del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	91
Figura 10. Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	99
Figura 11. Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	100
Figura 12. Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	101
Figura 13. Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	102
Figura 14. Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica de ambos muestreos de la red hidrográfica del estado de Morelos.	103
Figura 15. Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica de ambos muestreos de la red hidrográfica del estado de Morelos.	104
Figura 16. Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica en el primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	106

Figura 17.	Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica en el segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	107
Figura 18.	Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica de ambos muestreos de la red hidrográfica del estado de Morelos.	108
Figura 19.	Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	111
Figura 20.	Distribución de frecuencias de la concentración total de sólidos disueltos del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	112
Figura 21.	Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	114
Figura 22.	Distribución de frecuencias de la concentración total de sólidos disueltos del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	115
Figura 23.	Mapa de distribución de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de la red hidrográfica del estado de Morelos.	116
Figura 24.	Mapa de distribución de los sólidos disueltos (mg L^{-1}) de la red hidrográfica del estado de Morelos.	117
Figura 25.	Composición iónica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	119
Figura 26.	Composición iónica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	121
Figura 27.	Relación entre la presión osmótica experimental (atm) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las soluciones acuosas de las diferentes estaciones del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	125
Figura 28.	Relación de la presión osmótica experimental (atm), determinada con diferentes métodos y la concentración de las soluciones acuosas (mmol kg^{-1}) del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	128
Figura 29.	Relación entre la presión osmótica experimental (atm) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las soluciones acuosas de las diferentes estaciones del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	130
Figura 30.	Relación de la presión osmótica experimental (atm), determinada con diferentes métodos y la concentración de las soluciones acuosas (mmol kg^{-1}) del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	133
Figura 31.	Mapa de distribución de la calidad del agua en base a la clasificación citada por Richards <i>et al.</i> (1959), de la red hidrográfica del estado de Morelos.	140

Figura 32.	Mapa de distribución de la calidad del agua en base a la CE de la red hidrográfica del estado de Morelos, clasificación de Ayers y Westcot (1987).	146
Figura 33.	Mapa de distribución de la calidad del agua en base a los sólidos disueltos de la red hidrográfica del estado de Morelos, clasificación de Ayers y Westcot (1987).	147
Figura 34.	Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards <i>et al.</i> (1959), del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS original).	157
Figura 35.	Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards <i>et al.</i> (1959), del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS ^o).	158
Figura 36.	Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards <i>et al.</i> (1959), del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS _{aj}).	159
Figura 37.	Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards <i>et al.</i> (1959), del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS original).	163
Figura 38.	Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards <i>et al.</i> (1959), del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS _{aj}).	164
Figura 39.	Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards <i>et al.</i> (1959), del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS ^o).	165
Figura 40.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio original, en las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	177
Figura 41.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio ajustado (RAS _{aj}), en las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	178
Figura 42.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio corregido (RAS ^o), en las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	179
Figura 43.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio original, en las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	184

Figura 44.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio ajustado (RAS_{aj}), en las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	185
Figura 45.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio corregido (RAS^o), en las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	186
Figura 46.	Mapa de la reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y el RAS_{aj} de la red hidrográfica del estado de Morelos.	189
Figura 47.	Mapa de la distribución de la dureza de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos.	214
Figura 48.	Clasificación hidrogeoquímica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	218
Figura 49.	Clasificación hidrogeoquímica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.	223

1.- INTRODUCCIÓN

Un problema reconocido ampliamente es la escasez de agua con calidad adecuada para consumo humano y la competencia que se establece con la agricultura y actividades industriales, por lo que el riego con aguas residuales ha sido propuesto como estrategia consistente para la producción agrícola (Peña, 2006; Heidarpour *et al.*, 2007).

Según numerosos autores la calidad de agua se define en función de tres parámetros: salinidad, sodicidad y toxicidad (Vázquez *et al.*, 2006), y se evalúa en función de los problemas que potencialmente puede causar su uso sobre los suelos y cultivos.

La salinidad es el criterio primordial de la calidad y representa el efecto negativo que las sales tienen sobre el rendimiento de los cultivos (Bacarro *et al.*, 2006), así como a las propiedades físicas y químicas del suelo (Oster y Shainberg, 2001; Suarez *et al.*, 2006).

No sólo es importante la concentración de sales, sino también la composición de ésta en cuanto al tipo de cationes y aniones presentes. Aguas con alto contenido de sodio tienden a aumentar el nivel de sodio intercambiable en el suelo, propiciando cambios en las relaciones catiónicas de los sitios de intercambio (Ruiz y Wu, 2006). Con estas condiciones, los suelos se dispersan, decreciendo la velocidad de infiltración del agua, lo cual interfiere con el drenaje, suministro de agua y aireación requerida para el crecimiento del cultivo (Oster y Shainberg, 2001; Bacarro *et al.*, 2006).

Se destacan dos factores principales causantes de la caída en la infiltración: 1) una disminución en el gradiente de potencial mátrico a medida que se lleva a cabo la infiltración, y 2) la formación de costras o sellos en la superficie del suelo. La formación de costras se debe a dos procesos: 1) desintegración física de los agregados del suelo y su compactación a causa del impacto de las gotas de agua, y 2) dispersión química y movimiento de las partículas de arcilla, con el resultante taponamiento de los poros de conducción (Balks *et al.*, 1998; Oster, 1994).

Debido a la formación de costras, la tasa de infiltración resultante tiende a disminuir hasta un valor mínimo, y es particularmente sensible a los efectos de la Relación de Absorción de Sodio (RAS) y la CE del agua de riego. Si la CE es demasiado baja como para contrarrestar los efectos del sodio intercambiable, se produce dispersión de arcillas, disminución en la tasa de infiltración y formación de costras densas y duras en la superficie del suelo cuando este se seca (Oster, 1994)

La clasificación de las aguas con respecto al peligro del Na^+ , se hace con relación al grado probable de que el suelo adsorberá Na^+ del agua. En trabajos de investigación se encontró que el RAS de las aguas de riego está altamente correlacionado con el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en los sitios de intercambio, cuando el suelo está en equilibrio con el agua de riego (Parker y Suarez, 1990). Por lo que, la relación de adsorción de sodio (RAS) se puede utilizar como un valor aproximado de la sodicidad después del riego (Hussein y Rabenhorst, 2001).

La existencia de un equilibrio entre el agua de riego y la solución del suelo es válida en la mayoría de las situaciones, pero pueden producirse cambios que no son tomados en cuenta por la expresión original del RAS, por lo que en este trabajo se utilizaron la relación de adsorción de sodio ajustado y corregido (RASaj y RAS^0).

En condiciones naturales los aportes de fósforo son limitados, pero las actividades antropogénicas aceleran este proceso, por el uso de detergentes y fertilizantes fosfatados (Romero, 1999), el aumento de los niveles de este elemento, provoca la toxicidad de los cultivos y acelera el proceso de eutrofización de las aguas. El boro es un importante micronutriente con un difícil manejo (Malavé y Carrero, 2007), presentando síntomas de deficiencia y toxicidad en un rango bastante estrecho (Goldberg *et al.*, 2005), por lo que su determinación es importante.

2.- OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivo general

Determinar los índices de calidad del agua de riego de la red hidrográfica del estado de Morelos en diferentes estaciones de muestreo.

2.2 Objetivo particular

- Determinar las concentraciones de los diferentes iones en las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos (ríos Amacuzac, Yautepec, Cuautla, Apatlaco, Tembebe).
- Determinar los parámetros físico-químicos de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos (ríos Amacuzac, Yautepec, Cuautla, Apatlaco, Tembebe), así como de sus afluentes. Temperatura ($^{\circ}\text{t}$), concentración de iones hidrogeno (pH), conductividad eléctrica (CE), residuo seco evaporado (RSE), residuo seco calcinado (RSC), carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), fósforo (P), boro (B) y presión osmótica (PO).
- Obtener el índice de salinidad potencial, índice de salinidad efectiva, % de sodio posible y carbonato de sodio residual.
- Determinar el valor de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS).

2.3 Hipótesis

Las variaciones de las concentraciones de los iones se presentarán en los diferentes puntos de muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos por la descarga de aguas urbanas, industriales y escurrimientos naturales en todo su trayecto.

3.- REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 El agua y su distribución

El agua es el compuesto químico más abundante y el de mayor significación para nuestra vida. Su excepcional importancia desde el punto de vista químico, reside en que casi la totalidad de los procesos que ocurren en la naturaleza, tienen lugar entre sustancias disueltas en agua (Gil, 2005).

Los antiguos griegos consideraron el agua uno de los cuatro elementos de la realidad universal, junto con el aire, la tierra y el fuego. Esta teoría duró varios siglos, hasta que en el siglo XIX, una explicación científica surgió y desplazó así, más de 18 siglos de interpretaciones míticas, por primera vez se pudo escribir en papel la fórmula química del agua. Este resultado fue posible gracias a los físicos ingleses Henry Cavendish que en 1766 descubrió el hidrógeno y Joseph Priestley en 1744 el oxígeno. En 1783 Lavoisier hizo la primera síntesis del agua y le dio la fórmula HO, posteriormente con los trabajos del físico italiano Avogadro se dio la fórmula definitiva H₂O (Tortolero, 2000).

3.1.1 Distribución en el planeta

Aproximadamente 1.359×10^{12} m³ de agua existen en la naturaleza, cantidad que ha permanecido constante en el planeta desde su origen (Ramos *et al.*, 2003). A pesar que el 70% de la superficie del planeta está compuesta por agua, 97.5% de ésta es salina (cerca de 1 400 millones de km³), contenida principalmente en los océanos, y sólo 2.5% es agua dulce (alrededor de 35 millones de km³).

Del agua dulce 68.9% se encuentra congelada (en bancos de hielo, glaciares y nieves perpetuas) y en la humedad del suelo; 30.8% se almacena en aguas subterráneas, y poco menos de 0.3% es agua superficial localizada en lagos, lagunas, ríos y humedales (Carabias, 2005). El agua que forma parte del ciclo hidrológico es 0.77% del agua total equivale a 11 millones de km³ (Delgado, 2006).

El almacenamiento de agua subterránea a nivel mundial, se estima en 64 millones de km³ de los cuales el volumen aprovechable en forma estable es de sólo unos 4 millones de km³.

3.1.2 Distribución del agua en México

El agua que se precipita, escurre y almacena no está distribuida físicamente de manera homogénea en el territorio nacional, ni a lo largo del año y tampoco corresponden a la localización de los asentamientos humanos (Ramos *et al.*, 2003; Carabias, 2005). Menos del 10% de la extensión territorial proporciona más de la mitad de la escorrentía nacional del agua de lluvia (Hinrichsen, 1998).

Anualmente México recibe 1.51 billones de m³ de agua en forma de precipitación, 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, 25.6% escurre por los ríos o arroyos y 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos (CNA, 2007).

La mayor parte de los recursos hídricos epicontinentales de México se localiza en ríos (68.2%), seguida en importancia por presas (17.8%), acuíferos (11.7%), lagos y lagunas (2.3%) (Arriaga *et al.*, 2000). El volumen de agua que escurre en los ríos es de 0.41 km³, en los lagos y lagunas se almacenan 14 km³ de agua dulce y 150 km³ son retenidos artificialmente en presas (CNA, 2004; Delgado, 2006).

3.1.3 Usos del agua en México

Es difícil estimar la cantidad de agua que se necesita para mantener estándares de vida aceptables. Además, las fuentes de información emplean diferentes cifras para el consumo total de agua y para el uso del agua por sector de la economía (Hinrichsen, 1998). Cada 20 años el consumo de agua dulce se duplica. A principios del siglo XXI se calculó que el 12% de la población mundial usaba cerca del 85% del agua (Delgado, 2006).

En el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), se tienen clasificados los usos del agua en 12 rubros, mismos que se han agrupado en 5 grandes grupos; cuatro que corresponden a usos

consuntivos, el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y termoeléctrica. El hidroeléctrico se contabiliza aparte por corresponder a un uso no-consuntivo (CNA, 2007).

Como se observa en la Figura 1, el mayor volumen concesionado para usos consuntivos del agua es el que corresponde a las actividades agrícolas, debido a que México es uno de los países con mayor infraestructura de riego en el mundo, contando con 6.4 millones de hectáreas.

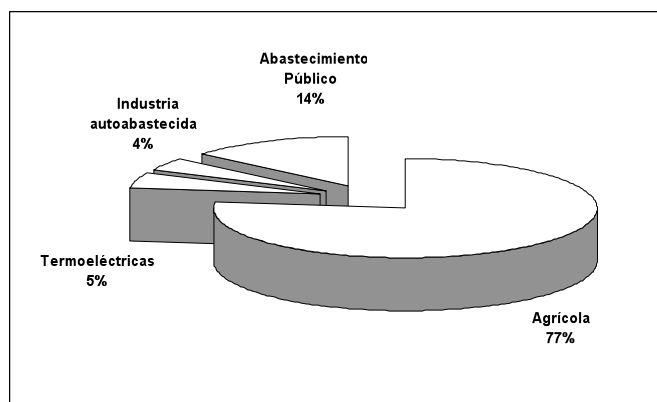


Figura 1. Distribución de los volúmenes de agua para usos consuntivos, 2006 (CNA, 2007).

El 63% del agua utilizada en el país proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que 37% restante proviene de fuentes subterráneas. El Cuadro 1 muestra la cantidad de agua que se utiliza para las diversas actividades según la fuente de extracción, para el año 2006.

Cuadro 1. Usos Consuntivos y su fuente de extracción (CNA, 2007).

USO	Usos consuntivos (km ³)		VOLUMEN TOTAL
	SUPERFICIAL	ORIGEN SUBTERRÁNEO	
Agrícola ^a	39.7	19.7	59.4
Abastecimiento público ^b	3.9	6.8	10.7
Industria autoabastecida ^c	1.6	1.4	3.0
Termoeléctricas	3.8	0.5	4.2
Total	49.0	28.3	77.3

NOTA: 1 km³ = 1 000 hm³ = mil millones de m³

Los datos corresponden a volúmenes concesionados al 31 de diciembre de 2006.

a Incluye los rubros agrícola, pecuario, acuacultura, múltiples y otros,

b Incluye los rubros público urbano y doméstico.

c Incluye los rubros industrial, agroindustrial, servicios y comercio.

3.1.4 Uso de agua residual

Un problema reconocido ampliamente es la escasez de agua con calidad adecuada para consumo humano y la competencia que se establece con la demanda del líquido para la agricultura y actividades industriales (Herrera, 1990). Por lo que, el riego con aguas residuales ha sido propuesto como estrategia consistente para la producción agrícola en zonas áridas (Peña, 2006).

Actualmente el aprovechamiento de aguas residuales depuradas y no depuradas para el riego se practica en Europa, los Estados Unidos, México, Australia, China, la India y el Cercano Oriente y en menor medida en Chile, Perú, Argentina, Sudán y Sudáfrica (Braatz y Kandiah, 1996).

El uso de las aguas residuales para el riego probablemente es tan antiguo como el cultivo de la tierra. Sin embargo, el aprovechamiento controlado en gran escala se remonta sólo al siglo pasado, cuando en algunas partes de Europa, Australia, la India y los Estados Unidos se crearon los llamados campos de aplicación o estaciones de depuración de aguas residuales, con el fin de eliminar las aguas negras y evitar la contaminación de los ríos. Aunque en estos campos se producían cultivos, su producción era una cuestión secundaria (Braatz y Kandiah, 1996).

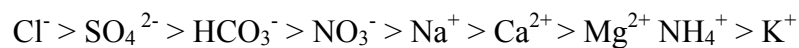
El agua residual es un recurso valioso y su demanda aumentará en la medida que decrezca la disponibilidad y se incremente la necesidad de agua (Heidarpour *et al.*, 2007). Entre los beneficios de la utilización de aguas residuales urbanas para el riego pueden señalarse el tratamiento y la eliminación de las aguas negras con bajos costos, la conservación del agua y la utilización de los nutrientes con fines de producción, ya que son aprovechados de forma inmediata.

La utilización de agua residual en la agricultura, es de interés tanto internacional como nacional, pues se practica en el país en más de 250 000 hectáreas, en la mayoría de los casos de forma inapropiada (Jiménez *et al.*, 2004). Tal es el caso del Valle del Mezquital en Hidalgo, que desde 1789 ha tenido el aporte de agua residual y de lluvia de la Ciudad de México (Maderey y Carrillo, 2005). La zona de riego abarca mas de 130 000 hectáreas (Velázquez *et al.*, 2002), siendo la de mayor extensión en el país.

3.2 Composición química de las aguas

La composición química, es el conjunto de sustancias generalmente inorgánicas incorporadas al agua por procesos naturales, las sustancias orgánicas aunque frecuentes, aparecen en concentraciones menores. La incorporación de los constituyentes al agua es debida a su elevado poder disolvente y a sus propiedades de combinación (Ramos *et al.*, 2003). Ésta disolución comienza incluso antes de que se incorpore al sistema de flujo subterráneo propio de cada acuífero. Gases, aerosoles, polvo y sales diversas, presentes en la atmósfera, reaccionan con el agua marcando el primer esbozo de la composición química del agua.

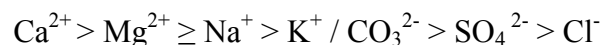
Las especies iónicas en orden de abundancia presentes en un agua atmosférica Wetzel (1981) propone las siguientes:



Este orden es mas cierto cuanto mayor sea la influencia de las aguas marinas, en zonas continentales, lejos de la influencia de mares y océanos, los iones HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} suelen ser los predominantes (Domònech y Peral, 2006).

El agua marina tiene un contenido en sales disueltas de un 3.5%, constituidas principalmente por iones Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} y K^+ (Figueruelo y Dávila, 2004).

Las corrientes superficiales, que en la mayoría de los casos son la causa inmediata de la lluvia, tienen contacto con los materiales que forman los cauces así como con los fragmentos de roca transportados, el agua disuelve los materiales que los componen obteniendo así su composición química, por lo cual ésta es muy variable (Vidal *et al.*, 2004). Las proporciones mundiales de los principales iones que se encuentran en las aguas continentales Wetzel (1981) indica:



Muchas veces en las aguas blandas y en los lagos de las regiones costeras, las concentraciones de Na^+ y Cl^- son mayores. Las concentraciones de los cuatro cationes: (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) y

cuatro aniones (HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-) normalmente son los que determinan para efectos prácticos la salinidad iónica total del agua (Wetzel, 1981; Alonso, 1998).

El aporte de materiales de los diferentes horizontes del suelo, el ambiente reductor, los procesos de carbonatación y los fenómenos de intercambio catiónico, determinan la composición química de las aguas subterráneas (Domènech y Peral, 2006). El orden habitual de abundancia de las especies iónicas en el agua subterránea es la siguiente:



Los conceptos de iones mayoritarios, minoritarios y trazas son usados tanto en aguas subterráneas como en superficiales. Los iones mayoritarios son cloruro, carbonatos, bicarbonato, sulfato, calcio, magnesio, sodio y potasio. Los iones minoritarios son aquellos que se encuentran formando menos del 1% del contenido iónico total, son: bromuro, yoduro, sílice, litio, estroncio, fosfato, nitrito, hierro, manganeso, aluminio, amonio, sulfuro, fluoruro. Los elementos traza son los que se encuentran en cantidades inferiores; metales pesados y otros (Sánchez, 2004).

3.3 Composición química de la corteza terrestre

La naturaleza de los elementos presentes en las soluciones acuosas de los suelos y el agua, puede entenderse mejor con un conocimiento de la composición elemental de la corteza, así como de los procesos que les dieron origen.

Si bien, la corteza terrestre se halla constituida por rocas compactas raramente aparecen en la superficie. Por lo general, la roca madre está oculta por un manto más o menos grueso de suelo y piedras sueltas que proceden de la disgregación progresiva de ella misma (Brinkmann, 1964).

La inmensa mayoría de las rocas son agregados de minerales (Holmes y Holmes, 1987). Los minerales están formados a base de elementos específicos en una ordenación estructural

característica. La composición elemental de los minerales del suelo es la misma de las rocas que le dieron origen (Cepeda, 1991).

Aunque en los minerales existen en forma natural 87 elementos de la tabla periódica, ocho de ellos son tan abundantes que forman el 99% en peso total de miles de rocas que han sido analizadas (Holmes y Holmes 1987). De los elementos más comunes, el único de valencia negativa es el oxígeno y está asociado con el silicio, formando unidades estructurales. En consecuencia, los minerales más comunes son los silicatos (Phillips y Phillips, 1986).

Holmes y Holmes (1987) resumen los principales elementos formadores de los minerales de las rocas éstos se indica en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Composición Media de las rocas (Holmes y Holmes, 1987).

Nombre	Símbolo	%	Nombre	Símbolo	%
Expresada en Elementos			Expresada en óxidos		
Oxígeno	O ²⁻	46.60			59.26
Silicio	Si ⁴⁺	27.72	Sílice	SiO ₂	15.35
Aluminio	Al ³⁺	8.13	Alúmina	Al ₂ O ₃	3.14
Hierro	Fe ²⁺	5.00	Férrico	Fe ₂ O ₃	3.74
	Fe ³⁺		Ferroso	FeO	
Calcio	Ca ²⁺	3.63	Cal	CaO	5.08
Sodio	Na ⁺	2.83	Sosa	Na ₂ O	3.81
Potasio	K ⁺	2.59	Potasa	K ₂ O	3.12
Magnesio	Mg ²⁺	2.09	Magnesia	MgO	3.46
Titanio	Ti ⁴⁺	0.44	Óxido de titanio	TiO ₂	0.73
Hidrógeno	H ⁺	0.14	Agua	H ₂ O	1.26
Fósforo	P ⁵⁺	0.12	Peroxido de fósforo	P ₂ O ₅	0.28
		99.29			99.23

Algunos elementos constituyen minerales por si solos, pero la mayoría de las especies mineralógicas se componen de dos o más elementos. El oxígeno es el elemento mas abundante de las rocas, en combinación con otros elementos forma lo llamados óxidos, algunos de los cuales se presentan en estado mineral.

3.3.1 Geoquímica de los elementos

Para realizar este apartado se consultó a: (Fersman, 1971; Holmes y Holmes, 1987; Fassbender y Bornemisza, 1987; Goldberg *et al.*, 2000; Guerrero, 2001; Navarro, 2003 y Manahan, 2007).

Sílice

El silicio es el segundo elemento más abundante en la naturaleza después del oxígeno, nunca se encuentra en estado libre y siempre está combinado con oxígeno formando sílice, óxido de silicio, ácido silícico o cuarzo. Forma la base de los magmas fundidos en las zonas profundas de la corteza terrestre, junto con otros metales, cuando se enfría en las profundidades se forman rocas cristalinas como granito, gabbro; o se derrama por la superficie en forma de lava, formando basaltos y otras rocas, aquí ocurren complejas combinaciones con óxidos de otros metales, a estos nuevos compuestos se les llama silicatos y forman parte de un gran número de minerales en la mayoría de las rocas.

El origen fundamental del sílice en el agua son los procesos de hidrólisis de feldespatos y silicatos en general, en forma de sílice hidratada H_4SiO_4 , que comienza a disociarse en pH superiores a 9, por lo que el contenido es escaso. Una parte de ésta se vuelve a precipitar en los fangos y lechos de ríos en forma de silicatos de hierro y otra cantidad sirve para cementar las areniscas, una mínima parte es aprovechada por los microorganismos (diatomeas). El cuarzo o la sílice amorfa, por su baja solubilidad, fuertemente dependiente de la temperatura, no son fuentes significativas de este elemento. En aguas altamente alcalinas suelen encontrarse hasta 100 mg L^{-1} , en agua subterránea sobrepasa los $3-8 \text{ mg L}^{-1}$.

El contenido de sílice en los suelos puede alcanzar hasta un 60-90% de la capa arable, pero en forma soluble es variable su contenido, ya que depende del pH, los suelos ácidos contienen mayor concentración.

Carbono

La cantidad de carbono en la superficie de la tierra es poco, algunos autores manejan que ocupa 0.23%, otros el 0.13%, pero el papel que desempeña en la química de la tierra es muy grande,

es la base de todo lo vivo. Las rocas carbonatadas y los sedimentos constituyen la reserva más importante de carbono, pero su liberación es muy lenta. El carbono está contenido en los magmas fundidos, en láminas o conglomeraciones de grafitos o en forma de cristales (diamante) contenidos en rocas o en vetas. En las profundidades de la tierra, el ácido sálicico no permite que el gas carbónico forme sales, por lo que las rocas lo acumulan en sus huecos internos, escapa principalmente como hidrocarburos y carburos volátiles (gas carbónico).

En regiones volcánicas el carbono se mezcla con el agua y forma aguas minerales carbónicas. Una gran cantidad de anhídrido carbónico es arrojado a la atmósfera por la actividad volcánica, éste destruye las rocas eruptivas, extrayendo los metales. Al combinarse con el calcio y el magnesio se acumula como caliza y dolomita.

El carbono está presente en la atmósfera como dióxido de carbono, este es fijado como carbono orgánico por la fotosíntesis y es liberado a la atmósfera por la descomposición microbiana de la materia orgánica, respiración y quema de combustibles. Otra parte del carbono orgánico es fijado por tejidos de los organismos, cuando estos mueren se transforma en petróleo, queroseno, carbón y lignito, por efecto de la temperatura, presión y procesos bioquímicos complejos.

Calcio

En la corteza terrestre ocupa aproximadamente 4%. Presenta un amplio ciclo en la naturaleza, en el cual los suelos conforman una parte. Es un metal que ha intervenido durante los procesos de formación de la corteza terrestre, en la creación de la vida y en el progreso técnico del hombre. Es muy móvil y presenta una tendencia infinita para combinarse con otros elementos, resultando complejas combinaciones.

Cuando las rocas ígneas (basaltos) del fondo del mar salieron a la superficie por medio del vulcanismo, en la formación de la corteza terrestre, paulatinamente se formaba la atmósfera e iniciaban las lluvias. Las erupciones volcánicas arrojaron gran cantidad de anhídrido carbónico que al combinarse con el agua de lluvia extrajo los iones de calcio y magnesio. El calcio formó combinaciones con el anhídrido carbónico cuando había exceso, el carbonato cálcico era

transportado por el agua, principalmente como bicarbonato, en parte como carbonato y abundantemente como sulfato, pero si había poco anhídrido carbónico, el carbonato cálcico se precipitaba en forma de polvo blanco cristalino, acumulándose en capas, algunos depósitos de estas fueron envueltas por masas incandescentes y se formó mármol.

Una de las múltiples combinaciones del carbono dio origen a la vida, con la combinación y evolución de estas moléculas se formaron todos los seres vivos, estos organismos necesitaban protección así que fijaron el calcio disuelto en el agua y lo utilizan para construir sus primeras conchas de fosfato de calcio, pero como éste compuesto no es muy abundante las hicieron de carbonato de calcio, siendo más resistentes. El carbonato de calcio se empezó a acumular en el fondo del mar gracias a las conchas y esqueletos de los organismos que morían, esto originó nuevas formaciones rocosas y futuras cordilleras, cuando salieron a la superficie terrestre por medio de movimientos tectónicos, el calcio es de nuevo liberado.

La concentración de calcio en las aguas varía ampliamente entre 10 y 250 mg L⁻¹ son frecuentes en aguas dulces mientras que en aguas de terrenos yesíferos pueden llegar a 600 mg L⁻¹ y en salmueras hasta 50 g L⁻¹. Las aguas subterráneas generalmente son duras.

El contenido de calcio en suelos considerados como calizos es de 25% y en los no calizos varía entre 0.1 y 0.2%. En regiones húmedas el contenido es menor que el que contiene la roca madre, cuando el lavado es moderado no sale del perfil y se acumula como carbonato o sulfato de calcio.

Sodio

El sodio ocupa el séptimo lugar en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre. Deriva de los minerales silicatados de lavas ácidas de rocas eruptivas y granitos, como, hornblenda y moscovita, también de depósitos de evaporitas (sal gema o sulfato sódico) y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino. Los agentes activos de la superficie extraen el sodio y el potasio. El sodio es fácilmente arrastrado por el agua y sólo se presenta en la naturaleza en estado combinado, se encuentra en el mar y en los lagos salinos como cloruro de

sodio (NaCl) y con menor frecuencia como carbonato de sodio (Na₂CO₃) y sulfato de sodio (Na₂SO₄). La concentración en aguas naturales es variable alcanza hasta 120 mg L⁻¹ en zonas evaporíticas y raramente sobrepasa 100 mg L⁻¹ en aguas dulces normales.

El contenido de sodio en los suelos varia, las sales de sodio son altamente solubles y tienden a permanecer en solución ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación. Sin embargo, el sodio puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico y puede ser intercambiado con calcio provocando una disminución de la dureza del agua.

El compuesto de sodio más importante es la sal común, otros compuestos se utilizan para fabricar jabón, rayón, papel, antiséptico, veneno, fertilizantes, agente blanqueador y oxidante, refrigerantes, también lo utiliza en las refinerías de petróleo, en la industria textil y del caucho. El sodio comercial se prepara descomponiendo electrolíticamente cloruro de sodio.

Potasio

El potasio es un elemento alcalinotérreo, que ocupa aproximadamente 2.5% del contenido de la superficie terrestre, es muy móvil y forma parte en mas de 100 minerales. Forma uniones estables solo con el cloro, su movilidad y migración es ligada al sodio. Cuando los agentes ambientales actúan sobre a las rocas graníticas que están conformadas por feldespatos potásicos, moscovia y biotita se libera sodio y potasio.

Una gran cantidad de átomos de potasio son fijados en el suelo, sedimentos de los mares, pantanos y ríos y solo una pequeña proporción está en dilución en el agua de mar, lagos y ríos. Ocasionalmente el potasio se obtiene de la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular de sales tipo silvina (KCl) o carnalita (KCl MgCl₂).

Existen yacimientos de potasio en donde fueron lagos salados o mares antiguos someros que se secaron por movimientos de la corteza o por la evaporación excesiva, estos depósitos son la fuente para la fabricación de fertilizantes. También se encuentra en las masas basálticas que están en el fondo de los océanos, constituyendo un 0.3%. En la mayoría de los suelos se

encuentra en cantidades relativamente grandes (3 y 5%), de esta cantidad solo un 10% puede ser aprovechado por las plantas, el resto se encuentra de forma intercambiable (adsorbido por los coloides del suelo).

Magnesio

El ciclo del magnesio se parece en muchos aspectos al del calcio, el magnesio puede substituir en parte al calcio, y formar calizas dolomíticas. Según diversas estimaciones, su contenido en la corteza terrestre puede situarse en un 2%. Existe en la naturaleza en combinación química con otros elementos, en particular, en los minerales carnalita, dolomita y magnesita, en muchos silicatos constituyentes de rocas y como sales, por ejemplo el cloruro de magnesio, que se encuentra en el mar y en los lagos salinos.

De las rocas ígneas deriva de la alteración de los silicatos ferromagnesiano como el olivino, los piroxenos y anfíboles. De las rocas metamórficas, el magnesio forma parte de los minerales como clorita, motmorinolita y serpentina. De las rocas sedimentarias procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomitas y calizas magnesianas) y evaporitas.

En aguas naturales el contenido no suele sobrepasar los 40 mg L⁻¹. En terrenos calcáreos pueden rebasarse los 100 mg L⁻¹ y en terrenos evaporíticos pueden llegar a valores de 1000 mg L⁻¹. En general las aguas subterráneas contienen pocas cantidades de magnesio excepto cuando están en contacto con dolomitas o con evaporitas ricas en Mg²⁺.

En algunos suelos el magnesio se encuentra en forma de carbonato como magnesita y dolomita que contienen hasta el 2% de magnesio. En regiones áridas y semiáridas se encuentra principalmente en forma de sulfatos.

Fósforo

Este elemento procede directamente de la roca madre, representa alrededor del 0.1% de la corteza terrestre, las rocas volcánicas son la principal fuente, representando entre 0.1 y 0.3% de

su contenido en forma de inclusiones apatíticas. Las rocas sedimentarias contienen entre 0.03 y 0.08 %. De casi 200 fosfatos minerales diferentes sólo uno es utilizado, la fluorapatita $[\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3]$, que se extrae esencialmente de grandes depósitos secundarios de mares prehistóricos originados por huesos de animales y de guanos depositados sobre rocas antiguas.

La importancia del fósforo es que forma la base de gran número de compuestos, en la materia viva aparece siempre en forma de ion fosfato soluble (ortofosfato PO_4^{3-}), que desempeñan un papel esencial en los procesos de transferencia de energía como el metabolismo, la fotosíntesis, la función nerviosa y la acción muscular, así como de los esqueletos de animales en forma de fosfato de calcio.

El contenido en los suelos varía, ya sea en forma sólida o disuelta, en suelos ácidos tiende a precipitarse o formar compuestos con el aluminio y el hierro. En suelos alcalinos pueden reaccionar con el carbonato de calcio para formar la hidroxiapatita $[\text{Ca}_5(\text{HPO}_4)_2]$, relativamente insoluble.

Azufre

La proporción del azufre en la corteza terrestre es de 0.03 a 0.1%. Con frecuencia se encuentra como elemento libre cerca de las regiones volcánicas (depósitos impuros). El azufre procede inicialmente de la oxidación de los sulfuros metálicos constituyentes de las rocas ígneas y sedimentarias (pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), blenda (ZnS), galena (PbS), etc.) y del lavado de terrenos formados en ambiente marino.

El azufre es un elemento activo que se combina directamente con la mayor parte de los elementos conocidos. Está sujeto a procesos de reducción, especialmente en presencia de bacterias y materia orgánica. En pH menor que 7.0, la forma reducida estable es el H_2S , mientras que en soluciones alcalinas predomina el HS^- . En aguas dulces, la concentración normal de sulfatos puede variar entre 2 y 150 mg L^{-1} . En aguas salinas, se puede asociar al calcio y puede llegar a 5000 mg L^{-1} ; asociado al Mg^{2+} y Na^+ , en salmueras, puede alcanzar hasta 200 g L^{-1} .

Cloro

El cloro libre no existe en la naturaleza, pero sus compuestos son minerales comunes y ocupa el lugar 20 en abundancia en la corteza terrestre. Este elemento está muy difundido en la naturaleza y ha sido difícil establecer su esencialidad. Procede principalmente de rocas ígneas, sedimentarias de origen marino, agua de mar, de la degradación de restos orgánicos y del agua de lluvia (especialmente en zonas próximas a la costa). La acumulación de este elemento en las aguas de mar se debe principalmente a las emisiones volcánicas y de las rocas marinas. La concentración es muy variable desde menos de 10 mg L^{-1} a más de 3000 mg L^{-1} . En salmueras naturales, puede llegar a casi 200 g L^{-1} , al igual que en el agua de mar.

En regiones con suelos muy lavados se han encontrado deficiencias de cloro, el contenido varía entre 0 y 1000 kg por hectárea. El contenido depende de la cantidad de sales solubles presentes particularmente de cloruro sódico y en menor medida de cloruro cálcico y magnésico. Debido a su gran solubilidad y a que se fija muy débilmente al complejo coloidal del suelo, es arrastrado por el agua, pero en suelos cercanos a los mares y océanos; con un nivel freático bajo, riego constante con aguas con altos contenidos de este ion, poco drenaje y climas áridos, ocurre su acumulación.

Boro

Al boro (B) se le conoce como metaloide y es liberado al medio desde los océanos, vapores geotérmicos, actividad volcánica y meteorización de las rocas ígneas y sedimentarias, con una distribución variable. En rocas ígneas ácidas se han encontrado concentraciones de hasta 60 ppm, en rocas ígneas básicas se consideran pobres ya que lo máximo que se encuentra son 10 ppm, La fuente principal de boro es la turmalina, un borosilicato que contiene 3% de boro, combinado con hierro, aluminio, magnesio, calcio, litio y sodio en proporciones variables, es muy resistente a la meteorización, por lo que, la liberación de boro es muy lenta.

El agua de mar es otra fuente importante de boro, este es liberado en forma de vapor de ácido bórico, en regiones costeras el contenido es 50 veces más que en contenido de suelos interiores. El aporte también puede ser mediante el riego de aguas con altas concentraciones.

Varios investigadores indican que el contenido de boro total en los suelos es de 1 a 200 ppm, sin embargo, no puede ser utilizado por los cultivos ya que no pueden asimilarlo, solo de 0.05 a 5 ppm se encuentra en forma asimilable como ácido bórico ($B_4O_7^{2-}$, BO_3^{3-} , BO_3H^{2-} , $BO_3H_2^-$) compuestos orgánicos solubles. En las regiones áridas alcanzan concentraciones de 1000 ppm. El contenido de boro soluble en el suelo se determina por la textura, si esta es gruesa es más fácilmente lixiviado. Otros factores son la temperatura, humedad y el pH, en condiciones ácidas el boro no está disociado y es fácilmente lixiviado, cuando el pH es alcalino hasta 10, hay mayor adsorción de óxidos de aluminio y hierro, ya que el boro tiende a hacer receptor de OH^- .

3.4 Origen de las sales

La formación y acumulación de las sales en los suelos es el resultado de muchos procesos geoquímicos que ocurren en la superficie de la corteza terrestre. Las sales proceden fundamentalmente del intemperismo de las rocas ígneas, que se acumulan en rocas sedimentarias, suelos y aguas, en cierta forma es la fuente original. También provienen de la precipitación atmosférica (próxima a las costas), emanaciones volcánicas, sales fósiles y de fuentes antropogénicas como el riego (Richards *et al.*, 1959; Kiely, 1999; Rengasamy, 2006).

El intemperismo se refiere a la descomposición y desintegración química y física de las rocas y minerales contenidos en ellas, que no se encuentran en equilibrio en las condiciones de temperatura, presión y humedad del espacio entre la atmósfera y litosfera (Buol *et al.*, 1981).

La corteza terrestre es atacada principalmente por el aire y por las aguas, siendo los medios de acción de estas sustancias sumamente variados. Sin embargo pueden clasificarse en: Desintegración mecánica se refiere a la intemperización de las rocas por agentes físicos (temperatura, agua, viento, vegetación) y descomposición química que se entiende por la acción de agentes que modifican la composición mineralógica de las rocas (Juárez, 2004).

La desintegración de la roca por la acción mecánica, produce fragmentos pequeños, con una área superficial relativamente elevada, ello propicia que en la superficie de estas partículas puedan tener lugar procesos químicos que transforman los minerales originarios de la roca, es decir los minerales primarios, en otros con propiedades físicas y químicas muy distintas (minerales secundarios) (Domènech y Peral, 2006).

Durante el proceso del intemperismo químico se liberan gradualmente los iones de las rocas y minerales, estos procesos son: hidrólisis, hidratación, oxidación, reducción, carbonatación y solución (Se consulto a Brinkmann 1964; Buckman y Brady, 1966; Buol *et al.*, 1981; Holmes y Holmes 1987; Cepeda, 1991; Doménech y Peral, 2006, para definir las).

OXIDACIÓN: Dentro de los diferentes cambios químicos, este es uno de los principales, la oxidación de minerales implica el cambio del estado de valencia de los metales que contiene en presencia de oxígeno libre. Se produce en rocas bien aireadas, en materiales de suelos con el contenido de oxígeno alto y demandas biológicas bajas de ese elemento. El caso más conocido es el paso del Fe^{2+} a Fe^{3+} , que afecta a minerales como pirita, olivino, piroxeno, biotita, este proceso rompe la estructura de los minerales. El hierro liberado de los minerales primarios, se une con el hidroxilo (OH) u oxígeno para formar óxidos o hidróxidos.

REDUCCION: Se produce en ambientes saturados de agua donde la existencia de oxígeno es baja y la demanda biológica de este elemento es elevada. El proceso convierte al fierro a la forma ferrosa, la cual es muy móvil, por lo que se puede perder si hay descenso o ascenso de agua freática. Si permanece en el sistema forma sulfuros y compuestos relacionados, dando la coloración verdosa característica de materiales reducidos de los suelos.

HIDRATACIÓN: Se refiere a la asociación de moléculas de agua o grupos hidroxilos con minerales, por lo común sin descomponer o modificar al mineral. Se produce principalmente en las superficies y los bordes de los granos minerales. En el caso de algunas sales simples pueden invadir toda la estructura como en el caso de la anhidrita para formar yeso, otro caso es el de algunos minerales de la arcilla (las denominadas arcillas expandibles, del grupo de la bentonita), capaces de absorber grandes cantidades de agua, lo que puede traducirse en un

aumento de su volumen en hasta un 60%, mientras que al perder agua por desecación se vuelven a contraer.

Al ser hidratados los minerales tienden a expandirse y hacerse más porosos, provocando así otros procesos de descomposición. En algunos casos, la repetición cíclica de procesos de hidratación-deshidratación propios de climas estacionales, puede provocar la destrucción de la red cristalina del mineral.

HIDRÓLISIS: La reacción de los minerales con el agua es quizá el camino más importante por el cual suceden las descomposiciones químicas. Se refiere al ataque del ion de hidrógeno (que junto a su capa de hidratación se le llama hidronio), en las superficies cristalinas. El proceso implica tres pasos: 1) Rotura de la estructura del mineral. Debido a su pequeño tamaño y a su gran movilidad, los iones H^+ se introducen con facilidad en las redes cristalinas, lo que produce la pérdida de su neutralidad eléctrica; para recuperarla, el cristal tiende a expulsar a los cationes, cuya carga es también positiva. Como consecuencia, la estructura cristalina colapsa, y se liberan también los aniones; 2) Lavado o lixiviado de una parte de los iones liberados, que son transportados por las aguas fuera de la roca meteorizada; 3) Neoformación de otros minerales, por la unión de los iones que dan como resultado compuestos insolubles. La intensidad del proceso hidrolítico se traduce en el grado de lixiviación de elementos químicos y en la formación de nuevos minerales.

Este proceso es el más importante de la intemperización química, ya que desintegra o modifica drásticamente a los minerales primarios. Afecta a los aluminio-silicatos, pero no actúa sobre los enlaces Si-O, por lo que en muchos casos aparecerá el SiO_2 como producto final (insoluble). La hidrólisis actúa con mayor intensidad a altas temperaturas, bajo pH y bajo potencial redox.

SOLUCION: La acción disolvente del agua y de los iones que arrastra se producen cuando circula alrededor y/o a través de las rocas y demás minerales. Es la disolución de sales simples como carbonatos y cloruros, que se encuentran presentes como granos minerales en materiales del suelo. El agua actúa como medio de reacción y no como reactivo.

CARBONATAACION: La desintegración y descomposición de la materia mineral son apresuradas por la presencia del ion H^+ en las aguas de percolación. El ácido carbónico (H_2CO_3), es conocido como causante de la solubilización de la calcita, dando lugar la formación de bicarbonatos, los cuales son muy solubles.

En consecuencia de los procesos intemperismo químico, hay una liberación de silicio hacia la hidrosfera, y una cantidad importante queda insoluble formando principalmente silicatos laminares y óxidos. También se lixivian de los minerales primarios iones alcalinos (Na^+ , K^+ , etc.), alcalinotérreos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc.) y metales de transición, aunque una parte se queda en algunos minerales o se acumula en el suelo como óxidos (Fe, Al).

Los minerales presentan características distintas entres sí, las cuales hacen que unos sean más resistentes a los procesos químicos y físicos a los que están sometidos en la corteza terrestre. En general manifiestan la siguiente resistencia erosiva, dada por Jackson y Sherman (Buckman, 1966).

Cuarzo > moscovita > feldespatos potásicos > feldespatos sódicos y cálcicos > biotita, hornblenda y augita > olivino > dolomita y calcita > yeso

De los elementos liberados por el intemperismo y que son fundamentales para la presencia de suelos salinos, tenemos: Calcio, magnesio, sodio, potasio, cloro, azufre, carbono, nitrógeno, boro, yodo. También tenemos en microcantidades al cobre, zinc y bromo (Del Valle, 1983). Estos elementos migran, se acumulan y combinan formando sales, influenciados por las características químicas propias de cada elemento y por las condiciones climáticas, hidrológicas, geomorfológicas y topográficas de cada región.

Para Fersman (1973), la secuencia de liberación de los iones constituyentes de rocas y minerales, así como su movilidad y su capacidad para acumularse en las depresiones fisiográficas, en forma de sales, son inversamente proporcionales al coeficiente de energía (CE), radio iónico, valencia y estabilidad del compuesto cristalino de estos iones, esto se observa en el Cuadro 3.

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

ANIONES	CE	CATIONES	CE
NO ₃ ⁻	0.18	K ⁺	0.36
Cl ⁻	0.23	Na ⁺	0.45
SO ₄ ²⁻	0.66	Ca ²⁺	1.75
CO ₃ ²⁻	0.78	Mg ²⁺	2.10
SiO ₃ ²⁻	2.75	Al ³⁺	4.25
		Fe ³⁺	5.15

Las sales que con mayor facilidad han de formarse son los nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos de iones alcalinos y alcalinotérreos.

Lo que propuso Fersman lo corroboraron los trabajos realizados por Polynov y Kovda, en los bajíos del mar caspio, realizando una clasificación de los elementos de acuerdo a su movilidad durante los procesos de intemperismo. Los elementos químicos los agruparon en cinco categorías (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).

Grupo 1. Prácticamente inmóvil: Sílice (en cuarzo)

Grupo 2. Débilmente móvil: Hierro, aluminio, Sílice

Grupo 3. Móvil: Sílice, fósforo, Manganeseo

Grupo 4. Fácilmente lavable: Calcio, sodio, potasio, magnesio, cobre, cobalto y zinc

Grupo 5. Muy fuertemente lavable: Cloro, bromo, yodo, azufre, carbono, boro

Por lo tanto los grupos cuarto y quinto son los principales elementos que constituyen los compuestos que se encuentran en los suelos salinos y aguas. Estos se acumulan en depresiones, cuencas endorreicas, deltas de ríos y océanos, en forma de cloruros (NaCl, CaCl₂, MgCl₂, KCl), sulfatos (MgSO₄, Na₂SO₄, CaSO₄), carbonatos (Na₂CO₃, CaCO₃, MgCO₃), y bicarbonatos (NaHCO₃) (Carrera, 2007).

4.4.1 Solubilidad de la sales

Se trata de una propiedad muy importante, pues además de afectar a la movilidad y precipitación de estas, va a regular su concentración en el agua superficial o freática y en la solución del suelo, cuanto mayor sea, más importante va a ser su efecto perjudicial en los cultivos. Las sales más tóxicas son las que presentan elevadas solubilidades, ya que darán soluciones muy concentradas. Por el contrario las sales con baja solubilidad se precipitarán antes de alcanzar niveles perjudiciales.

Las formas mineralógicas en las que se presentan las sales son muy variables, ya que dependen de la temperatura y de la humedad del medio en el que cristalicen. Existe una gran variedad de especies minerales que se diferencian en el grado de hidratación de su molécula, así como por la posibilidad de que se formen sales mixtas en las que intervienen más de un catión. Durante un ciclo de humectación y secado, muy común en los suelos salinos, pueden cambiar las especies cristalinas aunque no se modifique la composición iónica global (Porta *et al.*, 2003).

Las principales sales solubles que afectan a los suelos son los cloruros, en especial de sodio y magnesio, y en menor grados, los sulfatos de los mismos cationes. Éstas son sales constituidas por cationes y aniones fuertes, su disociación no altera el pH de la solución de manera significativa; pero en la solución edáfica y en algunas fuentes de agua freática de baja mineralización suelen ser alcalinas, en ellas el sodio está asociado con los aniones carbonato y bicarbonato, ambos débiles; la disolución de este tipo de sales hace que el pH de la solución alcance valores muy elevados para la mayor parte de los cultivos (Ortega y Orellana, 2007).

En general, la solubilidad de la sales aumenta con la temperatura. Para Kovda *et al.* (1967) en soluciones complejas, la presencia de sales con iones comunes disminuye su solubilidad. Por el contrario, cuando los iones son diferentes se suele aumentar la solubilidad de la sal menos soluble. En la Figura 2, se puede observar como cambia la solubilidad de las sales de sodio conforme aumenta la temperatura.

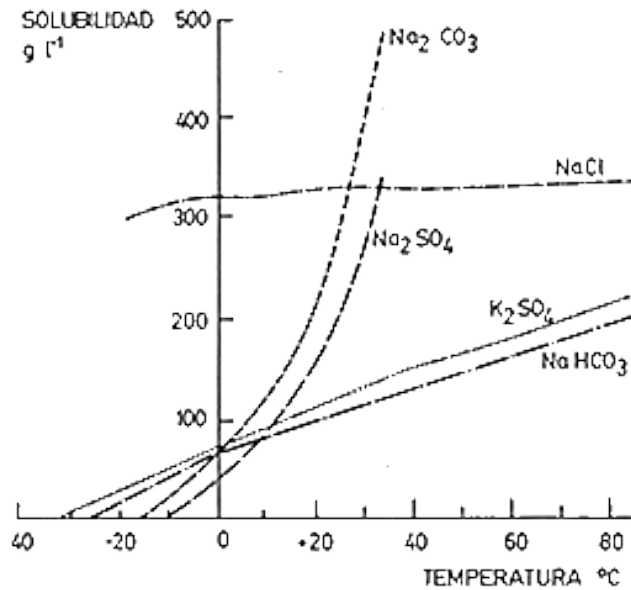


Figura 2. Solubilidad de diferentes sales en función de la temperatura (Irrigation/Drainage and Salinity, 1973).

La precipitación de las sales de una solución policomponente, depende del grado de solubilidad. Las débilmente soluble se precipitan en concentraciones bajas y las mas solubles se precipitan en concentraciones altas.

La regularidad de la precipitación de sales se ha estudiado ampliamente en las aguas de altos contenidos salinos. En primer lugar se precipitan los hidróxidos de silicio y fierro, después los carbonatos de calcio y magnesio, más adelante el yeso y los sulfatos de magnesio, por último cloruros de sodio, potasio y magnesio (Kovda *et al.*, 1967).

3. 5 Calidad del agua para riego

La calidad de agua tiene un papel importante en la producción agrícola, porque su disponibilidad es uno de los factores cruciales que modula el crecimiento de las plantas (Rodríguez, 2006; Leidi y Pardo, 2002).

De forma tradicional se ha entendido por calidad del agua al conjunto de características físicas, químicas y biológicas que hacen que sea apropiada para un uso determinado. Cuando el uso al que está destinada es el riego, la calidad viene definida por sus características físicas y químicas.

La calidad del agua de riego según numerosos autores, entre ellos Richards (1980), Suarez (1981), Pizarro (1985) y Ayers & Westcot (1987), se define en función de tres parámetros: salinidad, sodicidad y toxicidad. A pesar de esta unificación aparente de criterios, los diferentes autores emplean distintas escalas, relaciones entre parámetros y cálculos de indicadores, pues la naturaleza particular de los sistemas productivos y edafo-climáticos a partir de los cuales se originaron y justifica que aquellos desarrollados en ambientes particulares, no puedan ser extrapolados a otros ambientes sin adaptaciones (Vázquez *et al.*, 2006).

En el Cuadro 4, se presentan las directrices para valorar la calidad del agua de riego de acuerdo con Ayers y Westcot (1987). Se refieren a los efectos a largo plazo de la calidad del agua sobre la producción de cultivos, las condiciones del suelo y el manejo agrícola. Son válidas para la evaluación de los componentes de aguas superficiales, subterráneas, residuales, etc.

La calidad puede variar significativamente según el tipo y cantidad de sales disueltas (Ayers y Westcot, 1987). Por otra parte, la calidad requerida del agua dependerá de varios factores como son: tipo de suelo, velocidad de infiltración, conductividad hidráulica, drenaje, reacciones químicas agua-suelo, sistema de riego, fertilización, cultivo (tolerancia a la salinidad o a la toxicidad) (Oster y Shainberg, 2001; Pereira *et al.*, 2002; Heidarpour *et al.*, 2007).

Cuadro 4. Directrices para interpretar de la calidad del las agua para el riego (Ayers y Westcot, 1987).

Problema Potencial	Unidades	Grado de Restricción de Uso		
		Ninguna	Ligera a moderada	Severa
Salinidad				
(afecta disponibilidad de agua para cultivo) ²				
CEa o	dS m ⁻¹	<0.7	0.7-3.0	>3.0
STD	mg L ⁻¹	<450	450-2000	>2000
Infiltración				
(reduce infiltración: evaluar usando a la vez la CEa y el RAS) ³				
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
Toxicidad de iones específicos				
(afecta cultivos sensibles)				
Sodio (Na)⁴				
Riego por superficie	RAS	<3	3-9	>9
Riego por aspersion	mmol _c L ⁻¹	<3	>3	
Cloro (Cl)⁴				
Riego por superficie	mmol _c L ⁻¹	<4	4.0-10	>10
Riego por aspersion	mmol _c L ⁻¹	<3	>3	
Boro (B) ⁵	mg L ⁻¹	<0.7	0.7-3.0	>3.0
Varios (afecta cultivos sensibles)				
Nitrógeno (NO ₃ -N) ⁶	mg L ⁻¹	<5	5.0-3.0	>30
Bicarbonato (HCO ₃)				
(aspersion foliar únicamente)	mmol _c L ⁻¹	<1.5	1.5-8.5	>8.5
pH			Amplitud normal	6.5-8.4

¹Fuente: University of California, Committee of consultants 1974.

²CEa es la conductividad eléctrica del agua, expresada en dS m⁻¹ a 25 °C, o en mmhos cm⁻¹ a 25 °C, ambas son equivalentes. STD es el total de sólidos en solución, expresado en mg L⁻¹.

³RAS, relación de adsorción de sodio.

⁴La mayoría de los cultivos arbóreos y plantas leñosas son sensibles al cloro y al sodio, en el caso del riego por superficie úsese los valores indicados.

⁵Tolerancia del boro, úsese los valores indicados

⁶NO₃-N, es el nitrógeno en forma de nitrato, expresado en términos de nitrógeno elemental (en el caso de aguas residuales incluir NO₂-N y el nitrógeno orgánico).

3.6 Salinidad

Las sales se encuentran en cantidades relativamente pequeñas pero significativas, y tienen su origen en la disolución lenta de la caliza, del yeso y de otros minerales. Todas las aguas territoriales las contienen, razón por lo que Richards *et al.* (1959) la considera como la fuente directa de la salinidad, cuando son utilizadas para riego y de forma natural cuando inundan las tierras bajas.

Los problemas por salinidad aparecen cuando se concentran sales solubles procedentes del regadío en suelos productivos (Leidi y Pardo, 2002), ya sea por la utilización de aguas salinas, sodicas o residuales (Ben-Hu *et al.*, 2001; Heidarpour *et al.*, 2007).

La utilización de aguas de calidad inadecuada para la agricultura, surge como consecuencia del uso intensivo de las aguas de buena calidad existentes y de la competencia con otros sectores, sobre todo en zonas áridas y semiáridas (Rengel, 1992; Shani y Dudley, 2001; Feng *et al.*, 2003; Agassi *et al.*, 2003).

Las sales se acumulan en la zona radicular a una concentración tal que ocasiona pérdidas en la producción. A medida que el contenido total de sales aumenta, los problemas del suelo y cultivos se agravan, lo que requiere el uso de prácticas especiales de manejo, para mantener rendimientos aceptables (Ayers y Westcot, 1987). La acumulación de sales en los suelos, se debe a la extracción continua de la humedad por las raíces y por la evaporación (Richards *et al.*, 1959; Fereres y Soriano, 2007).

La salinidad es un estrés abiótico complejo que simultáneamente presenta componentes osmóticos e iónicos (Zeng y Shannon, 2000; Chinnusamy *et al.*, 2005), provoca diversos efectos perjudiciales que afectan tanto al suelo agrícola como a las plantas (Rengel, 1992; González, 2001; Morales *et al.*, 2006).

Uno de los efectos al suelo agrícola es el desplazamiento del Ca^{2+} del complejo arcillo-húmico por el Na^{+} que degrada la estructura del suelo (González, 2001; Bonilla *et al.*, 2004); en las

plantas se destaca la disminución del crecimiento y rendimiento, relacionados con la cantidad de sales solubles y potencial osmótico de la rizosfera (Al-Nabulsi, 2001; Shani y Dudley, 2001; Lau *et al.*, 2003; Polón, 2004; Crescimanno y Garofalo, 2006), mientras que en hojas y frutos se presentan daños por la acumulación de iones tóxicos en las células (Na y Cl) (Morales *et al.*, 2006; Bacarro *et al.*, 2006; Ortega y Orellana, 2007).

Por lo tanto la composición y concentración de sales en la solución del suelo puede afectar el crecimiento de los cultivos debido al efecto osmótico, cambio en las propiedades del suelo y toxicidad.

3.6.1 Presión Osmótica

Altas concentraciones de sales solubles afecta a los cultivos a través del estrés osmótico que limita la habilidad de las plantas para absorber agua (Bacarro *et al.*, 2006; Rengasamy, 2006). En respuesta a esto, las plantas desarrollan mecanismos de ajuste osmótico, de manera que puedan tolerar el déficit hídrico, manteniendo un grado de hidratación de las células que les permite continuar su crecimiento (Morales *et al.*, 2006).

La salinidad se entiende como una concentración de sales solubles que excede la necesaria para el crecimiento óptimo de la planta y tal que puede afectar significativamente las propiedades coligativas de la solución a las que las raíces están expuestas, especialmente por la reducción de su potencial osmótico (Läuchli y Epstein, 1990; Shani y Dudley, 2001).

El potencial osmótico resulta de la presencia de solutos en el agua del suelo que afecta sus propiedades termodinámicas y disminuyen su potencial de energía. Puede limitar la absorción de agua si los solutos se acumulan en los espacios libres en la periferia radical, ya que la energía del agua disminuye y con esta su capacidad de movimiento hacia el interior de la planta (Lira, 2003).

La presión osmótica de una solución es equivalente a la presión real que se desarrolla en un sistema osmótico y es equivalente a el potencial osmótico en concepto, pero de signo opuesto,

el potencial es expresado en términos de energía y la presión osmótica en términos de presión (Flores *et al.*, 2005).

La presión osmótica es la fuerza que debe aplicarse para contrarrestar el movimiento del agua hacia el sitio en donde existe mayor cantidad de solutos (Larqué, 1980). Se conocen como una de las propiedades coligativas de las soluciones, al aumentar la concentración de la solución, la presión osmótica también aumenta, el punto de congelación desciende, la presión de vapor disminuye y el punto de ebullición aumenta (Larqué y Trejo, 1990).

Para calcular la presión osmótica se utiliza la siguiente ecuación, que deriva de la ley de los gases ideales:

$$PV = nRT$$

Donde

P: Es la presión osmótica

V: Volumen ocupado por el gas, 1 L mol^{-1}

n: Es la cantidad de sustancia en moles

R: Constante universal de los gases en el sistema internacional el valor es $8.314511984 \text{ (J/mol k)}$

T: Temperatura absoluta expresada en grados kelvin

Richards *et al.* (1959), propone la siguiente fórmula para la estimación de la presión osmótica, en base a los datos experimentales del laboratorio de Estados Unidos de Norteamérica.

$$PO = 0.36CE$$

PO= Presión osmótica (atm)

CE= Conductividad eléctrica (dS m^{-1})

Para obtener con mayor exactitud la presión osmótica, se puede establecer una igualdad entre la CE y los STD (Total de sólidos solubles) ya que la presión osmótica de una solución es directamente proporcional a la concentración de solutos.

$$PO = 0.36CE$$

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

$$STD = 640CE$$

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

Se tiene entonces:

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

Donde:

PO: Presión osmótica (atm)

CE= Conductividad eléctrica (dS m⁻¹)

STD= Total de sólidos solubles (mg L⁻¹)

3.6.2 Clasificación de las aguas para riego con base al peligro de salinidad

La salinidad es una medida de la cantidad de sales disueltas en el agua de riego. La conductividad eléctrica (CE) es una estimación de la salinidad y solo considera la cantidad de sales solubles, pero no el tipo (Flores *et al.*, 2005; Steppuhn, *et al.*, 2005).

La estimación de sales solubles mediante las determinaciones de CE, se han usado por mucho tiempo por que es un método rápido y preciso. La razón de utilizar la CE se debe a que se incrementa al aumentar la concentración total de sustancias ionizadas disueltas en el agua, ya que la corriente es conducida en la solución mediante el movimiento de los iones y así cuanto

mayor es el número de estos, hay mayor movilidad y en consecuencia aumenta la magnitud de la conductividad, las sustancias inorgánicas como las sales, ácidos y bases, son relativamente buenos conductores en contraste con las moléculas de compuestos orgánicos. La CE se expresa en $\mu\text{S cm}^{-1}$ donde S es Siemens, que reemplaza a la unidad conocida como mhos (Kiely, 1999).

La clasificación de un agua o un suelo como salino es relativa ya que las respuestas de las plantas y de los suelos a la salinidad son altamente variables, debido a factores como la naturaleza mineralógica de la fracción arcillosa del suelo, densidad aparente, conductividad hidráulica, tipo de solutos disueltos y adsorbidos, producción y absorción de CO_2 , capacidad de retención de agua del suelo, absorción de agua por las plantas, sistema de irrigación, entre otras, son responsables de la evolución de la salinidad de los suelos (Vázquez *et al.*, 2006).

Richards *et al.* (1959) propuso cuatro clases de aguas de acuerdo a su conductividad eléctrica, siendo los rangos de división entre clases los siguientes valores 250, 750 y 2250 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Aguas de Baja Salinidad (C1). $< 250 \mu\text{S cm}^{-1}$. Puede usarse para riego en la mayoría de los cultivos y en casi cualquier tipo de suelo, con muy poca probabilidad de que se desarrolle la salinidad. Se necesita algún lavado, que se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.

Aguas de Salinidad Media (C2). $250 - 750 \mu\text{S cm}^{-1}$. Puede usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, pueden crecer cultivos moderadamente tolerantes a las sales.

Aguas Altamente Salinas (C3). $750 - 2250 \mu\text{S cm}^{-1}$. No pueden usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aún con drenaje adecuado, se puede necesitar prácticas especiales de control de la salinidad. Por lo tanto, se deben seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a las sales.

Aguas Muy Altamente Salinas (C4). $>2250 \mu\text{S cm}^{-1}$. No son apropiadas para riego bajo condiciones ordinarias, pero pueden usarse ocasionalmente en circunstancia muy especiales.

Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debe aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado y en la mayoría de los casos, se deben seleccionar cultivos altamente tolerantes a sales.

Casi todas las aguas para riego que se han usado por muchos tiempo tienen una conductividad eléctrica menor a $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$, ocasionalmente se usan aguas de mayor conductividad, pero las cosechas obtenidas no han sido satisfactorias, excepto en raras ocasiones (Richards *et al.*, 1959).

3.6.3 Clasificación de las aguas para riego con base a la Salinidad Efectiva

Este índice fue propuesto por Doneen en 1959 para sustraer de la salinidad total, los carbonatos y sulfatos de calcio, que precipitan fácilmente cuando el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo, dejando de participar en la elevación de la presión osmótica (Coras, 1996).

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 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$. Siempre se resta de la suma de cationes el componente o componentes de sales que pueden precipitar y se encuentran en menor cantidad. El Cuadro 5 indica la clasificación por salinidad efectiva, citada en Coras (1996).

Cuadro 5. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo a la salinidad efectiva (Coras, 1996).

Clasificación	Salinidad efectiva en mmol _e L ⁻¹
Buena	< 3.00
Condicionada	3.00 - 15.00
No recomendada	> 15.00

3.6.4. Clasificación de las aguas para riego con base a la salinidad Potencial

En 1963, Doneen introdujo este índice a la literatura sobre calidad de aguas. Ésta determina la cantidad de Cl⁻ y SO₄²⁻ que pueden afectar los cultivos según la permeabilidad del suelo (Coras, 1996). Estas sales son las últimas que permanecen en la solución del suelo cuando la humedad aprovechable disminuye a menos del 50%, es por eso que se debe estimar el efecto que causan sobre la presión osmótica.

La ecuación es la siguiente:

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

Todas las concentraciones se expresan en mmol_e L⁻¹. En el Cuadro 6 se indica la clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad potencial.

Cuadro 6. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo a la salinidad potencial (Coras, 1996).

Clasificación	Salinidad potencial en mmol _e L ⁻¹
Buena	< 3.00
Condicionada	3.00 -15.00
No recomendada	> 15.00

3.7 Sodicidad

El aumento de la proporción de sodio retenido en el complejo de intercambio del suelo se le conoce como sodificación y es resultado de la utilización de aguas de mala calidad (residuales, salinas, sódicas) (Crescimanno y Garofalo, 2006; Heidarpour *et al.*, 2007).

Los efectos perjudiciales causados por la presencia de sodio en suelos fueron primeramente detectados en regiones áridas y semiáridas, donde eran usadas aguas salinas y sódicas para riego (Chirinos y Mattiazzo, 2004).

En trabajos de investigación se encontró que la relación de adsorción de sodio (RAS) de las aguas de riego está altamente correlacionado con el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en los sitios de intercambio, cuando el suelo está en equilibrio con el agua de riego (Parker y Suarez, 1990). Por lo que, el RAS se puede utilizar como un valor aproximado de la sodicidad después del riego (Hussein y Rabenhorst, 2001).

El RAS se deriva de la ecuación de intercambio de Gapon, la cual se ha utilizado largamente para predecir el porcentaje de sodio intercambiable (Balks *et al.*, 1998; Hussein y Rabenhorst, 2001).

Richards *et al.* (1959) mencionan que Gapon (1933), Mattson y Wilander (1940), Davis (1945) y Schofield (1947) sugirieron que si se toma en cuenta la influencia de la concentración catiónica total, se obtiene una relación lineal con la relación entre cationes intercambiable monovalente y cationes divalentes, cuando la concentración molar del catión soluble monovalente se divide por la raíz cuadrada de la concentración molar del catión divalente. En una forma simple la relación se expresa:

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

Donde Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} son las concentraciones en la solución del suelo, en $mmol_c L^{-1}$.

Una menor proporción de calcio disuelto en la solución del suelo permitiría una mayor adsorción de Na^+ en el complejo arcillo-húmico frente al agregado de aguas de riego con altos niveles de RAS, lo cual provocaría el aumento del espesor de la doble capa difusa, con el consecuente efecto de peptización y aumento de pH del suelo (Ruda *et al.*, 2005).

Varios factores del suelo influyen en el enriquecimiento de sodio por el agua de riego y son; a) textura y mineralogía del suelo, b) densidad, c) pH, d) agentes de unión (materia orgánica, óxidos de hierro y aluminio) y estrés mecánico (Balks *et al.*, 1998; Oster y Shainberg, 2001; Pereira *et al.*, 2009).

3.7.1 Clasificación de las aguas en base al RAS

La clasificación se basa primordialmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre la condición física del suelo (Richards *et al.*, 1959). Los límites de los rangos entre clases se consideran los valores más altos de acuerdo a la Figura 3, solo como referencia ya que no son líneas rectas.

- **Agua baja en sodio (S1):** RAS < 10. Puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles como algunos frutales, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

- **Agua media en sodio (S2):** RAS 10.0–18.0. En suelos de textura fina el sodio representa un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

- **Agua alta en sodio (S3):** RAS 18.0–26.0. Puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayor parte de los suelos, por lo que estos necesitan prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable cuando se riegan con este

tipo de aguas. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para substituir el sodio intercambiable; sin embargo, tales mejoradores no serán costeables si se usan aguas de muy alta salinidad.

- **Agua muy alta en sodio (S4):** RAS >26. Es inadecuado para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y/o la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de estas clases de agua.

La clasificación considera el efecto del RAS y la CE en la cual se utiliza el diagrama de la Figura 3, citada en Richards *et al.* (1959).

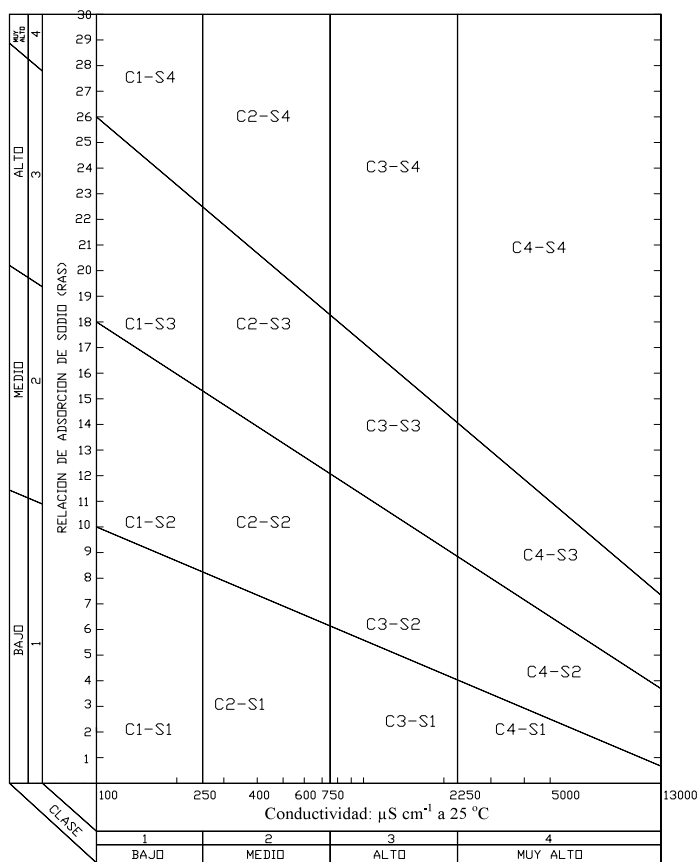


Figura 3. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego citado en (Richards *et al.*, 1959).

3.7.2 Calculo del RAS ajustado (RAS_{aj})

La existencia de un equilibrio entre el agua de riego y la solución del suelo es válida en la mayoría de las situaciones, pero en ciertas condiciones pueden producirse cambios, entre ellos tenemos, que el Na⁺ permanece soluble y en equilibrio con el Na⁺ intercambiable en todo momento, al ser un ión de alta solubilidad. Además, el Ca²⁺ está en permanente cambio hasta que alcanza un cierto equilibrio, produciendo un aumento de su contenido por disolución de los minerales del suelo o una disminución por precipitación en forma de carbonato de calcio o yeso, sobre todo, cuando las aguas de riego contienen concentraciones apreciables de bicarbonatos (Gardner, 2004).

Este proceso de precipitación, en principio, causa una disminución de las sales solubles en las soluciones salinas, al mismo instante se aumenta la proporción del Na⁺ en las soluciones de los suelos y por consiguiente en el complejo de intercambio catiónico (Manahan, 2007).

Ayers y Wescot (1987) introdujeron el concepto de la RAS ajustado (RAS_{aj}), la ecuación esta en función de la disponibilidad del calcio en condiciones de una alcalinidad determinada, cuando se tiene un pH de 8.4 en un suelo no sódico en equilibrio con el carbonato de calcio y se expresa:

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

Para estimar la precipitación del carbonato de calcio (CaCO₃) cuando alcanza su límite de saturación en presencia de iones bicarbonato, se utiliza el índice de saturación propuesto por Langelier en 1936 y es el siguiente:

$$IS = pHa - pHc$$

$$IS = 8.4 - pHc$$

El valor de pHc se calcula:

$$pHc = (pK_2 - pK_c) + p(Ca) + p(Alk)$$

Donde:

pK_2 es el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del ácido carbónico (H_2CO_3) y pK_c es el producto de la solubilidad del $CaCO_3$, corregidos por la fuerza iónica.

pCa , es el logaritmo negativo de la concentración molar de Calcio.

$p(Alk)$, corresponde al logaritmo negativo de la concentración equivalente de CO_3^{2-} y HCO_3^-

Los valores que se puede adquirir de pH_c de cualquier conjunto de aguas de riego serán los estimadores de la tendencia de la precipitación del $CaCO_3$, y se utiliza el Cuadro 7. Si el índice de saturación da positivo, indica que va haber precipitación del carbonato de calcio, pero si da negativo este permanecerá en solución (Ayers y Westcot, 1987).

Cuadro 7. Procedimiento para calcular pH_c teórico de las aguas, (Ayers y Wescot, 1987).

$pH_c = (pK_2 - pK_{ps}) + pCa^{2+} + p(Alk)^b$			
Concentración meq L ⁻¹	$pK_2 - pK_{ps}$	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

a) Fuente: Nacayama (1982) citado por Ayers y Wescot, (1987)

b) Se entra en la primera columna con las concentraciones de: i) $Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+$; ii) Ca^{2+} y iii) $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ en mmol_c L⁻¹. Se obtiene $(pK_2 - pK_{ps})$, pCa y $p(Alk)$, respectivamente.

3.7.3 Calculo del RAS corregido (RAS°)

Suárez (1981), reconoce que el procedimiento de ajuste del RAS propuesto sobreestima el peligro de sodificación. A partir de esto, se corrige la concentración de calcio del agua de riego en función del valor del equilibrio esperado, por el efecto del dióxido de carbono y de los bicarbonatos (Velázquez *et al.*, 2002).

El procedimiento asume la existencia de una fuente de calcio, es decir los carbonatos presentes en el suelo u otros minerales, y la no precipitación del magnesio. El RAS° surge de la aplicación de la siguiente expresión:

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

Donde:

Na^{+} es la concentración de sodio en $mmol_c L^{-1}$ en el agua de riego,

Ca° es la concentración corregida de Ca en $mmol_c L^{-1}$

Mg^{2+} es la concentración de Mg en el agua de riego expresada en $mmol_c L^{-1}$.

Ca° representa la concentración de Ca^{2+} en el agua de riego modificada por la salinidad del agua (CE), y por la relación HCO_3^{-} / Ca^{2+} (ambos en $mmol_c L^{-1}$) y por la presión parcial estimada de CO_2 ejercida en los primeros milímetros de suelo ($P= 0.0007$ atm). Este valor de Ca° representa los $mmol_c L^{-1}$ de calcio que se esperan permanezcan en solución en el suelo en las condiciones de equilibrio.

La concentración de Ca° se obtiene a partir del Cuadro 8 publicado por Ayers y Wescot en 1987. Se entra en la cuadro una vez determinada la relación HCO_3^{-} / Ca^{2+} y la CE en $dS m^{-1}$ del análisis de agua.

Cuadro 8. Concentración de calcio (Ca^0) en el agua del suelo, contenida cerca de la superficie del suelo, que resulta de regar con aguas de determinado valor $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ y CE en dS m^{-1} .

		SALINIDAD DEL AGUA APLICADA CEa dS m^{-1}											
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3	4	6	8
Valores de $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$	0.05	13.20	13.61	13.92	14.40	14.79	15.26	15.91	16.43	17.28	17.97	19.07	19.94
	0.10	8.30	8.57	8.77	9.07	9.31	9.62	10.02	10.35	10.89	11.32	12.01	12.56
	0.15	6.34	6.54	6.69	6.92	7.11	7.34	7.65	7.90	8.31	8.64	9.17	9.58
	0.20	5.24	5.40	5.52	5.71	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

Fuente: Suárez (1981), citado por Ayers y Wescot, 1987.
 $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ expresados en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ y CEa en dS m^{-1} .

3.8 Efecto de la concentración de iones CO_3^{2-} y HCO_3^-

Eaton (1950), reportó resultados de deterioros de las propiedades del suelo por incrementos importantes de los valores del por PSI asociados a riegos prolongados con aguas que contenían excesos de bicarbonatos en relación al calcio y magnesio, dando lugar a la precipitación de los cationes divalentes.

En aguas ricas en iones bicarbonato hay la tendencia del calcio y del magnesio a precipitarse en forma de carbonatos a medida que la solución del suelo se vuelve mas concentrada (Gardner, 2004). La reacción no se completa totalmente en circunstancias ordinarias, pero a medida que va teniendo lugar, las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo, aumentando así la proporción relativa de sodio (Richards *et al.*, 1954), que produce dispersión del suelo, si la concentración de electrolitos está por debajo de la concentración crítica de floculación de las arcillas (Bacarro *et al.*, 2006).

Eaton propuso usar tres términos:

$$\text{Por ciento de Na}^+ \text{ encontrado} = \left(\frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+} \right) \times 100$$

$$\text{Por ciento de Na}^+ \text{ posible} = \left[\frac{\text{Na}^+}{\left[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ \right] - \left(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- \right)} \right] \times 100$$

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

Los constituyentes iónicos están expresados en $\text{mmol}_e \text{ L}^{-1}$. El cálculo de estos supone que los iones CO_3^{2-} y HCO_3^- son cuantitativamente precipitados en el suelo hasta el límite de las concentraciones presentes de calcio y magnesio en las aguas de riego.

Generalmente la salinización conduce a un incremento del PSI, debido a que las sales de sodio, que son las más solubles en la naturaleza, pueden mantenerse en solución aún en concentraciones muy elevadas.

El incremento en la concentración de carbonato de sodio provoca dispersión de las partículas y facilita la destrucción de los agregados del suelo con disminución de la porosidad y de la infiltración. Para evaluar la existencia de condiciones para la precipitación de las sales de calcio, Wilcox *et al.* (1954), propusieron la clasificación de acuerdo al carbonato de sodio residual (CSR), dando lugar a tres clases que se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Clasificación de la calidad de agua de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual (Richards *et al.*, 1959).

Clase	Valor del CSR en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$
Buena	< 1.25
Marginal	1.22 - 2.50
No recomendable	> 25.00

Por lo general, las aguas para riego ricas en iones bicarbonato son las que provienen de acuíferos de basaltos, de zonas urbano-industriales y aguas subterráneas en las que se tiene procesos reductores de mucha intensidad (Cintora y Ortega, 2005).

3. 9 Problemas de infiltración

La infiltración se refiere a la facilidad con que el agua atraviesa la superficie del suelo y se mide en términos de velocidad. Los problemas de infiltración ocasionados por la mala calidad del agua ocurren por lo general en los primeros centímetros del suelo, aunque ocasionalmente puede ocurrir a mayores profundidades, el efecto final es la reducción del suministro de agua a los cultivos, por que se reduce la cantidad de agua que penetra a la rizosfera (Ayers y Westcot, 1987).

Además de la calidad del agua, la infiltración está determinada por las características físicas y químicas del suelo, las cuales dependen de la composición de los cationes intercambiables, de la concentración electrolítica y del tipo de sales presentes, lo cual afecta la distribución de iones

próximos a la superficie y, por ende, el acomodamiento de las partículas (Martínez *et al.*, 2001; Levy *et al.*, 2005).

Las arcillas y la materia orgánica del suelo normalmente neutralizan sus cargas negativas debido a la existencia de los cationes de la solución del suelo, que quedan adsorbidos a ellas. Este mecanismo facilita la agregación de las partículas, fenómeno clave para la estructuración de un suelo. Dependiendo de la carga del catión y de su radio iónico, se formarán agregados de mayor o menor tamaño y estabilidad (Muneer y Oades, 1989; Ruiz y Wu, 2006; Cerena, 2006)

La combinación de altos contenidos de sodio intercambiable (PSI) y baja salinidad provocan la disminución de la permeabilidad de los suelos (Oster y Shainberg, 2001; Chirinos y Mattiazzo, 2004; Ruiz y Wu, 2006; Heidarpour *et al.*, 2007). La mayor parte de esta problemática tiene su origen en los procesos expansivos y dispersivos sobre las arcillas, y la consecuente destrucción de los agregados causados por altas concentraciones de Na^+ (Mace y Amrhein, 2001; Ben-Hu *et al.*, 2001; Pérez, 2002; Dontsova *et al.*, 2004).

Después de que el agua es aplicada en el suelo, el PSI de la superficie del suelo se equilibra con el RAS del agua de riego, cuando el agua del suelo se concentra por la evaporación o evapotranspiración, la CE, el RAS y el PSI del suelo aumentan, pero cuando se riega con aguas no salinas la CE de la solución del suelo disminuye rápidamente, mientras que el PSI no, porque en general hay de 50 a 500 veces más el número de iones intercambiables en el suelo, que en la solución, por lo tanto, la cantidad iones de calcio y magnesio disponibles en la solución de suelo son menos que el número de iones de sodio intercambiable que deben reemplazar. Entonces si la CE baja demasiado para contrarrestar los efectos de sodio intercambiable, ocurre la expansión y/o dispersión de arcilla (Oster, 1994).

La expansión o hinchamiento de arcilla ocurre porque éstas absorben agua para bajar la concentración del catión intercambiable cerca de la superficie de la carga negativa de la arcilla. Los iones de calcio son más adsorbidos a las superficies de las arcillas que el sodio, por consiguiente, el calcio hincham menos a las arcillas que el sodio. La salinidad del agua afecta el proceso, tanto a las arcillas de calcio como de sodio, incrementándolo cuando la salinidad

disminuye. La expansión ocurre dentro de un volumen de suelo fijo reduciendo el radio de los poros y la dispersión obstruye los poros del suelo por el movimiento de las partículas, resultando en la reducción de la infiltración, conductividad hidráulica y en la formación de cortezas densas y firmes en la superficie del suelo, cuando se seca (Balks *et al.*, 1998; Oster, 1994).

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

En general, la infiltración aumenta con la salinidad y disminuye con una reducción en salinidad, o un aumento en el contenido de sodio, el efecto en la velocidad de infiltración se puede observar en la Figura 4.

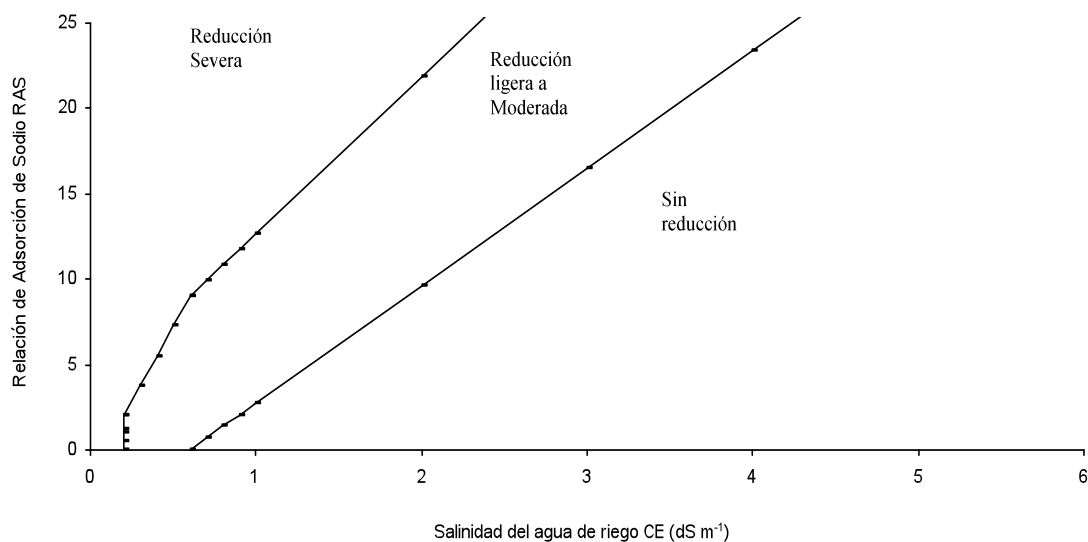


Figura 4. Reducción relativa de la infiltración, provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio RAS. [Fuente: Rhoades (1977) y Oster y Schroer (1979), citado por Ayers y Westcot (1987)].

Valores relativamente bajos de sodio intercambiable pueden inducir una dispersión de arcillas, con un encostramiento superficial principalmente cuando ingresa al suelo agua de muy bajo contenido salino (Balks *et al.*, 1998; Mace y Amrhein, 2001; Chirinos y Mattiazzo, 2004).

Aguas con CE inferior a 0.5 dS m^{-1} , particularmente por debajo de 0.2 dS m^{-1} , favorecen la lixiviación de sales, minerales e incluyendo al calcio, con efecto sobre la estructura del suelo, lo que reduce notablemente la infiltración

El RAS corregido puede utilizarse para prever mejor los problemas de infiltración causados por concentraciones relativamente altas de sodio, o bajas de calcio, en las aguas de riego (Ayers y Westcot, 1987).

3.10 Toxicidad de iones específicos

La toxicidad es un problema que ocurre internamente en la planta y no es provocada por la falta de agua. Normalmente resulta cuando ciertos cationes, absorbidos por la planta con el agua del suelo, se acumulan en las hojas durante la transpiración en cantidades suficientemente como para provocar daños. Los iones tóxicos contenidos en las aguas de riego son el cloro, sodio y boro y los daños pueden ser provocados individualmente o en combinación (Ayers y Westcot, 1987).

Los problemas de toxicidad frecuentemente acompañan a los de salinidad o de infiltración y pueden aparecer incluso cuando la salinidad sea baja. El daño dependerá del tiempo, concentración y sensibilidad del cultivo.

La salinidad también desencadena desequilibrios iónicos en las plantas por la excesiva absorción de sodio y cloruros, los que generan efectos secundarios como problemas de toxicidad y nutricionales vinculados a la absorción de iones esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas entre ellos zinc, fierro, fósforo, calcio, potasio, magnesio, manganeso y cobre (Chinnusamy *et al.*, 2005).

3. 10.1 Cloro

La toxicidad más común a partir del agua de riego es la producida por el cloro, que no es adsorbido por el complejo de cambio del suelo y se mueve fácilmente en la solución del suelo de donde es absorbido por la planta y circula en ella hasta acumularse en las hojas. Si la

concentración sobrepasa la tolerancia del cultivo, aparecen claros síntomas de toxicidad que incluyen hojas quemadas, necrosis de tejidos y muerte de brote (Maas, 1986; Borquez, 1986; Shani y Dudley, 2001).

En los cultivos sensibles, los síntomas ocurren cuando la concentración de cloro alcanza los 0.3 a 1.0 % del peso seco de las hojas. La sensibilidad de estos cultivos varía, en algunos árboles frutales muestran síntomas importantes en el límite inferior del rango (Ayers y Westcot, 1987). Para clasificar el agua por el contenido de cloruro, se utiliza el Cuadro 10.

El exceso de cloro puede presentarse cuando se aplica el riego con agua residual, debido a que dicha agua normalmente recibe cloraciones antes de su uso (Seoáñez, 2005). También puede ser absorbido directamente por el follaje, cuando se riega por aspersión, en períodos de alta temperatura y baja humedad relativa.

Cuadro 10. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo a su contenido de cloruros (Coras, 1996).

Clasificación	Contenido de Cloruros en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$
Buena	< 1.00
Condicionada	1.00 - 5.00
No recomendada	> 5.00

3.10.2 Sodio

El sodio, además de su efecto indirecto por alteración de la estructura del suelo, provoca en las plantas daños similares a los originados por los cloruros y le agrega desequilibrios nutricionales que afectan la asimilación del calcio, magnesio y potasio (Cabalceta y Cordero, 1991; González, 2001; Maathuis, 2006).

Su toxicidad no es fácilmente diagnosticada como el cloro, pero se han reportado casos usando aguas con alta concentración de sodio. Los síntomas típicos de toxicidad del sodio aparecen en forma de quemaduras o necrosis a lo largo de los borde de las hojas. Entre los cultivos sensibles

se encuentran los frutales de hojas caducas, el nivel tóxico se encuentra en concentraciones superiores a 0.25 a 0.50% de sodio en base seca (Ayers y Westcot, 1987).

Los síntomas de toxicidad comienzan en las hojas maduras, progresando hacia el centro y finalmente en las hojas jóvenes. No obstante, las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños a consecuencia de la acumulación del sodio en sus tejidos cuando los valores del sodio intercambiable son más bajos que los necesarios para deteriorar la condición física del suelo (Ayers y Westcot, 1987; González, 2001; Bonilla *et al.*, 2004).

Altas concentraciones de Na^+ en la solución externa causan una disminución en las concentraciones de K^+ y Ca^{2+} en los tejidos de las plantas, estas reducciones se pueden deber al antagonismo del Na^+ y el K^+ , y el Na^+ y el Ca^{2+} , y es asociado a la competencia por un mismo sitio de acumulación en las células vegetales, por lo que es obvio pensar que es la causa de la disminución del crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Rangel, 1992, González, 2001; Chinnusamy *et al.*, 2005), pero también por la inhibición del crecimiento de la raíz a causa del efecto osmótico del Na^+ y la competencia por los sitios de absorción en ella (Bonilla *et al.*, 2004; González, 2001; Rodríguez, 2006; Martínez *et al.*, 2008).

3.10.3 Boro

A pesar de que hace nueve décadas desde que se demostró la esencialidad del boro (B) para el normal crecimiento de las plantas, a la fecha su rol bioquímico no está bien definido. El B es un importante micronutriente con un difícil manejo debido a que su movilidad en el floema varía marcadamente entre las especies vegetales (Malavé y Carrero 2007), con síntomas de deficiencia y toxicidad en un rango bastante estrecho (Goldberg *et al.*, 2000).

El boro es tomado por la raíz de forma pasiva a través de la transpiración y es almacenado en forma de Borato. El boro forma parte de la pared celular y complejos estables en la membrana plasmática, estimula la germinación del polen y la elongación del tubo polínico (Brown *et al.*, 2002), por lo tanto es comúnmente aceptado que los órganos florales y frutales resienten su deficiencia. Los síntomas de toxicidad y deficiencia se manifiesta en hojas y ápices de

crecimiento (Castellanos *et al.*, 2000), y aparecen primero en las hojas más viejas, con un amarillamiento, un progresivo marchitamiento y una necrosis desde el borde hacia el centro de la hoja. En la mayoría de los cultivos los síntomas de toxicidad se presentan cuando la concentración de boro supera de 250 a 300 mg kg⁻¹ (peso seco) (Ayers y Westcot, 1987).

Tanto en condiciones de deficiencia como toxicidad del B, limita el crecimiento de la planta, resultando en la reducción de las cosechas y pérdidas económicas (Goldberg *et al.*, 2000; Goldberg *et al.*, 2005). Aunque todo depende de la tolerancia de cada cultivo. La clasificación del contenido de boro en aguas de riego se encuentra en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo a su contenido de boro (Coras, 1996).

Clase	Contenido de Boro en ppm
Buena	< 0.30
Condicionada	0.30- 4.00
No recomendable	> 4.00

3.10.4 Fósforo

El fósforo (P) se encuentra en concentraciones pequeñas por su tendencia a formar iones complejos, compuestos de baja solubilidad con un extenso número de metales y por ser adsorbido por sedimentos hidrolizados, especialmente minerales de la arcilla.

El fósforo soluble se presenta en forma de ion ortofosfato: H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻ y PO₄³⁻, la presencia de cada uno en la solución acuosa está en función del pH. El fósforo disuelto es fácilmente adsorbido en el suelo y tiene una movilidad muy baja en el agua subterránea (Fetter, 1999).

El fósforo es un elemento esencial para las plantas, en general requieren de 0.2–0.3 mg L⁻¹ para que crezcan en optimas condiciones (Daniel *et al.*, 1998). Las necesidades son variables en el crecimiento, es requerido para formar la masa foliar y para el crecimiento del fruto. En el caso

de los frutales no existe un período marcado de mayor demanda, sino que es proporcional al desarrollo de los diferentes órganos (Fujita *et al.*, 2003).

Para Ayers y Westcot (1987), las concentraciones de fósforo en aguas para riego deben estar entre 0 y 2 mg L⁻¹, para que no provoquen toxicidad a los cultivos.

Teniendo en cuenta la importancia del fósforo como nutriente y su participación en el proceso de eutrofización en las aguas, su determinación es necesaria ya que condicionan su uso, pues a mayor contenido de fósforo mayor crecimiento de algas (Romero, 1999). Para Sharpley y Withers (1994), una concentración de fósforo disuelto mayor a 0.1 mg L⁻¹, puede causar una eutrofización acelerada.

La eutrofización es un proceso natural que ocurre prácticamente en todos los sistemas acuáticos, es derivado del aumento de nutrientes, lo que provoca un aumento en la producción de primaria, que eventualmente puede deteriorar el sistema (Figueruelo y Dávila, 2004). En condiciones naturales los aportes de nitrógeno y fósforo son limitados, pero las actividades antropogénicas aceleran este proceso (Romero, 1999; Neal *et al.*, 2006).

Cuando ingresa el fósforo a suelos con pH entre 3 y 4, se precipita en forma de fosfatos hidroxilados insolubles de hierro y aluminio, cuando aumenta este, la precipitación se debilita y se anula prácticamente al alcanzar el valor de 5.5, a partir de este se inicia la precipitación como fosfatos cálcicos, a este compuesto se le llama hidroxiapatita (Fetter, 1999; Hassan, 1998). Este precipitado también se forma, cuando un agua residual rica en fosfatos entra en un reservorio que contenga altas concentraciones de calcio (Manahan, 2007).

3.11 Dureza

El término dureza se usa frecuentemente como un parámetro indicador de la calidad de las aguas. La dureza de las aguas está regida por el contenido de sales de calcio y de magnesio combinados principalmente con bicarbonato y carbonato (conocida como dureza temporal) y

con sulfatos, cloruros y otros aniones de ácidos minerales (llamada dureza permanente) (Wetzel, 1981).

En el proceso de carbonatación se da el fenómeno de endurecimiento de las aguas naturales, este termino designa el efecto que ejercen cationes metálicos divalentes capaces de reaccionar con los surfactantes (compuestos en los detergentes), para formar precipitados y con ciertos aniones presentes en el agua para formar incrustaciones (Romero, 1999).

En general el grado de dureza del agua se expresa como mg L^{-1} de carbonato de calcio (CaCO_3) y se pueden clasificar las aguas de acuerdo al Cuadro 12.

Cuadro 12. Clasificación de las aguas por su dureza, con base al CaCO_3 (Keith, 1967).

Clasificación	Concentración mg L^{-1}
Blanda	0.00 - 75.0
Moderadamente dura	75.0 -150.0
Dura	150.0 - 300.0
Muy Dura	> 300.0

Estas sales disueltas en el agua no constituyen un factor de peligro para la salud humana, pero presentan serios inconvenientes en los procesos de lavado doméstico e industrial ya que se combina con el jabón formando sales insolubles que impiden la formación de espuma, aspecto fundamental en los procesos de lavado.

Son perjudiciales en instalaciones que requieren el uso de agua caliente, ya que al calentar o hervir este tipo de agua se deposita lodo e incrustaciones de carbonatos, por lo tanto, el agua destinada al uso en calderas debe ser blanda.

La importancia de la dureza del agua de riego, radica en que se utilizan equipos y sistemas de riego que pueden ser dañados u obstruidos. En el riego por aspersión puede obstruir o dañar los aspersores si contiene una elevada proporción de bicarbonatos de calcio, ya que pueden formar incrustaciones, reduciendo con ello el flujo de agua (Booher, 1974; Riberiro *et al.*, 2005).

El agua que es usada como vehiculo para los herbicidas, puede degradar el ingrediente activo si es dura, ya que los carbonatos, bicarbonatos y cationes metálicos, en especial el calcio se combina con los herbicidas formando sales menos efectivas que la formula original. También pueden formar complejos con las sales del agua dificultando su absorción por las plantas (Ocampo, 2000). Algunos fertilizantes con P pueden precipitarse o perder su efectividad si la concentración de calcio excede de 2 a 3 mmol_c L⁻¹ en el agua de riego (Hassan, 1998).

3.13 Clasificación hidrogeoquímica

La importancia de estos estudios radica en la relación de la composición de química de las aguas y el origen de los yacimientos (Del Arenal, 1985).

El agua subterránea a medida que tiene más tiempo en contacto con los materiales de la corteza terrestre, cambia el contenido de algunos iones, dependiendo de la composición de la roca con que está en contacto y de las características del agua que transita por ellas (Güler y Thyne, 2004; Maderey y Carrillo, 2005). Este fenómeno está influenciado en gran medida por el pH y la relativa concentración de elementos ya en solución; en algunas ocasiones puede haber un intercambio con otros elementos, los factores orgánicos y desde luego la composición química del subsuelo (Lesser, 1987; Cerón *et al.*, 2000).

La interpretación de los datos obtenidos de los análisis químicos requiere inicialmente de un orden, en donde el objetivo es clasificar las aguas de acuerdo a características comunes, en este caso de acuerdo al catión y anión predominante. Existen varios tipos de diagramas para poder identificar las familias, el más usado es el diagrama triangular o de Piper (Pérez *et al.*, 2003).

El diagrama triangular (Figura 5) como su nombre lo indica, consta de dos triángulos equiláteros en su parte inferior y un rombo en su parte superior. Cada uno de los vértices del triangulo representa el 100% de la concentración en mmol_c L⁻¹ de un determinado elemento y el 0% del elemento situado en el vértice siguiente según el sentido de las agujas del reloj. Sólo es posible representar tres aniones y tres cationes, pero es posible representar muchos análisis en el mismo gráfico. En el triángulo de la izquierda del diagrama se grafican los principales

cationes en porcentaje de $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ y en el triángulo de la derecha los aniones (Lesser, 1987; Custodio y Llamas 1990; Martínez *et al.*, 2006).

Los datos se grafican trazando rectas paralelas al elemento opuesto del que se está representando, esto es que si se quiere representar el contenido de calcio, se debe dibujar una recta paralela al sodio mas potasio y a su vez se traza otra recta del magnesio al calcio. Lo mismo se hace con los aniones, la recta del cloro con bicarbonatos y carbonatos y la de sulfatos paralela al cloro. Cuando ya se tiene las intersecciones se trazan líneas paralelas al magnesio y otra al sulfato hasta intersectarse en el rombo de la parte superior del diagrama.

En general, si los análisis químicos de las muestras de agua se agrupan en una sola zona del diagrama, todas pertenecen a una misma familia, si sucede lo contrario, se puede inferir que existe la posibilidad de alguna otra fuente o acuífero. Se denomina familia a las aguas que ha atravesado por las mismas formaciones geológicas (Martínez *et al.*, 2006).

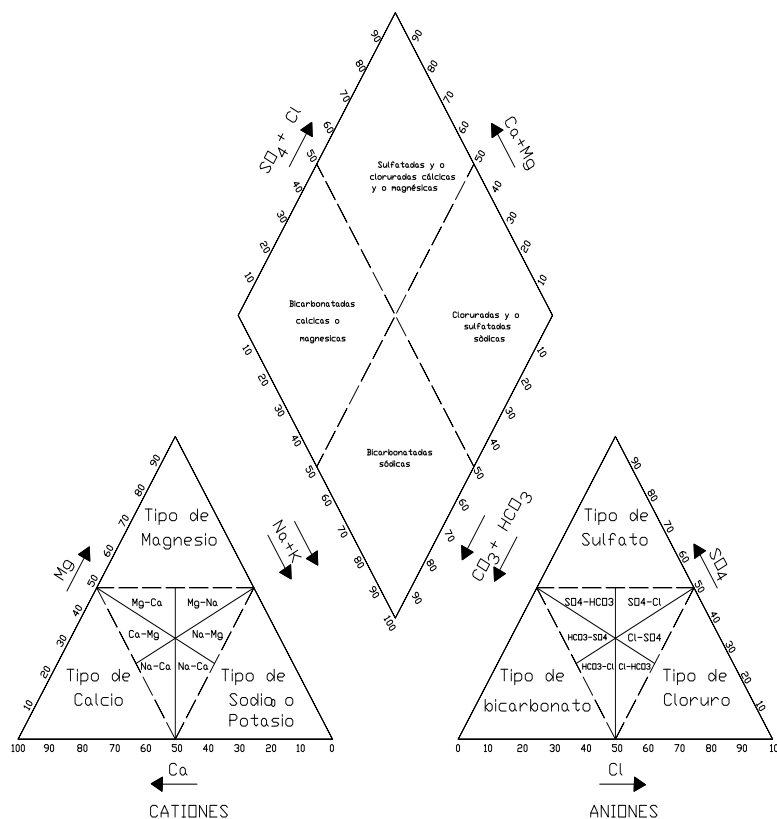


Figura 5. Diagrama triangular para representar resultados de estudios de química del agua (Martínez *et al.*, 2006).

4.- MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Ubicación del área de estudio

La red hidrográfica del estado de Morelos, comprende la cuenca del río Amacuzac con una superficie de 4392 km², queda incluida dentro de la región hidrológica No. 18 del "Río Balsas", en la subregión del Alto Balsas, en los estados de México, Morelos y Guerrero.

La cuenca del río Amacuzac, abarca cerca del 90% del estado de Morelos y tiene subcuencas intermedias de los ríos Yautepec, Chalma, Tembembe, Apatlaco y Cuautla. Forma parte del sistema orográfico de la cordillera Neovolcánica en la vertiente sur que se vincula con la Depresión del Balsas, colinda al norte con el Distrito Federal y el Estado de México; en esta parte se forma el parteaguas creado a partir de la Sierra del Chichinautzin. En el sur el parteaguas lo delimitan los municipios de Jolalpan en el estado de Puebla y Huitzucu, Atenango del Río, Taxco de Alarcón y Teticpac en Guerrero. En la parte Oeste, la cuenca la delimitan el parque Nevado de Toluca, Malinalco, Tenago del Valle, Tianguistenco, Zinacantepec, Texcaltitlán, Almoloya de Alquisiras y Zacualpan, se puede observar en la Figura 6.

4.2 Marco físico

Para realizar este apartado se consultó a: (Aguilar, 2000; CNA, 2000a, CNA, 2000b, CNA, 2000c, CNA, 2000d; García y López, 2005; Ramos *et al.*, 2003).

4.2.1 Aguas superficiales

El río Amacuzac se forma a partir de los ríos Chontalcuatlán y San Jerónimo, los cuales se generan a partir de los escurrimientos del Nevado de Toluca, se introducen por la sierra de Cacahuamilpa y luego de un recorrido subterráneo de 4 km surgen a la superficie al pie de las grutas, recibiendo dicho nombre. Corre en el territorio del estado de Morelos en una dirección general hacia el este-sureste hasta la confluencia del río Cuautla a unos 62 km de las grutas; por

el municipio de Coatlán del Río, se dirige hacia el sureste, posteriormente recibe el caudal del Tembembe y el Chalma, prosiguiendo su sinuoso camino rumbo al sureste, cruzando varias localidades. Por último, llega al paraje llamado balseadero, punto limítrofe de los estados de Morelos, Guerrero y Puebla. En este lugar sigue su recorrido de aproximadamente 104 km y se encamina hacia el suroeste fuera de Morelos hasta confluir con el río Balsas.

El sistema fluvial del río Yautepec, se forma por la confluencia del escurrimiento de varias barrancas, su caudal se incrementa en forma progresiva con los manantiales del Bosque, Oaxtepec, Itzamatitlán y el Recreo, ubicados en el municipio de Yautepec. Se le une el río Tepoztlán (o Apanctezalco), que baja de la sierra del mismo nombre. Continúa su camino pasando por el valle de Ticumán y recibiendo más líquido cerca de Tlaltizapán del manantial de las Estacas y del río Agua Dulce, que es enriquecido por los manantiales de las Fuentes, San Ramón, Limón y Santa Rosa. Prosigue su curso y rodea la ciudad de Jojutla, para desembocar en el río Amacuzac.

El río Cuautla, también conocido como Chinameca, nace en los manantiales de Pazulco en el Municipio de Yecapixtla, cuyos orígenes se localizan en las faldas del Popocatepetl. Posteriormente las aguas de los manantiales de Agua Hedionda, Agua Dulce, Ayala, las Tazas, los Sabios, las Tortugas y de la Cuera, se le unen. Se dirige al sur por los municipios de Ocuítuco, Cuautla, Ayala y Tlaquiltenango, hasta unirse al río Amacuzac.

El río Apatlaco o Jojutla tiene un recorrido aproximado de 63 km desde el poblado de Alta Palmira hasta la desembocadura en el río Yautepec. Inicia su recorrido en las Lagunas de Zempoala, de manera subterránea y superficial atraviesa la zona montañosa y aflora en el Túnel y Chapultepec de Cuernavaca, recibe las aguas de una serie de barrancas situadas al centro y occidente (Pollo, Pilcaya, Amanalco, Limón, Tlazala y Sabinos). Cambia su nombre a Barranca de San Antón, en la colonia del mismo nombre, continua hacia el sur y uniéndose con el afluente de la barranca el Mango, varía su nombre por Barranca del Pollo. Los aportes más importantes que recibe a lo largo de su recorrido, son los del río Tetlama por la margen derecha y el río Palo Escrito por la izquierda. Al sur de Jojutla el río Apatlaco se junta con el Yautepec.

El río Chalma, que nace en el lugar del mismo nombre, en el Estado de México, se une al río Tembembe en la población de Puente de Ixtla lugar en que se interna en la cuenca del Alto Amacuzac, para desembocar en el escurrimiento del mismo nombre, al sureste de la localidad del Coco.

El río Mexicapa desciende de la sierra de Ocuilán del Estado de México, cambia su nombre a Tembembe al penetrar en Morelos, en Buenavista forma un pequeño cañón que se dirige al sureste y pasa al occidente de Cuernavaca. Después de atravesar la sierra de Xochitepec, cambia su rumbo hacia el suroeste rodeando los lagos del Rodeo y Coatetelco, donde recibe el caudal del arroyo la Lima; vuelve a encaminarse hacia el sureste y se une al río Chalma en la población de Puente de Ixtla.

Entre los embalses más importantes está el lago Tequesquitengo que recibe agua de diversos afluentes como la Barranca Honda y la Barranca del Muerto. Pero su principal fuente de abastecimiento son manantiales que se encuentran distribuidos en diferentes puntos dentro del propio lago. El terreno es conocido como "polje", para Fries (1960), es un área con grandes concentraciones de roca caliza y anhidritas que va disolviéndose gradualmente por la acción erosiva del agua.

Las lagunas de Coatetelco y el Rodeo consideradas así por su escasa profundidad, se ubican en la cuenca del río Tembembe.

4.2.2 Aguas subterráneas

Por la altitud y permeabilidad de las rocas, las principales zonas de recarga de acuíferos se localizan en las sierras del Chichinautzin, Zempoala y Nevada (derrames lávicos fracturados, intercalados con depósitos piroclásticos semiconsolidados). La dirección predominante del flujo del agua subterránea es norte-sur y norte-suroeste. Otra zona de recarga, menos importante, se ubica al sur de Morelos, que corresponden a las sierras de San Gabriel, Tilzapotla y Huautla (complejo oligomiocénico volcánico integrado por rocas ígneas extrusivas). Por lo tanto el norte y sur de Morelos son zonas de recarga y el centro de descarga, con la presencia de una

depresión relativa en el suroeste de la entidad, hacia la que fluyen la mayoría de los escurrimientos superficiales y subterráneos.

En Morelos existen cuatro acuíferos, alojados en los valles de Cuernavaca, Cuautla-Yautepec, Zacatepec y Axochiapan-Tepalcingo, este último pertenece a la cuenca del río Nexapa.

El acuífero del valle de Cuernavaca se forma por un acuífero superior y uno profundo. Tiene una extensión de 996 km², de los cuales 595.7 km² se catalogan exclusivamente como zona de recarga y 400.3 km² como zona acuífera. El grupo Chichinautzin y la formación Cuernavaca constituyen el acuífero superior. Las formaciones Cuautla y Morelos forman el acuífero inferior. La formación Tepoztlán constituye una barrera al flujo subterráneo que circula en las rocas del grupo Chichinautzin, propiciando su división, una parte fluye hacia el acuífero Cuautla-Yautepec y otra rumbo al valle de Cuernavaca.

La formación Tlayecac, ubicada en el Popocatepetl, integra la zona de recarga principal de los acuíferos del valle de Cuautla-Yautepec y del valle de Axochiapan-Tepalcingo. La mayor parte de la recarga del acuífero del valle de Cuautla-Yautepec, proviene de las formaciones basálticas que se encuentran en el abanico comprendido entre los poblados de Tlayacapan y Yecapixtla. El flujo se dirige hacia la zona de Cuautla, para drenar hacia el río Cuautla y una pequeña parte descarga al río Yautepec. El acuífero ocupa una extensión de 350 km².

El acuífero del valle de Zacatepec, En función de aspectos geomorfológicos y geohidrológicos tiene una extensión de 2068.7 km², de los cuales, 529.7 km² se catalogan exclusivamente como zona de recarga y 1539 km² como zona acuífera. Este acuífero se forma por, un acuífero superior y un acuífero profundo. El acuífero libre se encuentra alojado en dos diferentes unidades de roca: la primera unidad consiste de rocas ígneas basálticas fracturadas de la formación Chichinautzin que presentan una alta permeabilidad y distribución irregular; la segunda unidad la constituyen rocas de la formación Cuernavaca que presenta una permeabilidad media y una distribución irregular. El acuífero Zacatepec se localiza en la porción Sur de las subcuencas de los ríos Chalma, Tembembe, Apatlaco y Yautepec y su confluencia con el río Amacuzac.

El acuífero del valle de Axochiapan-Tepalcingo, se define una extensión territorial de 1353.7 km², de los cuales, 495.9 km² se catalogan exclusivamente como zona de recarga y 857.8 km² como zona acuífera, desde el punto de vista hidrogeológico presenta dos unidades, la primera constituida por los materiales clásticos de origen volcánico y la segunda integrada por materiales calcáreos de la formación Morelos. La zona de recarga está conformada por las coladas de piroclastos del grupo Chichinautzin. Se ubica en la porción oriente del estado de Morelos, producto del agua de deshielo del volcán Popocatepetl que drenaba a través de la Barranca de Amatzinac, derivado de la descarga natural de los manantiales las Pilas (Jonacatepec) y Termas de Atotonilco (Atotonilco, Tepalcingo) y de la importación de agua del valle de Cuautla a través del canal Tenango al valle de Tepalcingo- Axochiapan.

Morelos es una de las entidades de la República Mexicana con más manantiales, en proporción a su territorio. Esto se debe a que son en parte una manifestación secundaria del vulcanismo y a que la entidad está casi totalmente rodeada por relieves endógenos volcánicos acumulativos, que favorecen la condensación, precipitación e infiltración del agua atmosférica, que procede del Golfo de México transportada por los vientos alisios en verano. Los manantiales tienen un caudal estable debido a que presentan una doble recarga, durante los meses lluviosos de junio a septiembre existe un flujo rápido, los gastos de los manantiales reaccionan en forma directa a las precipitaciones y en los meses secos de octubre a marzo la recarga del flujo lento crece de manera gradual.

4.2.3 Clima

El régimen pluviométrico tropical de Morelos determina la existencia de dos épocas climáticas muy definidas: la de secas y la de lluvias. En toda la entidad, las lluvias caen entre mayo y octubre (empiezan en mayo, pero se establecen ya definitivamente en junio). En el verano, la cantidad de lluvia excede la capacidad de filtración del suelo, presentándose así escurrimiento superficial en todas las cuencas.

De acuerdo con la clasificación de Koppen, modificada por García (1988), el clima de la red hidrográfica de Morelos es en promedio cálido subhúmedo Aw0(w)(i)g, con temperatura media

anual de 26°C y lluvias en verano, se presenta en el área correspondiente al valle intermontano del centro y sur de la entidad, se incluyen localidades como Cuautla, Temixco, Xoxocotla, Zacatepec, Huautla y Axochiapan, entre otras.

En la parte norte y zonas altas de los valles de Cuernavaca y Cuautla, la altitud del terreno determina el clima templado subhúmedo (C(w2)(w)b), con temperatura media anual entre 5 y 12°C y lluvias en verano ocasionadas por el enfriamiento adiabático en las montañas volcánicas norteñas que sufren los vientos alisios húmedos procedentes del Golfo de México.

Los climas semicálidos ((A)C(w0)(w), (A)C(w1)(w) y (A)C(w2)(w)), con temperatura media anual mayor de 18°C, con lluvias en verano, se presenta en menor grado en una franja que va de este a oeste situada en la región norte del estado, en la zona de transición entre la sierra y los valles.

La influencia orográfica juega un papel primordial en la distribución de la precipitación total anual, estableciéndose obviamente una relación directamente proporcional entre la altitud y la cantidad de precipitación recibida, que varía de 1500 mm anuales hasta menores a 1000 mm.

4.2.4 Suelos

El estado de Morelos está caracterizado por la presencia de 12 unidades edáficas principales de la clasificación FAO/UNESCO.

El mayor porcentaje (25%) corresponde a los suelos tipo Feozem distribuidos en la zona centro y sur de la entidad, seguido de los Vertizoles con 21%, en las planicies y valles de la región centro. Los Andosoles ocupan el 12% y se distribuyen en la zona norte ocupando una franja de poniente a Oriente, le siguen los Regosoles con 10%, Litosoles 9%, Castañozems y Redzinas ambos con 8%. En menor proporción se encuentran Chernozems (4%), Cambisoles, Fluvisoles y Acrisoles con 1% y, por último, los Luvisoles con 0.5%.

4.3 Aspectos socio-económicos

Según los datos del Censo del 2000, en la delimitación de la cuenca habitaban una total de 1 999 285 personas. El 45% de la población se asienta en el area correspondiente al acuífero de Cuernavaca, el 28% en el de Cuautla-Yautepec, el 19.3% en Zacatepec y el 7.7% en Tepalcingo-Axochitlan

Las principales actividades económicas son agricultura, ganadería, comercio, servicios y actividades industriales. Se estima que la superficie del estado de Morelos susceptible a los fines agrícolas sea de 186 000 hectáreas. De esta cantidad, el 66% tiene un régimen de temporal y el 34% de riego. Los principales productos agrícolas son: caña de azúcar, arroz, sorgo, maíz jitomate, algodón, cacahuate, cebolla, tomate, berro y frijol, entre otros; entre los frutales destacan: aguacate, mango, limón agrio, papaya y plátano. Como producto de exportación sobresalen las flores y plantas de ornato (orquídeas, nochebuenas, rosas, claveles, geranios, pompón, gerbera y otras especies de gran aceptación).

Los municipios como Emiliano Zapata, Cuautla, Yautepec y Jojutla, también funcionan como importantes centros agrícolas que requieren de jornaleros, debido a la actividad agroindustrial basada en la caña de azúcar.

En el estado la actividad pecuaria tiene poca importancia económica, se practica con carácter extensivo, especialmente la cría de ganado bovino. En el corredor metropolitano Cuernavaca – Cuautla, se genera la mitad del valor de la producción del sector. La actividad piscícola en Morelos se ha venido practicado desde 1980, principalmente en los lagos de Tequesquitengo, Coatetelco y el Rodeo, se reportaron volúmenes de producción de las especies alimenticias del orden de 602 toneladas y 5100 crías de especies ornamentales. La apicultura representa entre el 1 y el 2% de la producción nacional.

En el estado de Morelos se creó la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (CIVAC), donde se establecieron industrias variadas: automotriz, productos químicos, textil, papel y celulosa.

La economía se ha orientado hacia las actividades de comercio y servicios desde hace 20 años, se basan en la rama de restaurantes y hoteles, debido a que posee gran cantidad de atractivos turísticos de la entidad.

4.4 Usos del agua en Morelos

El consumo anual en los diversos usos del agua en estado es del orden de 988 millones de m³ por año, de los cuales 291 millones provienen de aguas subterráneas y 697 millones de recursos superficiales. En general del total del agua subterránea que se extrae a través de pozos y norias, el 82 % se destina al uso agrícola, el 15% al uso público urbano y servicios, el 3% al uso industrial (Aldama y Arreguín, 2003). De la descarga natural de manantiales se utiliza el 94.2% en la agricultura, 5.2% en uso público urbano y el 0.4% para otros usos (Ortega *et al.*, 2003). Ha comenzado a generarse un cambio de uso de suelo producto del crecimiento poblacional, como consecuencia, el volumen de agua que se utilizaba con fines agrícolas ha cambiado debido al uso público urbano.

Muchos problemas se presentan en torno a las presas e infraestructura de riego en Morelos, el mal manejo de los distritos de riego ha propiciado el incremento de algunos problemas críticos como los de la sobreexplotación de los acuíferos, la salinización de los suelos y el anegamiento y la contaminación de los mantos freáticos por el excesivo usos de agroquímicos (Toledo, 2003).

Las descargas de aguas residuales sin tratamiento (domésticas, industriales y de retornos agrícolas) y la falta de estructuras especializadas para el manejo de desechos tóxicos y peligrosos, constituye un problema de vastas repercusiones en la calidad del agua (Toledo, 2003). Así por ejemplo los ríos Amatzinac, Amacuzac y Cuautla en su tramo sur se clasifican como ligeramente contaminados; los ríos Yautepec, Tembembe y Chalma se consideran medianamente contaminados; y el río Apatlaco es toda su extensión se considera fuertemente contaminado, de acuerdo a los criterios del contenido de bacterias coliformes y plomo (García, 1991; Toledo, 2003; Aldama y Arreguín, 2003).

Los contaminantes de las aguas superficiales son básicamente por descargas residuales de tipo urbano e industrial, de los ingenios azucareros y aguas de retorno agrícola, en donde se utilizan 49 plaguicidas diferentes de los cuales 21 se consideran peligrosos para la salud y nueve son de vigilancia estricta (Aldama y Arreguín, 2003). La descarga de agua residual es de 2498 L/s, con el aporte del 83% de origen industrial y el 17% urbano. En el sector industrial los ingenios azucareros aportan 65%, la fabricación de alimentos 17%, la industria textil 2%, la elaboración de bebidas 1% y la industria química 1%. Los principales contribuyentes de dicha contaminación son los municipios de Zacatepec con 49%, Yautepec con 21%, Cuautla con 14% y Cuernavaca con 11% (CNA, 1996).

El río Apatlaco es el más importante de Morelos, ya que en su microcuenca se asienta el 58% de la población del estado y el 68% de las actividades productivas (Aldama y Arreguín, 2003). También es el receptor de las descargas municipales de Zacatepec y aguas tratadas de la Empresa para el Control de la Contaminación del Agua de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (ECCACIV, que recibe y da tratamiento a las aguas residuales de 888 empresas) y la descarga del ingenio Emiliano Zapata (CNA, 1996; Ramírez, 2007). Sus aguas se utilizan principalmente para el riego agrícola de 2985 hectáreas de los poblados de Temixco, Acatlipa, Xochitepec, Atlacholoya, Xoxocotla, Tetlepa, Zacatepec y Jojutla de Juárez, a través de las 10 tomas que se encuentran a lo largo de la corriente, con lo cual se beneficia a 2148 usuarios

A pesar de que en 1991 se prohibió el uso de aguas residuales para riego de hortalizas en la entidad, los productores siguen utilizándola en los cultivos de arroz, caña de azúcar, cebolla, tomate, entre otros. En los municipios de Emiliano Zapata, Jiutepec, Temixco y Xochitepec en la década de los 80 se advirtió la contaminación de estos suelos por el uso de estas aguas (UNICEDES, 1999; Cuenca *et al.*, 2001).

La Asociación de Usuarios del río Cuautla, Manantiales y Corrientes Tributarias General Eufemio Zapata Salazar A. C, mejor conocida como ASURCO, comprende unas 10 000 hectáreas las cuales son irrigadas en su mayoría con aguas de manantiales ubicados en la cuenca del río Cuautla (Ávalos, 2003).

4.5 Geología del área de estudio

El estudio de la estratigrafía pone de manifiesto la disposición y estructura de las 22 formaciones y grupos de rocas que se han localizado en la corteza terrestre de la red hidrográfica del estado de Morelos. Su historia geológica comprende desde el Cretácico inferior hasta el Holoceno. Cada unidad presenta una función diferente en el momento de interrelacionarse con otros factores ambientales para integrar el funcionamiento de un paisaje, así como su naturaleza, forma y estructura.

4.5.1 Estratigrafía

Se consultó a: (Fries, 1956; 1960; Aguilar, 2000; García y López, 2005; Escamilla *et al.*, 2003; Ramos *et al.*, 2003; Morán *et al.*, 2007; Salinas, 2007).

Las estructuras geológicas de la entidad son producto de una sucesión de acontecimientos naturales que modelaron la corteza terrestre, desde el más antiguo hasta el más reciente y son:

1.- Formación Xochicalco. Rocas del período Cretácico Inferior son las más antiguas y afloran en las inmediaciones de la zona arqueológica de Xochicalco, en un área aproximada de 9 km², se formaron por una sucesión de capas de calizas densas de espesor variable, generalmente con superficies de estratificación planas. El color varía desde gris oscuro hasta negro, según el contenido carbonoso. En la parte superior de la formación tiene abundancia de hojas de pedernal intercaladas, hasta el grado de formar casi la mitad de la roca en algunos lugares. Es difícil hacer una estimación del espesor de las capas expuestas, debido a la repetición producida por el plegamiento estrecho (estructura anticlinal), el espesor mínimo excede de 500 m.

2.- Formación Morelos. Es una sucesión de capas calizas y dolomíticas interestratificadas de unos 900 metros, de edad cenomaniano-albiana que aflora en Morelos y en los estados contiguos de México y Guerrero, con cantidades variables de pedernal en forma de nódulos, lentes, granos y fragmentos de fósiles silicificados. El color cambia marcadamente de una a otra capa, variando de gris cremoso hasta negro, las capas dolomitizadas muestran un tinte variando

desde gris parduzco a negro parduzco. Aflora al Sur de Tepoztlan, Yautepec y Tejalpa. La parte más antigua de la formación está constituida por un miembro de anhidrita en la parte oriental de la región, pero en el resto las capas basales consisten en carbonatos de edad un poco más joven.

La formación representa la acumulación de partículas calcáreas por precipitación esencialmente in situ, acompañada y seguida por aglutinación y redistribución de los granos, casi sin adición o mezcla de material terrígeno. La formación Morelos sobreyace discordantemente a la unidad anterior.

El miembro de anhidrita (CaSO_4) se extiende más o menos desde el lago de Tequesquitengo hacia Iguala y al suroeste hasta la latitud del río Balsas. El material superficial contiene una mezcla considerable de yeso, pero la roca relativamente inalterada más densa es anhidrita casi pura, los afloramientos son demasiado pequeños.

3.- Formación Cuautla (Turoniano). La formación consta de tres facies principales, que son: 1) una sucesión gruesa de capas calizas de estratificación mediana a gruesa, del tipo de banco calcáreo o de "buharnita", son de carbonato cálcico casi puro, a excepción de la sílice en forma de pedernal, de manera que las capas sin pedernal visible contienen escaso residuo insoluble; 2) una sucesión más delgada de capas calizas laminadas de estratificación delgada a mediana; y 3) con una sucesión muy delgada de capas calizas clásticas, parecen representar depósitos litorales o costeros, compuestos en parte por granos calizos y dolomíticos clásticos o detríticos, erosionados de algún terreno de carbonatos expuesto a la erosión y con mezcla de fragmentos biogénicos autóctonos.

Nódulos, lentes y masas irregulares de pedernal abundan en muchas capas y sobre los planos de estratificación, así como fósiles silicificados. Las tres facies pasan gradualmente de una a otra en sentido lateral y puede distinguirse de las Formaciones Morelos y Mexcala, infra y suprayacente respectivamente, esto indica que un período de regresión marina y de erosión separó las formaciones. La conclusión queda reforzada por la presencia de las capas basales clásticas en la Formación Cuautla, en las cuales los granos constituyentes fueron derivados de

la formación Morelos, así como la fracción arcillosa que puede representar el residuo insoluble producido por el intemperismo que disolvió la caliza y dolomita.

La escasez relativa de dolomita en esta formación, se expresa fisiográficamente por su mayor resistencia al intemperismo, erosión y por el desarrollo menor de rasgos cársticos.

4.- Formación Mexcala. Se constituye por depósitos marinos del Cretácico Superior, formada por una sucesión de capas interestratificadas de arenisca, limolita y lutita calcáreas con escasas lentes de caliza clástica, que yace sobre la formación Cuautla. Donde se presenta la caliza basal, está formada por capas calcareníticas clásticas visiblemente laminadas, de color gris oscuro y de 10 a 20 cm de espesor, encima se hallan capas interestratificadas de lutita y limolita calcáreas, con menor cantidad de arenisca, los interestratos de arenisca aumentan en número y aparecen también capas de conglomerado de grano fino. Los colores son también variables aunque predominan los oscuros. El color más común en exposiciones frescas es gris olivo oscuro, aunque localmente aparecen capas purpúreas, rojizas, negras y verdosas.

Muestra poca resistencia a la erosión y tiende a formar planicies bajas, con excepción de los sitios donde queda protegida por afloramientos calizos contiguos con mayor altura. Aflora al Oeste de Cocoyoc y al Sur de Jojutla.

5.- Grupo Balsas. Son rocas del periodo Eoceno Superior. Este grupo comprende rocas de una variedad grande de tipos litológicos locales de espesor variable, se incluyen, conglomerados calizos, yesos, calizas lacustres, areniscas, limolitas, brechas y tobas volcánicas con corriente de lava interestratificadas, algunas capas están bien endurecidas mientras que otras casi no muestran endurecimiento alguno. Se presentan en los alrededores del Lago de Tequesquitengo, al este de Jojutla, al oriente de Ticuman y poniente de Cuautla, en el centro austral de la cuenca del río Mexcala-Balsas y al suroeste de México.

La frecuente existencia de yeso en el Grupo Balsas se debe al sulfato cálcico llevado por las aguas que disolvían las capas anhidríticas de la parte inferior de la Formación Morelos, donde este miembro quedaba expuesto por la erosión en el interior de los anticlinales. El yeso más

puro tiene color de miel oscura. La adición de sílice que se presenta parcialmente en forma de ópalo y en parte como calcedonia aclara el color hasta amarillo claro o blanco y la adición de limo y arcilla da tonos verdosos, rojizos o parduzcos.

6.- Riolita Tilzapotla. Del periodo Oligoceno, se integran de afloramientos extensos de brecha tobácea riolítica situados en las cercanías de Tilzapotla al sur del lago de Tequesquitengo y del río Amacuzac, en los alrededores de Cuernavaca y en el sur del estado de Morelos. La brecha tobácea es de color parduzco rojizo oscuro, muy bien cementada y de grano grueso, con fragmentos hasta de 30 cm de diámetro. La estratificación es tan gruesa o masiva que difícilmente se distingue en los afloramientos, además no se identificaron verdaderas corrientes lávicas. El espesor máximo de la unidad es del orden de 250 m.

La Riolita Tilzapotla generalmente descansa en concordancia sobre las capas más jóvenes del Grupo Balsas, sin embargo, el volcanismo riolítico fue contemporáneo con el cese de la sedimentación del Grupo Balsas, y puede encontrarse localmente capas delgadas de este grupo arriba de la Riolita Tilzapotla.

7.- Formación Tepoztlán. Se les denomina así a los afloramientos cercanos al pueblo de este nombre, está compuesta predominantemente por detritos volcánicos andesíticos depositados en capas que varían en espesor quizás de 50 cm hasta más de 10 m. La topografía desarrollada en la formación difiere algo de la que caracteriza la mayoría de las demás rocas volcánicas de la región, ya que los afloramientos exhiben una topografía más accidentada y acantilados.

Los componentes que forman las capas constan de fragmentos tobáceos y detríticos que varían en tamaño desde la arcilla fina hasta bloques de 1 m de diámetro. Algunas capas contienen lentes de arena y grava mucho mejor clasificadas, con estratificación cruzada atestiguando un depósito por corrientes de agua. Gran parte del resto de la formación muestra una estratificación tosca que sugiere el depósito rápido por aguas broncas torrenciales sobre una planicie aluvial poco inclinada, y pueden representar corrientes de lodo o “lahares”. El color de las capas, en promedio es gris y amarillento a parduzco oscuro en afloramientos intemperizados.

La edad de la Formación Tepoztlán no se ha comprobado por medios directos, se piensa que la base de la Formación Tepoztlán puede ser tan antigua como el final del Oligoceno y que su depósito continuó durante la primera parte del Mioceno.

8.- Andesita Buenavista. Se compone de corrientes lávicas, brechas y tobas andesíticas, que forman un gran macizo montañoso situado hacia la porción sur del río Amacuzac y el oriente de la carretera Amacuzac - Buenavista de Cuellar. El tipo litológico que predomina en el Grupo Buenavista es la andesita, aunque las capas individuales varían en su composición desde basalto a dacita y en la parte superior se presentan aún rocas riolíticas. Interstratificadas con las corrientes lávicas se encuentran capas de toba y brecha volcánica, así como estratos tobáceo clásticos depositados por aguas corrientes.

Una estimación aproximada de la altura del macizo montañoso al oriente de Buenavista, sugiere que puede tener alrededor de 1000 m de espesor. Existen evidencias de una discordancia erosional entre las unidades infra y suprayacentes, Riolita Tilzapotla y formación Cuernavaca respectivamente, este intervalo de erosión debió ser largo, ya que fueron removidos grandes volúmenes y espesores del Grupo Buenavista antes de que comenzaran a acumularse los sedimentos Cuernavaca.

Si la edad de la Riolita Tilzapotla es del Oligoceno tardío, entonces el Grupo Buenavista puede corresponder también al Oligoceno tardío en su parte inferior, siendo el resto del Mioceno, pero si la Riolita Tilzapotla se eleva un poco en la escala cronológica, entonces al Grupo Buenavista únicamente puede atribuirse una edad miocénica.

9.- Grupo no identificado. Fries propone el nombre de Grupo no diferenciado para la mayoría de las rocas volcánicas del Terciario medio que no son de composición riolítica y quedan al norte del río Amacuzac y al sur de Cuernavaca, pero también está incluida una pequeña área de afloramientos al oriente de Iguala. Las rocas son en gran parte corrientes lávicas.

La zona más grande de afloramiento queda un poco al norte de Ocuituco y otra al sur de Mazatepec, están compuestas por corrientes lávicas andesíticas y estratos volcánicos clásticos,

interestratificados y una tercera en el extremo septentrional del cerro de Santa María se compone por capas clásticas, las capas basales contienen granos de cuarzo y pueden tener relación más estrecha con la Riolita Tilzapotla.

Todas las rocas volcánicas mencionadas guardan la misma relación que el Grupo Buenavista con la Riolita Tilzapotla, el Grupo Balsas y las rocas cretácicas infrayacentes, así como con la formación Cuernavaca suprayacente. Se considera que tienen los mismos límites temporales que el Grupo Buenavista y pueden correlacionarse con ella, así como con la formación Tepoztlán y la serie volcánica Xochitepec.

10.- Formación Zempoala. Originalmente conocida como Andesita Zempoala, situada en el límite entre los estados de México y Morelos. La formación es un corriente andesítica de grano relativamente grueso y de color gris. Algunos afloramientos muestran una interestratificación de brecha volcánica, corrientes lávicas, capas tobáceas y estratos masivos compuestos por fragmentos volcánicos angulosos, empotrados en una matriz de grano fino, generalmente de color grisáceo, que parecen representar corrientes de lodo volcánicos o lahares; con un espesor mínimo de 800 m.

La unidad descansa en concordancia aparente sobre la formación Tepoztlán, la próxima unidad litológica suprayacente es el Grupo Chichinautzin del Pleistoceno. La edad no fue determinada directamente y sólo puede inferirse al Mioceno tardío, aunque pudiera incluir capas del Plioceno.

11.- Formación Cuernavaca. Son rocas del Plioceno Tardío, tiene una litología compleja, consistente de conglomerados cuyos constituyentes son casi exclusivamente de rocas volcánicas andesíticas, que en conjunto, forman un abanico aluvial de grano medio con fragmentos de material volcánico terciario, sobre el que se ha construido gran parte de la ciudad de Cuernavaca. La unidad aflora principalmente en la cuenca hidrológica del río Amacuzac y de sus afluentes.

La expresión topográfica de la Formación Cuernavaca, es distintiva debido a la fase juvenil que representa en el ciclo de erosión, forma llanuras ligeramente inclinadas, surcadas en grado variable por valles y arroyos encajonados o en forma de V. Al sur de Cuernavaca las capas de la formación se hacen progresivamente más delgadas, rara vez exceden los 2 m de espesor. El espesor total puede alcanzar 200 ó 300 m. La formación Cuernavaca yace en discordancia erosional marcada encima de todas las otras unidades litológicas de la región.

12.- Formación Chichinautzin. Son rocas de los periodos Pleistoceno y Cuaternario que toman el nombre del volcán que les dio origen situado en el límite entre el Estado de Morelos y el Distrito Federal, comprende todas las corrientes lávicas, estratos de toba y brecha y materiales clásticos interestratificados depositados por agua, de composición andesítica y basáltica, que descansan con discordancia encima de la formación Cuernavaca o de unidades más antiguas

Una gran parte del Grupo Chichinautzin consiste en basalto olivínico porfídico con microlitos de labradorita y abundantes granos de augita en una matriz casi holocristalina.

13.- Depósitos clásticos continentales. Sobreyaciendo a todas las rocas anteriores se encuentran los depósitos clásticos continentales del periodo Pleistoceno formados por derrames de lava o conos cineríticos que produjeron materiales poco consolidados que varían desde detritos angulosos a gruesos hasta limos y arcillas, así como cantidades menores de marga, turba, ceniza volcánica, loes, travertino y tufa. La mayoría de los depósitos clásticos continentales se deben al bloqueo del desagüe por corrientes lávicas del Grupo Chichinautzin o a la formación de dolinas y poljes.

Las dolinas y poljes más importantes, que se originó por la disolución de las rocas carbonatadas y anhidricas cretácicas infrayacentes están presentes en varios lugares como en Xochitepec, Puente de Ixtla, al poniente de Alpuyecá, alrededor de las lagunas del Rodeo, Coatetelco, Cuautlita, y en el lago de Tequesquitengo.

La Figura 7, muestra el mapa de distribución de las rocas en la zona de estudio.

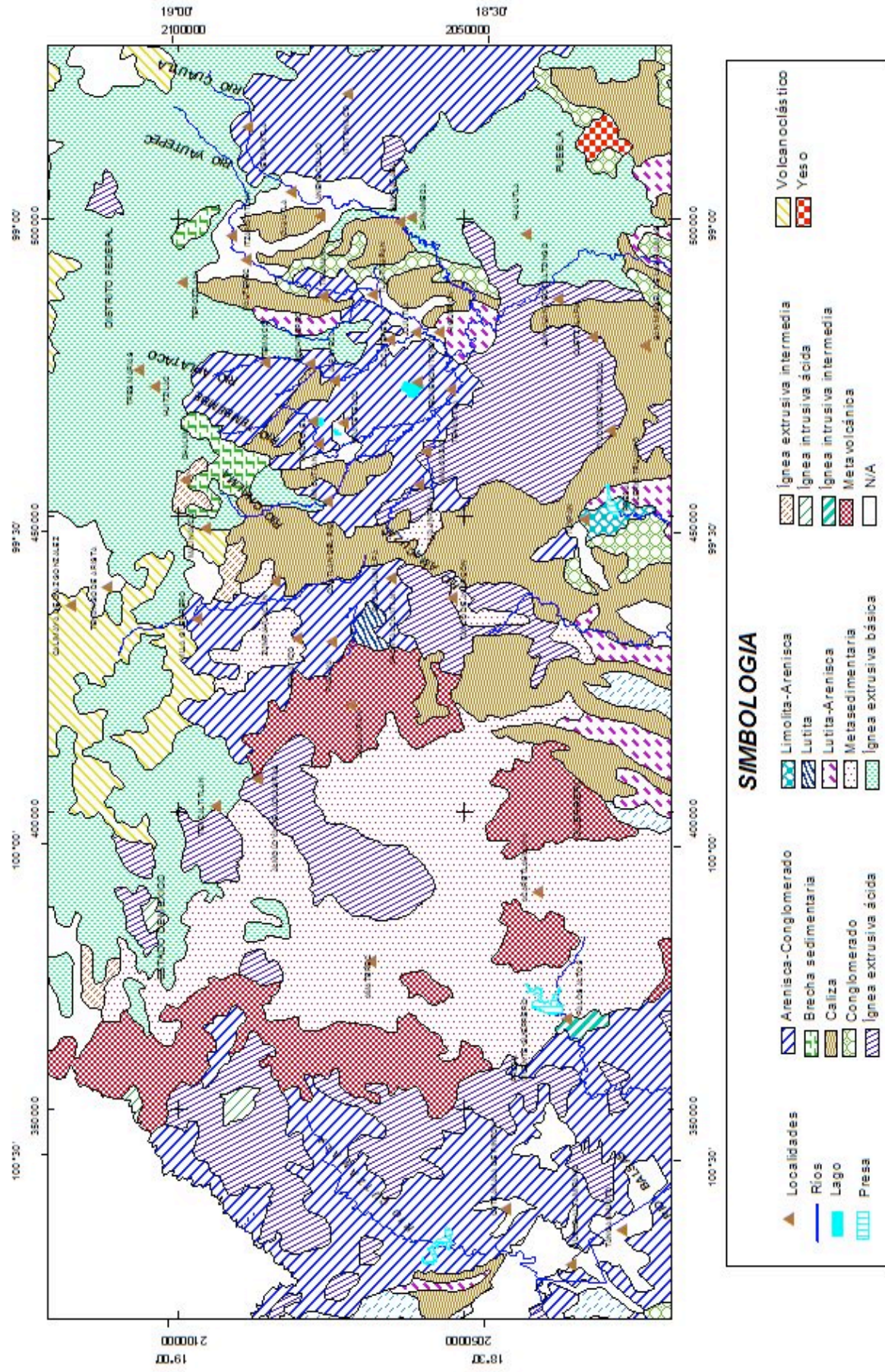


Figura 7. Mapa con los tipos de rocas de la red hidrográfica del estado de Morelos.

4.6 Muestreo

La toma de muestras de agua es una operación que requiere especial atención para que la fracción de agua a analizar no presente cambios químicos, biológicos o contaminación antes de la llegada al laboratorio. 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 1 L, la cual se debe almacenar en recipientes sean de plástico, por su resistencia y menor reacción con los iones del agua. El recipiente y su tapón se deben enjuagar 3 veces con el agua que se va a recolectar y cerrarse herméticamente.

Según la procedencia del agua, se debe considerar lo siguiente:

Muestreo en 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 en 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 en 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.

La toma de muestras de agua en el presente estudio se realizó a lo largo del recorrido del río Amacuzac y sus tributarios desde su nacimiento hasta la desembocadura al río Balsas, se utilizaron recipientes de plástico de 0.5 L, se tomaron dos de cada sitio o estación de muestreo para realizar las determinaciones en el laboratorio. Se colocó en el envase una etiqueta con la fecha en que fue tomado, nombre y localización del sitio. Las muestras se tomaron en canales de riego, pozos, presas, lagos, ríos, arroyos, manantiales y drenes.

4.7 Métodos

En el Cuadro 13, se presentan las determinaciones físico-químicas analíticas que se realizaron a cada muestra de agua.

Cuadro 13. Determinaciones físico-químicas para aguas.

DETERMINACIÓN	MÉTODO	REFERENCIA
1. pH	Potenciómetro	NOM-AA-08-1980
2. Conductividad eléctrica	Conductímetro	NOM-AA-93-1984
3. Residuo seco evaporado	Gravimetría	NOM-AA-34-1981 Procedimiento B
4. Residuo seco calcinado	Gravimetría	NOM-AA-34-1981
5. Sodio y potasio	Flamometría	APHA, 1995 3500-Na ⁺ y K ⁺ , D
6. Calcio y magnesio	Volumétrico	APHA, 1995 3500 Ca ²⁺ , D
7. Carbonatos	Volumétrico	APHA, 1995 2320 B
8. Bicarbonatos	Volumétricos	APHA, 1995 2320 B
9. Cloruros	Titulación.	APHA, 1995 4500-C-IB
10. Sulfatos	Turbidimetría	APHA, 1995 4500-SO ₄ ²⁻ E
11. Ortofosfatos	Colorimetría	Rodier, 1978
12. Boro	Azometina-H	Page (1982)
13. Presión Osmótica	Osmómetro	VAPRO, 1995

4.7.1 Determinaciones físico-químicas

pH

El término pH es definido como el logaritmo negativo de la concentración molar, o más exactamente la actividad molar, de los iones hidrogeno (Carrera, 2007). En general se usa para expresar la condición ácida o alcalina de una solución, sin que esto quiera decir que mida la acidez total o alcalinidad total de una solución.

El método electrométrico en el cual se mide el potencial de un electrodo sensitivo a pH con referencia a un electrodo estándar. Casi todos los aparatos usados hoy en día utilizan el electrodo de vidrio, en combinación con un electrodo de calomel, usado como electrodo de referencia, para medir el pH, el sistema de electrodos se calibra siempre en soluciones de pH conocido (Romero, 1999).

Para la determinación del pH de las muestras se utilizó un Potenciómetro de marca BlckMan, calibrado con soluciones de pH conocido de acuerdo a las instrucciones del fabricante, el electrodo se sumergió directamente en la botella de agua.

Conductividad eléctrica

La conductividad del agua es una expresión de su habilidad para transportar una corriente eléctrica. La conductividad del agua depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación, por tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad (Romero, 1999).

Para su determinación se utilizó el conductímetro de puente de wheatstone, de lectura directa, la celda se sumergió en la muestra de agua y registró la lectura, al mismo tiempo se midió la temperatura de la solución para realizar las correcciones pertinentes.

Las correcciones se realizaron mediante la siguiente formula.

$$CE_{25} = CE \times 100 \times F_c \times F_t$$

CE_{25} = Conductividad eléctrica a 25°C

CE = Conductividad eléctrica que se obtiene

F_c = Constante de celda (CE empírica/CE obtenida)

F_t = Constante de temperatura

Residuo seco evaporado

Se definen como los sólidos que permanecen como residuo después de la evaporación y secado a 105 °C (Romero, 1999).

Para su determinación la muestra se filtró para obtener un líquido perfectamente claro. Se tomó una muestra de 25 mL y en capsulas de porcelana previamente pesadas en una balanza digital, se colocó en una plancha para evaporarlas utilizando una cama de sal de cuarzo a una temperatura de 105°C hasta quedar completamente secos, luego se pesaron, el incremento de peso, sobre el peso inicial, representa el contenido de sólidos totales o residuo total.

$$STD(ppm) = \frac{(pesocapsulaconresiduo - pesocapsula) * 1x10^6}{25}$$

Residuo seco calcinado

Se utilizaron las mismas capsulas del residuo seco evaporado, y se colocaron en una mufla a una temperatura de 600°C durante 30 minutos, se dejan enfriar y se pesan, por medio de la formula anterior se obtiene su valor.

Carbonatos y Bicarbonatos

Para la determinación de carbonatos y bicarbonatos de las muestras de agua, se utilizó el método recomendado por APHA (1995).

El método consistió en la titulación con ácido sulfúrico 0.01 N y como indicador de carbonatos a la fenolftaleína al 0.25%, para la determinación de bicarbonatos se usa al indicador anaranjado de metilo al 0.1%.

Para determinar carbonatos se tomó 5 mL de la muestra y se agregaron 5 gotas de fenolftaleína, (da un color rosado a pH de 8.3 y vira a incolora por valores de pH menores de 8.3), si la solución tomó una coloración rosa indico la presencia de carbonato, se titulo agregando ácido sulfúrico hasta que el color desapareció.

En la misma muestra se determinó la concentración de bicarbonatos para lo que se agregaron 3 gotas de anaranjado de metilo (en condiciones de alcalinidad es de color amarillo y vira a color naranja en condiciones acidas) y se agregó ácido sulfúrico hasta obtener un color canela o rojizo.

Cloruros

Para la determinación de cloruros en las muestras de agua, se utilizó el método por titulación con nitrato de plata, recomendado por APHA (1995). El método se basa en que en la titulación el ion cloro es precipitado como cloruro de plata blanco. El punto final de titulación puede detectarse usando un indicador capaz de demostrar la presencia de exceso de iones plata. El indicador usado es el cromato de potasio.

A la muestra proveniente de la titulación de carbonatos y bicarbonatos se la agregó tres gotas del indicador de cromato de potasio y se adicionó la solución de nitrato de plata hasta obtener un color rojo ladrillo.

Cuando la concentración de iones cloruro se acerca a su extinción, la concentración del ion plata aumentó hasta exceder el producto de solubilidad del cromato de plata y en ese instante comenzó a formarse un precipitado amarillo-rojizo, éste precipitado se tomó como evidencia de que todos los cloruros habían sido precipitados (Romero, 1999).

Sulfatos

Para la determinación de sulfatos en las muestras de agua se utilizó el método por turbidimetría, recomendado por APHA (1995). El método consistió en la determinación de los sulfatos por medio de un espectrofotómetro marca Perkin Elmer a una longitud de onda de 420 nm. El método se basa en que se forma sulfato de bario, debido a que se combinan los sulfatos con el bario del cloruro de bario, éste se encuentra en forma coloidal y puede ser determinado por espectrofotometría, que después se compara con valores estándar de una curva preparada con concentraciones conocidas de iones sulfatos.

El procedimiento fue el siguiente: En un matraz volumétrico se agregó 100 mL de la muestra, para algunos casos se tomaran 10 mL de la muestra y se aforó a 100 ml con agua destilada. Se vertió al matraz erlenmeyer de 125 mL, se adicionó 5 ml de la solución HCl y un poco de cloruro de bario. Se agitó un minuto y se obtuvo la lectura en el espectrofotómetro

Calcio + Magnesio

Para la determinación de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ se utilizó el método por titulación con EDTA (Etilendiamino-tetraacetato), recomendado por APHA (1995), y como indicador al eriocromo negro T. El método supone que el EDTA forma iones complejos solubles con el calcio y magnesio libres y el eriocromo negro T sirve para indicar cuando todos los iones calcio y magnesio han formado un complejo con el EDTA.

El procedimiento fue el siguiente: Se tomó una muestra de 5 mL, a la cual se agregó 4 gotas de hidróxido de sodio, una pequeña porción de eriocromo negro T, y se tituló con EDTA (etilendiamino-tetra acetato) al 0.01 N, hasta que vire de un color rojo vino a azul permanente.

El eriocromo negro T se combinó con algunos iones calcio y magnesio para formar un ion complejo débil de color vino, durante la titulación el EDTA descompone el complejo débil vino, para formar un complejo mas estable con los iones calcio y magnesio, esta acción libera al indicador eriocromo negro T y la solución pasa de color vino a color azul, el cual indica el punto final de la titulación (Romero, 1999).

Calcio

Cuando se añade una solución de EDTA a una agua que contiene tanto calcio como magnesio, el EDTA se combina primero con el calcio y luego con el magnesio, por lo que se debe elevar el pH lo suficiente para que el magnesio se precipite. Para determinar el contenido de calcio se usó como indicador al purpurado de amonio o murexida mezclada con cloruro de sodio, ya que solo se combina con el calcio (Romero, 1999).

El procedimiento fue el siguiente: Se tomó una muestra de 5 mL de agua y se agregó 8 gotas de hidróxido de sodio, una pequeña porción de murexida y se tituló con EDTA (etilen-diamino-tetra acetato) hasta que se obtuvo un color violeta.

Sodio y Potasio

Para la determinación del contenido de sodio y potasio en las muestras de agua, se utilizó el método por flamometría, recomendado por APHA (1995). El aparato para las determinaciones fue un flamometro L653 las determinaciones se realizaron directamente de las botellas de agua y los datos obtenidos se compararon con valores estándar de una curva preparada con concentraciones conocidas de sodio y potasio.

Presión Osmótica

La determinación se basa en el principio de Peltier. Al colocar diferentes temperaturas las uniones de un lazo formado por dos metales (cobre y bismuto); aparece una corriente eléctrica, que dependerá de la diferencia de temperaturas entre las uniones. Después de la inserción de la muestra, 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 (Manual de usuario, 2008).

Para determinar la presión osmótica de las aguas, se utilizó un osmómetro marca Wescor, modelo VAPRO 5500. El aparato se calibró con soluciones estándares de optimol de 100, 290 y 1000 mmol kg⁻¹. Con una micro pipeta se extrajo directamente de las muestras de agua aproximadamente una gota y se colocó encima de una membrana especial, después de 75 segundos el osmómetro obtuvo la cantidad de sustancia en mmol kg⁻¹, este valor lo llevamos a la ecuación de los gases ideales y obtuvimos la presión osmótica en atm.

Boro

El método para determinar el boro en las muestras de agua, fue el de azometina-H para el rango de 0.5 a 10 µg de B mL⁻¹, recomendado por Page (1982). Las determinaciones se hicieron mediante un espectrofotómetro a una longitud de onda de 420 nm. El procedimiento consistió en preparar la azometina-H, disolviendo 0.45 g de azometina-H en 100 mL de solución de ácido ascórbico al 1%, el reactivo se preparó cada semana y se mantuvo en refrigeración.

Los reactivos utilizados fueron: agua desionizada, solución buffer y solución estándar. La solución buffer 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. La solución estándar de boro se preparó disolvieron 0.114 g de ácido bórico en agua destilada hasta ajustar 1000 mL, en esta solución cada mL contiene 20 µg de B mL⁻¹. Se diluyeron 0, 10, 20, 30, 40 y 50 mL de la solución en 100 mL con agua destilada para tener soluciones con concentraciones de boro de 2, 4, 6, 8 y 10 µg de B mL⁻¹ respectivamente.

Para hacer las lecturas en el espectrofotómetro se pipeteó 1 mL de el agua analizar en los tubos de polipropileno con una capacidad de 10 mL, 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, los valores obtenidos se llevaron a la curva de calibración

Ortofosfatos

Para la determinación de los ortofosfatos en las muestras de agua, se utilizó el método por colorimetría recomendado por Rodier (1991), este método se basa en que en un 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 por medio de un espectrofotómetro a una longitud de onda de 690 nm. Durante el proceso de formación del color se presentan los ortofosfatos por lo que las formas orgánicas de estos se hidrolizaron. Este desarrollo se acelera utilizando un catalizador emético.

El procedimiento consistió en lavar los recipientes con ácido clorhídrico diluido eliminando los fosfatos de los detergentes comerciales. Después se preparó un reactivo 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. Se preparó una solución madre patrón de 0.2 g L^{-1} de fosfato monopotásico y luego ésta se disolvió $1/100$ para obtener una solución patrón de 2 mg L^{-1} , con la que se preparó la curva de calibración.

Para la determinación de los ortofosfatos de la muestras de agua, se colocaron 20 mL de la muestra a analizar, se añadió 4 mL de reactivo y completamos con agua destilada hasta 25 mL, esperamos 20 minutos y se leyó en el espectrómetro.

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Localización geográfica de las estaciones de muestreo

En la Red Hidrográfica del estado de Morelos, el agua ocupa un lugar primordial, su disponibilidad y riqueza ha constituido un elemento de soporte básico para el desarrollo económico.

Alrededor de 63 000 hectáreas son irrigadas en Morelos y dado que las actividades agropecuarias, industriales y recreacionales compiten por este recurso, ha disminuido las fuentes de agua para la agricultura, incrementan el uso de aguas residuales para el riego de varios cultivos como: arroz, caña de azúcar, maíz, tomate, cebolla, berro, entre otros, por lo que se hace necesario conocer las características químicas de las aguas y los efectos adversos sobre los terrenos en donde se aplican.

Las estaciones de muestreo se distribuyeron en el río Amacuzac y sus tributarios (manantiales, pozos, presas y ríos, como; Apatlaco, Yautepec Cuautla, Chalma y Tembembe, Balsas, Cutzamala), con el fin de tomar el mayor número de puntos y cubrir el área en la cual, se riega con estas aguas.

En el Cuadro 14 se presentan las estaciones del primer muestreo y en la Figura 8 su localización geográfica. Se realizaron 66 estaciones en julio de 2007, en donde el 67% fueron de ríos, presas y lagos, mientras que el 33% en manantiales y pozos.

Como se puede observar en la Figura 8, los puntos 55, 60, 62, 63, 64, 65, se encuentran fuera de la red hidrográfica del estado de Morelos, pero se tomaron para enriquecer el contenido del presente trabajo.

La concentración de iones de las diferentes estaciones del primer muestreo se encuentra en el Cuadro 15.

Cuadro 14. Localización geográfica de las estaciones del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No	Sitio de muestreo	Fecha de colecta	Latitud Norte	Longitud Oeste	m.s.n.m	Temp. °C
1	Laguna de Zempoala 1	04/07/2007	19.05194	99.31553	2646	22.00
2	Laguna de Zempoala 2	04/07/2007	19.05208	99.31550	2641	21.00
3	Nacimiento del río Chalma	05/07/2007	18.93317	99.43606	1700	23.00
4	Drenaje en el salto de San Antón	04/07/2007	18.91583	99.24128	1510	24.00
5	Río Apatlaco en salto de San Antón	04/07/2007	18.91583	99.24128	1510	21.00
6	Nacimiento en el Tepozteco	07/07/2007	18.99461	99.09931	1477	30.00
7	Río Temixco en puente el Pollo	04/07/2007	18.86983	99.22375	1400	25.50
8	Manantial del balneario Agua Hedionda	08/07/2007	18.81519	98.93014	1340	23.70
9	Río Cuautla junto al balneario Agua Linda	04/07/2007	18.80942	98.94875	1300	18.90
10	Manantial Malinalco en poblado de Santa Lucia	07/07/2007	18.91547	99.01808	1260	24.40
11	Manantial Itzamatitlan en poblado de Santa Lucia	07/07/2007	18.90700	99.01694	1258	26.60
12	Pozo en poblado de Santa Lucia	07/07/2007	18.91011	99.01881	1250	24.00
13	Manantial del balneario los Termas, Atotonilco	08/07/2007	18.65058	98.83133	1240	32.00
14	Arroyo Oaxtepec	07/07/2007	18.90828	99.03556	1225	30.20
15	Río Chalma en el poblado del Platanar	05/07/2007	18.82744	99.45486	1220	20.30
16	Puente río Yautepec	06/07/2007	18.87083	99.07108	1220	31.60
17	Río Apatlaco junto al balneario Ojo de Agua	07/07/2007	18.83064	99.22792	1216	25.00
18	Río Colotepec junto al balneario Xochitepec	04/07/2007	18.77269	99.23939	1150	26.00
19	Pozo del balneario Xochitepec	04/07/2007	18.77436	99.23928	1150	26.00
20	Río Amacuzac, salida de la grutas	05/06/2007	18.66914	99.50914	920	27.00
21	Laguna Rodeo	04/07/2007	18.77275	99.31953	1105	34.20
22	Río junto al manantial Santa Tere	05/07/2007	18.68081	99.48489	1090	27.00
23	Manantial Santa Tere	05/07/2007	18.68081	99.48489	1090	26.00
24	Río Chalma en el puente Arroyo Cuates	05/07/2007	18.75325	99.46058	1080	22.10
25	Presa Atopula	08/07/2007	18.30192	99.27775	1060	30.40
26	Manantial balneario Palo Bolero	04/07/2007	18.76667	99.23847	1050	27.30
27	Río Chinameca	08/07/2007	18.62508	98.99842	1050	28.00
28	Río Cuautla en el puente Alpuyeca	04/07/2007	18.73553	99.25842	1025	27.00
29	Río Chalma en Coatlán del Río	05/07/2007	18.73458	99.42111	1020	21.50
30	Río Cuautla junto a Chinameca	08/07/2007	18.63653	99.00814	1020	27.60
31	Río Yautepec en el puente Ticumán,	07/07/2007	18.79500	99.10431	1007	25.20
32	Pozo del balneario Apotla	06/07/2007	18.69972	99.24403	996	24.60
33	Río Apatlaco	06/07/2007	18.69792	99.24253	996	25.60

Continuación...Localización geográfica de las estaciones del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No	Sitio de muestreo	Fecha de colecta	Latitud Norte	Longitud Oeste	m.s.n.m	Temp. °C
34	Laguna Coatetelco	04/07/2007	18.74581	99.33744	965	31.50
35	Manantial del balneario las Estacas,	07/07/2007	18.73225	99.11297	955	23.00
36	Río Yauatepec junto a las Estacas	07/07/2007	18.72494	99.11342	955	22.00
37	Acueducto cerca del balneario la Taza	06/07/2007	18.70328	99.13653	950	26.50
38	Nacimiento del río Agua Dulce,	06/07/2007	18.70017	99.12964	940	24.50
39	Manantial 1 del balneario del ojo de Agua	05/07/2007	18.64969	99.34997	930	21.00
40	Manantial 2 del balneario del ojo de Agua	05/07/2007	18.64967	99.34978	930	28.80
41	Manantial 2 del balneario del ojo de Agua	05/07/2007	18.65039	99.35111	930	26.20
42	Río Amacuzac en el puente Huajitlan	05/07/2007	18.60900	99.42786	920	27.00
43	Río Salado junto al puente Huajitlan	05/07/2007	18.60886	99.42851	920	31.60
44	Puente Casa Blanca en el río Agua Dulce,	06/07/2007	18.63419	99.19442	920	28.00
45	Lago de Tequesquitengo	06/07/2007	18.60114	99.26083	910	28.10
46	Puente el Chichote en el río Dulce	06/07/2007	18.67822	99.13253	910	27.50
47	Pozo del balneario el Paraíso	06/07/2007	18.60875	99.16583	900	27.40
48	Río Yauatepec puente General Elpidio Perdomo Jojutla	07/07/2007	18.61017	99.16394	900	26.60
49	Ojo de agua Baños de Tula	05/07/2007	18.63658	99.34647	890	27.00
50	Puente río Tembembe	06/07/2007	18.63028	99.32553	890	29.10
51	Río Atetetla	08/07/2007	18.32689	99.38136	890	30.50
52	Río Chalma en el puente Chalma 1	05/07/2007	18.62017	99.33325	880	28.80
53	Puente la fundición en el río Amacuzac	06/07/2007	18.54753	99.26947	869	22.50
54	Pozo del balneario las Palmas	06/07/2007	18.54428	99.26472	869	25.10
55	Presa Valerio Trujano	08/07/2007	18.29536	99.47039	853	30.30
56	Río Amacuzac camino al balneario las Huertas	06/07/2007	18.48181	99.16353	850	28.40
57	Río Cuautla junto al poblado de Nexpan	08/07/2007	18.51633	99.14678	850	30.50
58	Manantial del balneario los Manantiales	06/07/2007	18.47950	99.15361	780	30.60
59	Manantial del balneario las Huertas	06/07/2007	18.48117	99.15339	756	32.00
60	Arroyo junto al balneario M. Luisa en Ahuehuepan	08/07/2007	18.34131	99.65092	750	21.70
61	Manantial del balneario las Tortugas	08/07/2007	18.47447	99.14631	745	29.00
62	Río el Naranja	08/07/2007	18.38650	100.19133	486	24.10
63	Presa Vicente Guerrero	08/07/2007	18.37964	100.26272	370	29.00
64	Río Balsas junto al poblado de Sinahua	08/07/2007	18.28139	100.60833	250	31.70
65	Río Cutzamala en Ciudad Altamirano	09/07/2007	18.36303	100.66481	230	31.50
66	Junta de los ríos Balsas y Cutzamala	09/07/2007	18.38969	100.68394	200	34.20

Cuadro 15. Concentración iónica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	pH	CE μScm^{-1}	$\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$										RSE mgL^{-1}	$\frac{\sum \text{mgL}^{-1}}{\sum \text{mmoles}}$	% Error
			Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Suma	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Suma			
1	7.10	107	0.45	0.34	0.21	0.04	1.04	0.00	0.60	0.37	0.04	1.01	72.96		1.46
			9.02	4.13	4.83	1.56		0.00	36.61	13.12	1.92				
			0.23	0.17	0.21	0.04		0.00	0.60	0.37	0.02				
2	6.88	147	0.70	0.43	0.30	0.02	1.45	0.00	0.73	0.60	0.08	1.41	98.98		1.40
			14.03	5.22	6.90	0.78		0.00	44.53	21.27	3.84				
			0.35	0.22	0.30	0.02		0.00	0.73	0.60	0.04				
3	7.45	113	0.48	0.32	0.27	0.05	1.12	0.00	0.59	0.48	0.02	1.09	77.54		1.36
			9.62	3.89	6.21	1.96		0.00	36.00	17.02	0.96				
			0.24	0.16	0.27	0.05		0.00	0.59	0.48	0.01				
4	6.75	733	1.99	1.20	3.73	0.32	7.24	0.00	4.44	1.90	0.72	7.06	538.68		1.26
			39.88	14.58	85.79	12.51		0.00	270.84	67.36	34.58				
			1.00	0.60	3.73	0.32		0.00	4.44	1.90	0.36				
5	7.00	361	1.35	1.10	0.96	0.16	3.57	0.00	2.14	1.07	0.27	3.48	256.46		1.28
			27.05	13.37	22.08	6.26		0.00	130.54	37.93	12.97				
			0.68	0.55	0.96	0.16		0.00	2.14	1.07	0.14				
6	7.63	141	0.61	0.38	0.31	0.09	1.39	0.00	0.86	0.38	0.11	1.35	101.17		1.46
			12.22	4.62	7.13	3.52		0.00	52.46	13.47	5.28				
			0.31	0.19	0.31	0.09		0.00	0.86	0.38	0.06				
7	7.15	384	1.21	1.16	1.25	0.17	3.79	0.00	2.14	1.05	0.51	3.70	272.65		1.20
			24.25	14.09	28.75	6.65		0.00	130.54	37.22	24.50				
			0.61	0.58	1.25	0.17		0.00	2.14	1.05	0.26				
8	7.05	2510	8.30	12.84	3.39	0.20	24.73	0.00	11.32	2.80	9.99	24.11	1719.67		1.27
			166.33	156.01	77.97	7.82		0.00	690.52	99.26	479.82				
			4.15	6.42	3.39	0.20		0.00	11.32	2.80	5.00				
9	7.55	401	2.10	1.02	0.74	0.08	3.94	0.00	2.58	1.02	0.24	3.84	286.68		1.29
			42.08	12.39	17.02	3.13		0.00	157.38	36.16	11.53				
			1.05	0.51	0.74	0.08		0.00	2.58	1.02	0.12				
10	7.65	519	2.30	2.20	0.56	0.07	5.13	0.00	3.07	0.80	1.13	5.00	367.30		1.28
			46.09	26.73	12.88	2.74		0.00	187.27	28.36	54.27				
			1.15	1.10	0.56	0.07		0.00	3.07	0.80	0.57				
11	7.43	1833	11.71	5.10	1.19	0.11	18.11	0.00	7.91	1.30	8.43	17.64	1293.35		1.31
			234.67	61.97	27.37	4.30		0.00	482.51	46.09	404.89				
			5.86	2.55	1.19	0.11		0.00	7.91	1.30	4.22				
12	7.03	2933	11.20	14.69	2.88	0.20	28.97	0.00	8.82	2.20	17.17	28.19	1965.62		1.36
			224.45	178.48	66.24	7.82		0.00	538.02	77.99	824.68				
			5.60	7.35	2.88	0.20		0.00	8.82	2.20	8.59				
13	7.65	1438	5.30	7.32	1.48	0.09	14.19	0.00	3.68	1.12	9.04	13.84	954.36		1.25
			106.21	88.94	34.04	3.52		0.00	224.48	39.70	434.19				
			2.65	3.66	1.48	0.09		0.00	3.68	1.12	4.52				
14	7.55	1495	7.19	6.30	1.16	0.12	14.77	0.00	4.84	1.40	8.15	14.39	1013.03		1.30
			144.09	76.55	26.68	4.69		0.00	295.24	49.63	391.44				
			3.60	3.15	1.16	0.12		0.00	4.84	1.40	4.08				
15	7.30	271	1.06	0.94	0.61	0.07	2.68	0.00	1.93	0.62	0.06	2.61	105.08		1.32
			21.24	11.42	14.03	2.74		0.00	117.73	21.98	2.88				
			0.53	0.47	0.61	0.07		0.00	1.93	0.62	0.03				
16	7.48	874	4.55	2.86	1.04	0.16	8.61	0.00	4.30	1.07	3.03	8.40	616.92		1.23
			91.18	34.75	23.92	6.26		0.00	262.30	37.93	145.53				
			2.28	1.43	1.04	0.16		0.00	4.30	1.07	1.52				
17	7.18	372	1.24	1.06	1.14	0.23	3.67	0.00	2.45	0.80	0.33	3.58	273.27		1.24
			24.85	12.88	26.22	8.99		0.00	149.45	28.36	15.85				
			0.62	0.53	1.14	0.23		0.00	2.45	0.80	0.17				
18	7.25	147	0.55	0.48	0.33	0.09	1.45	0.00	0.81	0.48	0.12	1.41	102.65		1.40
			11.02	5.83	7.59	3.52		0.00	49.41	17.02	5.76				
			0.28	0.24	0.33	0.09		0.00	0.81	0.48	0.06				

Continuación...Concentración iónica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	pH	CE μScm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹										RSE mgL ⁻¹	Σ ^{mgL⁻¹} Σ ^{mmoles}	% Error	
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma				
19	7.38	677	3.00	2.75	0.85	0.09	6.69	0.00	4.14	1.30	1.08	6.52	478.78		1.29	
			60.12	33.41	19.55	3.52	0.00	252.54	46.09	51.87						467.10
			1.50	1.38	0.85	0.09	0.00	4.14	1.30	0.54						9.80
20	7.48	248	1.22	0.65	0.47	0.11	2.45	0.00	1.42	0.80	0.17	2.39	174.88		1.24	
			24.45	7.90	10.81	4.30	0.00	86.62	28.36	8.17						170.61
			0.61	0.33	0.47	0.11	0.00	1.42	0.80	0.09						3.83
21	7.43	186	0.86	0.50	0.31	0.16	1.83	0.00	1.05	0.60	0.13	1.78	131.47		1.39	
			17.23	6.08	7.13	6.26	0.00	64.05	21.27	6.24						128.26
			0.43	0.25	0.31	0.16	0.00	1.05	0.60	0.07						2.87
22	7.33	508	3.69	1.12	0.18	0.03	5.02	0.00	4.03	0.80	0.06	4.89	379.19		1.31	
			73.95	13.61	4.14	1.17	0.00	245.83	28.36	2.88						369.94
			1.85	0.56	0.18	0.03	0.00	4.03	0.80	0.03						7.48
23	7.45	468	2.42	2.02	0.15	0.03	4.62	0.00	3.59	0.85	0.06	4.50	337.90		1.32	
			48.50	24.54	3.45	1.17	0.00	218.99	30.13	2.88						329.66
			1.21	1.01	0.15	0.03	0.00	3.59	0.85	0.03						6.87
24	7.75	519	2.99	1.20	0.85	0.09	5.13	0.00	3.79	1.02	0.19	5.00	383.46		1.28	
			59.92	14.58	19.54	3.52	0.00	231.27	36.16	9.13						374.11
			1.50	0.60	0.85	0.09	0.00	3.79	1.02	0.10						7.94
25	7.15	237	1.16	0.68	0.36	0.12	2.32	0.00	1.47	0.70	0.09	2.26	167.37		1.31	
			23.25	8.26	8.28	4.69	0.00	89.67	24.82	4.32						163.29
			0.58	0.34	0.36	0.12	0.00	1.47	0.70	0.05						3.62
26	7.15	2143	11.86	8.50	0.73	0.08	21.17	0.00	6.83	1.30	12.50	20.63	1459.57		1.29	
			237.67	103.28	16.79	3.13	0.00	416.63	46.09	600.38						1423.97
			5.93	4.25	0.73	0.08	0.00	6.83	1.30	6.25						25.37
27	7.70	1010	3.42	4.56	1.87	0.12	9.97	0.00	6.51	1.40	1.81	9.72	722.95		1.27	
			68.54	55.40	43.01	4.69	0.00	397.11	49.63	86.93						705.32
			1.71	2.28	1.87	0.12	0.00	6.51	1.40	0.91						14.80
28	7.55	1354	6.97	5.70	0.61	0.09	13.37	0.00	5.09	1.04	6.91	13.04	928.38		1.25	
			139.68	69.26	14.03	3.52	0.00	310.49	36.87	331.89						905.74
			3.49	2.85	0.61	0.09	0.00	5.09	1.04	3.46						16.63
29	7.58	293	1.15	1.05	0.61	0.08	2.89	0.00	1.95	0.80	0.07	2.82	208.73		1.23	
			23.05	12.76	14.03	3.13	0.00	118.95	28.36	3.36						203.64
			0.58	0.53	0.61	0.08	0.00	1.95	0.80	0.04						4.59
30	7.90	1015	4.26	3.86	1.70	0.20	10.02	0.00	5.98	1.40	2.38	9.76	725.61		1.31	
			85.37	46.90	39.10	7.82	0.00	364.78	49.63	114.31						707.91
			2.13	1.93	1.70	0.20	0.00	5.98	1.40	1.19						14.53
31	7.80	790	4.11	2.50	0.97	0.20	7.78	0.00	4.90	0.90	1.80	7.60	574.13		1.17	
			82.36	30.38	22.31	7.82	0.00	298.90	31.91	86.45						560.13
			2.06	1.25	0.97	0.20	0.00	4.90	0.90	0.90						11.18
32	7.60	1833	10.96	6.10	0.91	0.13	18.10	0.00	3.94	1.30	12.41	17.65	1232.30		1.26	
			219.64	74.12	20.93	5.08	0.00	240.34	46.09	596.05						1202.24
			5.48	3.05	0.91	0.13	0.00	3.94	1.30	6.21						21.02
33	7.00	705	3.71	2.04	1.07	0.14	6.96	0.00	3.29	1.50	2.00	6.79	491.13		1.24	
			74.35	24.79	24.61	5.47	0.00	200.69	53.18	96.06						479.15
			1.86	1.02	1.07	0.14	0.00	3.29	1.50	1.00						9.88
34	7.43	790	1.28	1.20	4.41	0.91	7.80	0.00	5.68	1.20	0.72	7.60	615.86		1.30	
			25.65	14.58	101.43	35.58	0.00	346.48	42.54	34.58						600.84
			0.64	0.60	4.41	0.91	0.00	5.68	1.20	0.36						13.80
35	7.30	1297	8.36	3.24	1.10	0.11	12.81	0.00	6.18	0.90	5.40	12.48	927.37		1.30	
			167.53	39.37	25.30	4.30	0.00	376.98	31.91	259.36						904.75
			4.18	1.62	1.10	0.11	0.00	6.18	0.90	2.70						16.79
36	7.45	790	4.20	2.60	0.87	0.13	7.80	0.00	5.23	0.80	1.57	7.60	577.74		1.30	
			84.17	31.59	20.01	5.08	0.00	319.03	28.36	75.41						563.65
			2.10	1.30	0.87	0.13	0.00	5.23	0.80	0.79						11.22

Continuación...Concentración iónica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	pH	CE μScm ⁻¹	mmol _c L ⁻¹										RSE mgL ⁻¹	Σ mgL ⁻¹ Σ mmoles	% Error	
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma				
37	7.68	620	2.66	2.58	0.78	0.08	6.10	0.00	3.91	0.90	1.14	5.95	441.66	430.89	1.24	
			53.31	31.35	17.94	3.13		0.00	238.51	31.91	54.75					8.86
			1.33	1.29	0.78	0.08		0.00	3.91	0.90	0.57					
38	7.65	592	2.58	2.60	0.59	0.08	5.85	0.00	4.39	0.60	0.71	5.70	433.73	423.15	1.30	
			51.70	31.59	13.56	3.13		0.00	267.79	21.27	34.10					8.61
			1.29	1.30	0.59	0.08		0.00	4.39	0.60	0.36					
39	7.58	761	3.72	3.35	0.40	0.05	7.52	0.00	3.46	0.90	2.97	7.33	524.83	512.03	1.28	
			74.55	40.70	9.20	1.96		0.00	211.06	31.91	142.65					9.84
			1.86	1.68	0.40	0.05		0.00	3.46	0.90	1.49					
40	7.48	733	3.61	3.18	0.40	0.05	7.24	0.00	3.88	0.80	2.38	7.06	514.03	501.49	1.26	
			72.34	38.64	9.20	1.96		0.00	236.68	28.36	114.31					9.72
			1.81	1.59	0.40	0.05		0.00	3.88	0.80	1.19					
41	7.53	761	3.72	3.38	0.37	0.05	7.52	0.00	4.14	0.75	2.45	7.34	535.96	522.89	1.21	
			74.55	41.07	8.51	1.96		0.00	252.54	26.59	117.67					10.09
			1.86	1.69	0.37	0.05		0.00	4.14	0.75	1.23					
42	7.35	254	1.27	0.63	0.51	0.10	2.51	0.00	1.43	0.82	0.20	2.45	179.02	174.65	1.21	
			25.45	7.65	11.73	3.91		0.00	87.23	29.07	9.61					3.92
			0.64	0.32	0.51	0.10		0.00	1.43	0.82	0.10					
43	7.50	451	1.80	2.19	0.41	0.05	4.45	0.00	3.00	1.04	0.30	4.34	316.06	308.35	1.25	
			36.07	26.61	9.43	1.96		0.00	183.00	36.87	14.41					6.65
			0.90	1.10	0.41	0.05		0.00	3.00	1.04	0.15					
44	7.18	846	3.90	3.01	1.27	0.18	8.36	0.00	4.65	1.50	2.00	8.15	598.47	583.87	1.27	
			78.16	36.57	29.21	7.04		0.00	283.65	53.18	96.06					12.06
			1.95	1.51	1.27	0.18		0.00	4.65	1.50	1.00					
45	7.73	3384	10.88	14.22	7.63	0.69	33.42	0.00	3.63	2.80	26.15	32.58	2224.20	2169.95	1.27	
			218.04	172.77	175.49	26.98		0.00	221.43	99.26	1255.98					40.38
			5.44	7.11	7.63	0.69		0.00	3.63	2.80	13.08					
46	7.68	620	2.78	2.60	0.66	0.08	6.12	0.00	4.35	0.60	1.00	5.95	451.27	440.26	1.41	
			55.71	31.59	15.18	3.13		0.00	265.35	21.27	48.03					8.88
			1.39	1.30	0.66	0.08		0.00	4.35	0.60	0.50					
47	7.15	959	4.73	3.80	0.85	0.09	9.47	0.00	4.68	1.80	2.75	9.23	661.54	645.40	1.28	
			94.79	46.17	19.55	3.52		0.00	285.48	63.81	132.08					13.07
			2.37	1.90	0.85	0.09		0.00	4.68	1.80	1.38					
48	7.45	1072	5.68	3.75	1.05	0.11	10.59	0.00	4.36	1.70	4.23	10.29	735.17	717.24	1.44	
			113.83	45.56	24.15	4.30		0.00	265.96	60.27	203.17					14.06
			2.84	1.88	1.05	0.11		0.00	4.36	1.70	2.12					
49	7.38	987	4.58	4.80	0.32	0.05	9.75	0.00	4.63	0.90	3.98	9.51	681.54	664.92	1.25	
			91.78	58.32	7.36	1.96		0.00	282.43	31.91	191.16					12.58
			2.29	2.40	0.32	0.05		0.00	4.63	0.90	1.99					
50	7.50	564	3.49	1.44	0.44	0.20	5.57	0.00	3.25	1.10	1.08	5.43	404.36	394.50	1.27	
			69.94	17.50	10.12	7.82		0.00	198.25	39.00	51.87					8.00
			1.75	0.72	0.44	0.20		0.00	3.25	1.10	0.54					
51	7.50	113	0.50	0.40	0.16	0.06	1.12	0.00	0.53	0.35	0.21	1.09	77.63	75.74	1.36	
			10.02	4.86	3.68	2.35		0.00	32.33	12.41	10.09					1.66
			0.25	0.20	0.16	0.06		0.00	0.53	0.35	0.11					
52	7.63	451	1.74	2.12	0.54	0.07	4.47	0.00	2.72	0.98	0.68	4.38	316.84	309.11	1.02	
			34.87	25.76	12.42	2.74		0.00	165.92	34.74	32.66					6.58
			0.87	1.06	0.54	0.07		0.00	2.72	0.98	0.34					
53	7.53	384	1.80	1.36	0.53	0.10	3.79	0.00	1.73	1.01	0.96	3.70	262.53	256.13	1.20	
			36.07	16.52	12.19	3.91		0.00	105.53	35.80	46.11					5.43
			0.90	0.68	0.53	0.10		0.00	1.73	1.01	0.48					
54	7.53	1579	8.45	6.00	1.03	0.12	15.60	0.00	3.94	1.30	9.97	15.21	1061.81	1035.91	1.27	
			169.34	72.90	23.69	4.69		0.00	240.34	46.09	478.86					18.61
			4.23	3.00	1.03	0.12		0.00	3.94	1.30	4.99					

Continuación... Concentración iónica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	pH	CE μScm ⁻¹	mmol _c L ⁻¹										RSE mgL ⁻¹	Σ _{mmoles} mgL ⁻¹	% Error
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma			
55	7.50	248	1.16	0.90	0.27	0.12	2.45	0.00	1.52	0.70	0.16	2.38	174.57	170.31	1.45
			23.25	10.94	6.21	4.69		0.00	92.72	24.82	7.68				
			0.58	0.45	0.27	0.12		0.00	1.52	0.70	0.08				
56	7.35	761	2.96	3.60	0.84	0.12	7.52	0.00	4.27	0.90	2.15	7.32	535.78	522.71	1.35
			59.32	43.74	19.32	4.69		0.00	260.47	31.91	103.26				
			1.48	1.80	0.84	0.12		0.00	4.27	0.90	1.08				
57	7.95	959	3.71	3.92	1.65	0.19	9.47	0.00	5.33	1.60	2.27	9.20	674.70	658.24	1.45
			74.35	47.63	37.95	7.43		0.00	325.13	56.72	109.03				
			1.86	1.96	1.65	0.19		0.00	5.33	1.60	1.14				
58	7.25	1636	10.14	4.92	0.98	0.11	16.15	0.00	5.14	0.60	10.02	15.76	1133.55	1105.90	1.22
			203.21	59.78	22.54	4.30		0.00	313.54	21.27	481.26				
			5.07	2.46	0.98	0.11		0.00	5.14	0.60	5.01				
59	7.23	2031	12.86	6.32	0.81	0.07	20.06	0.00	2.30	0.80	16.45	19.55	1347.49	1314.62	1.29
			257.71	76.79	18.62	2.74		0.00	140.30	28.36	790.09				
			6.43	3.16	0.81	0.07		0.00	2.30	0.80	8.23				
60	7.53	485	1.88	2.24	0.61	0.06	4.79	0.00	3.14	1.03	0.50	4.67	341.68	333.35	1.27
			37.68	27.22	14.03	2.35		0.00	191.54	36.51	24.02				
			0.94	1.12	0.61	0.06		0.00	3.14	1.03	0.25				
61	7.00	1833	7.96	9.08	0.92	0.08	18.04	0.00	5.56	0.96	11.07	17.59	1228.99	1199.01	1.26
			159.52	110.32	21.16	3.13		0.00	339.16	34.03	531.69				
			3.98	4.54	0.92	0.08		0.00	5.56	0.96	5.54				
62	7.53	463	1.92	2.24	0.36	0.04	4.56	0.00	2.04	1.60	0.81	4.45	302.99	295.60	1.22
			38.48	27.22	8.28	1.56		0.00	124.44	56.72	38.90				
			0.96	1.12	0.36	0.04		0.00	2.04	1.60	0.41				
63	7.68	338	1.40	1.24	0.61	0.09	3.34	0.00	1.69	1.20	0.37	3.26	229.68	224.08	1.21
			28.06	15.07	14.03	3.52		0.00	103.09	42.54	17.77				
			0.70	0.62	0.61	0.09		0.00	1.69	1.20	0.19				
64	7.53	1100	5.65	4.24	0.87	0.10	10.86	0.00	2.78	0.80	7.00	10.58	740.89	722.82	1.31
			113.23	51.52	20.01	3.91		0.00	169.58	28.36	336.21				
			2.83	2.12	0.87	0.10		0.00	2.78	0.80	3.50				
65	7.63	417	1.62	1.36	1.03	0.11	4.12	0.00	2.60	0.90	0.51	4.01	299.29	291.99	1.35
			32.46	16.52	23.69	4.30		0.00	158.60	31.91	24.50				
			0.81	0.68	1.03	0.11		0.00	2.60	0.90	0.26				
66	7.53	722	4.00	2.10	0.93	0.10	7.13	0.00	3.48	1.03	2.44	6.95	509.38	496.96	1.28
			80.16	25.52	21.39	3.91		0.00	212.28	36.51	117.19				
			2.00	1.05	0.93	0.10		0.00	3.48	1.03	1.22				
Media	7.43	845	3.96	3.24	1.02	0.13	8.34	0.00	3.65	1.06	3.42	8.13	584.43	570.17	1.29
			79.27	39.32	23.48	5.03		0.00	222.57	37.62	164.25				
			1.98	1.62	1.02	0.13		0.00	3.65	1.06	1.71				
Mediana	7.48	691	3.00	2.37	0.80	0.10	6.83	0.00	3.66	0.97	1.11	6.66	484.95	473.13	1.28
			60.02	28.80	18.28	3.91		0.00	222.96	34.39	53.07				
			1.50	1.19	0.80	0.10		0.00	3.66	0.97	0.55				
Moda	7.53	1833	1.16	1.20	0.61	0.09	1.12	0.00	2.14	0.80	0.06	1.41			1.26
			23.25	14.58	14.03	3.52		0.00	130.54	28.36	2.88				
			0.58	0.60	0.61	0.09		0.00	2.14	0.80	0.03				
DEST	0.24	688	3.29	3.11	1.15	0.13	6.79	0.00	2.03	0.49	5.08	6.62	460.82	449.59	0.08
			65.92	37.83	26.41	5.20		0.00	124.07	17.20	243.83				
			1.64	1.56	1.15	0.13		0.00	2.03	0.49	2.54				
CV	0.03	0.81	0.83	0.96	1.12	1.03	0.81	0.00	0.56	0.46	1.48	0.81	0.79	0.79	0.06
			0.83	0.96	1.12	1.03		0.00	0.56	0.46	1.48				
			0.83	0.96	1.12	1.03		0.00	0.56	0.46	1.48				

La localización geográfica de las estaciones del segundo muestreo se indica en el Cuadro 16 y en la Figura 9. Se realizaron 78 estaciones en mayo de 2008, en donde el 34.6% de las muestras se tomaron en manantiales y pozos y 65.4% en ríos, lagos y presas. Los puntos 68, 73, 75, 76, 77 y 78, están fuera de la red hidrográfica del estado de Morelos.

Los resultados de la composición iónica de las aguas del segundo muestreo se encuentran en el Cuadro 17.

Cuadro 16. Localización geográfica de las estaciones del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No	Sitio de muestreo	Fecha de colecta	Latitud Norte	Longitud Oeste	m.s.n.m	Temp. °C
1	Arroyo Alumbre en Lagunas de Zempoala	12/05/2008	19.05134	99.30431	2658	12.00
2	Arroyo Pico del Águila en Lagunas de Zempoala	12/05/2008	19.05134	99.30431	2647	12.30
3	Laguna de Zempoala 1	12/05/2008	19.05056	99.30429	2646	21.60
4	Laguna de Zempoala 2	12/05/2008	19.05208	99.31550	2641	20.20
5	Nacimiento del río Chalma	17/05/2008	18.93317	99.43606	1700	23.00
6	Río Apatlaco en salto de San Antón	12/05/2008	18.91583	99.24128	1510	24.00
7	Drenaje en el salto de San Antón	12/05/2008	18.91583	99.24128	1510	24.00
8	Nacimiento en el Tepozteco	15/05/2008	18.98675	99.08782	1477	23.70
9	Río Temixco en puente el Pollo	12/05/2008	18.86983	99.22375	1400	23.50
10	Manantial del balneario Agua Hedionda	16/05/2008	18.81519	98.93014	1322	25.90
11	Río Cuautla junto al balneario Agua Linda	16/05/2008	18.80942	98.94875	1300	17.40
12	Manantial Malinalco en poblado de Santa Lucia	15/05/2008	18.91547	99.01808	1260	27.30
13	Manantial Itzamatitlan en poblado de Santa Lucia	15/05/2008	18.90700	99.01694	1258	21.80
14	Pozo en poblado de Santa Lucia	15/05/2008	18.91011	99.01881	1250	21.50
15	Manantial 1 del balneario los Termas, Atotonilco	15/05/2008	18.65024	98.82083	1240	32.70
16	Manantial 2 del balneario los Termas, Atotonilco	15/05/2008	18.65024	98.82083	1240	32.70
17	Manantial 3 del balneario los Termas, Atotonilco	15/05/2008	18.65019	98.82083	1240	36.20
18	Arroyo Oaxtepec	15/05/2008	18.90222	99.03390	1225	18.70
19	Río Apatlaco junto al balneario Ojo de Agua	12/05/2008	18.83064	99.22792	1216	24.80
20	Río Oaxtepec	15/05/2008	18.88763	98.97111	1208	27.70
21	Cisterna del balneario Ojo de Agua	12/05/2008	18.82082	99.22050	1200	29.00
22	Pozo del balneario Ojo de Agua	12/05/2008	18.82082	99.22050	1200	22.80
23	Drenaje a la salida del balneario Xochitepec	12/05/2008	18.76835	99.23495	1155	26.50
24	Pozo del balneario Xochitepec	12/05/2008	18.77436	99.23928	1150	24.20
25	Río Colotepec junto al balneario Xochitepec	12/05/2008	18.76835	99.23495	1150	26.00
26	Río Yautepec a la salida del poblado Yautepec	15/05/2008	18.87055	99.05369	1144	19.80
27	Laguna Rodeo	12/05/2008	18.76827	99.31750	1105	25.50
28	Manantial Santa Tere	13/05/2008	18.67003	99.48370	1090	26.50
29	Río junto al manantial Santa Tere	13/05/2008	18.67060	99.48379	1090	26.00
30	Río Chalma en el puente Arroyo Cuates 1	13/05/2008	18.75080	99.45295	1080	24.70
31	Río Chalma en el puente Arroyo Cuates 2	13/05/2008	18.75085	99.45294	1080	24.10
32	Presa Atopula	16/05/2008	18.30054	99.26965	1060	31.30
33	Canal de riego camino al balneario Xochitepec	12/05/2008	18.78708	99.23664	1053	27.00
34	Manantial balneario Palo Bolero	13/05/2008	18.76670	99.23475	1050	21.30
35	Río cuenca junto al balneario Palo Bolero	13/05/2008	18.76670	99.23475	1050	22.00
36	Río Chinameca	16/05/2008	18.61897	98.98792	1050	23.70
37	Río Cuautla en el puente Alpuyeca	13/05/2008	18.73392	99.25280	1025	21.20
38	Río Chalma en Coatlán del Río	13/05/2008	18.75144	99.45065	1020	21.50
39	Río Cuautla junto a Chinameca	16/05/2008	18.63422	99.00225	1020	25.20

Continuación...Localización geográfica de las estaciones del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No	Sitio de muestreo	Fecha de colecta	Latitud Norte	Longitud Oeste	m.s.n.m	Temp. °C
40	Río Yautepec en el puente Ticuman,	15/05/2008	18.78662	99.10124	1007	24.00
41	Río Apatlaco junto al balneario Apotla	14/05/2008	18.68765	99.23583	996	22.40
42	Canal de riego salida del balneario Apotla	14/05/2008	18.68791	99.23610	996	21.90
43	Laguna Coatetelco	13/05/2008	18.73681	99.33442	965	29.60
44	Acueducto cerca del balneario la Taza	14/05/2008	18.70090	99.13422	950	20.30
45	Nacimiento del río Agua Dulce,	14/05/2008	18.70006	99.12030	940	19.04
46	Manantial 1 del balneario del ojo de Agua	13/05/2008	18.65004	99.35008	930	25.80
47	Manantial 2 del balneario del ojo de Agua	13/05/2008	18.63790	99.33793	930	25.80
48	Manantial 2 del balneario del ojo de Agua	13/05/2008	18.63790	99.33793	930	26.20
49	Río Coatlaco	13/05/2008	18.73366	99.41789	924	23.60
50	Río Amacuzac, salida de la grutas	13/05/2008	18.66914	99.50914	920	26.00
51	Río Amacuzac en el puente Huajitlan	13/05/2008	18.60255	99.41969	920	30.10
52	Río Agua dulce en el puente Casa Blanca	14/05/2008	18.63363	99.18646	920	24.40
53	Lago de Tequesquitengo	13/05/2008	18.60114	99.26083	910	29.00
54	Puente el Chichote en el río Dulce	14/05/2008	18.66981	99.12111	910	22.80
55	Pozo del balneario el Paraíso	14/05/2008	18.60242	99.15461	900	24.60
56	Río Yautepec puente General Elpidio Perdomo Jojutla	14/05/2008	18.60091	99.16837	900	23.50
57	Río agua Dulce camino a las Estacas	14/05/2008	18.68759	99.10281	899	24.40
58	Canal de riego con aguas de la Laguna rodeo y pozos	13/05/2008	18.73681	99.33442	891	26.40
59	Río junto a los Baños de Tula	13/05/2008	18.63434	99.33687	890	28.70
60	Canal de riego junto a los Baños de Tula	13/05/2008	18.63361	99.33633	890	28.50
61	Puente río Tembembe	13/05/2008	18.62035	99.31908	890	29.40
62	Ojo de agua Baños de Tula	13/05/2008	18.60254	99.41970	890	28.50
63	Manantial del balneario las Estacas,	14/05/2008	18.73758	99.10381	881	22.60
64	Río Chalma en el puente Chalma 1	13/05/2008	18.61765	99.32127	880	27.90
65	Presa junto al balneario Ojo de Agua	13/05/2008	18.65257	99.35194	878	29.40
66	Río Amacuzac junto al balneario las Palmas	14/05/2008	18.53637	99.25410	869	25.00
67	Pozo del balneario las Palmas	14/05/2008	18.54428	99.26472	869	24.00
68	Presa Valerio Trujano	16/05/2008	18.29536	99.47039	853	32.20
69	Río Amacuzac camino al balneario las Huertas	14/05/2008	18.48181	99.16353	850	26.80
70	Río Cuautla junto al poblado de Nexpan	14/05/2008	18.51633	99.14678	850	31.70
71	Manantial del balneario los Manantiales	14/05/2008	18.47950	99.15361	780	28.60
72	Manantial del balneario las Huertas	14/05/2008	18.48117	99.15339	756	29.60
73	Arroyo junto al balneario M. Luisa en Ahuehuepan	16/05/2008	18.34131	99.65092	750	32.00
74	Manantial del balneario las Tortugas	14/05/2008	18.47447	99.14631	745	24.00
75	Presa Vicente Guerrero	16/05/2008	18.37030	100.25354	370	30.30
76	Río Balsas junto al poblado de Sinahua	16/05/2008	18.27076	100.58391	250	30.50
77	Río Cutzamala en Ciudad Altamirano	17/05/2008	18.35376	100.65388	230	29.20
78	Junta de los ríos Balsas y Cutzamala	17/05/2008	18.40137	100.68356	220	27.80

Cuadro 17. Concentración iónica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	pH	CE μScm^{-1}	$\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$										RSE mgL^{-1}	$\sum \text{mgL}^{-1}$ $\sum \text{mmoles}$	% Error
			Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Suma	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Suma			
1	7.00	125	0.62	0.32	0.27	0.02	1.23	0.00	0.67	0.38	0.14	1.19	86.47	84.36	1.65
			12.42	3.89	6.21	0.78		0.00	40.87	13.47	6.72				
			0.31	0.16	0.27	0.02		0.00	0.67	0.38	0.07				
2	7.00	131	0.66	0.35	0.25	0.03	1.29	0.00	0.80	0.40	0.06	1.26	92.52	90.26	1.18
			13.23	4.25	5.75	1.17		0.00	48.80	14.18	2.88				
			0.33	0.18	0.25	0.03		0.00	0.80	0.40	0.03				
3	7.15	104	0.52	0.30	0.18	0.03	1.03	0.00	0.62	0.34	0.04	1.00	72.95	71.17	1.48
			10.42	3.65	4.14	1.17		0.00	37.82	12.05	1.92				
			0.26	0.15	0.18	0.03		0.00	0.62	0.34	0.02				
4	6.90	161	0.75	0.55	0.26	0.02	1.58	0.00	0.99	0.48	0.07	1.54	111.97	109.24	1.28
			15.03	6.68	5.98	0.78		0.00	60.39	17.02	3.36				
			0.38	0.28	0.26	0.02		0.00	0.99	0.48	0.04				
5	7.00	141	0.36	0.71	0.28	0.04	1.39	0.00	1.06	0.28	0.02	1.36	101.87	99.39	1.09
			7.21	8.63	6.44	1.56		0.00	64.66	9.93	0.96				
			0.18	0.36	0.28	0.04		0.00	1.06	0.28	0.01				
6	7.15	418	0.74	0.80	2.35	0.24	4.13	0.00	2.51	1.22	0.29	4.02	305.73	298.27	1.35
			14.83	9.72	54.05	9.38		0.00	153.11	43.25	13.93				
			0.37	0.40	2.35	0.24		0.00	2.51	1.22	0.15				
7	6.90	705	2.50	1.29	2.85	0.32	6.96	0.00	4.45	1.50	0.80	6.75	519.56	506.88	1.53
			50.10	15.67	65.55	12.51		0.00	271.45	53.18	38.42				
			1.25	0.65	2.85	0.32		0.00	4.45	1.50	0.40				
8	7.50	151	0.56	0.67	0.20	0.06	1.49	0.00	0.93	0.44	0.08	1.45	105.04	102.48	1.36
			11.22	8.14	4.60	2.35		0.00	56.73	15.60	3.84				
			0.28	0.34	0.20	0.06		0.00	0.93	0.44	0.04				
9	7.00	480	1.16	1.32	2.02	0.22	4.72	0.00	2.92	1.14	0.56	4.62	348.27	339.78	1.07
			23.25	16.04	46.46	8.60		0.00	178.12	40.41	26.90				
			0.58	0.66	2.02	0.22		0.00	2.92	1.14	0.28				
10	7.00	2637	12.26	8.54	5.03	0.22	26.05	0.00	12.55	3.04	9.93	25.52	1869.60	1824.00	1.03
			245.69	103.76	115.69	8.60		0.00	765.55	107.77	476.94				
			6.13	4.27	5.03	0.22		0.00	12.55	3.04	4.97				
11	7.65	418	1.93	1.42	0.69	0.08	4.12	0.00	3.41	0.40	0.21	4.02	314.89	307.21	1.23
			38.68	17.25	15.87	3.13		0.00	208.01	14.18	10.09				
			0.97	0.71	0.69	0.08		0.00	3.41	0.40	0.11				
12	7.10	407	2.14	1.35	0.47	0.06	4.02	0.00	2.76	0.66	0.51	3.93	295.93	288.71	1.13
			42.89	16.40	10.81	2.35		0.00	168.36	23.40	24.50				
			1.07	0.68	0.47	0.06		0.00	2.76	0.66	0.26				
13	7.10	1906	11.04	6.00	1.60	0.18	18.82	0.00	7.52	1.04	9.88	18.44	1340.81	1308.11	1.02
			221.24	72.90	36.80	7.04		0.00	458.72	36.87	474.54				
			5.52	3.00	1.60	0.18		0.00	7.52	1.04	4.94				
14	6.95	2951	16.33	9.34	3.36	0.11	29.14	0.00	10.55	2.12	15.65	28.32	2042.50	1992.68	1.43
			327.25	113.48	77.28	4.30		0.00	643.55	75.15	751.67				
			8.17	4.67	3.36	0.11		0.00	10.55	2.12	7.83				
15	7.05	1473	8.77	4.24	1.46	0.08	14.55	0.00	4.97	0.84	8.35	14.16	1022.93	997.98	1.36
			175.75	51.52	33.58	3.13		0.00	303.17	29.78	401.05				
			4.39	2.12	1.46	0.08		0.00	4.97	0.84	4.18				
16	7.00	1483	7.68	5.42	1.47	0.08	14.65	0.00	4.44	0.92	8.87	14.23	1010.83	986.18	1.45
			153.91	65.85	33.81	3.13		0.00	270.84	32.61	426.03				
			3.84	2.71	1.47	0.08		0.00	4.44	0.92	4.44				
17	6.95	1462	7.70	5.14	1.51	0.08	14.43	0.00	2.91	1.24	9.91	14.06	975.87	952.07	1.30
			154.31	62.45	34.73	3.13		0.00	177.51	43.96	475.98				
			3.85	2.57	1.51	0.08		0.00	2.91	1.24	4.96				
18	7.60	1358	7.65	4.68	1.01	0.08	13.42	0.00	5.22	1.08	6.77	13.07	941.36	918.40	1.32
			153.31	56.86	23.23	3.13		0.00	318.42	38.29	325.16				
			3.83	2.34	1.01	0.08		0.00	5.22	1.08	3.39				

Continuación...Concentración iónica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	pH	mmol _c L ⁻¹											RSE mgL ⁻¹	$\sum \frac{mgL^{-1}}{\sum nmoles}$	% Error
		CE μScm ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma			
19	7.35	428	1.53	1.16	1.34	0.20	4.23	0.00	2.51	1.14	0.47	4.12	306.97		1.32
			30.66	14.09	30.82	7.82		0.00	153.11	40.41	22.57				
			0.77	0.58	1.34	0.20		0.00	2.51	1.14	0.24				
20	7.10	2050	5.04	8.64	6.38	0.18	20.24	0.00	10.46	2.60	6.59	19.65	1441.67	1406.51	1.48
			101.00	104.98	146.74	7.04		0.00	638.06	92.17	316.52				
			2.52	4.32	6.38	0.18		0.00	10.46	2.60	3.30				
21	7.20	511	1.88	1.73	1.33	0.11	5.05	0.00	3.04	1.12	0.76	4.92	364.11	355.23	1.30
			37.68	21.02	30.59	4.30		0.00	185.44	39.70	36.50				
			0.94	0.87	1.33	0.11		0.00	3.04	1.12	0.38				
22	7.20	407	1.52	1.05	1.34	0.11	4.02	0.00	2.38	0.80	0.75	3.93	295.10	287.90	1.13
			30.46	12.76	30.82	4.30		0.00	145.18	28.36	36.02				
			0.76	0.53	1.34	0.11		0.00	2.38	0.80	0.38				
23	7.35	460	1.84	0.85	1.51	0.20	4.40	0.00	3.03	1.14	0.34	4.51	339.60	331.32	1.23
			36.87	10.33	34.73	7.82		0.00	184.83	40.41	16.33				
			0.92	0.43	1.51	0.20		0.00	3.03	1.14	0.17				
24	7.55	692	3.60	2.22	0.90	0.11	6.83	0.00	4.60	0.88	1.15	6.63	503.42	491.14	1.49
			72.14	26.97	20.70	4.30		0.00	280.60	31.20	55.23				
			1.80	1.11	0.90	0.11		0.00	4.60	0.88	0.58				
25	8.35	241	0.76	0.75	0.78	0.08	2.37	0.40	1.23	0.50	0.18	2.31	162.79	158.82	1.28
			15.23	9.11	17.94	3.13		12.00	75.03	17.73	8.65				
			0.38	0.38	0.78	0.08		0.20	1.23	0.50	0.09				
26	8.00	888	3.76	3.62	1.19	0.14	8.71	0.00	1.48	1.04	6.01	8.53	582.18	567.98	1.04
			75.35	43.98	27.37	5.47		0.00	90.28	36.87	288.66				
			1.88	1.81	1.19	0.14		0.00	1.48	1.04	3.01				
27	7.65	186	0.96	0.54	0.27	0.07	1.84	0.00	1.15	0.36	0.28	1.79	134.39	131.11	1.38
			19.24	6.56	6.21	2.74		0.00	70.15	12.76	13.45				
			0.48	0.27	0.27	0.07		0.00	1.15	0.36	0.14				
28	7.50	548	3.31	1.90	0.17	0.03	5.41	0.00	4.19	0.98	0.10	5.27	399.37	389.63	1.31
			66.33	23.09	3.91	1.17		0.00	255.59	34.74	4.80				
			1.66	0.95	0.17	0.03		0.00	4.19	0.98	0.05				
29	7.50	585	4.26	1.30	0.20	0.02	5.78	0.00	5.29	0.28	0.08	5.65	454.09	443.01	1.14
			85.37	15.80	4.60	0.78		0.00	322.69	9.93	3.84				
			2.13	0.65	0.20	0.02		0.00	5.29	0.28	0.04				
30	7.80	470	2.36	1.34	0.86	0.08	4.64	0.00	3.39	0.88	0.26	4.53	345.38	336.96	1.20
			47.29	16.28	19.78	3.13		0.00	206.79	31.20	12.49				
			1.18	0.67	0.86	0.08		0.00	3.39	0.88	0.13				
31	7.60	533	2.91	1.38	0.88	0.09	5.26	0.00	3.97	0.88	0.28	5.13	395.31	385.67	1.25
			58.32	16.77	20.24	3.52		0.00	242.17	31.20	13.45				
			1.46	0.69	0.88	0.09		0.00	3.97	0.88	0.14				
32	7.25	282	1.08	1.02	0.49	0.19	2.78	0.00	2.18	0.44	0.08	2.70	210.28	205.15	1.46
			21.64	12.39	11.27	7.43		0.00	132.98	15.60	3.84				
			0.54	0.51	0.49	0.19		0.00	2.18	0.44	0.04				
33	7.30	418	1.65	0.90	1.39	0.19	4.13	0.00	2.47	1.18	0.37	4.02	301.02	293.68	1.35
			33.07	10.94	31.97	7.43		0.00	150.67	41.83	17.77				
			0.83	0.45	1.39	0.19		0.00	2.47	1.18	0.19				
34	7.45	2191	13.42	7.46	0.70	0.06	21.64	0.00	6.96	0.98	13.07	21.01	1501.71	1465.08	1.48
			268.94	90.64	16.10	2.35		0.00	424.56	34.74	627.75				
			6.71	3.73	0.70	0.06		0.00	6.96	0.98	6.54				
35	7.30	486	1.32	0.28	3.00	0.20	4.80	0.00	3.09	1.08	0.51	4.68	366.90	357.95	1.27
			26.45	3.40	69.00	7.82		0.00	188.49	38.29	24.50				
			0.66	0.14	3.00	0.20		0.00	3.09	1.08	0.26				
36	7.50	1150	5.06	2.82	3.36	0.12	11.36	0.00	6.64	1.42	2.97	11.03	836.05	815.66	1.47
			101.40	34.26	77.28	4.69		0.00	405.04	50.34	142.65				
			2.53	1.41	3.36	0.12		0.00	6.64	1.42	1.49				

Continuación...Concentración iónica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	pH	CE μScm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹										RSE mgL ⁻¹	Σ mgL ⁻¹ Σ mmoles	% Error
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma			
37	7.70	1597	11.49	3.36	0.84	0.08	15.77	0.00	5.64	0.84	8.88	15.36	1121.21	1093.86	1.32
			230.26	40.82	19.32	3.13	0.00	344.04	29.78	426.51	19.27				
			5.75	1.68	0.84	0.08	0.00	5.64	0.84	4.44					
38	7.90	339	1.59	0.98	0.70	0.08	3.35	0.00	2.46	0.76	0.06	3.28	248.95	242.88	1.06
			31.86	11.91	16.10	3.13	0.00	150.06	26.94	2.88	5.32				
			0.80	0.49	0.70	0.08	0.00	2.46	0.76	0.03					
39	7.85	1044	2.41	4.82	2.86	0.22	10.31	0.00	4.94	1.40	3.70	10.04	727.67	709.92	1.33
			48.30	58.56	65.78	8.60	0.00	301.34	49.63	177.71	14.89				
			1.21	2.41	2.86	0.22	0.00	4.94	1.40	1.85					
40	8.10	731	2.91	2.78	1.17	0.21	7.07	0.00	4.03	0.96	2.23	7.22	527.04	514.19	1.05
			58.32	33.78	26.91	8.21	0.00	245.83	34.03	107.11	10.34				
			1.46	1.39	1.17	0.21	0.00	4.03	0.96	1.12					
41	7.00	731	3.12	2.36	1.45	0.24	7.17	0.00	3.43	1.54	2.02	6.99	507.13	494.76	1.27
			62.52	28.67	33.35	9.38	0.00	209.23	54.59	97.02	10.41				
			1.56	1.18	1.45	0.24	0.00	3.43	1.54	1.01					
42	7.40	1619	10.67	3.88	0.91	0.11	15.57	0.00	8.55	0.84	6.59	15.98	1182.90	1154.05	1.30
			213.83	47.14	20.93	4.30	0.00	521.55	29.78	316.52	20.99				
			5.34	1.94	0.91	0.11	0.00	8.55	0.84	3.30					
43	7.70	836	1.65	1.01	4.22	1.38	8.26	0.00	5.65	1.22	1.18	8.05	656.96	640.94	1.29
			33.07	12.27	97.06	53.96	0.00	344.65	43.25	56.68	14.40				
			0.83	0.51	4.22	1.38	0.00	5.65	1.22	0.59					
44	7.53	627	2.68	2.48	0.77	0.09	6.02	0.00	3.38	0.98	1.79	6.15	442.76	431.96	1.07
			53.71	30.13	17.71	3.52	0.00	206.18	34.74	85.97	8.70				
			1.34	1.24	0.77	0.09	0.00	3.38	0.98	0.90					
45	7.40	601	3.98	1.40	0.45	0.07	5.90	0.00	4.66	0.60	0.47	5.73	448.91	437.96	1.46
			79.76	17.01	10.35	2.74	0.00	284.26	21.27	22.57	8.71				
			1.99	0.70	0.45	0.07	0.00	4.66	0.60	0.24					
46	7.20	731	5.10	1.68	0.39	0.05	7.22	0.00	4.31	0.64	2.09	7.04	532.51	519.52	1.26
			102.20	20.41	8.97	1.96	0.00	262.91	22.69	100.38	9.83				
			2.55	0.84	0.39	0.05	0.00	4.31	0.64	1.05					
47	7.00	783	5.78	1.32	0.38	0.05	7.53	0.00	4.59	0.76	2.38	7.73	577.91	563.81	1.31
			115.83	16.04	8.74	1.96	0.00	279.99	26.94	114.31	10.52				
			2.89	0.66	0.38	0.05	0.00	4.59	0.76	1.19					
48	7.10	836	5.24	2.39	0.38	0.04	8.05	0.00	4.68	0.52	3.06	8.26	610.11	595.23	1.29
			105.01	29.04	8.74	1.56	0.00	285.48	18.43	146.97	10.97				
			2.62	1.20	0.38	0.04	0.00	4.68	0.52	1.53					
49	7.60	376	1.44	1.48	0.71	0.08	3.71	0.00	2.78	0.76	0.07	3.61	272.83	266.18	1.37
			28.86	17.98	16.33	3.13	0.00	169.58	26.94	3.36	5.83				
			0.72	0.74	0.71	0.08	0.00	2.78	0.76	0.04					
50	7.90	313	1.00	1.28	0.64	0.17	3.09	0.00	1.12	1.48	0.41	3.01	202.38	197.44	1.31
			20.04	15.55	14.72	6.65	0.00	68.32	52.47	19.69	4.76				
			0.50	0.64	0.64	0.17	0.00	1.12	1.48	0.21					
51	8.45	319	0.97	1.36	0.67	0.15	3.15	0.03	1.42	1.36	0.26	3.07	210.60	205.46	1.29
			19.44	16.52	15.41	5.87	0.90	86.62	48.21	12.49	4.92				
			0.49	0.68	0.67	0.15	0.02	1.42	1.36	0.13					
52	7.60	1044	6.08	2.62	1.17	0.17	10.04	0.00	5.11	1.16	4.04	10.31	752.45	734.10	1.33
			121.84	31.83	26.91	6.65	0.00	311.71	41.12	194.04	13.98				
			3.04	1.31	1.17	0.17	0.00	5.11	1.16	2.02					
53	7.80	3447	16.12	7.27	9.02	0.74	33.15	0.00	3.61	2.38	28.04	34.03	2356.58	2299.10	1.31
			323.04	88.33	207.46	28.93	0.00	220.21	84.37	1346.76	41.47				
			8.06	3.64	9.02	0.74	0.00	3.61	2.38	14.02					
54	7.15	640	3.71	2.02	0.52	0.07	6.32	0.00	4.57	0.44	1.15	6.16	474.77	463.19	1.28
			74.35	24.54	11.96	2.74	0.00	278.77	15.60	55.23	9.05				
			1.86	1.01	0.52	0.07	0.00	4.57	0.44	0.58					

Continuación...Concentración iónica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	pH	CE μScm ⁻¹	mmol _c L ⁻¹										RSE mgL ⁻¹	Σ ^{mgL⁻¹} Σ ^{mmoles}	% Error
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma			
55	7.05	888	4.99	2.80	0.90	0.08	8.77	0.00	4.23	1.76	2.56	8.55	616.25	601.22	1.27
			100.00	34.02	20.70	3.13	0.00	258.03	62.39	122.96					
			2.50	1.40	0.90	0.08	0.00	4.23	1.76	1.28					
56	7.35	1097	6.44	2.84	1.15	0.12	10.55	0.00	6.54	0.72	3.57	10.83	810.41	790.64	1.31
			129.06	34.51	26.45	4.69	0.00	398.94	25.52	171.47					
			3.22	1.42	1.15	0.12	0.00	6.54	0.72	1.79					
57	7.30	1253	8.19	3.16	0.87	0.08	12.30	0.00	8.41	0.82	2.82	12.05	925.76	903.18	1.03
			164.13	38.39	20.01	3.13	0.00	513.01	29.07	135.44					
			4.10	1.58	0.87	0.08	0.00	8.41	0.82	1.41					
58	7.50	204	0.73	0.80	0.39	0.09	2.01	0.00	1.31	0.55	0.10	1.96	144.58	141.05	1.26
			14.63	9.72	8.97	3.52	0.00	79.91	19.50	4.80					
			0.37	0.40	0.39	0.09	0.00	1.31	0.55	0.05					
59	7.50	721	3.87	2.74	0.46	0.05	7.12	0.00	3.75	0.84	2.35	6.94	507.15	494.78	1.28
			77.55	33.29	10.58	1.96	0.00	228.75	29.78	112.87					
			1.94	1.37	0.46	0.05	0.00	3.75	0.84	1.18					
60	7.20	715	4.01	2.32	0.50	0.05	6.88	0.00	4.36	0.56	2.14	7.06	523.37	510.60	1.29
			80.36	28.19	11.50	1.96	0.00	265.96	19.85	102.78					
			2.01	1.16	0.50	0.05	0.00	4.36	0.56	1.07					
61	7.35	742	3.66	3.02	0.57	0.08	7.33	0.00	4.26	0.88	2.01	7.15	526.73	513.88	1.24
			73.35	36.69	13.11	3.13	0.00	259.86	31.20	96.54					
			1.83	1.51	0.57	0.08	0.00	4.26	0.88	1.01					
62	7.35	992	4.15	5.32	0.30	0.03	9.80	0.00	4.71	0.54	4.35	9.60	688.04	671.26	1.03
			83.17	64.64	6.90	1.17	0.00	287.31	19.14	208.93					
			2.08	2.66	0.30	0.03	0.00	4.71	0.54	2.18					
63	7.20	1253	7.99	2.98	1.00	0.08	12.05	0.00	4.81	0.82	6.78	12.41	892.34	870.58	1.47
			160.12	36.21	23.00	3.13	0.00	293.41	29.07	325.64					
			4.00	1.49	1.00	0.08	0.00	4.81	0.82	3.39					
64	7.50	731	3.68	2.82	0.49	0.05	7.04	0.00	4.44	0.74	2.04	7.22	529.20	516.29	1.26
			73.75	34.26	11.27	1.96	0.00	270.84	26.23	97.98					
			1.84	1.41	0.49	0.05	0.00	4.44	0.74	1.02					
65	7.40	486	2.34	1.60	0.76	0.10	4.80	0.00	3.81	0.68	0.16	4.65	360.72	351.92	1.59
			46.89	19.44	17.48	3.91	0.00	232.41	24.11	7.68					
			1.17	0.80	0.76	0.10	0.00	3.81	0.68	0.08					
66	7.30	1044	7.17	2.14	0.90	0.10	10.31	0.00	3.40	0.84	5.80	10.04	727.80	710.05	1.33
			143.69	26.00	20.70	3.91	0.00	207.40	29.78	278.57					
			3.59	1.07	0.90	0.10	0.00	3.40	0.84	2.90					
67	7.10	1697	9.46	5.69	1.01	0.10	16.26	0.00	5.74	0.64	10.38	16.76	1186.16	1157.23	1.51
			189.58	69.13	23.23	3.91	0.00	350.14	22.69	498.55					
			4.73	2.85	1.01	0.10	0.00	5.74	0.64	5.19					
68	7.20	272	1.38	0.94	0.26	0.11	2.69	0.00	1.90	0.62	0.10	2.62	196.84	192.04	1.32
			27.66	11.42	5.98	4.30	0.00	115.90	21.98	4.80					
			0.69	0.47	0.26	0.11	0.00	1.90	0.62	0.05					
69	7.85	890	4.07	3.52	0.96	0.24	8.79	0.00	3.73	0.94	3.90	8.57	619.06	603.96	1.27
			81.56	42.77	22.08	9.38	0.00	227.53	33.32	187.32					
			2.04	1.76	0.96	0.24	0.00	3.73	0.94	1.95					
70	7.70	1097	5.38	4.00	0.92	0.23	10.53	0.00	4.77	1.24	4.83	10.84	772.32	753.48	1.45
			107.82	48.60	21.16	8.99	0.00	290.97	43.96	231.98					
			2.69	2.00	0.92	0.23	0.00	4.77	1.24	2.42					
71	7.20	1645	11.06	4.10	0.99	0.10	16.25	0.00	3.84	0.80	11.20	15.84	1126.15	1098.68	1.28
			221.64	49.82	22.77	3.91	0.00	234.24	28.36	537.94					
			5.53	2.05	0.99	0.10	0.00	3.84	0.80	5.60					
72	7.35	2000	10.50	7.66	1.01	0.08	19.25	0.00	4.77	0.68	14.31	19.76	1365.55	1332.24	1.31
			210.42	93.07	23.23	3.13	0.00	290.97	24.11	687.31					
			5.25	3.83	1.01	0.08	0.00	4.77	0.68	7.16					

Continuación...Concentración iónica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	pH	CE μScm^{-1}	$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$										RSE mgL^{-1}	$\sum \text{mgL}^{-1}$ $\sum \text{mmoles}$	% Error
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma			
73	7.40	574	3.02	2.00	0.55	0.10	5.67	0.00	1.06	2.02	2.45	5.53	364.20	355.32	1.25
			60.52	24.30	12.65	3.91	0.00	64.66	71.61	117.67					
			1.51	1.00	0.55	0.10	0.00	1.06	2.02	1.23		7.47			
74	7.30	1906	11.60	6.06	1.06	0.10	18.82	0.00	3.18	0.64	14.52	18.34	1279.66	1248.45	1.29
			232.46	73.63	24.38	3.91	0.00	193.98	22.69	697.40		21.07			
			5.80	3.03	1.06	0.10	0.00	3.18	0.64	7.26					
75	7.55	334	1.49	1.20	0.47	0.06	3.22	0.00	2.51	0.52	0.26	3.29	247.67	241.63	1.08
			29.86	14.58	10.81	2.35	0.00	153.11	18.43	12.49		5.04			
			0.75	0.60	0.47	0.06	0.00	2.51	0.52	0.13					
76	7.45	1008	6.29	2.81	0.80	0.07	9.97	0.00	2.52	0.76	6.43	9.71	687.59	670.82	1.32
			126.05	34.14	18.40	2.74	0.00	153.72	26.94	308.83		11.93			
			3.15	1.41	0.80	0.07	0.00	2.52	0.76	3.22					
77	7.50	439	2.65	0.44	1.17	0.08	4.34	0.00	3.01	0.72	0.50	4.23	329.70	321.66	1.28
			53.11	5.35	26.91	3.13	0.00	183.61	25.52	24.02		6.78			
			1.33	0.22	1.17	0.08	0.00	3.01	0.72	0.25					
78	7.40	783	4.72	1.86	0.92	0.08	7.58	0.00	4.41	0.68	2.65	7.74	575.93	561.88	1.04
			94.59	22.60	21.16	3.13	0.00	269.01	24.11	127.28		10.71			
			2.36	0.93	0.92	0.08	0.00	4.41	0.68	1.33					
Media	7.39	877	4.54	2.68	1.24	0.13	8.60	0.01	3.95	0.95	3.60	8.50	619.95	604.83	1.29
			91.06	32.51	28.61	5.21	0.01	240.67	33.57	173.04		11.69			
			2.27	1.34	1.24	0.13	0.00	3.95	0.95	1.80					
Mediana	7.35	718	3.63	2.01	0.89	0.09	7.00	0.00	3.78	0.84	2.02	6.97	513.35	500.83	1.29
			72.75	24.42	20.47	3.32	0.00	230.58	29.78	96.78		9.91			
			1.82	1.01	0.89	0.09	0.00	3.78	0.84	1.01					
Moda	7.00	731	2.91	0.80	1.01	0.08	4.13	0.00	2.51	0.84	0.08	4.02	462.51	6.78	1.28
			58.32	9.72	23.23	3.13	0.00	153.11	29.78	3.84					
			1.46	0.40	1.01	0.08	0.00	2.51	0.84	0.04					
DEST	0.33	672	3.84	2.17	1.41	0.17	6.57	0.05	2.28	0.51	4.89	6.53	462.51	451.23	0.14
			76.93	26.32	32.49	6.74	0.10	139.19	18.21	235.09		8.06			
			1.92	1.08	1.41	0.17	0.00	2.28	0.51	2.45					
CV	0.04	0.77	0.84	0.81	1.14	1.30	0.76	8.23	0.58	0.54	1.36	0.77	0.75	0.75	0.11
			0.84	0.81	1.14	1.30	8.83	0.58	0.54	1.36					
			0.84	0.81	1.14	1.30	8.83	0.58	0.54	1.36					

5.2 Comprobación de la exactitud de los resultados

Para verificar la exactitud de los análisis que se realizaron en las muestras, se aplicaron varios procedimientos, entre ellos, el balance de anión-cación, total de sólidos disueltos, conductividad eléctrica, así como las relaciones entre estas determinaciones.

La primera verificación de los datos es mediante el porcentaje de error que existió entre la suma de aniones y cationes. APHA (1995), indica que la suma de cationes debe ser aproximadamente igual a la suma de los aniones, porque en términos rigurosos, las soluciones salinas son electroneutrales y se ha establecido valores permisibles de la diferencia en las determinaciones analíticas, estos se encuentran en el Cuadro 18.

El porcentaje de error en las determinaciones analíticas se calcula con la siguiente expresión, en $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$:

$$\%Dif = \frac{\sum_{cationes} - \sum_{aniones}}{\sum_{cationes} + \sum_{aniones}} \times 100$$

Cuadro 18. Porcentaje permisible de diferencia en los resultados analíticos (APHA, 1995).

Suma de cationes $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$	% de Diferencia aceptable
0.00 - 3.00	± 0.20
3.00 - 10.00	± 2.00
20.00 - 800.00	± 2.50

Se tiene un error promedio de 1.28 % para el primer muestreo y para el segundo 0.58 %, de acuerdo al cuadro anterior, el porcentaje de error están dentro del intervalo permisible, lo cual significa que los valores de las determinaciones analíticas de la investigación son correctos.

Otra forma en que se evaluó la exactitud de los resultados fue a través de la relación de la suma de cationes y aniones y la CE.

Richards *et al.* (1959), recomienda que el número del cociente que resulta de dividir la CE en $\mu\text{S cm}^{-1}$ entre el total de cationes en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, debe ser aproximadamente 100, para la mayoría de las aguas, la relación varía de 80 a 110 dependiendo del tipo de sal. Para aguas con bicarbonatos o sulfatos y ricas en calcio y magnesio la relación baja hasta 80 y para aguas con cloruros y ricas en sodio llega hasta 110.

La comprobación de los valores analíticos mediante esta recomendación, se hizo con las medias obtenidas en cada muestreo, el resultado para el primer muestreo es 102.62 y para el segundo muestreo 102.66.

Para graficar la relación de la suma de aniones y cationes en función de la CE se realizaron las Figuras 10 y 11 para el primer muestreo obteniendo una pendiente media de 0.009745 y las Figuras 12 y 13 para el segundo muestreo, con una pendiente de 0.009747.

El resultado de la pendiente es igual al que resulta de la operación inversa a la recomendación, esto es dividir el total de cationes en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ entre CE en $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Para comprobar que los dos muestreos estén dentro del intervalo permisible, se graficaron los 144 datos, obteniendo un valor de 0.00983 en cationes y 0.00967 en aniones, como se puede observar en las Figuras 14 y 15, En base a la recomendación se tiene 101.7 para cationes y 101.53 aniones, lo cual indica que están dentro del intervalo permisible.

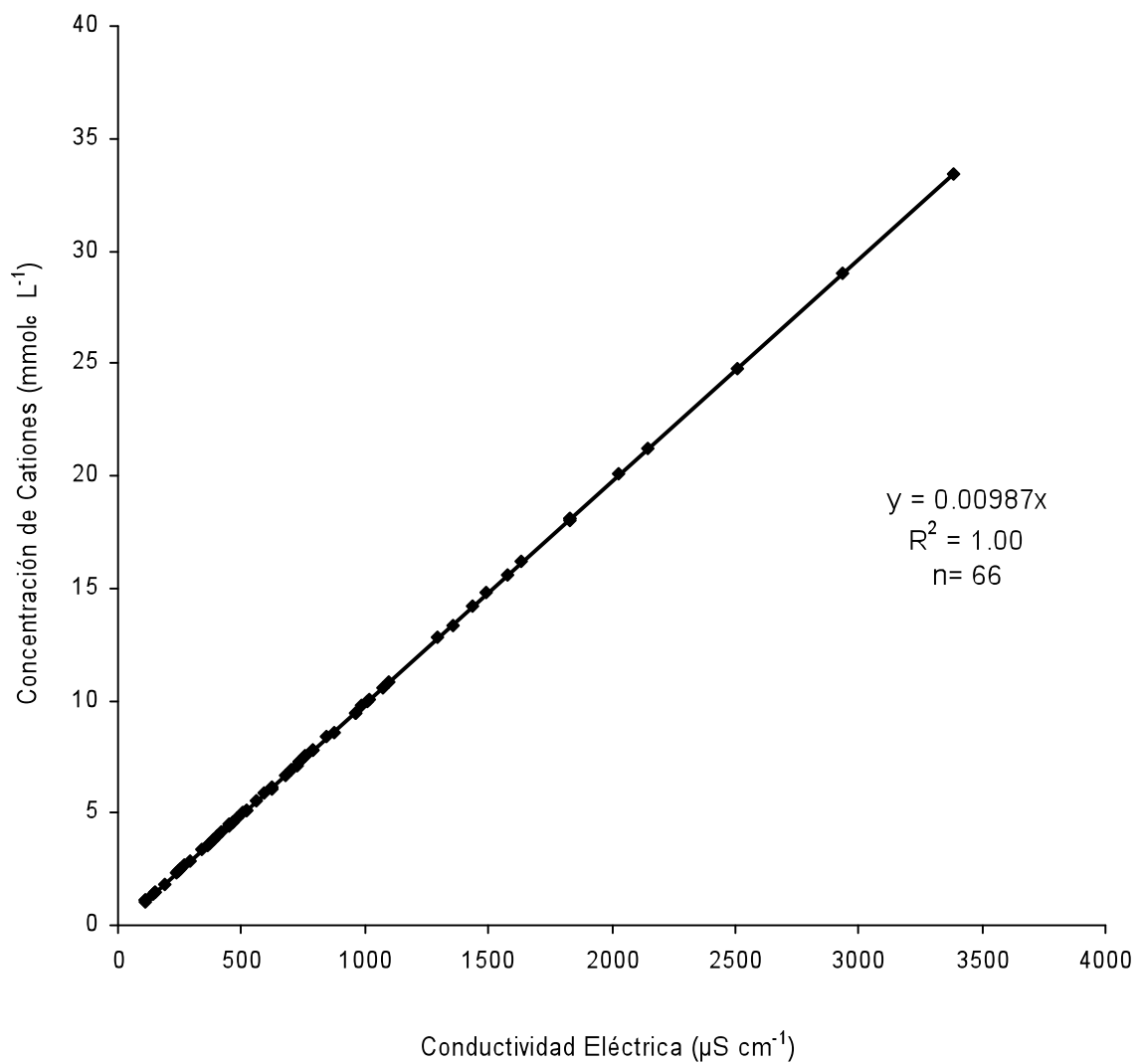


Figura 10. Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

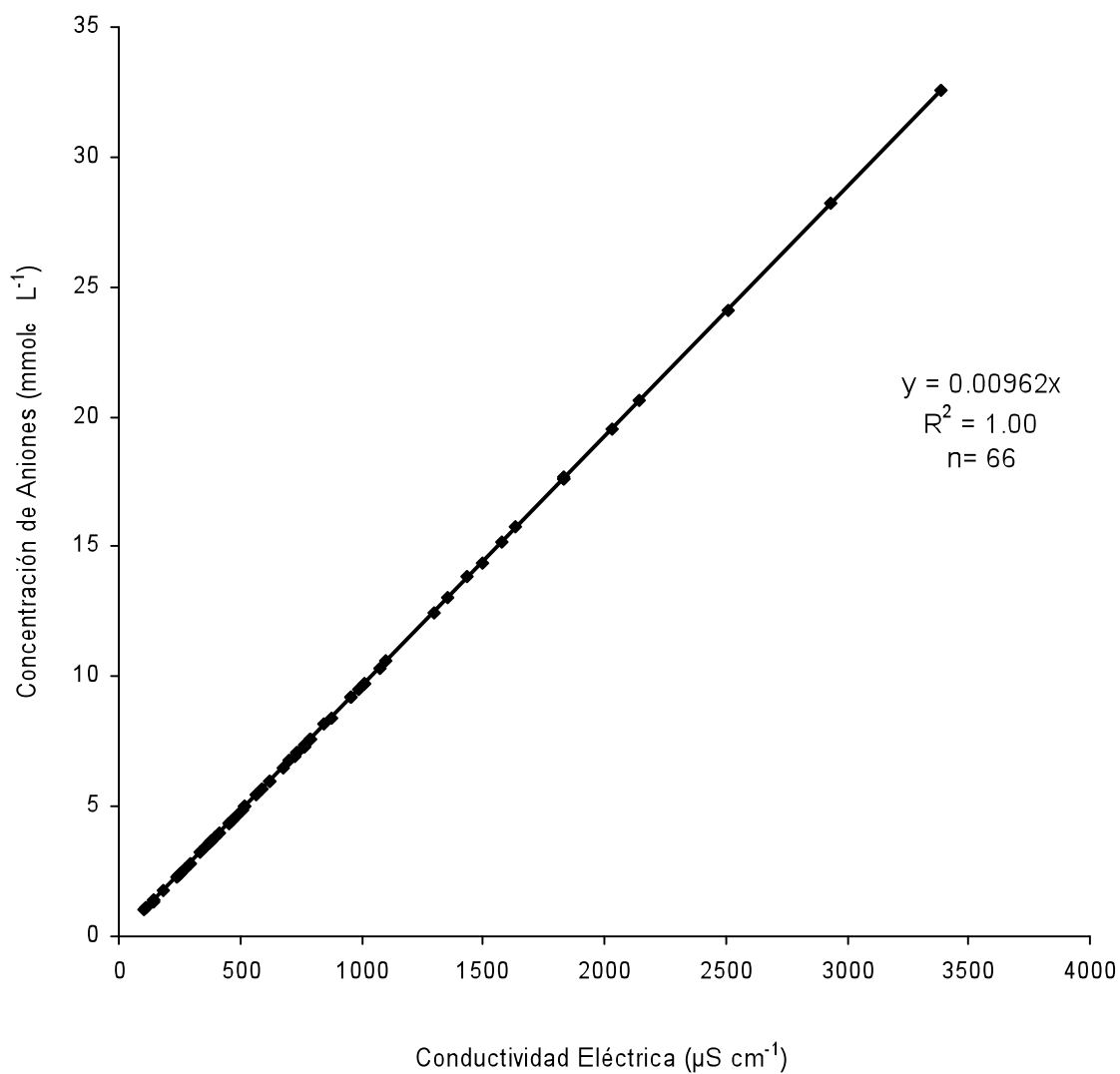


Figura 11. Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

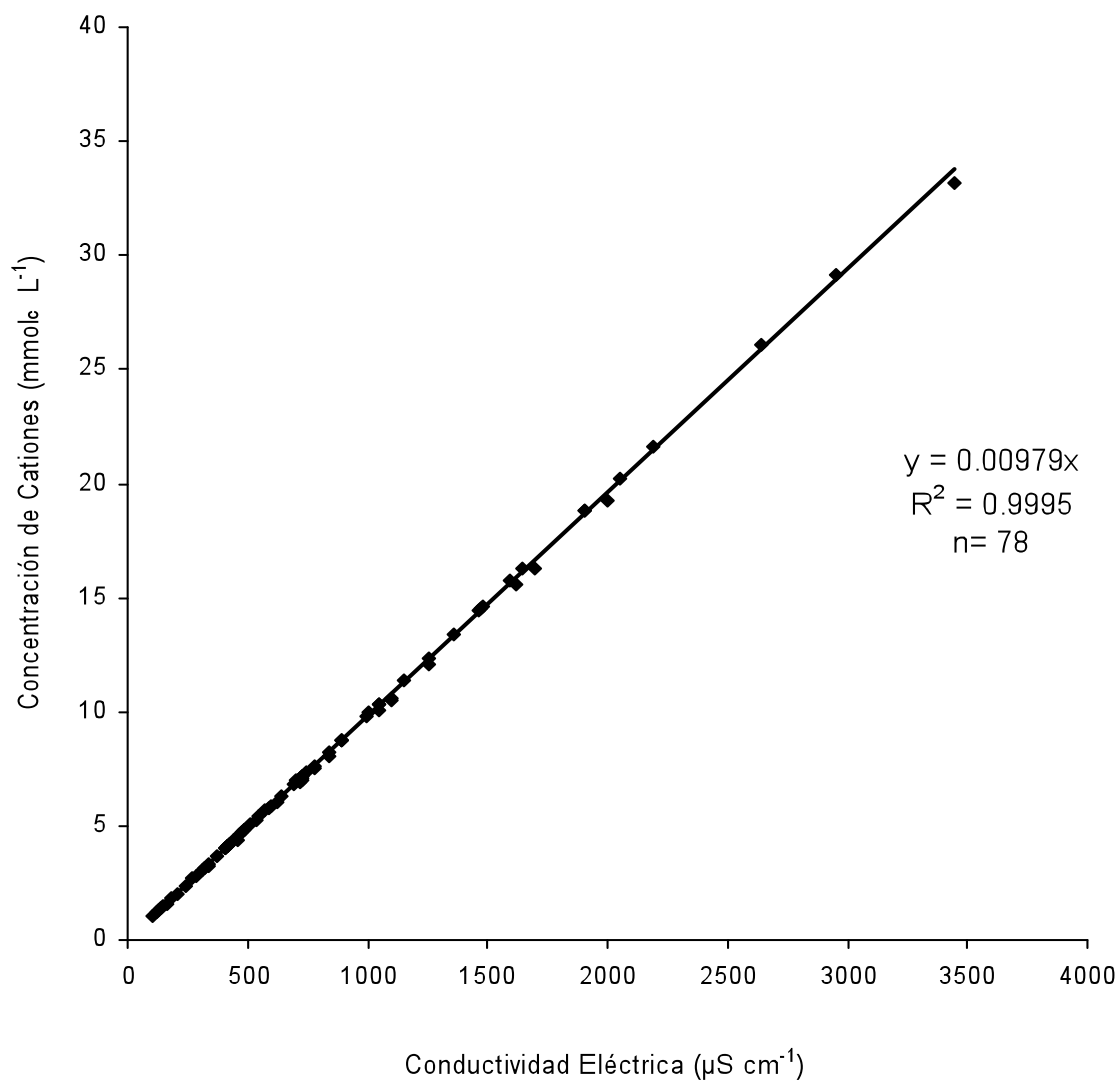


Figura 12. Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

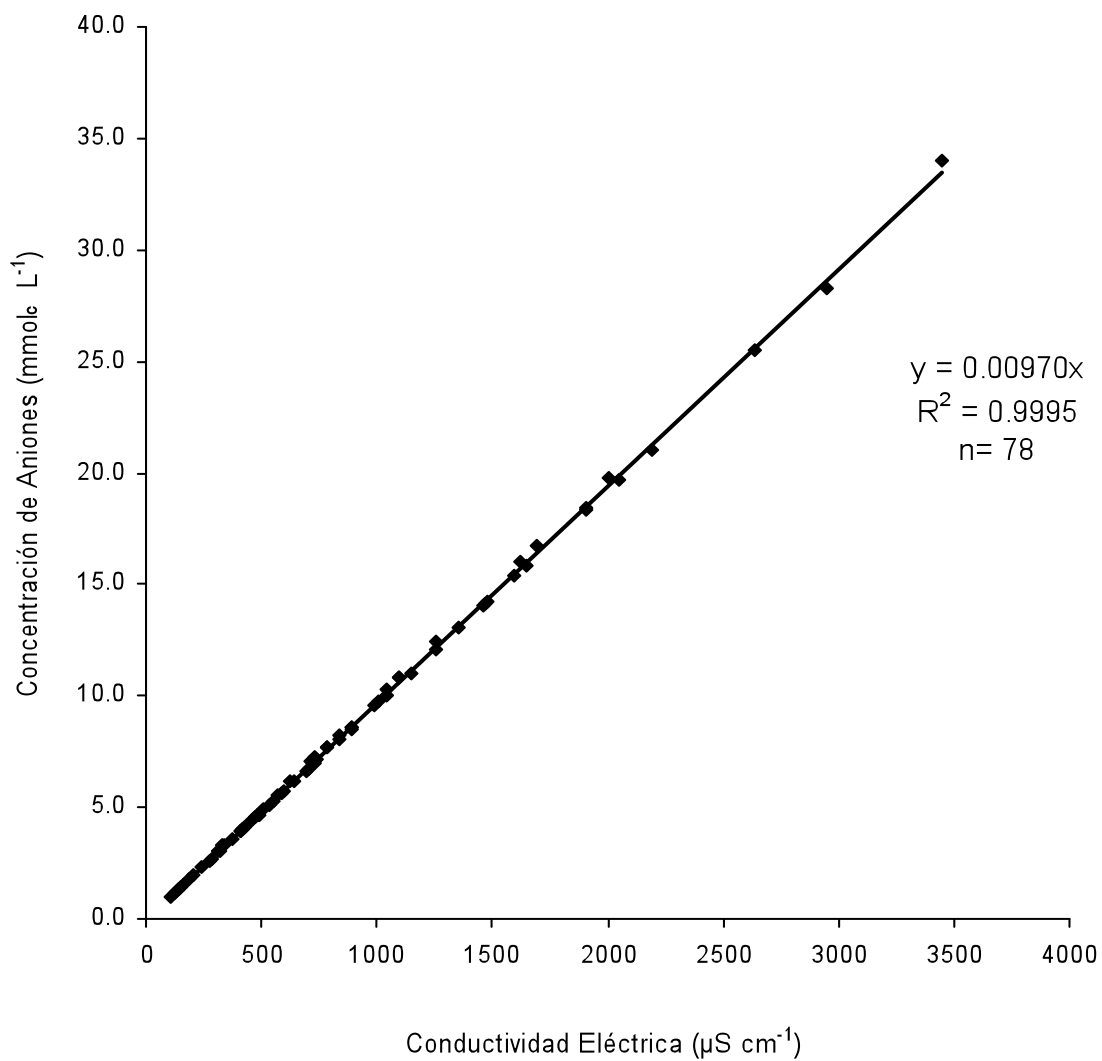


Figura 13. Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

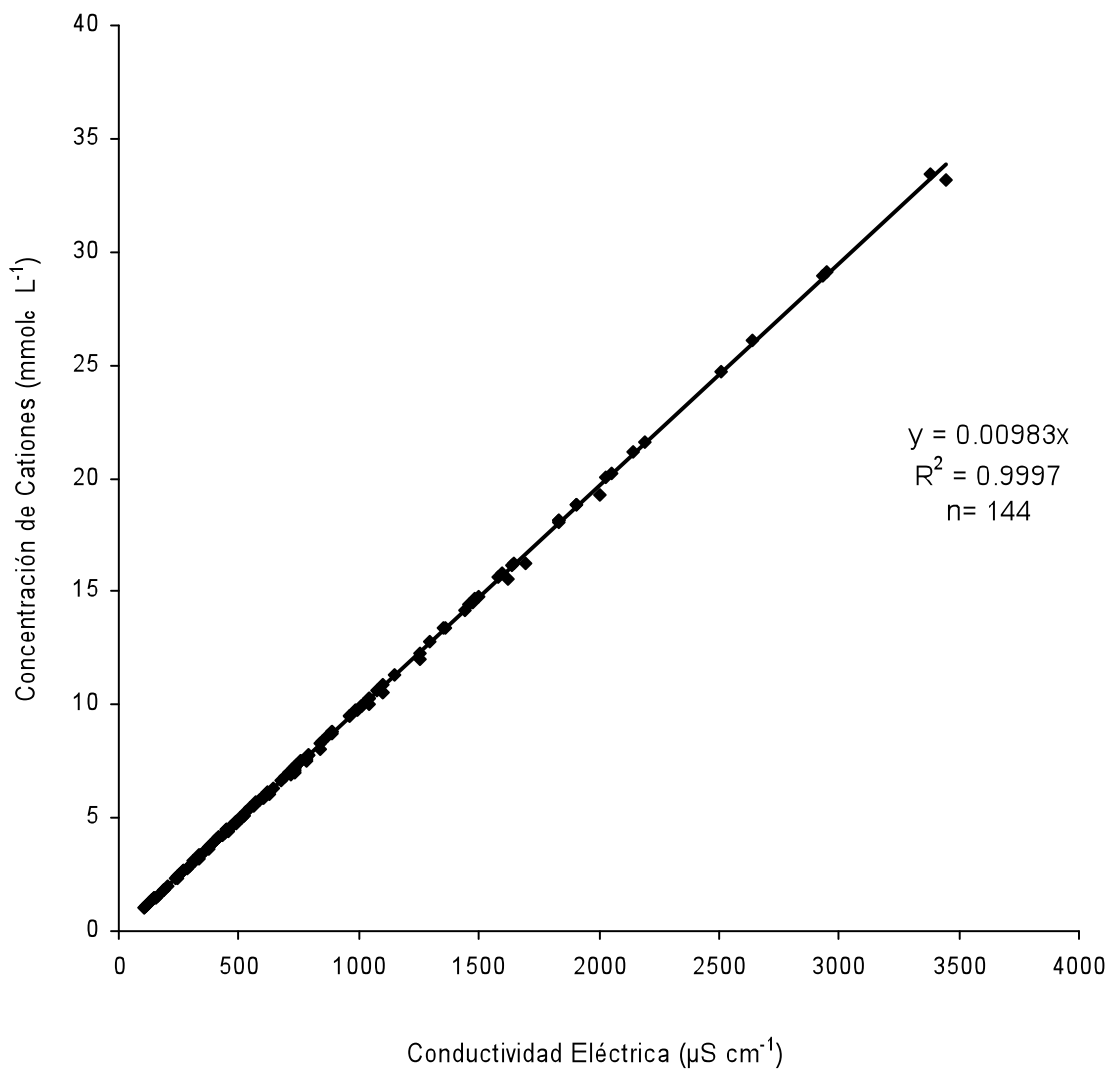


Figura 14. Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica de ambos muestreos de la red hidrográfica del estado de Morelos.

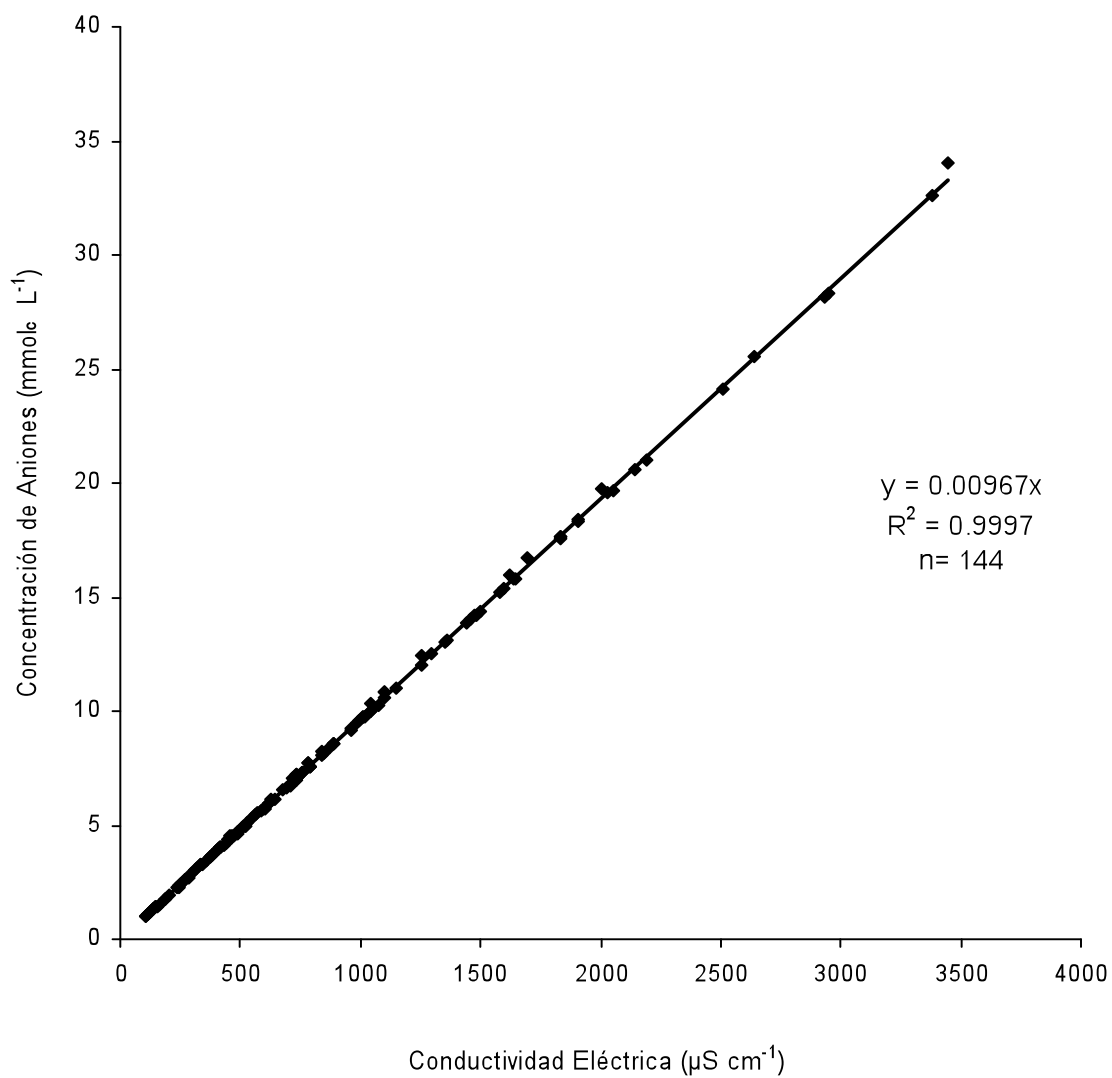


Figura 15. Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica de ambos muestreos de la red hidrográfica del estado de Morelos.

Richards *et al.* (1959) indicaron una segunda recomendación para comprobar los resultados analíticos obtenidos, ésta se refiere al valor numérico del cociente de dividir los sólidos totales disueltos en mg L^{-1} entre la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$, debe ser aproximadamente 0.64.

Los residuos sólidos disueltos al igual que la conductividad eléctrica son estimadores cuantitativos de la concentración total de sales disueltas en las aguas para riego. La conductividad eléctrica se utiliza para indicar la concentración total de componentes disociados en las aguas, con ello se tiene una aproximación al contenido de los sólidos disueltos, esto se expresa en la siguiente ecuación.

$$\text{STD} = 0.640 * \text{CE}$$

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

CE= Conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$

0.640= Se obtiene de la regresión lineal de los datos experimentales

El valor recomendado para verificar los resultados es de 0.64, pero puede variar de 0.550 a 0.750 dependiendo del tipo de sal.

La relación entre sólidos totales y la conductividad eléctrica del primer muestreo fue de 0.666 y del segundo muestreo 0.683, ambos muestreos están dentro del intervalo recomendado y se presenta en la Figura 16 y 17 respectivamente.

Para comprobar que todos los datos analíticos estén dentro del rango recomendado se graficaron los 144 puntos, obteniendo un valor de 0.675, esto se observa en la Figura 18, de lo anterior se concluye que las determinaciones están correctas ya que se encuentran dentro del intervalo recomendado.

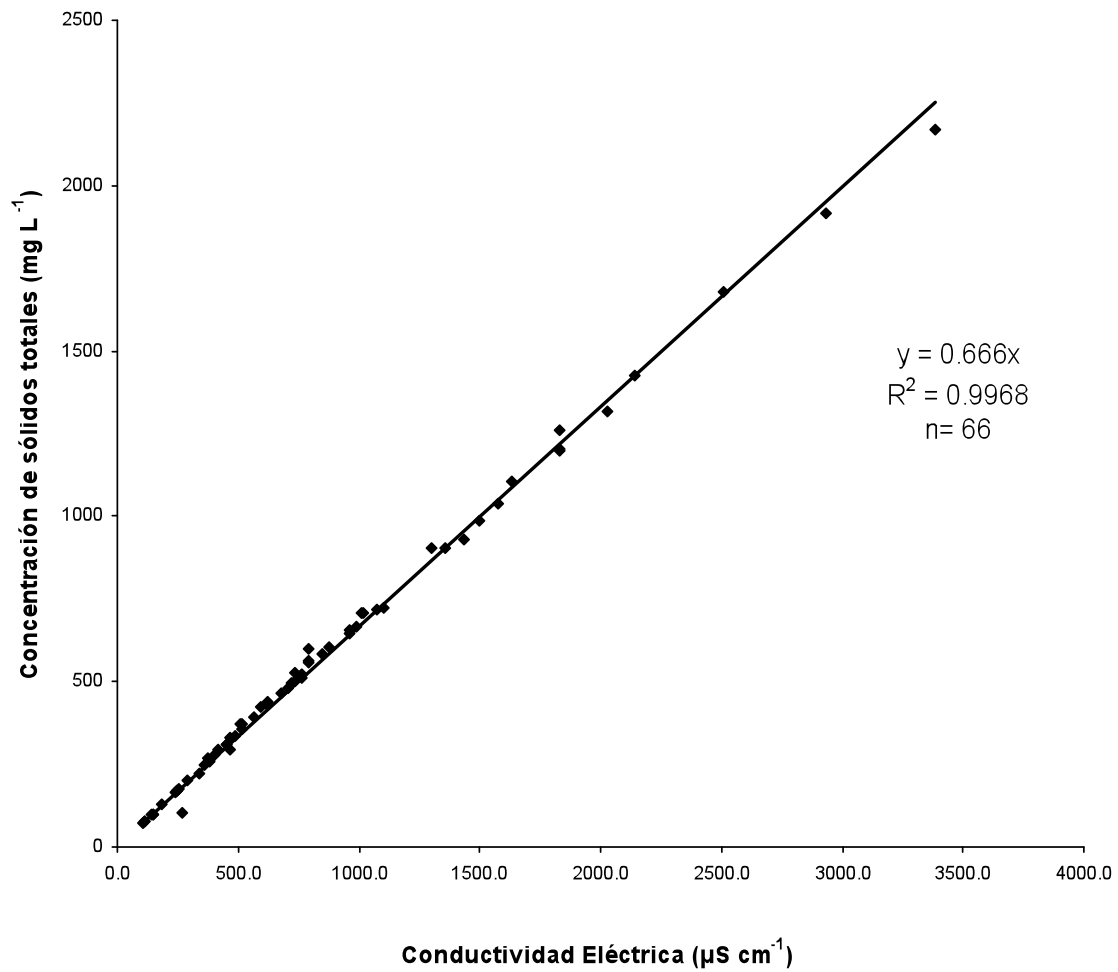


Figura 16. Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica en el primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

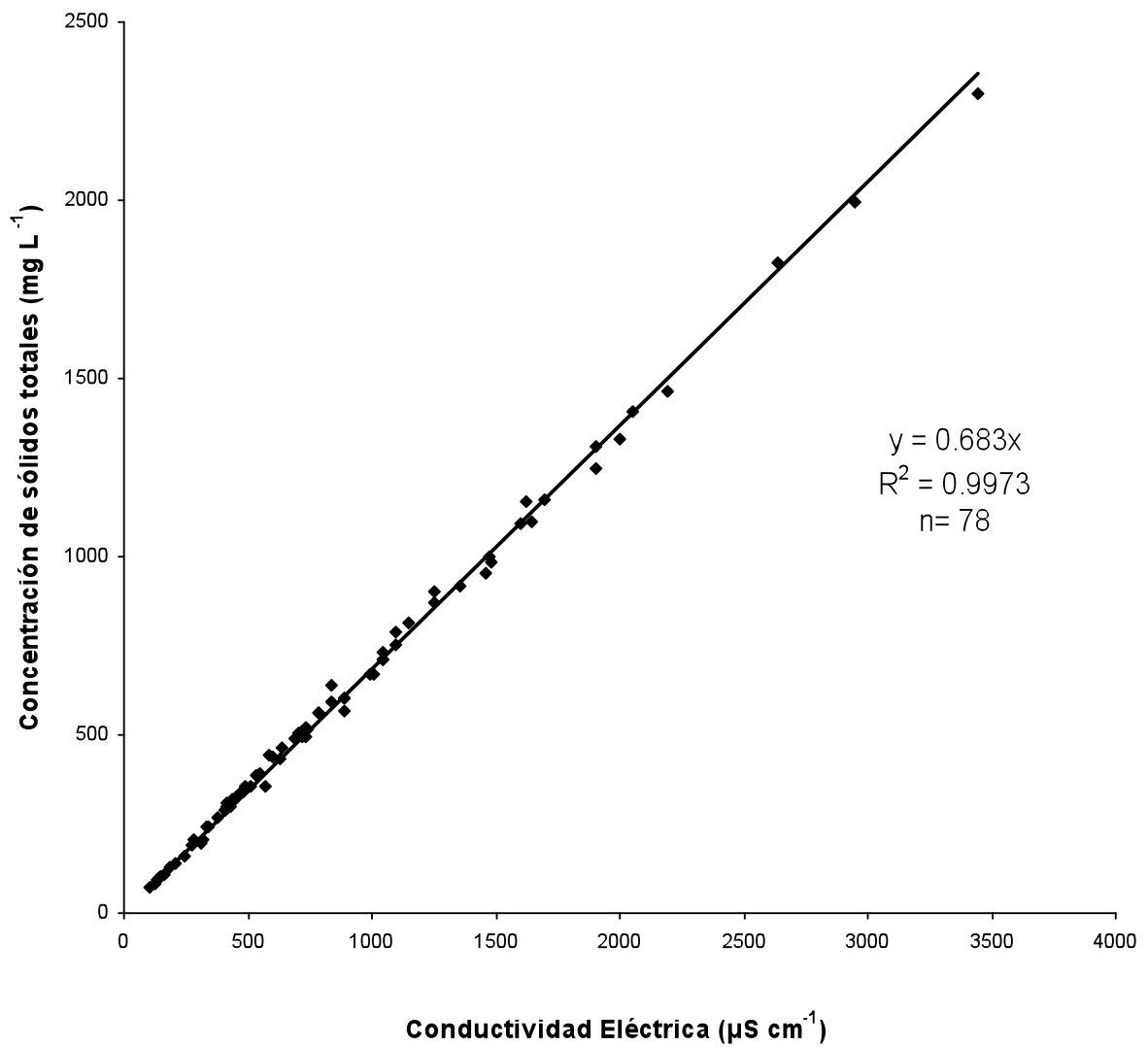


Figura 17. Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica en el segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

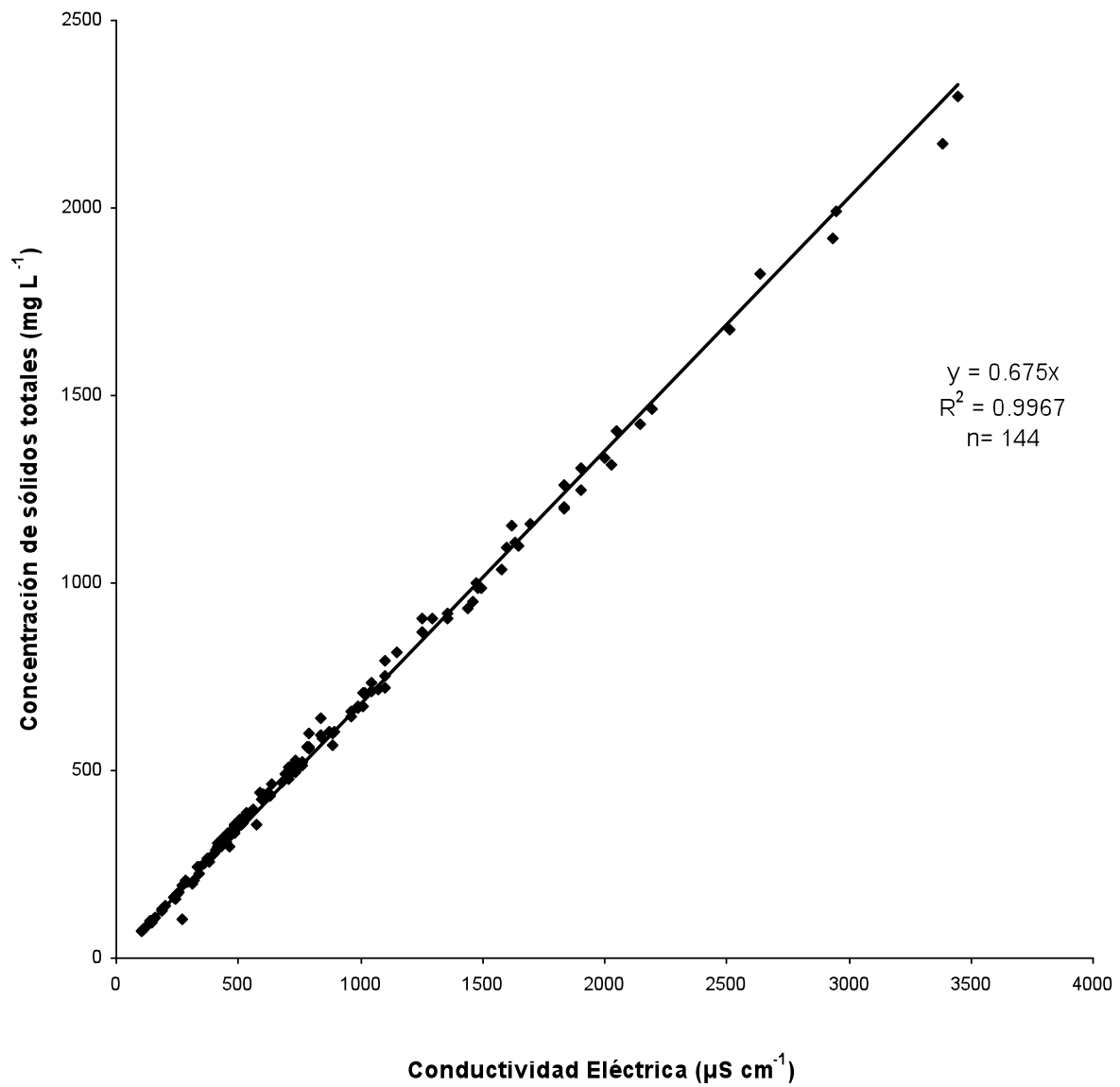


Figura 18. Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica de ambos muestreos de la red hidrográfica del estado de Morelos.

Una segunda recomendación de APHA (1995), para la comprobación de datos analíticos se realiza mediante la comparación de la concentración total de sólidos disueltos medidos y la concentración de sólidos disueltos calculados, mediante la siguiente expresión:

$$1.0 < \frac{STD_{medidos}}{STD_{calculados}} < 1.2$$

Los sólidos totales disueltos medidos (STD) se obtienen del promedio de la suma de los iones en mg L^{-1} de cada punto de muestreo. Para obtener los STD calculados, se procede de la siguiente manera: se toma la media de conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ y se multiplica por el coeficiente (a) que se obtuvo al graficar la relación de la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos. Ambas determinaciones deben estar en un intervalo entre 0.55 y 0.7 para que sean confiables los datos y la concentración total de sólidos disueltos medidos debe ser mayor a la calculada, de no ser si las muestras deben ser analizadas nuevamente.

Para el caso del primer muestreo se tiene **1.01** y para el segundo muestreo **1.04**, por lo que se demuestra que los resultados analíticos están correctos, ya que están dentro del rango permisible de 1.0 a 1.2 .

La tercera comprobación de los datos es la comparación entre la conductividad eléctrica medida y la conductividad eléctrica calculada, mediante la siguiente expresión:

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

La $CE_{calculada}$ se obtiene de la gráfica de la conductividad eléctrica en función de la suma de aniones o cationes en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, la CE_{medida} es el promedio de las mediciones en cada punto de muestreo.

Para el primer muestreo se obtuvo **1.01** y para el segundo muestreo **1.00**, los resultados analíticos están correctos, ya que están dentro del rango permisible de 1.0 a 1.1.

5.3 Distribución de frecuencias de los datos analíticos

Con la finalidad de conocer la frecuencia con que se repitieron los valores de la conductividad eléctrica dentro de un intervalo establecido, para el primer muestreo se elaboro la Figura 19.

Se obtuvo que el 10.6% de las aguas tuvieron una CE $< 200 \mu\text{S cm}^{-1}$, el 9% entre $200-300 \mu\text{S cm}^{-1}$, el 7.6% entre $300-400 \mu\text{S cm}^{-1}$, el 10.6% entre $400-500 \mu\text{S cm}^{-1}$, el 7.6% entre $500-600 \mu\text{S cm}^{-1}$, el 4.5% entre $600-700 \mu\text{S cm}^{-1}$.

El 50% de las estaciones de muestreo presentaron una conductividad eléctrica mayor a $700 \mu\text{S cm}^{-1}$, de las cuales la mitad fueron aguas subterráneas, que de acuerdo a Grasby y Betcher (2002) y Diop y Tijani (2008), el enriquecimiento de sales en aguas subterráneas que circulan por materiales calcáreos, se debe al proceso de disolución de rocas como caliza, dolomita, yeso y anhidritas. Las demás estaciones se realizaron en puntos cercanos a centros urbanos, lo que nos indica que el aumento de la conductividad, además de la disolución de las calizas, se debe a la descarga de aguas residuales.

La distribución de las frecuencias de los sólidos totales disueltos del primer muestreo indico que el 6.1% de las estaciones contienen entre $0-100 \text{ mg L}^{-1}$, el 12.1% entre $100-200 \text{ mg L}^{-1}$, al igual que en los intervalos $200-300$ y $300-400 \text{ mg L}^{-1}$, el 9% entre $400-500 \text{ mg L}^{-1}$. El 48.5% de las estaciones presentan concentraciones mayores a 500 mg L^{-1} , esto se obseva en la Figura 20.

Huízar *et al.* (2001) indicaron que valores bajos de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos corresponden a los sitios ubicados en la zonas de recarga, y conforme se acercan a la planicie el contenido va aumentando. Los datos obtenidos en esta investigación coinciden con dicha tendencia y se pueden observar en la Figura 23 y 24 en las cuales se presenta la distribución de la conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos.

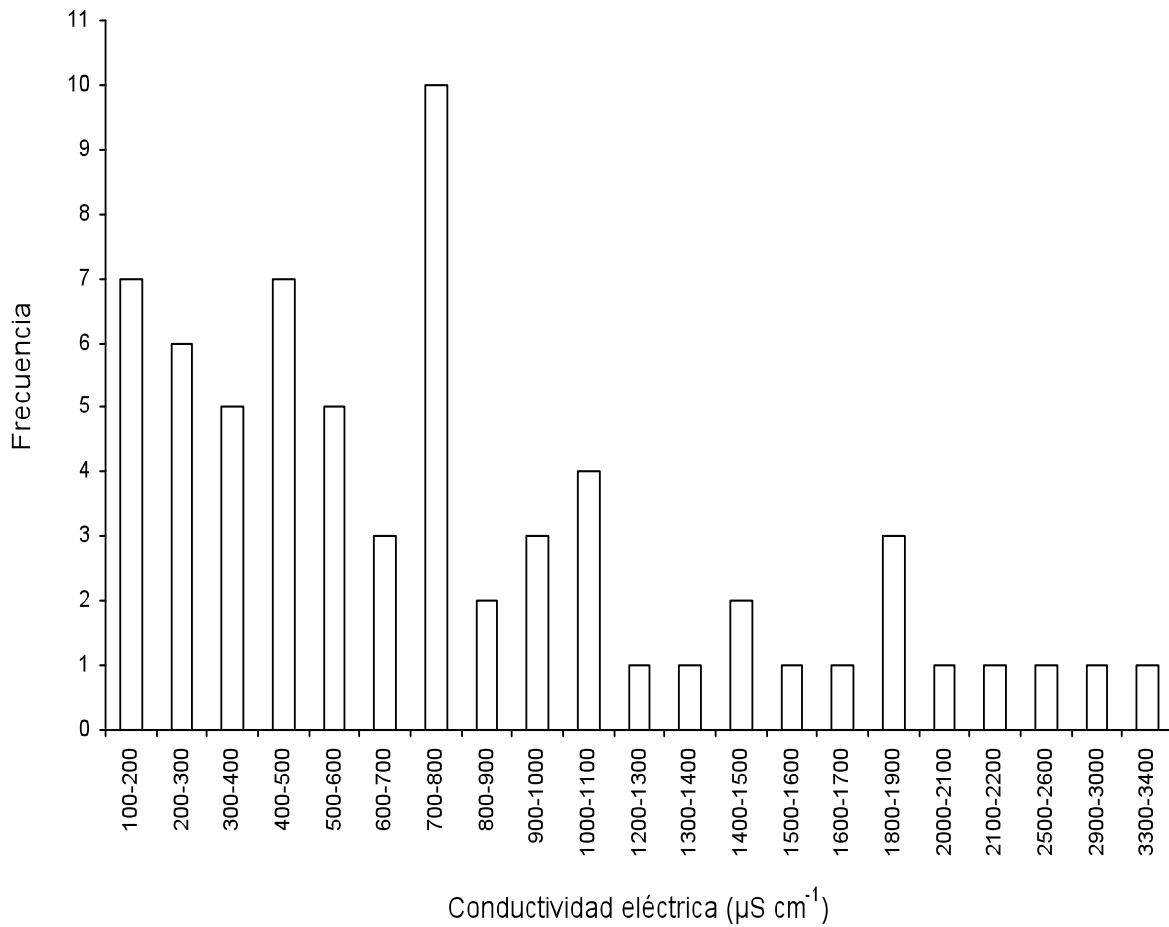


Figura 19. Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

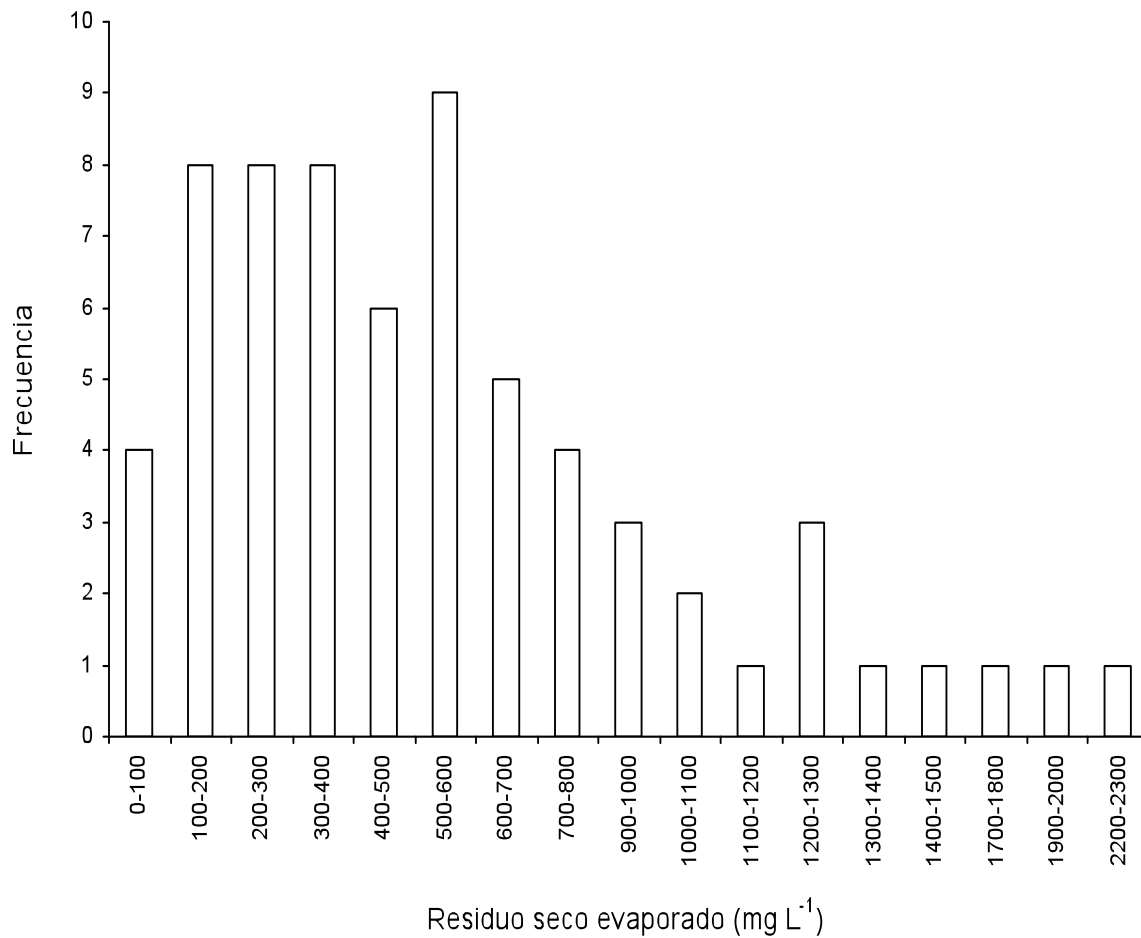


Figura 20. Distribución de frecuencias de la concentración total de sólidos disueltos del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

En la Figura 21, se aprecia la distribución de las frecuencias de la conductividad eléctrica del segundo muestreo, se tiene que el 47.4% de las muestras tienen una conductividad eléctrica menor a $700 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Las frecuencias se encuentran distribuidas de la siguiente manera: el 8.9% entre $100-200 \mu\text{S cm}^{-1}$, el 5.1% entre $200-300 \mu\text{S cm}^{-1}$, el 6.4% entre $300-400 \mu\text{S cm}^{-1}$, el 15.4% entre $400-500 \mu\text{S cm}^{-1}$, el 6.4% entre $500-600 \mu\text{S cm}^{-1}$, el 5.1% entre $600-700 \mu\text{S cm}^{-1}$.

El 52.6% presentan una conductividad eléctrica superior a $700 \mu\text{S cm}^{-1}$, de estas el 44% son aguas subterráneas. Cabrera *et al.* (2002) y Ramos *et al.* (2007) sugieren que la presencia de valores altos de CE en las aguas indica tiempos de residencia mayores en el acuífero y/o grandes distancias de recorrido.

La Figura 22 muestra la distribución de las frecuencias de los sólidos totales disueltos del segundo muestreo, se obtuvo que el 3.8% de las estaciones de muestreo están entre $0-100 \text{ mg L}^{-1}$, el 9% entre $100-200 \text{ mg L}^{-1}$, el 10.3% entre $200-300 \text{ mg L}^{-1}$, el 17.9% entre $300-400 \text{ mg L}^{-1}$, el 5.1% entre $400-500 \text{ mg L}^{-1}$.

El 53.8% presentan arriba de 500 mg L^{-1} , estas aguas son las antes citadas en la conductividad eléctrica, que presentan $\text{CE} < 700 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Los mapas de la distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos del área de estudio se realizaron con los valores observados en los dos muestreos, en el programa Arc View (Figura 23 y 24).

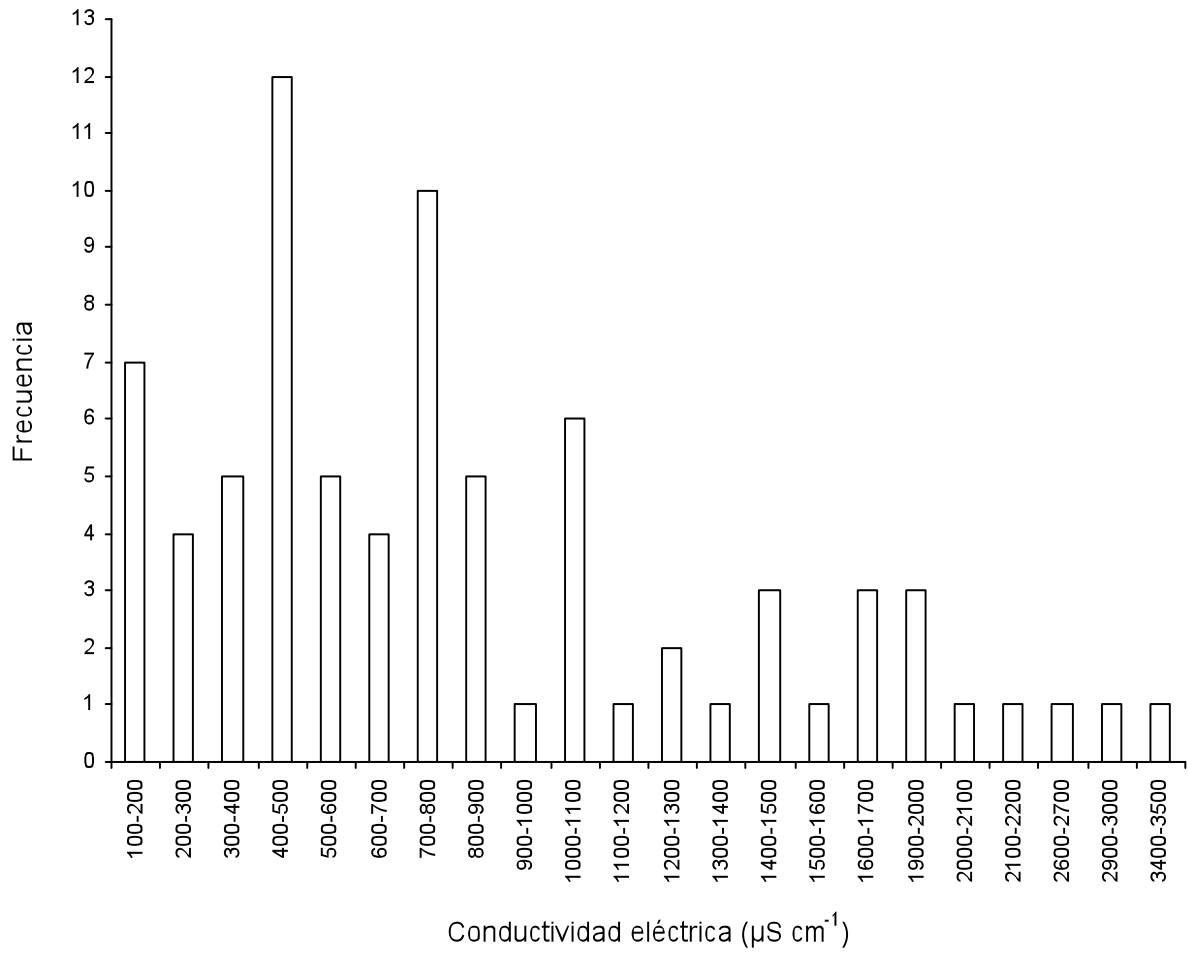


Figura 21. Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

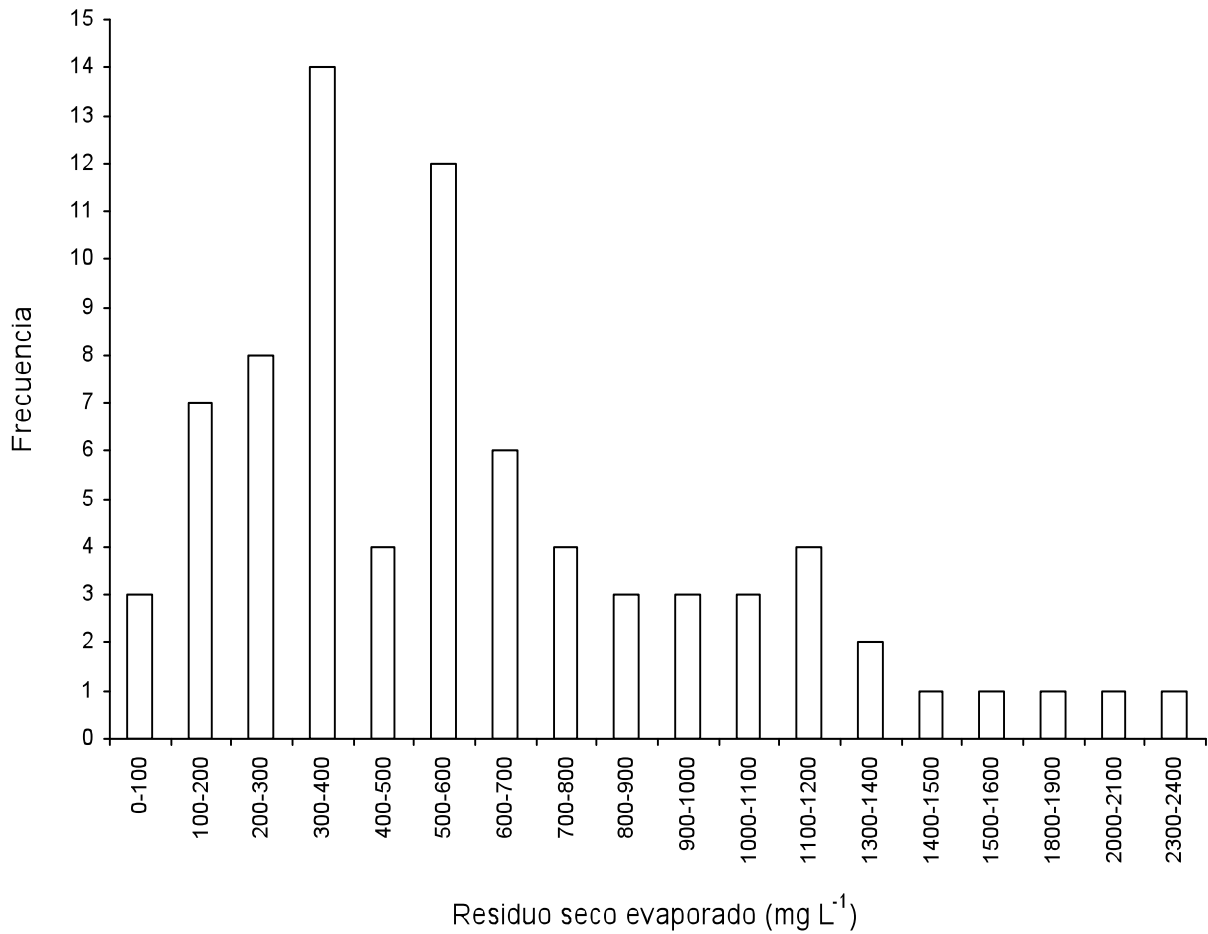


Figura 22. Distribución de frecuencias de la concentración total de sólidos disueltos del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

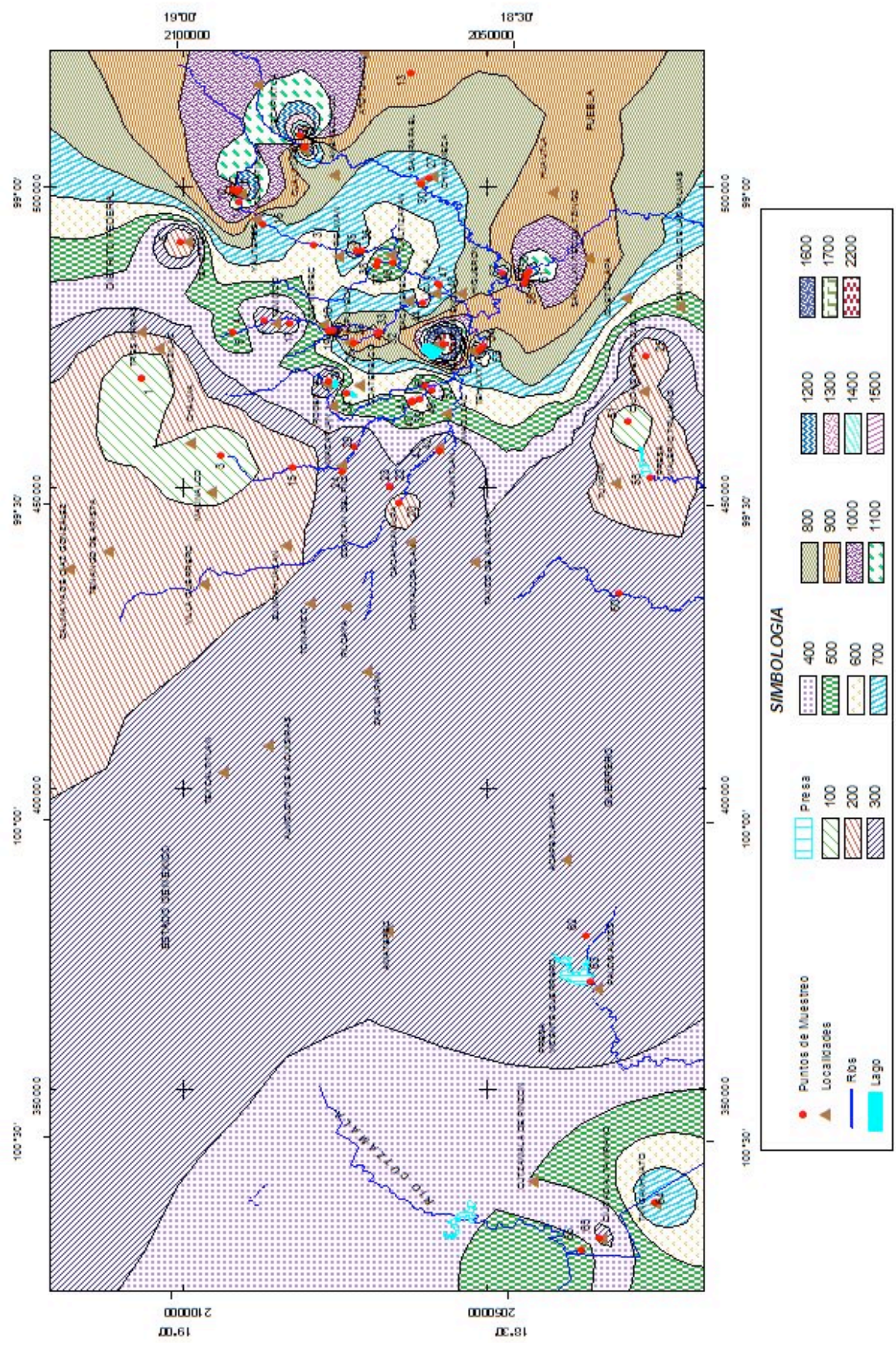


Figura 24. Mapa de distribución de los sólidos disueltos (mg L⁻¹) de la red hidrográfica del estado de Morelos.

5.4 Composición y distribución iónica de las aguas

La composición química de las aguas se debe, principalmente, a la presencia de siete iones: dos son metales alcalinotérreos (Ca^{2+} y Mg^{2+}); dos alcalinos (Na^+ y K^+); dos aniones de ácidos fuertes (Cl^- y SO_4^{2-}) y un anión de ácido débil (HCO_3^- , a veces CO_3^{2-}). Las concentraciones de otros elementos como el nitrógeno, fósforo, hierro, boro y otros elementos secundarios tienen importancia biológica, pero desde el punto de vista de la composición de las aguas dulces son insignificantes (Wetzel, 1981; Alonso, 1998).

Conocer la composición de las aguas de irrigación es importante porque el exceso de sodio, carbonatos, bicarbonatos y cloruros, aumentarán el pH, la conductividad eléctrica y el porcentaje de sodio intercambiable del suelo en donde se apliquen (Choudhary *et al.*, 2006).

En el primer muestreo la variación de la concentración de cationes fue: Ca^{2+} de 0.45 a 12.86 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; Mg^{2+} de 0.34 a 14.69 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; Na^+ de 0.15 a 7.62 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; K^+ de 0.02 a 1.03 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ y de aniones es: HCO_3^- de 0.53 a 11.32 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; Cl^- de 0.34 a 2.80 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; SO_4^{2-} de 0.02 a 26.15 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; CO_3^{2-} 0.0. Esto nos indica que los iones con mayor concentración son: calcio, magnesio, bicarbonato y sulfato. Para tener una mejor referencia sobre los resultados antes mencionados se realizó la Figura 25, en donde el área bajo la curva indica la cantidad de concentración con respecto a los otros iones. También nos permite distinguir las estaciones con mayor concentración y como se distribuyen a lo largo de la red hidrográfica.

En la Figura 25 se observa que las primeras estaciones corresponden a la zona de recarga en las sierras del Chichinautzin y Zempoala, porque contienen poca concentración y conforme se avanza se incrementan las concentraciones. Existen picos de concentración de sulfatos en los puntos: 8, 11, 12, 26, 32, 54, 58, 59 y 61, los cuales pertenecen a aguas subterráneas. La disolución de horizontes evaporíticos (yeso y anhidrita fundamentalmente) representa el aporte más importante de sulfatos a estas aguas (CNA, 2002b). Cabrera *et al.* (2002) indican que el predominio del sodio es indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales, tal es el caso de las estaciones 4 y 34.

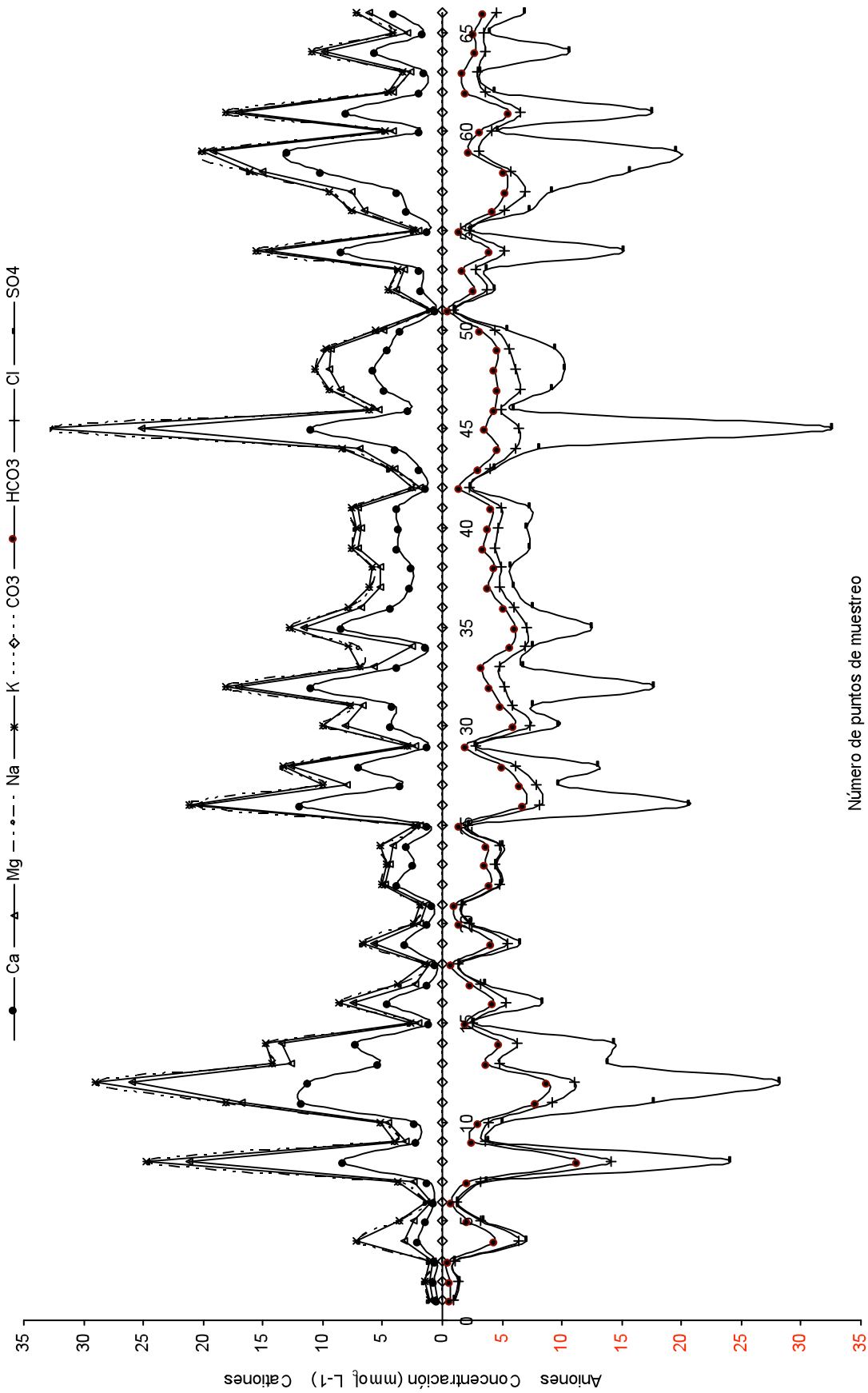


Figura 25. Composición iónica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

Para el segundo muestreo la variación de la concentración de cationes fue: Ca^{2+} de 0.36 a 16.33 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; Mg^{2+} de 0.28 a 9.34 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; Na^+ de 0.17 a 9.02 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; K^+ de 0.02 a 1.38 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ y de aniones es: CO_3^{2-} de 0.03 a 0.4 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; HCO_3^- de 0.57 a 12.55 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; Cl^- de 0.28 a 3.04 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; SO_4^{2-} de 0.02 a 28.04 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$. Por lo tanto los iones con mayor concentración fueron: calcio, magnesio, bicarbonato y sulfato.

En la Figura 26, se observa la distribución de los iones del segundo muestreo, en donde las estaciones con mayor concentración son: 10, 13, 14, 16, 17, 34, 67, 71, 72, 74, estos corresponden a aguas subterráneas, que al igual que en el primer muestreo son sulfatadas, ya que atraviesan depósitos evaporíticos.

La estación con mayor concentración en ambos muestreos fue el Lago de Tequesquitengo, terreno conocido como "polje". Fries (1960) indica que, esto se debe a la disolución gradual de las rocas carbonatadas y anhídricas que le dieron origen. Además, su recarga es a través de manantiales de aguas sulfatadas dentro del mismo lago y al aporte de aguas residuales de las comunidades cercanas.

La presencia de carbonatos y bicarbonatos está relacionada primeramente con los contenidos de CO_2 en el agua, ya que acelera la disolución de calizas y dolomías, y condiciones de pH superior a 8.2 para que se formen carbonatos (Custodio y Llamas, 1996; Cerón *et al.*, 2000; CNA, 2002a).

La variación del pH en el segundo muestreo fue de 6.9 a 8.45 lo que indica la presencia de carbonatos en las estaciones en donde se tenga pH superior a 8.2 y son las muestras 39 y 51.

En aguas colectadas en el primer muestreo no se encuentran CO_3^{2-} , porque el pH tuvo una variación de 6.75 a 7.95, en estas condiciones de pH el sistema HCO_3^- - CO_3^{2-} permanece con la predominancia de bicarbonatos.

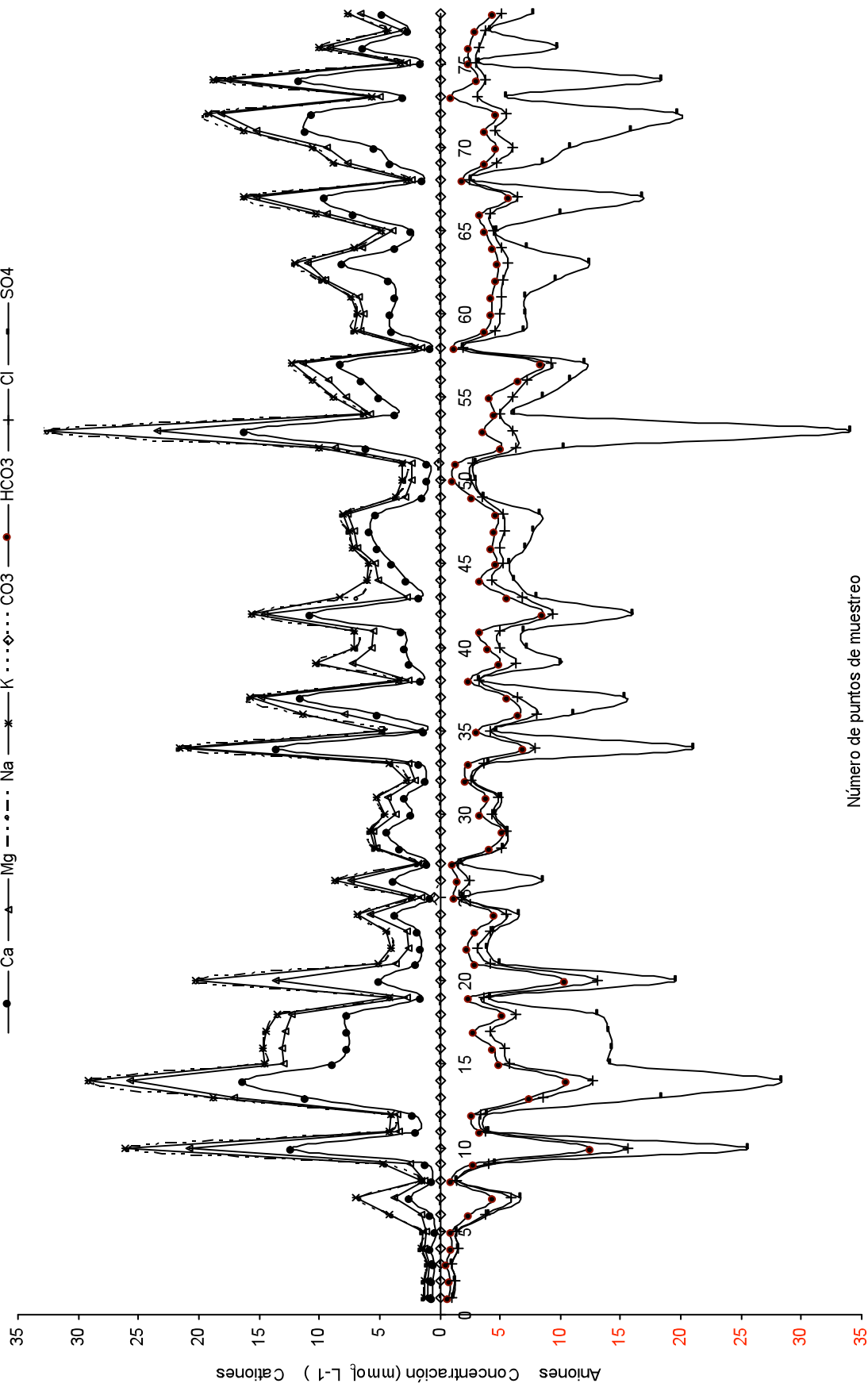


Figura 26. Composición iónica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

El calcio y el magnesio son de los principales cationes en las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas y sedimentarias, (Huizar *et al.*, 1999; Grasby y Betcher, 2002; Diop y Tijani, 2008). Esto es confirmado en los resultados de este estudio, aunque el magnesio es menos abundante debido a que este ión se encuentra en menor proporción en calizas y dolomías.

Custodio y Llamas (1996), Cerón *et al.* (2000) y Poulsen *et al.* (2006), indican que las aguas en contacto con rocas evaporíticas contienen concentraciones elevadas de sodio y potasio solo si estos elementos están presentes fundamentalmente como cloruro de sodio, silvina (KCl) o carnalita (KCl MgCl₂). Debido a que estas sales no se encuentran en el área de estudio, su concentración en las aguas es poca. Además, el potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de intercambio iónico. Altas concentraciones de estos iones pueden ser indicio de contaminación por aguas residuales y agrícolas.

La composición química de las aguas de la red hidrográfica de Morelos se debe a que circulan por materiales basálticos fracturados, sedimentarios y depósitos evaporíticos, éstas al disolver los minerales que los forman adquieren sales, las diferentes concentraciones que se conforman durante el escurrimiento se incrementan en centros urbanos e industriales por el vertido de aguas residuales.

Los iones con mayor concentración son: calcio, magnesio, bicarbonato y sulfato, por lo tanto las sales más comunes que se formaran serán bicarbonatos de calcio, sulfatos de calcio, bicarbonatos de magnesio y sulfatos de magnesio.

5.5 Clasificación de las aguas en base a la salinidad

La salinidad en los suelos es un problema para la agricultura en el mundo, siendo el factor que más limita la productividad de los cultivos (Gili *et al.*, 2004). La actividad antrópica ha incrementado la extensión de áreas salinizadas al ampliarse las zonas de regadío con el desarrollo de grandes proyectos hidrológicos, que han provocado cambios en el balance de agua y sales de los sistemas hidrogeológicos (Leidi y Pardo, 2002; Rengasamy, 2006).

La salinidad del agua es el criterio primordial de calidad y representa el efecto negativo que las sales tienen sobre el rendimiento de los cultivos (Bacarro *et al.*, 2006), así como a las propiedades físicas y químicas del suelo (Oster y Shainberg, 2001; Suarez *et al.*, 2006).

Diversos autores plantean que entre los efectos más frecuentes de la salinidad en las plantas se destacan la supresión del crecimiento y la aparición de distintos tipos de daño en las hojas, destacando que los daños en el crecimiento se relacionan con la cantidad de sales solubles y con el potencial osmótico del medio radical, mientras que las afectaciones en las hojas como succulencia, epinastia, clorosis y necrosis, se relacionan con la acumulación de iones tóxicos (González, 2001; Bacarro *et al.*, 2006).

5.5.1 Presión Osmótica

Valores elevados de la presión osmótica de la solución del suelo repercuten en una disminución de la absorción de agua por las raíces, como consecuencia del descenso en el potencial hídrico del suelo (Zeng y Shannon, 2000; Corwin y Lesch, 2003; Casierra y García, 2006), e incrementan la energía que debe utilizar la planta para extraer agua (Shani y Dudley, 2001; Lau *et al.*, 2003).

Dado que la presión osmótica representa la concentración iónica total de los solutos en una solución y es equivalente a la presión real que se desarrolla en un sistema osmótico (Flores *et al.*, 2005), se determinó en las aguas muestreadas, ya que al ser aplicadas puede aumentar o disminuir con la concentración de la solución del suelo.

Richards *et al.* (1959) indican que la relación entre presión osmótica y conductividad eléctrica es muy útil con fines agrícolas, pues dentro de los valores de la conductividad eléctrica que permite el desarrollo de las plantas, la relación $PO = (0.36CE)/1000$ donde PO: presión osmótica en atm y CE: conductividad eléctrica en $\mu S\ cm^{-1}$, puede usarse para calcular la PO a partir de las determinaciones de la CE. La Figura 27, presenta la relación entre la conductividad eléctrica medida y la presión osmótica experimental, la regresión lineal da un valor de $0.32 * 10^{-3}$

Los resultados del primer muestreo se observan en el Cuadro 19, estos indican que la variación de la presión osmótica es de 0.042 a 1.028 atm, las aguas que presentan valores altos de conductividad eléctrica tienen presión osmótica alta, ya que son generadas por los iones en solución. La PO_1 se obtiene de la Figura 28 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 $mmol\ L^{-1}$ de cada ion obtenido en el laboratorio para cada punto del primer muestreo. La PO_3 se obtiene al igualar las ecuaciones siguientes:

$$PO = (0.320 * 10^{-3}) \times CE$$

despejando

$$CE = \frac{PO}{0.320 * 10^{-3}}$$

$$STD = (0.666 * 10^{-3}) \times CE$$

despejando

$$CE = \frac{STD}{0.666 * 10^{-3}}$$

igualando

$$\frac{PO}{0.320 * 10^{-3}} = \frac{STD}{0.666 * 10^{-3}} \text{ despejando}$$

$$PO_3 = \frac{0.320 * 10^{-3}}{0.666 * 10^{-3}} \times STD$$

En la Figura 28, se presenta la relación de la presión osmótica determinada en el osmómetro, con los resultados de la presión osmótica estimada mediante las formulas establecidas por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de Norteamérica. Se muestran que hay similitud entre resultados, por lo que su estimación es correcta.

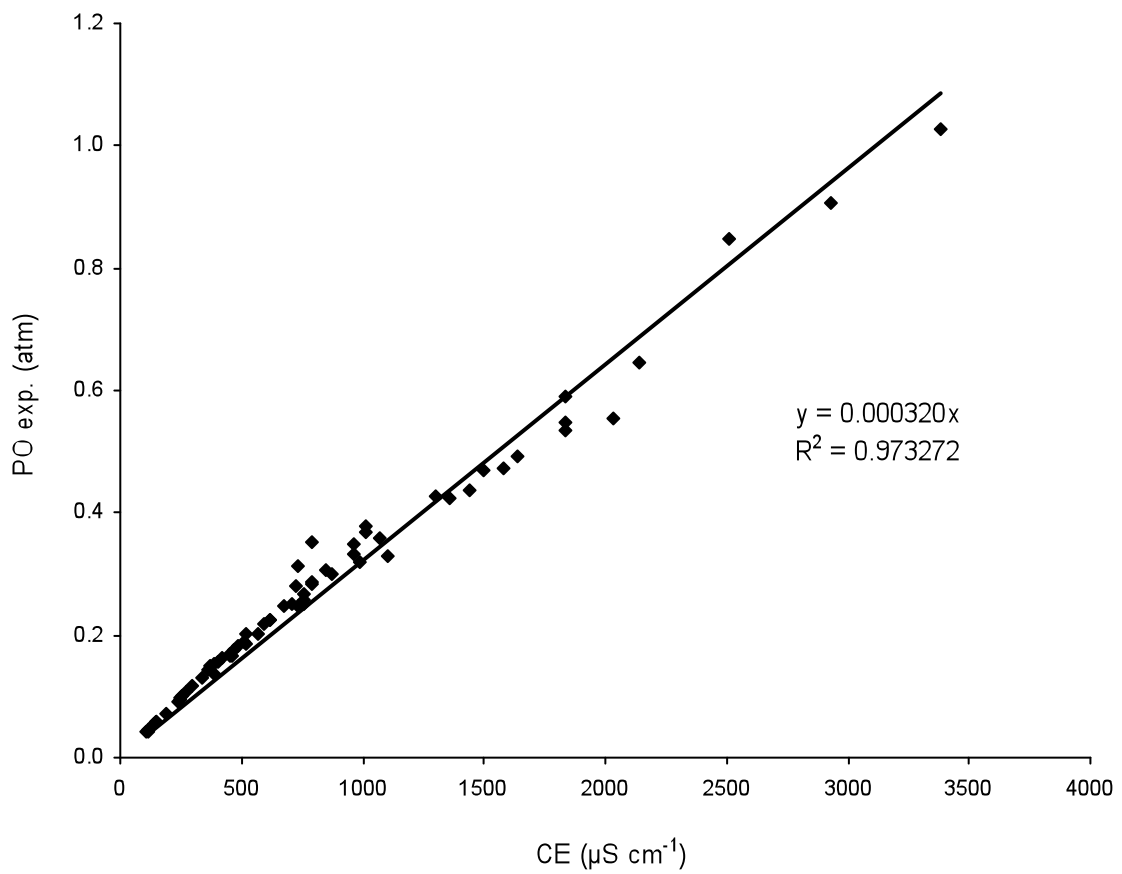


Figura 27. Relación entre la presión osmótica experimental (atm) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las soluciones acuosas de las diferentes estaciones del primer muestro de la red hidrográfica del estado de Morelos.

Cuadro 19. Presión osmótica calculada por tres métodos para las estaciones del primer muestro de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	CE $\mu S\ cm^{-1}$	T °K	R atm*L/mol*K	mmol exp(X)	$PO_1=0.0257*X$	$PO_2 = \frac{n \times R \times T}{v}$	mg L ⁻¹ analíticos	$PO_3=(mg\ L^{-1}) * (0.320/666)$
1	107	310.15	0.082087	1.64	0.042	0.042	71.18	0.035
2	147	310.15	0.082087	2.26	0.058	0.058	96.57	0.047
3	113	310.15	0.082087	1.80	0.046	0.046	75.65	0.037
4	733	310.15	0.082087	12.35	0.315	0.314	525.54	0.255
5	361	310.15	0.082087	5.70	0.145	0.145	250.20	0.121
6	141	310.15	0.082087	2.20	0.056	0.056	98.70	0.048
7	384	310.15	0.082087	6.06	0.155	0.154	266.00	0.129
8	2510	310.15	0.082087	33.28	0.849	0.847	1677.73	0.813
9	401	310.15	0.082087	6.10	0.156	0.155	279.69	0.136
10	519	310.15	0.082087	7.32	0.187	0.186	358.34	0.174
11	1833	310.15	0.082087	23.14	0.590	0.589	1261.80	0.612
12	2933	310.15	0.082087	35.64	0.909	0.907	1917.68	0.930
13	1438	310.15	0.082087	17.20	0.439	0.438	931.08	0.451
14	1495	310.15	0.082087	18.45	0.470	0.470	988.32	0.479
15	271	310.15	0.082087	4.26	0.109	0.108	102.02	0.049
16	874	310.15	0.082087	11.80	0.301	0.300	601.87	0.292
17	372	310.15	0.082087	5.94	0.151	0.151	266.60	0.129
18	147	310.15	0.082087	2.29	0.058	0.058	100.15	0.049
19	677	310.15	0.082087	9.80	0.250	0.249	467.10	0.226
20	248	310.15	0.082087	3.83	0.098	0.097	170.61	0.083
21	186	310.15	0.082087	2.87	0.073	0.073	128.26	0.062
22	508	310.15	0.082087	7.48	0.191	0.190	369.94	0.179
23	468	310.15	0.082087	6.87	0.175	0.175	329.66	0.160
24	519	310.15	0.082087	7.94	0.202	0.202	374.11	0.181
25	237	310.15	0.082087	3.62	0.092	0.092	163.29	0.079
26	2143	310.15	0.082087	25.37	0.647	0.646	1423.97	0.690
27	1010	310.15	0.082087	14.80	0.377	0.377	705.32	0.342
28	1354	310.15	0.082087	16.63	0.424	0.423	905.74	0.439
29	293	310.15	0.082087	4.59	0.117	0.117	203.64	0.099
30	1015	310.15	0.082087	14.53	0.371	0.370	707.91	0.343
31	790	310.15	0.082087	11.18	0.285	0.285	560.13	0.272
32	1833	310.15	0.082087	21.02	0.536	0.535	1202.24	0.583
33	705	310.15	0.082087	9.88	0.252	0.251	479.15	0.232
34	790	310.15	0.082087	13.80	0.352	0.351	600.84	0.291
35	1297	310.15	0.082087	16.79	0.428	0.427	904.75	0.439

Continuación...Presión osmótica calculada por tres métodos para las estaciones del primer muestro de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	CE $\mu S\ cm^{-1}$	T °K	R atm*L/mol*K	mmol exp(X)	$PO_1=0.0257*X$	$PO_2 = \frac{n \times R \times T}{v}$	mg L ⁻¹ analíticos	$PO_3=(mg\ L^{-1}) * (0.320/666)$
36	790	310.15	0.082087	11.22	0.286	0.286	563.65	0.273
37	620	310.15	0.082087	8.86	0.226	0.225	430.89	0.209
38	592	310.15	0.082087	8.61	0.220	0.219	423.15	0.205
39	761	310.15	0.082087	9.84	0.251	0.250	512.03	0.248
40	733	310.15	0.082087	9.72	0.248	0.247	501.49	0.243
41	761	310.15	0.082087	10.09	0.257	0.257	522.89	0.254
42	254	310.15	0.082087	3.92	0.100	0.100	174.65	0.085
43	451	310.15	0.082087	6.65	0.170	0.169	308.35	0.150
44	846	310.15	0.082087	12.06	0.308	0.307	583.87	0.283
45	3384	310.15	0.082087	40.38	1.030	1.028	2169.95	1.052
46	620	310.15	0.082087	8.88	0.226	0.226	440.26	0.213
47	959	310.15	0.082087	13.07	0.333	0.333	645.40	0.313
48	1072	310.15	0.082087	14.06	0.359	0.358	717.24	0.348
49	987	310.15	0.082087	12.58	0.321	0.320	664.92	0.322
50	564	310.15	0.082087	8.00	0.204	0.204	394.50	0.191
51	113	310.15	0.082087	1.66	0.042	0.042	75.74	0.037
52	451	310.15	0.082087	6.58	0.168	0.167	309.11	0.150
53	384	310.15	0.082087	5.43	0.138	0.138	256.13	0.124
54	1579	310.15	0.082087	18.61	0.475	0.474	1035.91	0.502
55	248	310.15	0.082087	3.72	0.095	0.095	170.31	0.083
56	761	310.15	0.082087	10.49	0.267	0.267	522.71	0.253
57	959	310.15	0.082087	13.73	0.350	0.349	658.24	0.319
58	1636	310.15	0.082087	19.37	0.494	0.493	1105.90	0.536
59	2031	310.15	0.082087	21.80	0.556	0.555	1314.62	0.637
60	485	310.15	0.082087	7.15	0.182	0.182	333.35	0.162
61	1833	310.15	0.082087	21.58	0.550	0.549	1199.01	0.581
62	463	310.15	0.082087	6.53	0.167	0.166	295.60	0.143
63	338	310.15	0.082087	5.10	0.130	0.130	224.08	0.109
64	1100	310.15	0.082087	13.00	0.332	0.331	722.82	0.350
65	417	310.15	0.082087	6.39	0.163	0.163	291.99	0.142
66	722	310.15	0.082087	9.81	0.250	0.280	496.96	0.241
Media	845	310.15	0.082087	11.172	0.285	0.285	570.174	0.276
Mediana	722	310.15	0.082087	9.760	0.249	0.248	473.125	0.229
Moda	1833	310.15	0.082087					

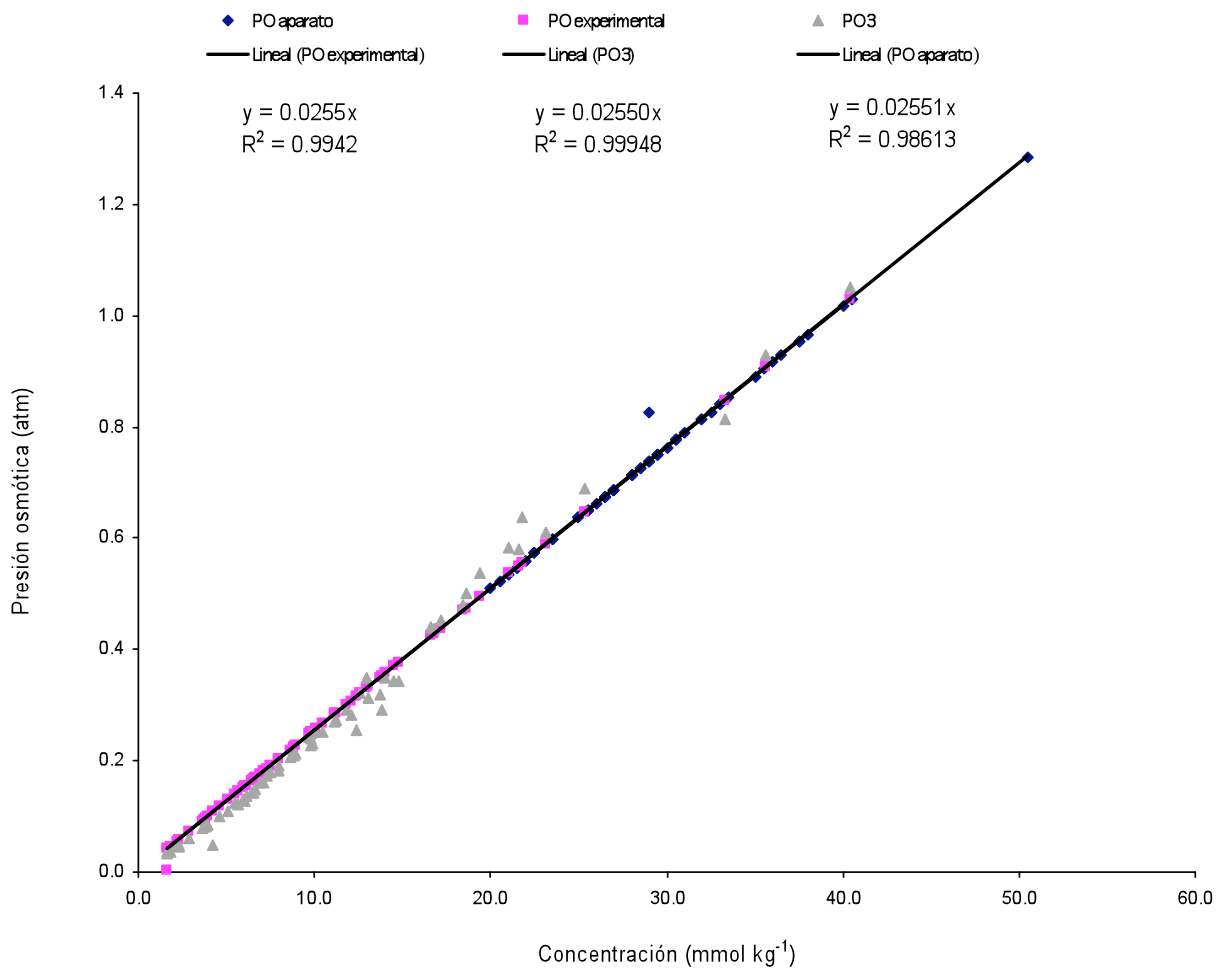


Figura 28. Relación de la presión osmótica experimental (atm), determinada con diferentes métodos y la concentración de las soluciones acuosas (mmol kg⁻¹) del primer muestra de la red hidrográfica del estado de Morelos.

La Figura 29 se presenta la relación entre la conductividad eléctrica medida y la presión osmótica experimental, en donde se obtuvo el valor de 0.33×10^{-3} de la regresión lineal. Esta relación $PO_{(exp)} = f CE$ se establece para el segundo muestreo.

En la Cuadro 20, se tienen los resultados para el segundo muestreo, estos indican una variación de 0.041 a 1.055 atmósferas. La PO_1 se obtiene de la Figura 30 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 $mmol L^{-1}$ de cada ion obtenido en el laboratorio para cada punto del primer muestreo. La PO_3 se obtiene al igualar las ecuaciones siguientes:

$$PO = (0.330 * 10^{-3}) \times CE$$

despejando

$$CE = \frac{PO}{0.330 * 10^{-3}}$$

$$STD = (0.683 * 10^{-3}) \times CE$$

despejando

$$CE = \frac{STD}{0.683 * 10^{-3}}$$

igualando

$$\frac{PO}{0.330 * 10^{-3}} = \frac{STD}{0.683 * 10^{-3}} \text{ despejando}$$

$$PO_3 = \frac{0.330 * 10^{-3}}{0.683 * 10^{-3}} \times STD$$

En la Figura 30 se presenta la relación de la presión osmótica determinada con diferentes métodos y la concentración de las soluciones acuosas en $mmol kg^{-1}$ del segundo muestreo. Estos resultados muestran que hay similitud entre ellos.

Ayers y Westcot (1987) señalan que prácticamente todos los cultivos pueden alcanzar su máximo rendimiento cuando las aguas de riego presentan una presión osmótica menor a 0.25 atm o una conductividad eléctrica $< 700 \mu S cm^{-1}$, sin embargo, pueden utilizarse aguas con presión osmótica entre 0.25 y 1.00 atm o 700 a 3000 $\mu S cm^{-1}$, siempre y cuando se mantenga la salinidad de los suelos dentro del rango de tolerancia de los cultivos.

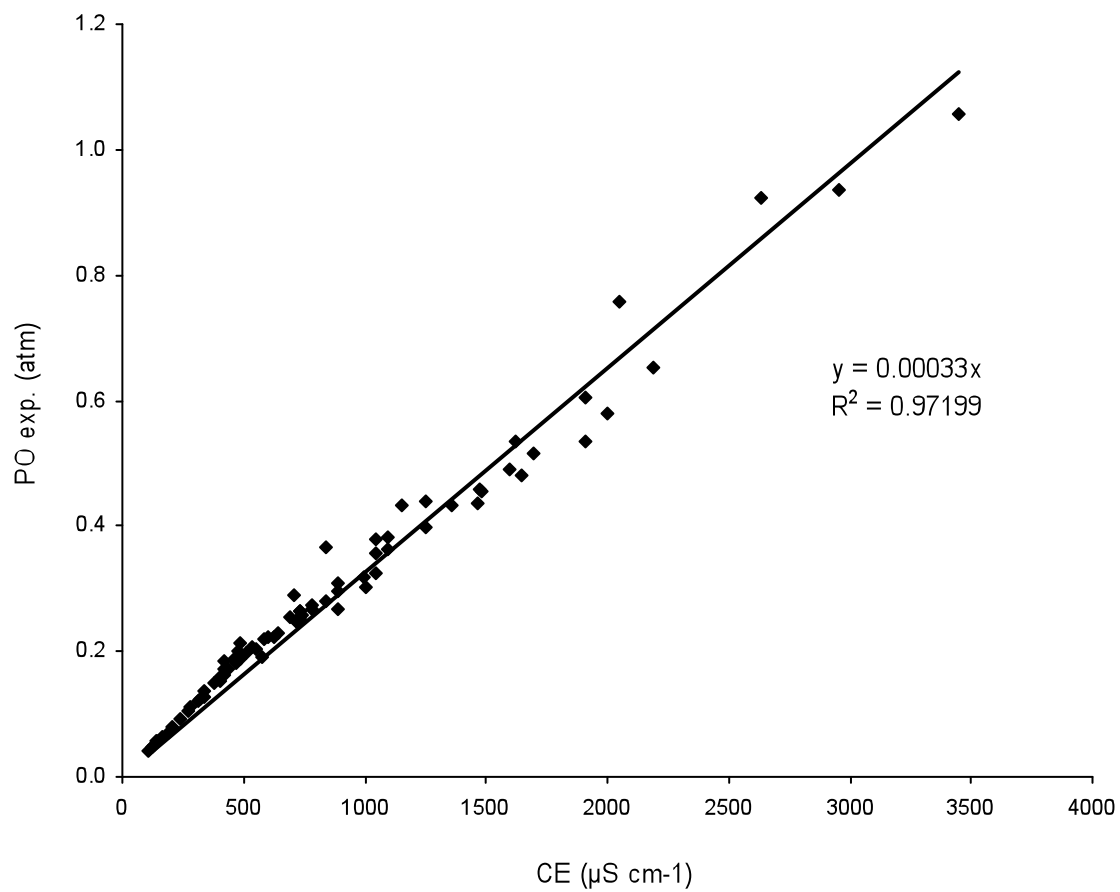


Figura 29. Relación entre la presión osmótica experimental (atm) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las soluciones acuosas de las diferentes estaciones del segundo muestro de la red hidrográfica del estado de Morelos.

Cuadro 20. Presión osmótica calculada por tres métodos para las estaciones del segundo muestro de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	CE $\mu S\ cm^{-1}$	T °K	R atm*L/mol*K	mmol exp(X)	$PO_1=0.0257*X$	$PO_2 = \frac{n \times R \times T}{v}$	mg L ⁻¹ analíticos	$PO_3=(mg\ L^{-1}) * (0.330/683)$
1	107	310.15	0.082087	1.88	0.048	0.048	84.36	0.041
2	147	310.15	0.082087	2.02	0.052	0.051	90.26	0.043
3	113	310.15	0.082087	1.60	0.041	0.041	71.17	0.034
4	733	310.15	0.082087	2.45	0.062	0.062	109.24	0.053
5	361	310.15	0.082087	2.21	0.056	0.056	99.39	0.048
6	141	310.15	0.082087	7.24	0.185	0.184	298.27	0.144
7	384	310.15	0.082087	11.42	0.291	0.291	506.88	0.244
8	2510	310.15	0.082087	2.29	0.058	0.058	102.48	0.049
9	401	310.15	0.082087	7.82	0.199	0.199	339.78	0.164
10	519	310.15	0.082087	36.21	0.923	0.922	1824.00	0.879
11	1833	310.15	0.082087	6.37	0.162	0.162	307.21	0.148
12	2933	310.15	0.082087	5.96	0.152	0.152	288.71	0.139
13	1438	310.15	0.082087	23.80	0.607	0.606	1308.11	0.630
14	1495	310.15	0.082087	36.81	0.939	0.937	1992.68	0.960
15	271	310.15	0.082087	18.04	0.460	0.459	997.98	0.481
16	874	310.15	0.082087	17.90	0.456	0.456	986.18	0.475
17	372	310.15	0.082087	17.12	0.437	0.436	952.07	0.459
18	147	310.15	0.082087	16.95	0.432	0.431	918.40	0.443
19	677	310.15	0.082087	6.78	0.173	0.173	299.48	0.144
20	248	310.15	0.082087	29.76	0.759	0.757	1406.51	0.678
21	186	310.15	0.082087	7.79	0.199	0.198	355.23	0.171
22	508	310.15	0.082087	6.30	0.161	0.160	287.90	0.139
23	468	310.15	0.082087	7.40	0.189	0.188	331.32	0.160
24	519	310.15	0.082087	9.98	0.254	0.254	491.14	0.237
25	237	310.15	0.082087	3.64	0.093	0.093	158.82	0.077
26	2143	310.15	0.082087	10.55	0.269	0.269	567.98	0.274
27	1010	310.15	0.082087	2.74	0.070	0.070	131.11	0.063
28	1354	310.15	0.082087	8.03	0.205	0.204	389.63	0.188
29	293	310.15	0.082087	8.61	0.220	0.219	443.01	0.213
30	1015	310.15	0.082087	7.19	0.183	0.183	336.96	0.162
31	790	310.15	0.082087	8.11	0.207	0.206	385.67	0.186
32	1833	310.15	0.082087	4.39	0.112	0.112	205.15	0.099
33	705	310.15	0.082087	6.70	0.171	0.171	293.68	0.142
34	790	310.15	0.082087	25.68	0.655	0.654	1465.08	0.706
35	1297	310.15	0.082087	8.43	0.215	0.215	357.95	0.172
36	790	310.15	0.082087	16.97	0.433	0.432	815.66	0.393
37	620	310.15	0.082087	19.27	0.491	0.490	1093.86	0.527
38	592	310.15	0.082087	5.32	0.136	0.135	242.88	0.117
39	761	310.15	0.082087	14.89	0.380	0.379	709.92	0.342
40	733	310.15	0.082087	10.34	0.264	0.263	514.19	0.248
41	761	310.15	0.082087	10.41	0.265	0.265	494.76	0.238
42	254	310.15	0.082087	20.99	0.535	0.534	1154.05	0.556

Continuación...Presión osmótica calculada por tres métodos para las estaciones del segundo muestro de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	CE $\mu S\ cm^{-1}$	T °K	R atm*L/mol*K	mmol exp(X)	PO ₁ =0.0257*X	PO ₂ = $\frac{n \times R \times T}{v}$	mg L ⁻¹ analíticos	PO ₃ =(mg L ⁻¹) * (0.330/683)
43	451	310.15	0.082087	14.40	0.367	0.366	640.94	0.309
44	846	310.15	0.082087	8.70	0.222	0.221	431.96	0.208
45	3384	310.15	0.082087	8.71	0.222	0.222	437.96	0.211
46	620	310.15	0.082087	9.83	0.251	0.250	519.52	0.250
47	959	310.15	0.082087	10.52	0.268	0.268	563.81	0.272
48	1072	310.15	0.082087	10.97	0.280	0.279	595.23	0.287
49	987	310.15	0.082087	5.83	0.149	0.148	266.18	0.128
50	564	310.15	0.082087	4.76	0.121	0.121	197.44	0.095
51	113	310.15	0.082087	4.92	0.125	0.125	205.46	0.099
52	451	310.15	0.082087	13.98	0.356	0.356	734.10	0.354
53	384	310.15	0.082087	41.47	1.057	1.055	2299.10	1.108
54	1579	310.15	0.082087	9.05	0.231	0.230	463.19	0.223
55	248	310.15	0.082087	12.15	0.310	0.309	601.22	0.290
56	761	310.15	0.082087	14.96	0.381	0.381	790.64	0.381
57	959	310.15	0.082087	17.27	0.440	0.440	903.18	0.435
58	1636	310.15	0.082087	3.16	0.081	0.080	141.05	0.068
59	2031	310.15	0.082087	9.59	0.245	0.244	494.78	0.238
60	485	310.15	0.082087	9.71	0.248	0.247	510.60	0.246
61	1833	310.15	0.082087	10.14	0.259	0.258	513.88	0.248
62	463	310.15	0.082087	12.50	0.319	0.318	671.26	0.323
63	338	310.15	0.082087	15.59	0.398	0.397	870.58	0.420
64	1100	310.15	0.082087	9.99	0.255	0.254	516.29	0.249
65	417	310.15	0.082087	7.40	0.189	0.188	351.92	0.170
66	722	310.15	0.082087	12.80	0.326	0.326	710.05	0.342
67	1697	310.15	0.082087	20.26	0.517	0.516	1157.23	0.558
68	272	310.15	0.082087	4.10	0.105	0.104	192.04	0.093
69	890	310.15	0.082087	11.62	0.296	0.296	603.96	0.291
70	1097	310.15	0.082087	14.27	0.364	0.363	753.48	0.363
71	1645	310.15	0.082087	18.91	0.482	0.481	1098.68	0.529
72	2000	310.15	0.082087	22.78	0.581	0.580	1332.24	0.642
73	574	310.15	0.082087	7.47	0.190	0.190	355.32	0.171
74	1906	310.15	0.082087	21.07	0.537	0.536	1248.45	0.602
75	334	310.15	0.082087	5.04	0.129	0.128	241.63	0.116
76	1008	310.15	0.082087	11.93	0.304	0.304	670.82	0.323
77	439	310.15	0.082087	6.78	0.173	0.173	321.66	0.155
78	783	310.15	0.082087	10.71	0.273	0.273	561.88	0.271
Media	845	310.15	0.082087	11.69	0.30	0.302	604.83	0.29
Mediana	722	310.15	0.082087	9.91	0.26	0.256	500.83	0.24
Moda	1833	310.15	0.082087	6.78	0.17	0.17		

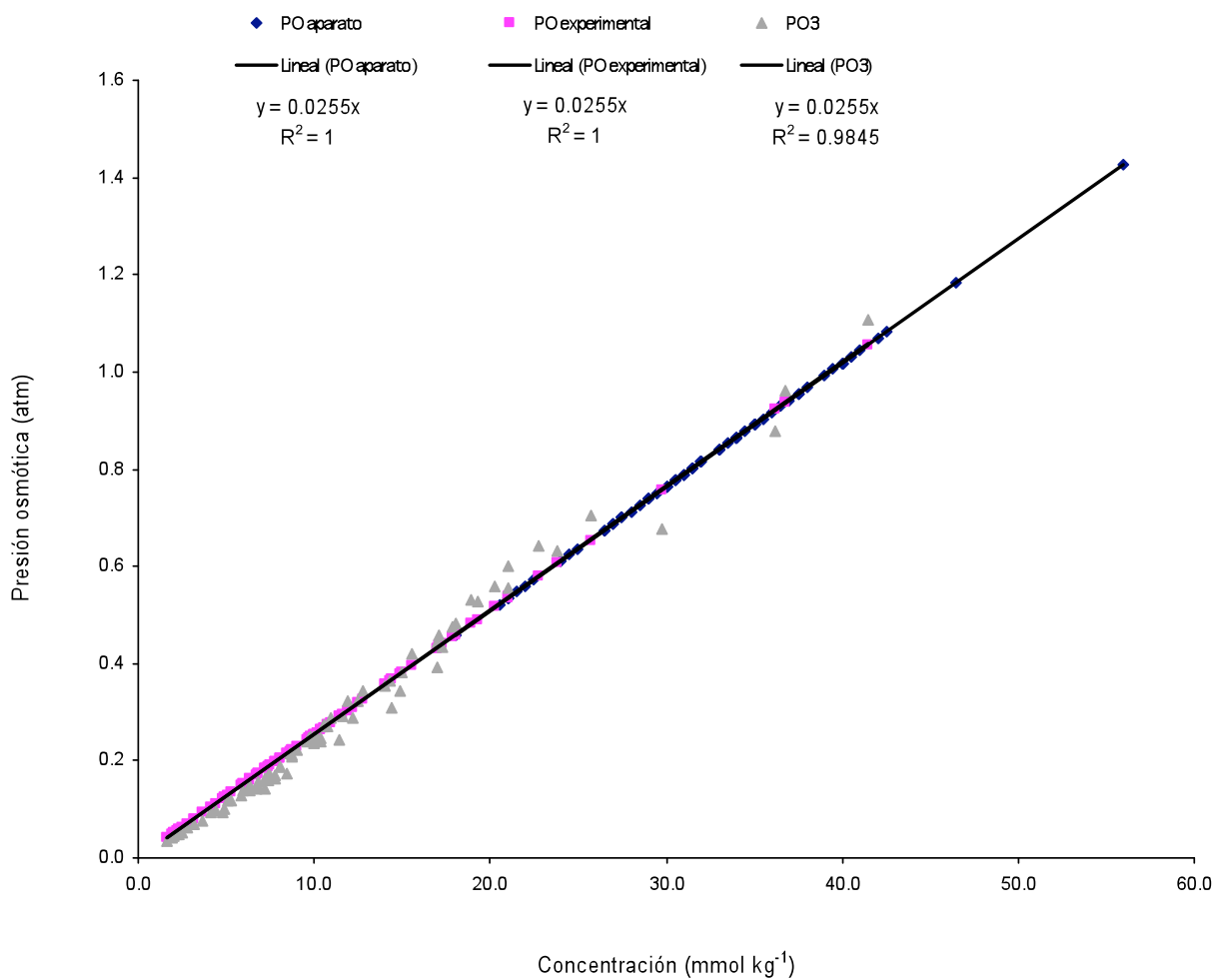


Figura 30. Relación de la presión osmótica experimental (atm), determinada con diferentes métodos y la concentración de las soluciones acuosas (mmol kg⁻¹) del segundo muestra de la red hidrográfica del estado de Morelos.

En la zona de estudio se siembra varios cultivos como: sorgo, arroz, tomate, caña de azúcar, maíz, cebolla, frijol, entre otros, los cuales pueden alcanzar su máximo rendimiento cuando las aguas de riego presentan una presión osmótica de 1.46, 0.65, 0.55, 0.36, 0.36, 0.26 y 0.23 atmósferas, respectivamente. Para el caso de las aguas del primer muestreo se pueden utilizar todas para el riego de sorgo. En el arroz y tomate se restringe el uso de las estaciones 8, 11, 12, 26 y 45. Las estaciones 8, 11, 12, 13, 14, 26, 27, 28, 30, 32, 34, 35, 45, 48, 54, 57, 58, 59, 61 pueden ocasionar problemas si se utilizan para el riego de caña y maíz. Para los cultivos de cebolla y frijol, las aguas que pueden ocasionar problemas en su rendimiento son las que presentan una PO mayor de 0.26 y 0.23 atm respectivamente.

Todas las estaciones del segundo muestreo se pueden utilizar para regar sorgo. Las estaciones 10, 13, 14, 20, 34, 53 y 72 presentan peligro osmótico para los cultivos de arroz y tomate. Las estaciones 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 34, 36, 37, 39, 42, 43, 53, 56, 57, 63, 67, 70, 71, 72 y 74 representan un riesgo para los cultivos de caña y maíz. Las estaciones con una PO mayor de 0.26 atm pueden ocasionar problemas para el cultivo de la cebolla y 0.23 atm para el frijol.

El efecto osmótico tiene repercusiones en el porcentaje y velocidad de la germinación (Goykovic y Saavedra, 2007). A nivel de raíces, éstas alcanzan una menor longitud de modo que el volumen de suelo que exploran disminuye. También hay cambios en el color de hoja y calidad del desarrollo, como modificación de la relación parte aérea/raíz, limitación de la expansión foliar y pérdida de turgencia (Netondo *et al.*, 2004; Steppuhn *et al.*, 2005; Casierra y García, 2006; Maathuis, 2006).

Para aumentar la capacidad de obtener y/o retener agua, la planta realiza un ajuste osmótico que consiste en activar múltiples mecanismos y son consecuencia de cambios bioquímicos (como síntesis de ácido abscísico y solutos osmoprotectores) y fisiológicos (entre ellos, alteración de la permeabilidad de las membranas a los iones y al agua, cierre estomático, disminución de transpiración y fotosíntesis, etc.) (Leidi y Pardo, 2002; Morales *et al.*, 2006). Este ajuste cumple con la disminución del potencial osmótico interno para absorber agua con potenciales hídricos del suelo menores y que el crecimiento relativo no sea afectado (Shani y Dudley, 2001; Chinnusamy *et al.*, 2005; Morales *et al.*, 2006; Goykovic y Saavedra, 2007).

5.5.2 Índice de salinidad

El proceso de salinización está estrechamente vinculado principalmente al uso de técnicas de irrigación agrícola inapropiadas. En muchos casos la calidad del agua aplicada tiene efectos adversos sobre las propiedades del suelo, ya que contiene cantidades elevadas de sales solubles que se acumularán en tal concentración que parcial o totalmente afectan el crecimiento de las plantas, teniendo repercusión negativa en el rendimiento agrícola (Corwin y Lesch, 2003; Polón *et al*, 2004; Fereres y Soriano, 2007; Rengasamy, 2006).

Generalmente, el parámetro más importante para evaluar calidad de agua para riego es la concentración total de sales, usualmente medida como CE, para ello se utiliza la clasificación citada por Richards *et al.* (1959).

En el Cuadro 21 se muestra la clasificación en base a la conductividad eléctrica de las estaciones del primer muestreo, los resultados indican que el 15.15% están dentro de la clasificación C1 ($CE < 250 \mu S cm^{-1}$), la cual indica que son aguas de baja salinidad y pueden usarse para riego en la mayoría de los cultivos y en casi cualquier tipo de suelo. El 40.91% son aguas de salinidad media C2 ($CE 250 - 750 \mu S cm^{-1}$), pueden usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado y cultivos moderadamente tolerantes a las sales.

El 39.39% son aguas altamente salinas C3 ($CE 750 - 2250 \mu S cm^{-1}$), no se pueden utilizar en suelos cuyo drenaje sea deficiente y los cultivos deben ser muy tolerantes a las sales, estos puntos corresponden a manantiales y cauces de ríos con descarga de aguas residuales urbano-industriales. El 4.55% son aguas muy altamente salinas C4 ($CE > 2250 \mu S cm^{-1}$), no son apropiadas para el riego bajo condiciones normales, sin embargo, se pueden utilizar ocasionalmente cuando los suelos son permeables y seleccionar cultivos altamente tolerantes a las sales, dentro de esta clasificación se encuentra el punto 8 (manantial del balneario Agua Hedionda), 12 (pozo en Santa Lucia) y 45 (lago de Tequesquitengo).

Cuadro 21. Clasificación de las aguas de acuerdo a la salinidad del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Clasificación	No.	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Clasificación
1	107	C1 Agua de baja salinidad	34	790	C3 Aguas altamente salinas
2	147	C1 Agua de baja salinidad	35	1297	C3 Aguas altamente salinas
3	113	C1 Agua de baja salinidad	36	790	C3 Aguas altamente salinas
4	733	C2 Aguas de salinidad media	37	620	C2 Aguas de salinidad media
5	361	C2 Aguas de salinidad media	38	592	C2 Aguas de salinidad media
6	141	C1 Agua de baja salinidad	39	761	C3 Aguas altamente salinas
7	384	C2 Aguas de salinidad media	40	733	C2 Aguas de salinidad media
8	2510	C4 Aguas muy altamente salinas	41	761	C3 Aguas altamente salinas
9	401	C2 Aguas de salinidad media	42	254	C2 Aguas de salinidad media
10	519	C2 Aguas de salinidad media	43	451	C2 Aguas de salinidad media
11	1833	C3 Aguas altamente salinas	44	846	C3 Aguas altamente salinas
12	2933	C4 Aguas muy altamente salinas	45	3384	C4 Aguas muy altamente salinas
13	1438	C3 Aguas altamente salinas	46	620	C2 Aguas de salinidad media
14	1495	C3 Aguas altamente salinas	47	959	C3 Aguas altamente salinas
15	271	C2 Aguas de salinidad media	48	1072	C3 Aguas altamente salinas
16	874	C3 Aguas altamente salinas	49	987	C3 Aguas altamente salinas
17	372	C2 Aguas de salinidad media	50	564	C2 Aguas de salinidad media
18	147	C1 Agua de baja salinidad	51	113	C1 Agua de baja salinidad
19	677	C2 Aguas de salinidad media	52	451	C2 Aguas de salinidad media
20	248	C1 Agua de baja salinidad	53	384	C2 Aguas de salinidad media
21	186	C1 Agua de baja salinidad	54	1579	C3 Aguas altamente salinas
22	508	C2 Aguas de salinidad media	55	248	C1 Agua de baja salinidad
23	468	C2 Aguas de salinidad media	56	761	C3 Aguas altamente salinas
24	519	C2 Aguas de salinidad media	57	959	C3 Aguas altamente salinas
25	237	C1 Agua de baja salinidad	58	1636	C3 Aguas altamente salinas
26	2143	C3 Aguas altamente salinas	59	2031	C3 Aguas altamente salinas
27	1010	C3 Aguas altamente salinas	60	485	C2 Aguas de salinidad media
28	1354	C3 Aguas altamente salinas	61	1833	C3 Aguas altamente salinas
29	293	C2 Aguas de salinidad media	62	463	C2 Aguas de salinidad media
30	1015	C3 Aguas altamente salinas	63	338	C2 Aguas de salinidad media
31	790	C3 Aguas altamente salinas	64	1100	C3 Aguas altamente salinas
32	1833	C3 Aguas altamente salinas	65	417	C2 Aguas de salinidad media
33	705	C2 Aguas de salinidad media	66	722	C2 Aguas de salinidad media

En el Cuadro 22 se muestra la clasificación de las aguas del segundo muestreo. Estos resultados indican que el 11.54% son C1, aguas de baja salinidad con muy poca probabilidad de que desarrolle salinidad en suelos. El 46.15% son C2, aguas de salinidad media que pueden usarse en cultivos moderadamente tolerantes a las sales y en suelos con buen drenaje. El 38.46% son C3, aguas altamente salinas y se pueden utilizar en cultivos muy tolerantes a las sales, en suelos con un buen drenaje, estos puntos corresponden a manantiales, pozos, lagunas y cauces de ríos a los cuales se vierten aguas residuales urbanas e industriales. El 3.85% están dentro de la clasificación C4 altamente salinas.

Los valores de CE con un máximo de $3384 \mu\text{S cm}^{-1}$ y un mínimo de $107 \mu\text{S cm}^{-1}$ en el primer muestreo y un máximo de $3447 \mu\text{S cm}^{-1}$ y un mínimo de $104 \mu\text{S cm}^{-1}$ del segundo muestreo (Cuadro 21 y 22 respectivamente), resultaron similares a los observados en el área por CNA (2002a, 2002b, 2002c, 2002d) y Prol y Cortes (2003).

Se realizó la Figura 31 con la distribución de la clasificación de la conductividad eléctrica citada por Richards *et al.* (1959) del área de estudio, con datos de ambos muestreos en el programa Arc View.

La salinidad del agua constituye una limitante en la producción agrícola, ya que, provoca cambios importantes en la conductividad hidráulica de las raíces que limitan la absorción y el flujo del agua hacia la parte aérea, afectando el crecimiento y la producción de la planta, a la vez se afectan tallos (menor altura), hojas (se reducen el número, presentan desecación y quemaduras en bordes) y frutos (disminuye el número y peso) (Bogoslavsky y Neumann, 1998; Casierra y García, 2006). Puede reducir también el número de flores, incrementar la esterilidad y alterar la duración de la floración y la maduración (Morales *et al.*, 2003).

No todos los cultivos responden de igual manera a la salinidad, algunos producen rendimientos aceptables a niveles altos y otros son sensibles a niveles relativamente bajos, por lo que, es necesario conocer los efectos que tendrá la aplicación de aguas salinas en el área de estudio, puesto que se siembran cultivos sensibles como: frijol, cebolla, aguacate, limón, y moderadamente sensible como; caña de azúcar, arroz, maíz, tomate, melón.

Ayers y Westcot (1987), sugirieron que los cultivos del sorgo, arroz, tomate, caña de azúcar, maíz, cebolla y frijol pueden alcanzar su máximo rendimiento cuando las aguas de riego presentan una CE de 4500, 2000, 1700, 1100, 1100, 800 y 700 $\mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente.

Para el caso de las aguas del primer muestreo se pueden utilizar todas para el riego de sorgo. Para el arroz y tomate se restringe el uso de las estaciones 8, 11, 12, 26, 32, 45 y 59. Para caña de azúcar y maíz las estaciones que pueden ocasionar problemas en su rendimiento son 13,14, 28, 32, 35, 54, 58 y 64, además, de la que se restringen para arroz y tomate. Para el frijol y maíz no se deben utilizar las estaciones con una CE mayor de 800 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Se pueden utilizar todas las aguas del segundo muestreo para el riego de sorgo. Para el frijol y maíz no se deben utilizar las estaciones con una CE mayor de 800 $\mu\text{S cm}^{-1}$. En los cultivos de arroz y tomate se restringe el uso de las estaciones 12, 72 y 74. Para caña de azúcar y maíz se restringen los puntos 12, 15, 16, 17, 18, 36, 37, 42, 56, 57, 63, 67, 70, 71, 72 y 74.

La magnitud de las respuestas de las plantas se encuentra estrechamente relacionada a la concentración de las sales, a la duración del estrés a que están expuestas y a la especie o cultivar de que se trate, y no está consistentemente relacionada durante la germinación, emergencia, crecimiento vegetativo, floración y fructificación (Katerji *et al.*, 1994; Steppuhn *et al.*, 2005; Goykovic y Saavedra, 2007).

Lo anterior lo corroboran Wilson *et al.* (2000) pues mencionan que el cultivo del arroz es más sensible durante la germinación, etapas posteriores se vuelve más tolerante y el cultivo del maíz se ve mas afectado en la etapa de emergencia. Katerji *et al.* (1994) encontraron que el crecimiento del maíz se reduce del 10 al 25% con valores de la CE de 2.5-5.4 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Los frutos se afectan adversamente en su rendimiento, pero también hay efectos positivos de la salinidad ya que presentan un mayor contenido de compuestos solubles, sólidos totales, acidez y carotenoides atributos organolépticos y/o de interés para la agroindustria, esto no sólo en el cultivo del tomate, sino también en otros cultivos como la fresa, guayaba, manzana, pepino y pimiento (Casierra y García, 2006; Goykovic y Saavedra, 2007).

Cuadro 22. Clasificación de las aguas de acuerdo a la salinidad del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Clasificación	No.	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Clasificación
1	125	C1 Agua de baja salinidad	40	731	C2 Aguas de salinidad media
2	131	C1 Agua de baja salinidad	41	731	C2 Aguas de salinidad media
3	104	C1 Agua de baja salinidad	42	1619	C3 Aguas altamente salinas
4	161	C1 Agua de baja salinidad	43	836	C3 Aguas altamente salinas
5	141	C1 Agua de baja salinidad	44	627	C2 Aguas de salinidad media
6	418	C2 Aguas de salinidad media	45	601	C2 Aguas de salinidad media
7	705	C2 Aguas de salinidad media	46	731	C2 Aguas de salinidad media
8	151	C1 Agua de baja salinidad	47	783	C3 Aguas altamente salinas
9	480	C2 Aguas de salinidad media	48	836	C3 Aguas altamente salinas
10	2637	C4 Aguas muy altamente salinas	49	376	C2 Aguas de salinidad media
11	418	C2 Aguas de salinidad media	50	313	C2 Aguas de salinidad media
12	407	C2 Aguas de salinidad media	51	319	C2 Aguas de salinidad media
13	1906	C3 Aguas altamente salinas	52	1044	C3 Aguas altamente salinas
14	2951	C4 Aguas muy altamente salinas	53	3447	C4 Aguas muy altamente salinas
15	1473	C3 Aguas altamente salinas	54	640	C2 Aguas de salinidad media
16	1483	C3 Aguas altamente salinas	55	888	C3 Aguas altamente salinas
17	1462	C3 Aguas altamente salinas	56	1097	C3 Aguas altamente salinas
18	1358	C3 Aguas altamente salinas	57	1253	C3 Aguas altamente salinas
19	428	C2 Aguas de salinidad media	58	204	C1 Agua de baja salinidad
20	2050	C3 Aguas altamente salinas	59	721	C2 Aguas de salinidad media
21	511	C2 Aguas de salinidad media	60	715	C2 Aguas de salinidad media
22	407	C2 Aguas de salinidad media	61	742	C2 Aguas de salinidad media
23	460	C2 Aguas de salinidad media	62	992	C3 Aguas altamente salinas
24	692	C2 Aguas de salinidad media	63	1253	C3 Aguas altamente salinas
25	241	C1 Agua de baja salinidad	64	731	C2 Aguas de salinidad media
26	888	C3 Aguas altamente salinas	65	486	C2 Aguas de salinidad media
27	186	C1 Agua de baja salinidad	66	1044	C3 Aguas altamente salinas
28	548	C2 Aguas de salinidad media	67	1697	C3 Aguas altamente salinas
29	585	C2 Aguas de salinidad media	68	272	C2 Aguas de salinidad media
30	470	C2 Aguas de salinidad media	69	890	C3 Aguas altamente salinas
31	533	C2 Aguas de salinidad media	70	1097	C3 Aguas altamente salinas
32	282	C2 Aguas de salinidad media	71	1645	C3 Aguas altamente salinas
33	418	C2 Aguas de salinidad media	72	2000	C3 Aguas altamente salinas
34	2191	C3 Aguas altamente salinas	73	574	C2 Aguas de salinidad media
35	486	C2 Aguas de salinidad media	74	1906	C3 Aguas altamente salinas
36	1150	C3 Aguas altamente salinas	75	334	C2 Aguas de salinidad media
37	1597	C3 Aguas altamente salinas	76	1008	C3 Aguas altamente salinas
38	339	C2 Aguas de salinidad media	77	439	C2 Aguas de salinidad media
39	1044	C3 Aguas altamente salinas	78	783	C3 Aguas altamente salinas

Ayers y Westcot (1987) propusieron una clasificación de las aguas de riego, con tres grados de restricción para su uso con base en la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos; de acuerdo a su conductividad eléctrica los puntos de división son los valores 700 y 3000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y en cuanto a los sólidos totales disueltos 450 y 2000 mg L^{-1} , esta clasificación se encuentra en el Cuadro 4 en las directrices de calidad de las aguas.

El Cuadro 23 contiene los resultados para el primer muestreo de acuerdo a la conductividad eléctrica, estos indican que el 50% no tiene ningún grado de restricción para su uso, el 48.5% presentan restricción ligera a moderada y 1.5% muestran un severo grado de restricción para su uso, este punto es el 45 que corresponde al lago de Tequesquitengo. Para el caso de los sólidos totales disueltos, se tiene que 47% no tienen ningún grado de restricción y 51.5% presentan restricción ligera a moderada. El 1.5% tienen una severa restricción para su uso en el riego y es el punto 45.

Los resultados para el segundo muestreo están en el Cuadro 24, para la conductividad eléctrica se obtuvo que el 47.4% que lo constituyen 37 muestras, no tiene ningún grado de restricción para su uso, 51.3% que lo forman 40 muestras, presentan restricción ligera a moderada y el 1.3% presenta un severo grado de restricción para su uso, este punto es el 45. Para el caso de los sólidos totales disueltos, se tiene que 43.6% no tienen ningún grado de restricción y 53.8% presentan el grado de restricción de ligero a moderado. El 2.6% presenta una severa restricción para su uso y son los puntos 14 y 53.

Según Ayers y Westcot (1987), aguas de riego con una CE menor a 700 $\mu\text{S cm}^{-1}$ no son un problema, pero una CE mayor a 3000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ puede afectar el crecimiento de muchos cultivos, por lo que se debe tener cuidado con las aguas de la estación 45 del primer muestreo y 53 del segundo.

La Figura 32 muestra la clasificación de la calidad de las aguas con base a la conductividad eléctrica y Figura 33 indica la clasificación de la calidad de las aguas con base a los sólidos disueltos de la red hidrográfica del estado de Morelos, de acuerdo con Ayers y Westcot (1987).

Cuadro 23. Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, de acuerdo a la salinidad y grado de restricción para su uso (Ayers y Westcot, 1987).

No.	Directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego			
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	STD (mg L^{-1})	Grado de restricción de uso para CE	Grado de restricción de uso para STD
1	107	73	Ninguna	Ninguna
2	147	99	Ninguna	Ninguna
3	113	78	Ninguna	Ninguna
4	733	539	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
5	361	256	Ninguna	Ninguna
6	141	101	Ninguna	Ninguna
7	384	273	Ninguna	Ninguna
8	2510	1720	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
9	401	287	Ninguna	Ninguna
10	519	367	Ninguna	Ninguna
11	1833	1293	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
12	2933	1966	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
13	1438	954	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
14	1495	1013	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
15	271	105	Ninguna	Ninguna
16	874	617	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
17	372	273	Ninguna	Ninguna
18	147	103	Ninguna	Ninguna
19	677	479	Ninguna	Ligera a Moderada
20	248	175	Ninguna	Ninguna
21	186	131	Ninguna	Ninguna
22	508	379	Ninguna	Ninguna
23	468	338	Ninguna	Ninguna
24	519	383	Ninguna	Ninguna
25	237	167	Ninguna	Ninguna
26	2143	1460	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
27	1010	723	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
28	1354	928	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
29	293	209	Ninguna	Ninguna
30	1015	726	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
31	790	574	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
32	1833	1232	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
33	705	491	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada

Continuación... Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, de acuerdo a la salinidad y grado de restricción para su uso (Ayers y Westcot, 1987).

No.	Directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego			
	C.E. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	STD (mg L^{-1})	Grado de restricción de uso para C.E.	Grado de restricción de uso para STD
34	790	616	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
35	1297	927	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
36	790	578	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
37	620	442	Ninguna	Ninguna
38	592	434	Ninguna	Ninguna
39	761	525	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
40	733	514	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
41	761	536	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
42	254	179	Ninguna	Ninguna
43	451	316	Ninguna	Ninguna
44	846	598	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
45	3384	2224	Severo	Severo
46	620	451	Ninguna	Ligera a Moderada
47	959	662	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
48	1072	735	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
49	987	682	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
50	564	404	Ninguna	Ninguna
51	113	78	Ninguna	Ninguna
52	451	317	Ninguna	Ninguna
53	384	263	Ninguna	Ninguna
54	1579	1062	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
55	248	175	Ninguna	Ninguna
56	761	536	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
57	959	675	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
58	1636	1134	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
59	2031	1347	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
60	485	342	Ninguna	Ninguna
61	1833	1229	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
62	463	303	Ninguna	Ninguna
63	338	230	Ninguna	Ninguna
64	1100	741	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
65	417	299	Ninguna	Ninguna
66	722	509	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada

Cuadro 24. Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, de acuerdo a la salinidad y grado de restricción para su uso (Ayers y Westcot, 1987).

No.	Directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego			
	C.E. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	STD (mg L^{-1})	Grado de restricción de uso para C.E.	Grado de restricción de uso para STD
1	125	86	Ninguna	Ninguna
2	131	93	Ninguna	Ninguna
3	104	73	Ninguna	Ninguna
4	161	112	Ninguna	Ninguna
5	141	102	Ninguna	Ninguna
6	418	306	Ninguna	Ninguna
7	705	520	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
8	151	105	Ninguna	Ninguna
9	480	348	Ninguna	Ninguna
10	2637	1870	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
11	418	315	Ninguna	Ninguna
12	407	296	Ninguna	Ninguna
13	1906	1341	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
14	2951	2042	Ligera a Moderada	Severo
15	1473	1023	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
16	1483	1011	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
17	1462	976	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
18	1358	941	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
19	428	307	Ninguna	Ninguna
20	2050	1442	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
21	511	364	Ninguna	Ninguna
22	407	295	Ninguna	Ninguna
23	460	340	Ninguna	Ninguna
24	692	503	Ninguna	Ligera a Moderada
25	241	163	Ninguna	Ninguna
26	888	582	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
27	186	134	Ninguna	Ninguna
28	548	399	Ninguna	Ninguna
29	585	454	Ninguna	Ligera a Moderada
30	470	345	Ninguna	Ninguna
31	533	395	Ninguna	Ninguna
32	282	210	Ninguna	Ninguna
33	418	301	Ninguna	Ninguna
34	2191	1502	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
35	486	367	Ninguna	Ninguna
36	1150	836	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
37	1597	1121	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
38	339	249	Ninguna	Ninguna

Continuación...Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, de acuerdo a la salinidad y grado de restricción para su uso (Ayers y Westcot, 1987).

No.	Directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego			
	C.E. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	STD (mg L^{-1})	Grado de restricción de uso para C.E.	Grado de restricción de uso para STD
39	1044	728	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
40	731	527	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
41	731	507	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
42	1619	1183	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
43	836	657	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
44	627	443	Ninguna	Ninguna
45	601	449	Ninguna	Ninguna
46	731	533	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
47	783	578	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
48	836	610	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
49	376	273	Ninguna	Ninguna
50	313	202	Ninguna	Ninguna
51	319	211	Ninguna	Ninguna
52	1044	752	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
53	3447	2357	Severo	Severo
54	640	475	Ninguna	Ligera a Moderada
55	888	616	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
56	1097	810	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
57	1253	926	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
58	204	145	Ninguna	Ninguna
59	721	507	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
60	715	523	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
61	742	527	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
62	992	688	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
63	1253	892	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
64	731	529	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
65	486	361	Ninguna	Ninguna
66	1044	728	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
67	1697	1186	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
68	272	197	Ninguna	Ninguna
69	890	619	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
70	1097	772	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
71	1645	1126	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
72	2000	1366	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
73	574	364	Ninguna	Ninguna
74	1906	1280	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
75	334	248	Ninguna	Ninguna
76	1008	688	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada
77	439	330	Ninguna	Ninguna
78	783	576	Ligera a Moderada	Ligera a Moderada

5.5.3 Índice de salinidad efectiva

Este índice toma en cuenta los carbonatos de calcio y magnesio y sulfatos de calcio, que precipitan fácilmente cuando el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo, los cuales dejan de participar en la elevación de la presión osmótica, así se conoce mejor los peligros de las sales que se encuentran en solución.

Los resultados del primer muestreo de este índice, se muestran en el Cuadro 25, dentro de la clasificación de buena calidad para el uso en el riego se encuentra el 53% de los puntos, el 43.9% están dentro del tipo de agua condicionada y el 3% no se recomienda su uso.

Para el segundo muestreo tenemos que el 53.8% es de buena calidad, el 44.9% están condicionadas y el 1.3% no se recomiendan para su uso, los resultados se encuentran en el Cuadro 26.

La mayor cantidad de aguas analizadas no representan peligro para su uso, ya que el contenido de calcio y magnesio es mayor que el contenido de carbonatos y sulfatos. Las aguas que están condicionadas para su uso, pueden mezclarse con las sales del suelo ocasionando severos problemas a los cultivos y a los suelos.

Cuadro 25. Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la salinidad efectiva.

No.	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación	No.	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
1	0.44	Buena	34	5.32	Condicionada
2	0.72	Buena	35	4.45	Condicionada
3	0.53	Buena	36	2.57	Buena
4	4.05	Condicionada	37	2.19	Buena
5	1.43	Buena	38	1.46	Buena
6	0.53	Buena	39	3.80	Condicionada
7	1.65	Buena	40	3.36	Condicionada
8	13.41	Condicionada	41	3.38	Condicionada
9	1.36	Buena	42	1.08	Buena
10	2.06	Buena	43	1.45	Buena
11	6.40	Condicionada	44	3.71	Condicionada
12	17.77	No recomendable	45	22.54	No recomendable
13	8.89	Condicionada	46	1.77	Buena
14	7.58	Condicionada	47	4.74	Condicionada
15	0.75	Buena	48	4.91	Condicionada
16	4.06	Condicionada	49	5.12	Condicionada
17	1.37	Buena	50	2.08	Buena
18	0.64	Buena	51	0.59	Buena
19	2.55	Buena	52	1.75	Buena
20	1.03	Buena	53	1.99	Buena
21	0.78	Buena	54	7.15	Condicionada
22	0.99	Buena	55	0.93	Buena
23	1.03	Buena	56	3.25	Condicionada
24	1.34	Buena	57	4.14	Condicionada
25	0.85	Buena	58	6.01	Condicionada
26	9.31	Condicionada	59	7.20	Condicionada
27	3.46	Condicionada	60	1.65	Buena
28	6.40	Condicionada	61	10.08	Condicionada
29	0.94	Buena	62	2.52	Buena
30	4.04	Condicionada	63	1.65	Buena
31	2.88	Buena	64	5.21	Condicionada
32	7.14	Condicionada	65	1.52	Buena
33	3.25	Condicionada	66	3.13	Condicionada

Cuadro 26. Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la salinidad efectiva.

No.	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación	No.	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
1	0.56	Buena	40	3.04	Condicionada
2	0.49	Buena	41	3.74	Condicionada
3	0.41	Buena	42	4.9	Condicionada
4	0.59	Buena	43	5.6	Condicionada
5	0.33	Buena	44	2.64	Buena
6	2.59	Buena	45	1.24	Buena
7	3.17	Condicionada	46	2.12	Buena
8	0.56	Buena	47	1.75	Buena
9	2.24	Buena	48	2.81	Buena
10	13.5	Condicionada	49	0.93	Buena
11	0.77	Buena	50	1.97	Buena
12	1.26	Buena	51	1.7	Buena
13	7.78	Condicionada	52	3.96	Condicionada
14	12.81	Condicionada	53	17.03	No recomendable
15	5.78	Condicionada	54	1.75	Buena
16	6.97	Condicionada	55	3.78	Condicionada
17	6.73	Condicionada	56	4.01	Condicionada
18	5.77	Condicionada	57	3.89	Condicionada
19	1.72	Buena	58	0.7	Buena
20	9.78	Condicionada	59	3.25	Condicionada
21	2.01	Buena	60	2.52	Buena
22	1.64	Buena	61	3.07	Condicionada
23	1.71	Buena	62	5.09	Condicionada
24	2.23	Buena	63	4.06	Condicionada
25	0.86	Buena	64	2.6	Buena
26	4.95	Condicionada	65	0.99	Buena
27	0.69	Buena	66	3.14	Condicionada
28	1.22	Buena	67	6.8	Condicionada
29	0.49	Buena	68	0.79	Buena
30	1.25	Buena	69	4.72	Condicionada
31	1.29	Buena	70	5.15	Condicionada
32	0.68	Buena	71	5.19	Condicionada
33	1.66	Buena	72	8.75	Condicionada
34	8.22	Condicionada	73	2.65	Buena
35	3.2	Condicionada	74	7.22	Condicionada
36	4.72	Condicionada	75	0.71	Buena
37	4.28	Condicionada	76	3.68	Condicionada
38	0.89	Buena	77	1.33	Buena
39	5.37	Condicionada	78	2.86	Buena

5.5.4 Índice de salinidad potencial

La salinidad potencial determina la cantidad de Cl^- y SO_4^{2-} que pueden afectar los cultivos, pues son las últimas sales que permanecen en la solución del suelo cuando la humedad aprovechable disminuye a menos del 50%, es por eso que se debe estimar su efecto sobre la presión osmótica.

En el Cuadro 27, se presentan los resultados del primer muestreo, éstos indican que el 74.2% están clasificadas como aguas buenas para riego, el 24.3% son condicionadas y el 1.5% no se recomiendan para su uso sobre suelos y cultivos en los que se van aplicar estas aguas.

El segundo muestreo se tiene que el 67.9% son de buena calidad, el 30.8% son condicionadas y el 1.3% no se recomiendan para su uso en el riego, esto se puede observar en el Cuadro 28. Como se puede observar el punto 53, que es el lago de Tequesquitengo, es el único que no se recomienda su uso para riego.

En general las aguas muestreadas no representan peligro para su uso, ya que el contenido de cloruros y sulfatos no son muy altos.

Cuadro 27. Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la salinidad potencial.

No.	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación Salinidad Potencial	No.	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación Salinidad Potencial
1	0.39	Buena	34	1.56	Buena
2	0.64	Buena	35	3.60	Condicionada
3	0.49	Buena	36	1.59	Buena
4	2.26	Buena	37	1.47	Buena
5	1.21	Buena	38	0.96	Buena
6	0.44	Buena	39	2.39	Buena
7	1.31	Buena	40	1.99	Buena
8	7.80	Condicionada	41	1.98	Buena
9	1.14	Buena	42	0.92	Buena
10	1.37	Buena	43	1.19	Buena
11	5.52	Condicionada	44	2.50	Buena
12	10.79	Condicionada	45	15.88	No recomendable
13	5.64	Condicionada	46	1.10	Buena
14	5.48	Condicionada	47	3.18	Condicionada
15	0.65	Buena	48	3.82	Condicionada
16	2.59	Buena	49	2.89	Buena
17	0.97	Buena	50	1.64	Buena
18	0.54	Buena	51	0.46	Buena
19	1.84	Buena	52	1.32	Buena
20	0.89	Buena	53	1.49	Buena
21	0.67	Buena	54	6.29	Condicionada
22	0.83	Buena	55	0.78	Buena
23	0.88	Buena	56	1.98	Buena
24	1.12	Buena	57	2.74	Buena
25	0.75	Buena	58	5.61	Condicionada
26	7.55	Condicionada	59	9.03	Condicionada
27	2.31	Buena	60	1.28	Buena
28	4.50	Condicionada	61	6.50	Condicionada
29	0.84	Buena	62	2.01	Buena
30	2.59	Buena	63	1.39	Buena
31	1.80	Buena	64	4.30	Condicionada
32	7.51	Condicionada	65	1.16	Buena
33	2.50	Buena	66	2.25	Buena

Cuadro 28. Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la salinidad potencial.

No.	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación	No.	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación
1	0.45	Buena	40	2.075	Buena
2	0.43	Buena	41	2.55	Buena
3	0.36	Buena	42	4.135	Condicionada
4	0.515	Buena	43	1.81	Buena
5	0.29	Buena	44	1.875	Buena
6	1.365	Buena	45	0.835	Buena
7	1.9	Buena	46	1.685	Buena
8	0.48	Buena	47	1.95	Buena
9	1.42	Buena	48	2.05	Buena
10	8.005	Condicionada	49	0.795	Buena
11	0.505	Buena	50	1.685	Buena
12	0.915	Buena	51	1.49	Buena
13	5.98	Condicionada	52	3.18	Condicionada
14	9.945	Condicionada	53	16.4	No recomendable
15	5.015	Condicionada	54	1.015	Buena
16	5.355	Condicionada	55	3.04	Condicionada
17	6.195	Condicionada	56	2.505	Buena
18	4.465	Condicionada	57	2.23	Buena
19	1.375	Buena	58	0.6	Buena
20	5.895	Condicionada	59	2.015	Buena
21	1.5	Buena	60	1.63	Buena
22	1.175	Buena	61	1.885	Buena
23	1.31	Buena	62	2.715	Buena
24	1.455	Buena	63	4.21	Condicionada
25	0.59	Buena	64	1.76	Buena
26	4.045	Condicionada	65	0.76	Buena
27	0.5	Buena	66	3.74	Condicionada
28	1.03	Buena	67	5.83	Condicionada
29	0.32	Buena	68	0.67	Buena
30	1.01	Buena	69	2.89	Buena
31	1.02	Buena	70	3.655	Condicionada
32	0.48	Buena	71	6.4	Condicionada
33	1.365	Buena	72	7.835	Condicionada
34	7.515	Condicionada	73	3.245	Condicionada
35	1.335	Buena	74	7.9	Condicionada
36	2.905	Buena	75	0.65	Buena
37	5.28	Condicionada	76	3.975	Condicionada
38	0.79	Buena	77	0.97	Buena
39	3.25	Condicionada	78	2.005	Buena

5.6 Clasificación de las aguas en base a la sodicidad

Ninguna zona climática del mundo entero está libre de la salinización, aunque la percepción general es enfocada en regiones áridas y semiáridas, en donde el dominio de sales de sodio es muy común (Rengasamy, 2006).

El proceso de sodificación se da por el uso de aguas con altos contenidos de sodio, particularmente en caso de precipitación limitada y una evaporación alta, entonces, se puede incrementar la sodicidad del suelo significativamente (Jalali *et al.*, 2008).

El peligro de la sodificación queda determinado por las concentraciones absolutas y relativas de los cationes en solución (Richards *et al.*, 1959). La sodificación es cuantificada por RAS y parte del supuesto de que el suelo adsorberá el sodio del agua de riego, y este se irá acumulando, aumentándose el contenido de sodio intercambiable en la solución del suelo, afectando negativamente la estructura del suelo, la dinámica del agua y la producción agrícola (Costa 1999; Ruiz y Wu, 2006 Pereira *et al.*, 2009).

Se utilizaron las diferentes formulaciones de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), tomando en cuenta la precipitación del calcio en forma de carbonatos, ya que la cantidad del calcio precipitado varía de acuerdo al pH y la temperatura.

Para observar el comportamiento de los resultados obtenidos de las diferentes formulaciones del RAS de las estaciones del primer muestreo se realizaron las Figuras 34, 35 y 36 que presentan el el diagrama de clasificación de las aguas para riego de acuerdo a Richards *et al.* (1959) en base a la CE y RAS. El RAS original se encuentra en la Figura 34, el RAS ajustado en la 35 y RAS^o en la 36. El 100% de las muestras presentan una clasificación S1, en el RAS original y corregido. En el RAS ajustado el 97% presentan una clasificación S1 y el 3% S2, estos resultados se observan en el Cuadro 29. S1 indica que las aguas son bajas en sodio y pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de que alcancen niveles peligrosos de sodio intercambiable, S2 son aguas medias en sodio, estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

Cuadro 29. Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la sodicidad.

No.	Clasificación en base al RAS					
	RAS original	Tipo	RAS ajustado	Tipo	RAS corregido	Tipo
1	0.334	S1	0.144	S1	0.220	S1
2	0.399	S1	0.297	S1	0.285	S1
3	0.427	S1	0.193	S1	0.278	S1
4	2.953	S1	5.304	S1	3.418	S1
5	0.867	S1	1.187	S1	0.858	S1
6	0.441	S1	0.323	S1	0.324	S1
7	1.148	S1	1.507	S1	1.125	S1
8	1.043	S1	2.782	S1	1.250	S1
9	0.592	S1	0.969	S1	0.637	S1
10	0.373	S1	0.660	S1	0.405	S1
11	0.410	S1	1.110	S1	0.595	S1
12	0.800	S1	2.152	S1	0.975	S1
13	0.589	S1	1.236	S1	0.658	S1
14	0.447	S1	1.047	S1	0.541	S1
15	0.610	S1	0.738	S1	0.582	S1
16	0.540	S1	1.127	S1	0.660	S1
17	1.063	S1	1.473	S1	1.069	S1
18	0.460	S1	0.305	S1	0.339	S1
19	0.501	S1	0.995	S1	0.575	S1
20	0.486	S1	0.562	S1	0.433	S1
21	0.376	S1	0.353	S1	0.301	S1
22	0.116	S1	0.240	S1	0.147	S1
23	0.101	S1	0.186	S1	0.113	S1
24	0.587	S1	1.161	S1	0.710	S1
25	0.375	S1	0.432	S1	0.338	S1
26	0.229	S1	0.599	S1	0.301	S1
27	0.936	S1	1.093	S1	1.087	S1
28	0.242	S1	0.571	S1	0.299	S1
29	0.582	S1	0.727	S1	0.560	S1
30	0.844	S1	1.876	S1	1.023	S1
31	0.534	S1	2.348	S1	0.660	S1
32	0.312	S1	0.740	S1	0.398	S1
33	0.631	S1	1.236	S1	0.735	S1
34	3.960	S1	6.873	S2	4.463	S1

Continuación... Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la sodicidad.

No.	Clasificación en base al RAS					
	RAS original	Tipo	RAS ajustado	Tipo	RAS corregido	Tipo
35	0.457	S1	1.154	S1	0.643	S1
36	0.472	S1	2.096	S1	0.590	S1
37	0.482	S1	0.926	S1	0.544	S1
38	0.367	S1	0.716	S1	0.418	S1
39	0.213	S1	0.414	S1	0.241	S1
40	0.217	S1	0.432	S1	0.250	S1
41	0.196	S1	0.395	S1	0.228	S1
42	0.523	S1	0.617	S1	0.469	S1
43	0.290	S1	0.482	S1	0.307	S1
44	0.683	S1	1.404	S1	0.817	S1
45	2.154	S1	4.950	S2	2.461	S1
46	0.402	S1	0.800	S1	0.462	S1
47	0.412	S1	0.881	S1	0.495	S1
48	0.484	S1	1.066	S1	0.596	S1
49	0.148	S1	0.313	S1	0.173	S1
50	0.280	S1	0.553	S1	0.331	S1
51	0.239	S1	0.101	S1	0.155	S1
52	0.389	S1	0.619	S1	0.405	S1
53	0.422	S1	0.593	S1	0.410	S1
54	0.383	S1	0.885	S1	0.470	S1
55	0.266	S1	0.311	S1	0.243	S1
56	0.464	S1	0.904	S1	0.522	S1
57	0.845	S1	1.777	S1	0.991	S1
58	0.357	S1	0.892	S1	0.480	S1
59	0.262	S1	0.569	S1	0.313	S1
60	0.425	S1	0.718	S1	0.453	S1
61	0.315	S1	0.755	S1	0.377	S1
62	0.250	S1	0.372	S1	0.251	S1
63	0.531	S1	0.689	S1	0.505	S1
64	0.391	S1	0.791	S1	0.446	S1
65	0.844	S1	1.303	S1	0.875	S1
66	0.533	S1	1.063	S1	0.632	S1

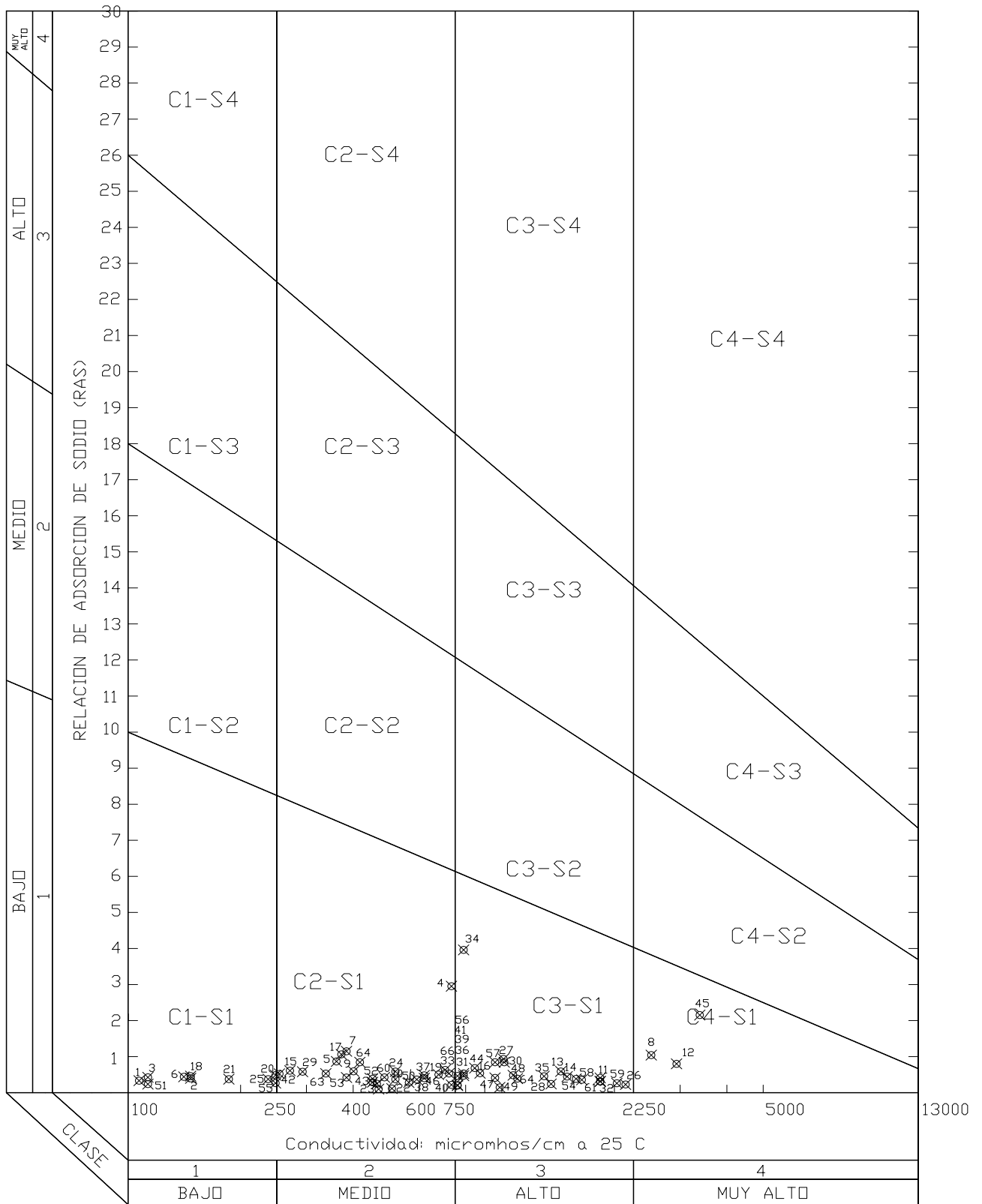


Figura 34. Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards *et al.* (1959), del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS original).

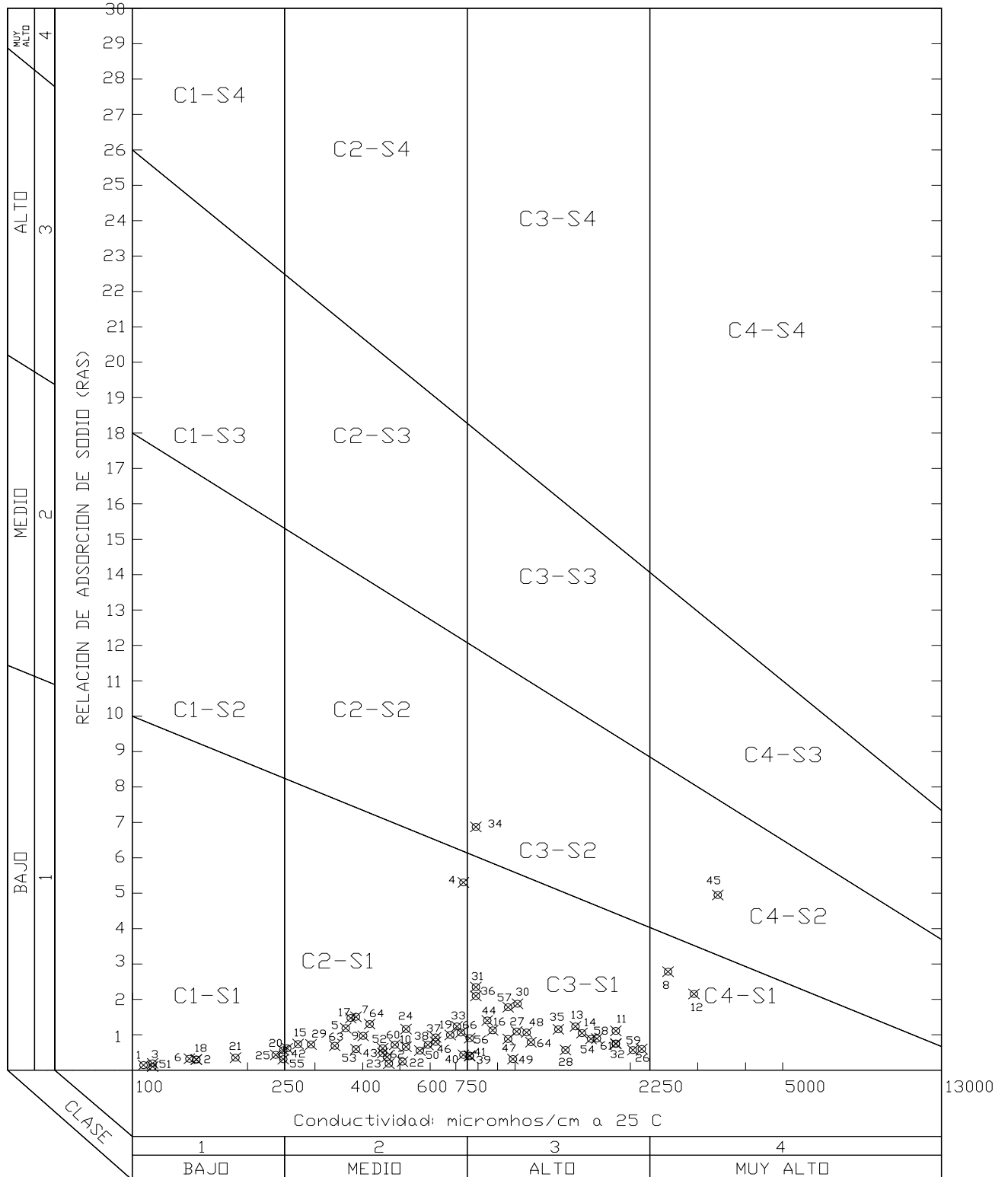


Figura 35. Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards *et al.* (1959), del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS_{aj}).

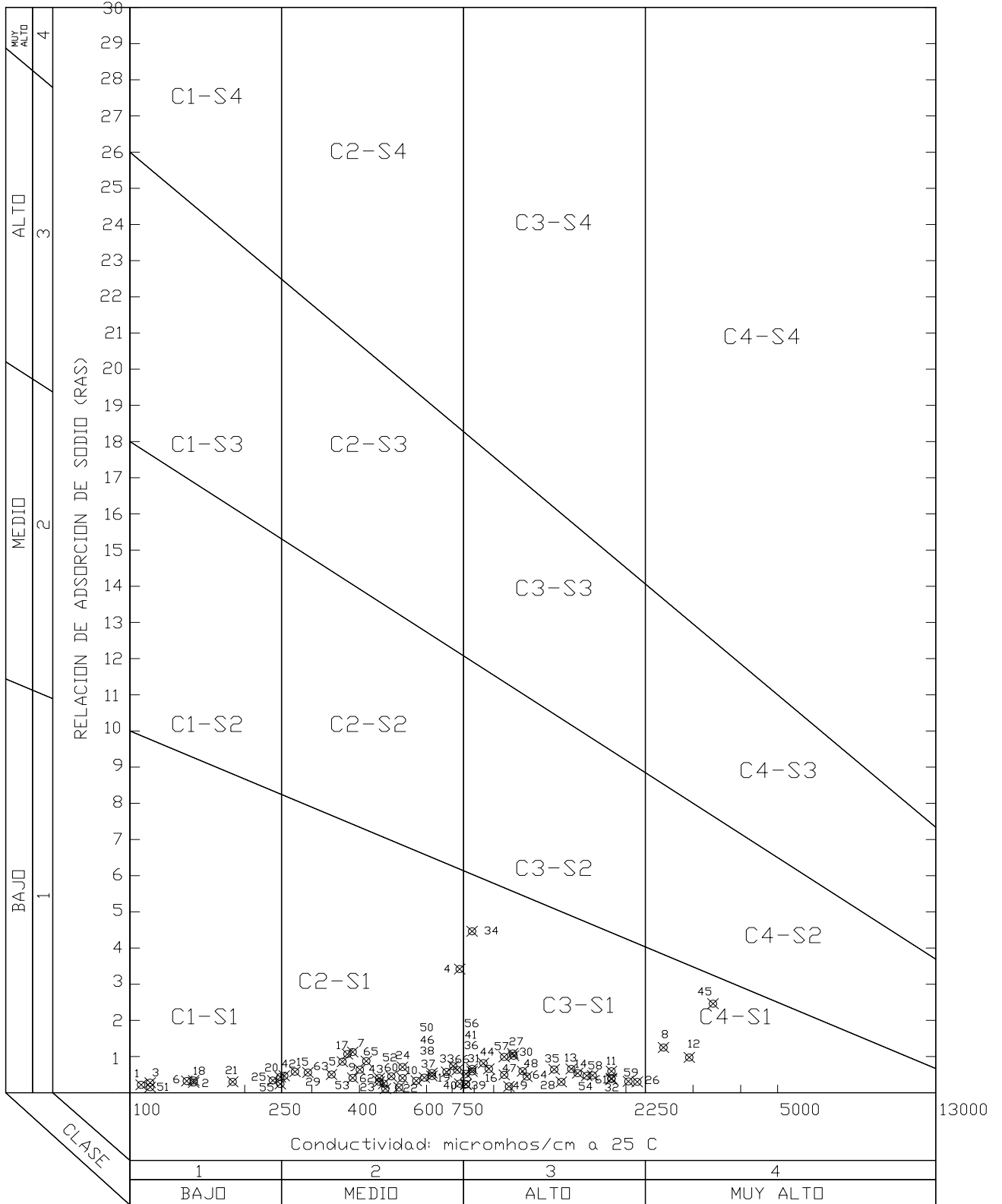


Figura 36. Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards *et al.* (1959), del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS^o).

En el Cuadro 30 se tienen los resultados del segundo muestreo, para el caso del RAS original el 100% de las muestras se clasifican en S1 y para el RAS ajustado el 96.2% están en S1 y el 3.8% en S2, En el caso del RAS^o, 98.7% están clasificados como S1 y 1.3% en S2, los diagramas de este muestreo se encuentran en las Figuras 37, 38 y 39 respectivamente. S1 son aguas con poco sodio y S2 agua media en sodio.

El incremento de los niveles de sodio intercambiable, representa una de las alteraciones más característica después del riego con aguas residuales, además de altos contenidos de sales, materia orgánica disuelta y cuerpos sólidos suspendidos (Heidarpour *et al.*, 2007; Pereira *et al.*, 2009).

El RAS expresa la posibilidad de que el sodio se adsorba en el complejo de cambio del suelo y la presencia de otros cationes, en especial el Ca^{2+} reduce esta posibilidad (Ortega y Orellana, 2007), en el área de estudio se cuenta con el predominio del calcio, por lo que el riesgo de sodificar los suelos es mínimo.

Cuando se riega con aguas de RAS elevado no se debe permitir que el suelo se seque, debido a que se precipitaran los bicarbonatos de calcio y magnesio, y posteriormente el yeso, de esta manera la solución edáfica perderá los cationes alcalinotérreos con lo que el RAS se elevará y parte del sodio tendrá mayor oportunidad de entrar a formar parte del complejo de cambio (Ortega y Orellana, 2007), para evitar esto los riegos deben ser frecuentes, otra medida es la corrección del RAS del agua de riego, es añadiéndole yeso (Halliwell *et al.*, 2001; Surapaneni y Olsson, 2002;).

Altos niveles del RAS puede afectar directamente la nutrición de planta por deficiencias de calcio y magnesio (Gardner 2004). En gran medida se debe a la inhibición del crecimiento de la raíz a causa de los efectos adversos en la estructura del suelo (Balks *et al.*, 1998; Oster y Shainberg, 2001; Goykovic y Saavedra, 2007).

Cuadro 30. Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la sodicidad

No.	Clasificación en base al RAS					
	RAS original	Tipo	RAS ajustado	Tipo	RAS corregido	Tipo
1	0.394	S1	0.249	S1	0.267	S1
2	0.352	S1	0.176	S1	0.253	S1
3	0.281	S1	0.144	S1	0.185	S1
4	0.322	S1	0.285	S1	0.255	S1
5	0.383	S1	0.224	S1	0.314	S1
6	2.678	S1	3.198	S1	2.581	S1
7	2.070	S1	3.961	S1	2.473	S1
8	0.255	S1	0.184	S1	0.201	S1
9	1.814	S1	2.627	S1	1.855	S1
10	1.560	S1	4.511	S2	2.163	S1
11	0.533	S1	0.921	S1	0.589	S1
12	0.356	S1	0.598	S1	0.385	S1
13	0.548	S1	1.450	S1	0.758	S1
14	0.938	S1	2.765	S1	1.343	S1
15	0.572	S1	1.394	S1	0.757	S1
16	0.574	S1	1.337	S1	0.709	S1
17	0.596	S1	1.291	S1	0.702	S1
18	0.407	S1	0.978	S1	0.522	S1
19	1.155	S1	1.742	S1	1.186	S1
20	2.439	S1	5.909	S2	2.863	S1
21	0.990	S1	1.663	S1	1.059	S1
22	1.182	S1	1.750	S1	1.204	S1
23	1.302	S1	2.176	S1	1.425	S1
24	0.528	S1	1.099	S1	0.643	S1
25	0.898	S1	0.925	S1	0.760	S1
26	0.619	S1	0.971	S1	0.616	S1
27	0.312	S1	0.309	S1	0.259	S1
28	0.105	S1	0.216	S1	0.127	S1
29	0.120	S1	0.270	S1	0.163	S1
30	0.632	S1	1.145	S1	0.718	S1
31	0.601	S1	1.189	S1	0.720	S1
32	0.478	S1	0.606	S1	0.467	S1
33	1.231	S1	1.876	S1	1.277	S1
34	0.217	S1	0.582	S1	0.299	S1
35	3.354	S1	5.155	S1	3.601	S1
36	1.693	S1	3.958	S1	2.221	S1
37	0.308	S1	0.805	S1	0.454	S1
38	0.618	S1	0.932	S1	0.639	S1
39	1.504	S1	2.822	S1	1.636	S1

Continuación. Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a la sodicidad.

No.	Clasificación en base al RAS					
	RAS original	Tipo	RAS ajustado	Tipo	RAS corregido	Tipo
40	0.694	S1	1.347	S1	0.788	S1
41	0.876	S1	1.672	S1	0.993	S1
42	0.337	S1	0.926	S1	0.508	S1
43	3.659	S1	6.773	S2	4.320	S1
44	0.479	S1	0.898	S1	0.532	S1
45	0.274	S1	0.594	S1	0.356	S1
46	0.212	S1	0.462	S1	0.278	S1
47	0.202	S1	0.456	S1	0.279	S1
48	0.195	S1	0.426	S1	0.250	S1
49	0.588	S1	0.900	S1	0.609	S1
50	0.599	S1	0.568	S1	0.518	S1
51	0.621	S1	0.663	S1	0.563	S1
52	0.561	S1	1.299	S1	0.741	S1
53	2.638	S1	6.518	S1	3.426	S2
54	0.307	S1	0.650	S1	0.393	S1
55	0.456	S1	0.968	S1	0.563	S1
56	0.534	S1	1.307	S1	0.757	S1
57	0.365	S1	0.960	S1	0.553	S1
58	0.446	S1	0.412	S1	0.385	S1
59	0.253	S1	0.508	S1	0.297	S1
60	0.281	S1	0.589	S1	0.344	S1
61	0.312	S1	0.633	S1	0.366	S1
62	0.138	S1	0.288	S1	0.158	S1
63	0.427	S1	1.016	S1	0.576	S1
64	0.272	S1	0.561	S1	0.323	S1
65	0.541	S1	1.001	S1	0.619	S1
66	0.417	S1	0.917	S1	0.538	S1
67	0.367	S1	0.926	S1	0.481	S1
68	0.241	S1	0.322	S1	0.234	S1
69	0.493	S1	0.976	S1	0.568	S1
70	0.425	S1	0.941	S1	0.519	S1
71	0.360	S1	0.864	S1	0.480	S1
72	0.335	S1	0.809	S1	0.422	S1
73	0.347	S1	0.495	S1	0.318	S1
74	0.357	S1	0.823	S1	0.444	S1
75	0.405	S1	0.607	S1	0.416	S1
76	0.375	S1	0.757	S1	0.439	S1
77	0.941	S1	1.723	S1	1.109	S1
78	0.507	S1	1.084	S1	0.650	S1

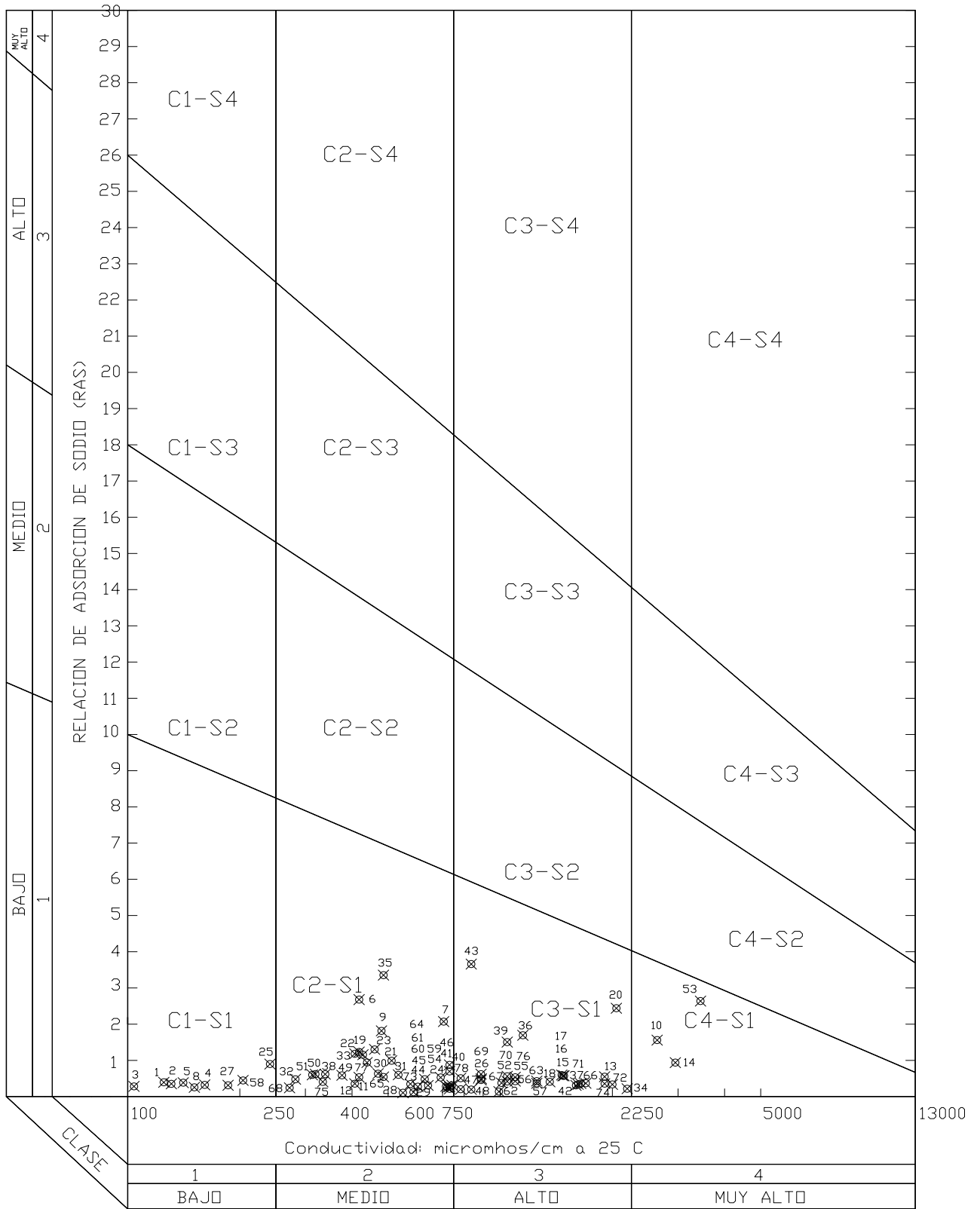


Figura 37. Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards *et al.* (1959), del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS original).

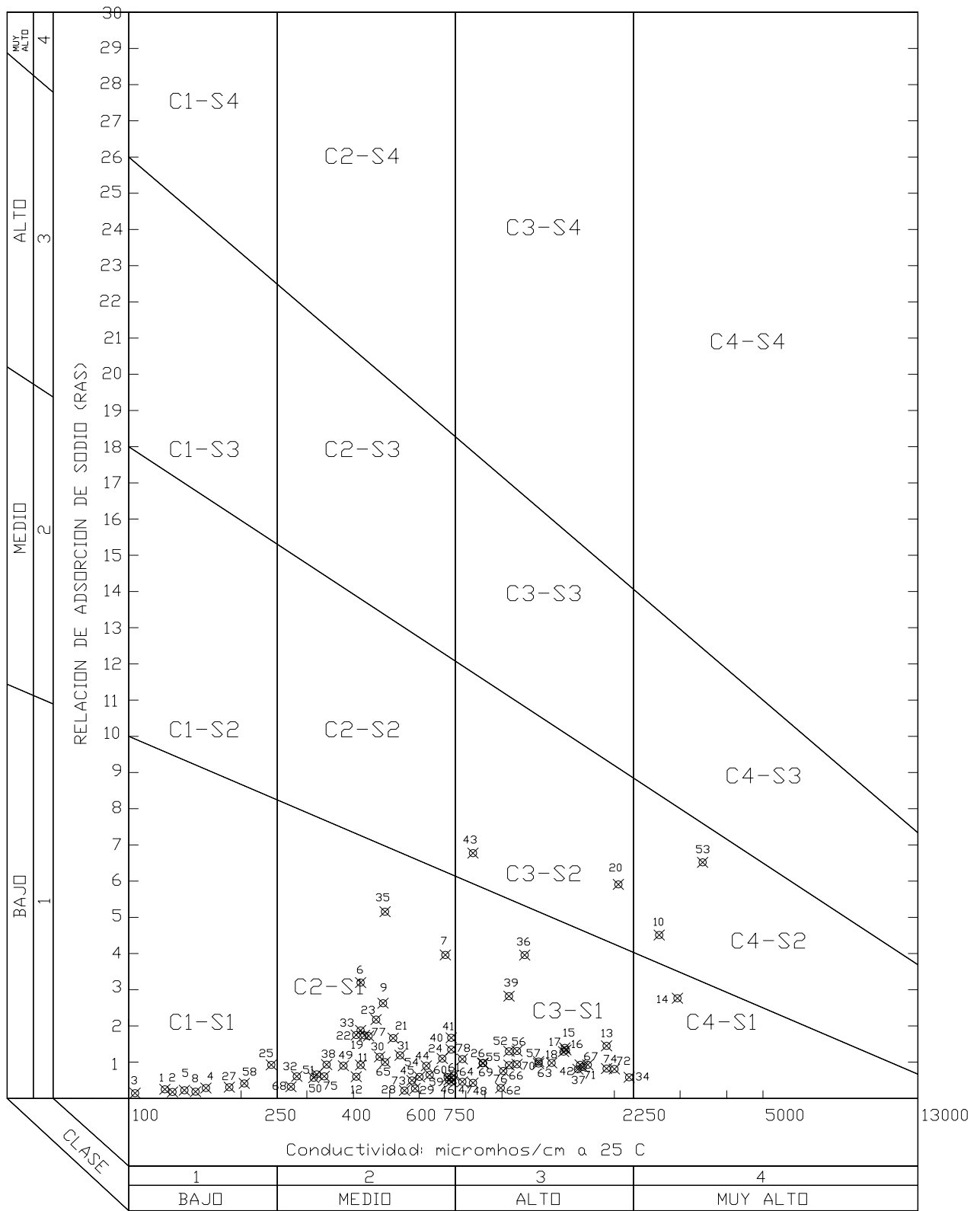


Figura 38. Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards *et al.* (1959), del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS_{aj}).

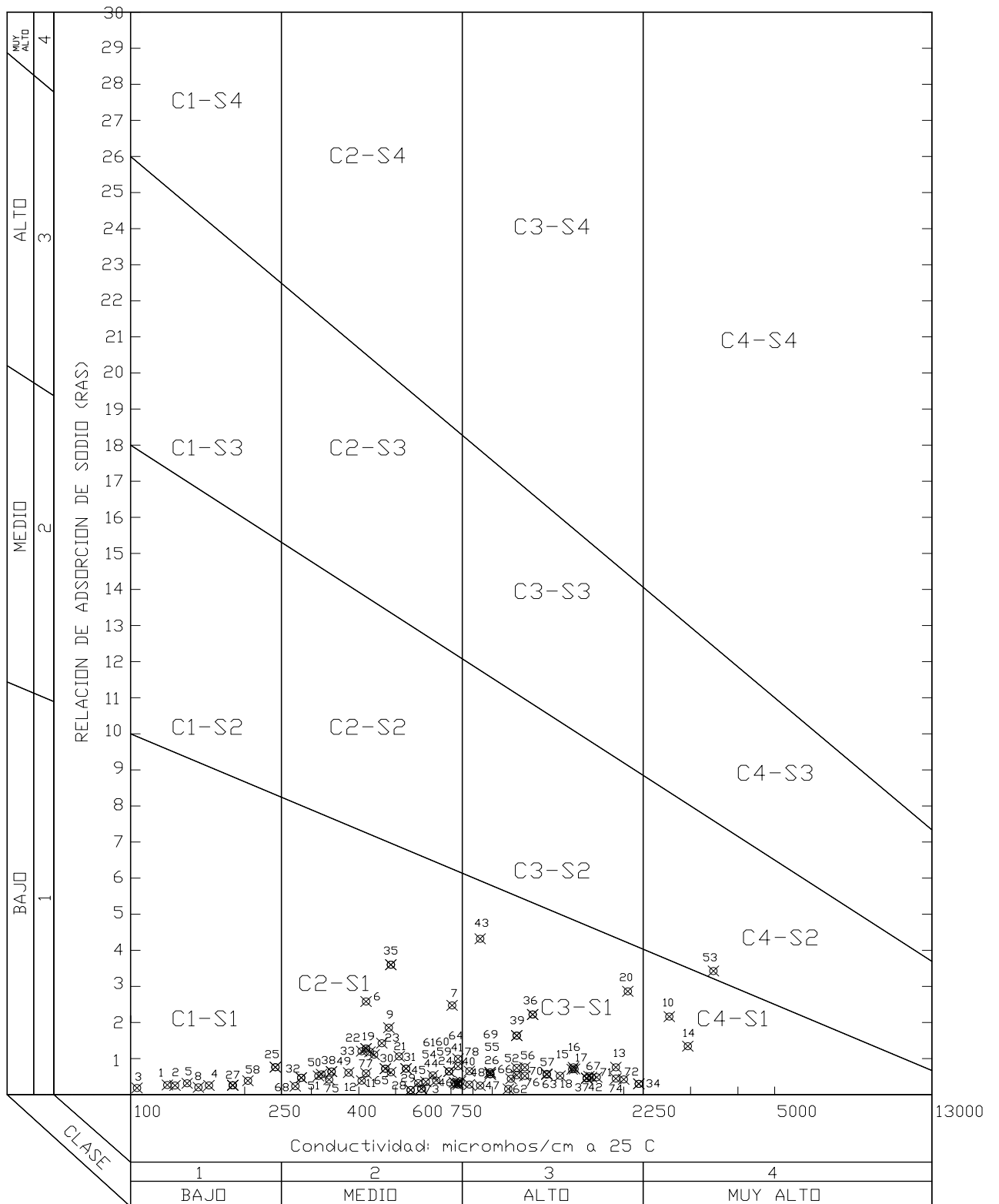


Figura 39. Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards *et al.* (1959), del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS^o).

5.7 Efecto de la concentración de iones CO_3^{2-} y HCO_3^-

La composición aniónica del agua de riego también importa, especialmente los contenidos de carbonatos y bicarbonatos. Esto se debe a que en los suelos, el agua puede precipitar o disolver carbonato de calcio agravando o disminuyendo la peligrosidad por sodio.

Un exceso de bicarbonato en el agua de riego causará una reacción alcalina en el suelo, debido a que precipita con los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} formando los carbonatos respectivos (Gardner, 2004). A medida que precipitan, aumenta la concentración relativa de Na^+ y por tanto, el riesgo de sodificación del suelo, a pesar de que la cantidad presente de sodio no ha variado (Bacarro *et al.*, 2006).

Los trabajos de Wilcox *et al.* (1954) demostraron que cuando se incrementan los valores de bicarbonatos en el agua, se incrementa la cantidad de CaCO_3 precipitado, esta precipitación es directamente proporcional al incremento del PSI en el suelo. Richards *et al.* (1959) indica que Eaton en 1950 reportó que aguas de riego con excesos de bicarbonatos en relación al calcio y magnesio, aumentaron el PSI del suelo y propuso tres términos para referirse a este incremento y son: Por ciento de sodio encontrado, por ciento de sodio posible, y carbonato de sodio residual.

5.7.1 Porcentaje de sodio encontrado

El peligro de desplazamiento del calcio y magnesio por el sodio en el complejo de intercambio catiónico, empieza cuando el contenido de sodio en solución presenta más de la mitad de los cationes disueltos, y como la cantidad de sodio en solución en el agua de riego no es suficiente para desplazar al calcio y al magnesio, entonces se estima después de que se precipitan los carbonatos de calcio y magnesio y sulfatos de calcio, pues de esta manera se incrementa el contenido de sodio en solución.

El porcentaje de sodio intercambiable, ha sido utilizado para clasificar la intensidad de sodificación de suelos (Jalali *et al.*, 2008).

Se puede pronosticar el valor aproximado del PSI que tendrá el suelo a partir del valor del RAS del agua de riego cuando esté en equilibrio con el suelo (Ruda *et al.*, 2005). Sin embargo es de esperarse que el equilibrio no siempre se cumpla en condiciones de campo, ya que la solución del suelo casi siempre posee mayor concentración de sales que el agua de riego, esto causaría que el PSI sea más alto que el esperado a partir del RAS del agua de riego (Baccaro *et al.*, 2006).

En el primer muestreo, el 59.1% de las aguas tendrá poca probabilidad de generar suelos sódicos y el 40.9% tiene probabilidad de formar suelos sódicos, estos resultados se aprecian en el Cuadro 31.

Para los resultados del segundo muestreo se tiene el Cuadro 32, que indican que el 55.1% de las muestras analizadas no provocarán suelos sódicos, mientras que el 44.9% tienen posibilidades de provocar suelos sódicos.

En aguas residuales comúnmente presentan altas concentraciones de sodio en comparación con otros cationes (Heidarpour *et al.*, 2007; Bhardwaj *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2009), lo cual concuerda con los resultados obtenidos del presente estudio, ya que las muestras que contienen mayor cantidad de sodio son aquellas tomadas en ríos, arroyos y lagunas, que reciben descargas de aguas residuales tanto de poblaciones como industrias que hay a lo largo de su cauce.

Cuadro 31. Efecto posible del porcentaje de sodio encontrado de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Porcentaje de Na encontrado	Clasificación	No.	Porcentaje de Na encontrado	Clasificación
1	21.00	Probabilidad de suelos sódicos	34	64.01	Probabilidad de suelos sódicos
2	20.98	Probabilidad de suelos sódicos	35	8.66	No hay problema de suelos sódicos
3	25.23	Probabilidad de suelos sódicos	36	11.34	No hay problema de suelos sódicos
4	53.90	Probabilidad de suelos sódicos	37	12.96	No hay problema de suelos sódicos
5	28.15	Probabilidad de suelos sódicos	38	10.23	No hay problema de suelos sódicos
6	23.85	Probabilidad de suelos sódicos	39	5.35	No hay problema de suelos sódicos
7	34.53	Probabilidad de suelos sódicos	40	5.56	No hay problema de suelos sódicos
8	13.82	No hay problema de suelos sódicos	41	4.95	No hay problema de suelos sódicos
9	19.17	Probabilidad de suelos sódicos	42	21.16	Probabilidad de suelos sódicos
10	11.07	No hay problema de suelos sódicos	43	9.32	No hay problema de suelos sódicos
11	6.61	No hay problema de suelos sódicos	44	15.53	Probabilidad de suelos sódicos
12	10.01	No hay problema de suelos sódicos	45	23.31	Probabilidad de suelos sódicos
13	10.50	No hay problema de suelos sódicos	46	10.93	No hay problema de suelos sódicos
14	7.92	No hay problema de suelos sódicos	47	9.06	No hay problema de suelos sódicos
15	23.37	Probabilidad de suelos sódicos	48	10.02	No hay problema de suelos sódicos
16	12.31	No hay problema de suelos sódicos	49	3.30	No hay problema de suelos sódicos
17	33.14	Probabilidad de suelos sódicos	50	8.19	No hay problema de suelos sódicos
18	24.26	Probabilidad de suelos sódicos	51	15.09	Probabilidad de suelos sódicos
19	12.88	No hay problema de suelos sódicos	52	12.27	No hay problema de suelos sódicos
20	20.09	Probabilidad de suelos sódicos	53	14.36	No hay problema de suelos sódicos
21	18.56	Probabilidad de suelos sódicos	54	6.65	No hay problema de suelos sódicos
22	3.61	No hay problema de suelos sódicos	55	11.59	No hay problema de suelos sódicos
23	3.27	No hay problema de suelos sódicos	56	11.35	No hay problema de suelos sódicos
24	16.87	Probabilidad de suelos sódicos	57	17.78	Probabilidad de suelos sódicos
25	16.36	Probabilidad de suelos sódicos	58	6.11	No hay problema de suelos sódicos
26	3.46	No hay problema de suelos sódicos	59	4.05	No hay problema de suelos sódicos
27	18.98	Probabilidad de suelos sódicos	60	12.90	No hay problema de suelos sódicos
28	4.59	No hay problema de suelos sódicos	61	5.12	No hay problema de suelos sódicos
29	21.71	Probabilidad de suelos sódicos	62	7.96	No hay problema de suelos sódicos
30	17.31	Probabilidad de suelos sódicos	63	18.77	Probabilidad de suelos sódicos
31	12.80	No hay problema de suelos sódicos	64	8.09	No hay problema de suelos sódicos
32	5.06	No hay problema de suelos sódicos	65	25.69	Probabilidad de suelos sódicos
33	15.69	Probabilidad de suelos sódicos	66	13.23	No hay problema de suelos sódicos

Cuadro 32. Efecto posible del porcentaje de sodio encontrado de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Porcentaje de Na encontrado	Clasificación	No.	Porcentaje de Na encontrado	Clasificación
1	22.31	Probabilidad de suelos sódicos	40	17.06	Probabilidad de suelos sódicos
2	19.84	Probabilidad de suelos sódicos	41	20.92	Probabilidad de suelos sódicos
3	18.00	Probabilidad de suelos sódicos	42	5.89	No hay problema de suelos sódicos
4	16.67	Probabilidad de suelos sódicos	43	61.34	Probabilidad de suelos sódicos
5	20.74	Probabilidad de suelos sódicos	44	12.98	No hay problema de suelos sódicos
6	60.41	Probabilidad de suelos sódicos	45	7.72	No hay problema de suelos sódicos
7	42.92	Probabilidad de suelos sódicos	46	5.44	No hay problema de suelos sódicos
8	13.99	No hay problema de suelos sódicos	47	5.08	No hay problema de suelos sódicos
9	44.89	Probabilidad de suelos sódicos	48	4.74	No hay problema de suelos sódicos
10	19.47	Probabilidad de suelos sódicos	49	19.56	Probabilidad de suelos sódicos
11	17.08	Probabilidad de suelos sódicos	50	21.92	Probabilidad de suelos sódicos
12	11.87	No hay problema de suelos sódicos	51	22.33	Probabilidad de suelos sódicos
13	8.58	No hay problema de suelos sódicos	52	11.85	No hay problema de suelos sódicos
14	11.57	No hay problema de suelos sódicos	53	27.83	Probabilidad de suelos sódicos
15	10.09	No hay problema de suelos sódicos	54	8.32	No hay problema de suelos sódicos
16	10.09	No hay problema de suelos sódicos	55	10.36	No hay problema de suelos sódicos
17	10.52	No hay problema de suelos sódicos	56	11.03	No hay problema de suelos sódicos
18	7.57	No hay problema de suelos sódicos	57	7.12	No hay problema de suelos sódicos
19	33.25	Probabilidad de suelos sódicos	58	20.31	Probabilidad de suelos sódicos
20	31.80	Probabilidad de suelos sódicos	59	6.51	No hay problema de suelos sódicos
21	26.92	Probabilidad de suelos sódicos	60	7.32	No hay problema de suelos sódicos
22	34.27	Probabilidad de suelos sódicos	61	7.86	No hay problema de suelos sódicos
23	35.95	Probabilidad de suelos sódicos	62	3.07	No hay problema de suelos sódicos
24	13.39	No hay problema de suelos sódicos	63	8.35	No hay problema de suelos sódicos
25	34.06	Probabilidad de suelos sódicos	64	7.01	No hay problema de suelos sódicos
26	13.89	No hay problema de suelos sódicos	65	16.17	Probabilidad de suelos sódicos
27	15.25	Probabilidad de suelos sódicos	66	8.81	No hay problema de suelos sódicos
28	3.16	No hay problema de suelos sódicos	67	6.25	No hay problema de suelos sódicos
29	3.47	No hay problema de suelos sódicos	68	10.08	No hay problema de suelos sódicos
30	18.86	Probabilidad de suelos sódicos	69	11.23	No hay problema de suelos sódicos
31	17.02	Probabilidad de suelos sódicos	70	8.93	No hay problema de suelos sódicos
32	18.92	Probabilidad de suelos sódicos	71	6.13	No hay problema de suelos sódicos
33	35.28	Probabilidad de suelos sódicos	72	5.27	No hay problema de suelos sódicos
34	3.24	No hay problema de suelos sódicos	73	9.87	No hay problema de suelos sódicos
35	65.22	Probabilidad de suelos sódicos	74	5.66	No hay problema de suelos sódicos
36	29.89	Probabilidad de suelos sódicos	75	14.87	No hay problema de suelos sódicos
37	5.35	No hay problema de suelos sódicos	76	8.08	No hay problema de suelos sódicos
38	21.41	Probabilidad de suelos sódicos	77	27.46	Probabilidad de suelos sódicos
39	28.34	Probabilidad de suelos sódicos	78	12.27	No hay problema de suelos sódicos

5.7.2 Porcentaje de sodio posible

En el cuadro 33 se aprecian los resultados del primer muestreo, obteniendo el 65.2% de la muestras analizadas tienen una clasificación buena y el 34.8% son condicionadas, aunque estas representan solo 23 muestras, se debe tener cuidado en los suelos en donde se va a aplicar el riego y seleccionar cultivos adecuados.

Para el segundo muestreo se tiene el Cuadro 34, en donde se indican los resultados, el 70.5% están clasificadas como buena para su uso y el 29.5% no son recomendadas.

Las muestras que están dentro de la categoría de no recomendable, proceden de los cauces de ríos en donde existen grandes localidades, esto significa que el aporte de aguas de drenaje a los cauces naturales, tiene una gran importancia para la presencia de sodio en las aguas.

Cuadro 33. Porcentaje de sodio posible de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Porcentaje de Na posible	Clasificación	No.	Porcentaje de Na posible	Clasificación
1	-2.67	Buena	34	4.94	Condicionada
2	3.03	Condicionada	35	0.19	Buena
3	-11.44	Buena	36	0.71	Condicionada
4	1.84	Condicionada	37	1.02	Condicionada
5	3.61	Condicionada	38	-2.14	Buena
6	-2.34	Buena	39	0.25	Buena
7	2.40	Condicionada	40	0.40	Buena
8	0.08	Buena	41	0.45	Buena
9	2.69	Condicionada	42	3.16	Condicionada
10	1.21	Condicionada	43	-1.36	Buena
11	0.12	Buena	44	0.41	Buena
12	0.06	Buena	45	0.07	Buena
13	0.12	Buena	46	4.52	Condicionada
14	0.12	Buena	47	0.26	Buena
15	-2.06	Buena	48	0.20	Buena
16	0.32	Buena	49	0.22	Buena
17	-712.50	Buena	50	0.50	Condicionada
18	-3.25	Buena	51	4.71	Condicionada
19	0.71	Condicionada	52	3.28	Condicionada
20	4.45	Condicionada	53	0.67	Condicionada
21	-8.86	Buena	54	0.10	Buena
22	-1.30	Buena	55	-2.31	Buena
23	-0.17	Buena	56	0.49	Buena
24	3.86	Condicionada	57	0.34	Buena
25	-5.52	Buena	58	0.10	Buena
26	0.06	Buena	59	0.05	Buena
27	0.34	Buena	60	5.73	Condicionada
28	0.11	Buena	61	0.09	Buena
29	-3.82	Buena	62	0.52	Condicionada
30	0.35	Buena	63	1.31	Condicionada
31	0.59	Condicionada	64	0.13	Buena
32	0.07	Buena	65	2.45	Condicionada
33	0.41	Buena	66	0.38	Buena

Cuadro 34. Porcentaje de sodio posible de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Porcentaje de Na posible	Clasificación	No.	Porcentaje de Na posible	Clasificación
1	7.42	Condicionada	40	0.55	Condicionada
2	-4.76	Buena	41	0.47	Buena
3	-3.91	Buena	42	0.16	Buena
4	-2.68	Buena	43	16.09	Condicionada
5	-0.56	Buena	44	0.64	Condicionada
6	21.36	Condicionada	45	-9.00	Buena
7	1.65	Condicionada	46	0.27	Buena
8	-0.85	Buena	47	0.22	Buena
9	2.23	Condicionada	48	0.26	Buena
10	0.12	Buena	49	-2.46	Buena
11	-1.38	Buena	50	0.92	Condicionada
12	32.41	Condicionada	51	1.55	Condicionada
13	0.12	Buena	52	0.29	Buena
14	0.09	Buena	53	0.12	Buena
15	0.15	Buena	54	2.73	Condicionada
16	0.13	Buena	55	0.27	Buena
17	0.12	Buena	56	0.36	Buena
18	0.14	Buena	57	0.34	Buena
19	2.33	Condicionada	58	-1.46	Buena
20	0.13	Buena	59	0.33	Buena
21	1.17	Condicionada	60	0.62	Condicionada
22	2.45	Condicionada	61	0.51	Condicionada
23	16.15	Condicionada	62	0.29	Buena
24	0.90	Condicionada	63	0.16	Buena
25	-2.74	Buena	64	0.79	Condicionada
26	0.18	Buena	65	-2.99	Buena
27	-6.11	Buena	66	0.16	Buena
28	-0.31	Buena	67	0.11	Buena
29	-0.26	Buena	68	-0.94	Buena
30	7.03	Condicionada	69	0.26	Buena
31	5.70	Condicionada	70	0.21	Buena
32	-0.82	Buena	71	0.09	Buena
33	3.23	Condicionada	72	0.08	Buena
34	0.06	Buena	73	0.18	Buena
35	-3.23	Buena	74	0.07	Buena
36	0.43	Buena	75	-1.03	Buena
37	0.10	Buena	76	0.13	Buena
38	-3.80	Buena	77	7.56	Condicionada
39	0.25	Buena	78	0.46	Buena

5.7.3 Carbonato de sodio residual

Cuando la concentración de carbonatos y bicarbonatos sobrepasan al calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio, sal altamente soluble, que permanece en la solución del suelo aún cuando se produce la precipitación de los carbonatos de calcio y magnesio. En estas condiciones el sodio puede ser suficiente para desplazar el calcio y al magnesio del complejo de intercambio, produciendo la defloculación del suelo (Coras, 1996).

Para el primer muestreo se tiene que el 97% son aguas bajas en carbonato de sodio residual, lo que indica que son buenas para el riego, el 1.5% están condicionadas para el riego y el 1.5% no son recomendables, estas aguas están mezcladas con descargas de drenaje, esto se observa en el Cuadro 35.

Los resultados del segundo muestreo se encuentran en el Cuadro 36, indican que el 97% son buenas para el riego, el 1.5% están condicionadas para el riego y el 1.5% no son recomendables. Para ambos muestreos es la Laguna de Coatetelco no se recomienda que se utilice para riego

Pocas muestras presentaron CSR mayor a 2.5 mmolc L^{-1} (Cuadro 36 y 37) y son consideradas perjudiciales para el riego. Cuando la diferencia es negativa no existe el problema y el valor de CSR puede suponerse iguala cero.

El CSR se emplea para predecir el peligro del Na^+ asociado con la precipitación del carbonato de calcio, tiene la limitación que supone la precipitación de todo el HCO_3^- presente en el agua; sin embargo, esto dependería de la proporción de agua que infiltra a través del suelo, pues la cantidad de bicarbonato que precipita depende del grado de concentración que logran las sales después de la evapotranspiración en la zona radical. Como ejemplo extremo, si no se perdiera nada de agua por evapotranspiración, todo el bicarbonato pasaría a través del suelo sin cambiar. A la inversa, si se perdiera toda el agua por evapotranspiración, precipitaría todo el bicarbonato (Bohn *et al.*, 1993).

Cuadro 35. Carbonato de sodio residual de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Carbonato de sodio residual	Clasificación	No.	Carbonato de sodio residual	Clasificación
1	0.19	Buena	34	3.20	No recomendable
2	-0.40	Buena	35	-5.42	Buena
3	-0.21	Buena	36	-1.57	Buena
4	1.25	Condicionada	37	-1.33	Buena
5	-0.31	Buena	38	-0.79	Buena
6	-0.13	Buena	39	-3.61	Buena
7	-0.23	Buena	40	-2.91	Buena
8	-9.82	Buena	41	-2.96	Buena
9	-0.54	Buena	42	-0.47	Buena
10	-1.43	Buena	43	-0.99	Buena
11	-8.90	Buena	44	-2.26	Buena
12	-17.07	Buena	45	-21.47	Buena
13	-8.94	Buena	46	-1.03	Buena
14	-8.65	Buena	47	-3.85	Buena
15	-0.07	Buena	48	-5.07	Buena
16	-3.11	Buena	49	-4.75	Buena
17	0.15	Buena	50	-1.68	Buena
18	-0.22	Buena	51	-0.37	Buena
19	-1.61	Buena	52	-1.14	Buena
20	-0.45	Buena	53	-1.43	Buena
21	-0.31	Buena	54	-10.51	Buena
22	-0.78	Buena	55	-0.54	Buena
23	-0.85	Buena	56	-2.29	Buena
24	-0.40	Buena	57	-2.30	Buena
25	-0.37	Buena	58	-9.92	Buena
26	-13.53	Buena	59	-16.88	Buena
27	-1.47	Buena	60	-0.98	Buena
28	-7.58	Buena	61	-11.48	Buena
29	-0.25	Buena	62	-2.12	Buena
30	-2.14	Buena	63	-0.95	Buena
31	-1.71	Buena	64	-7.11	Buena
32	-13.12	Buena	65	-0.38	Buena
33	-2.46	Buena	66	-2.62	Buena

Cuadro 36. Carbonato de sodio residual de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Porcentaje de Na posible	Clasificación	No.	Porcentaje de Na posible	Clasificación
1	-0.27	Buena	40	-1.66	Buena
2	-0.21	Buena	41	-2.05	Buena
3	-0.20	Buena	42	-6.00	Buena
4	-0.31	Buena	43	2.99	No recomendable
5	-0.01	Buena	44	-1.78	Buena
6	0.97	Buena	45	-0.72	Buena
7	0.66	Buena	46	-2.47	Buena
8	-0.30	Buena	47	-2.51	Buena
9	0.44	Buena	48	-2.95	Buena
10	-8.25	Buena	49	-0.14	Buena
11	0.06	Buena	50	-1.16	Buena
12	-0.73	Buena	51	-0.88	Buena
13	-9.52	Buena	52	-3.59	Buena
14	-15.12	Buena	53	-19.78	Buena
15	-8.04	Buena	54	-1.16	Buena
16	-8.66	Buena	55	-3.56	Buena
17	-9.93	Buena	56	-2.74	Buena
18	-7.11	Buena	57	-2.94	Buena
19	-0.18	Buena	58	-0.22	Buena
20	-3.22	Buena	59	-2.86	Buena
21	-0.57	Buena	60	-1.97	Buena
22	-0.19	Buena	61	-2.42	Buena
23	0.34	Buena	62	-4.76	Buena
24	-1.22	Buena	63	-6.16	Buena
25	0.12	Buena	64	-2.06	Buena
26	-5.90	Buena	65	-0.13	Buena
27	-0.35	Buena	66	-5.91	Buena
28	-1.02	Buena	67	-9.41	Buena
29	-0.27	Buena	68	-0.42	Buena
30	-0.31	Buena	69	-3.86	Buena
31	-0.32	Buena	70	-4.61	Buena
32	0.08	Buena	71	-11.32	Buena
33	-0.08	Buena	72	-13.39	Buena
34	-13.92	Buena	73	-3.96	Buena
35	1.49	Condicionada	74	-14.48	Buena
36	-1.24	Buena	75	-0.18	Buena
37	-9.21	Buena	76	-6.58	Buena
38	-0.11	Buena	77	-0.08	Buena
39	-2.29	Buena	78	-2.17	Buena

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

La infiltración de los suelos depende de las características físicas y químicas del suelo, del contenido de sales y la relación entre las concentraciones del sodio, calcio y magnesio (Rengasarny, 1982; Levy *et al.*, 2005; Bacarro *et al.*, 2006).

Los problemas ocasionados por el uso de aguas con altas concentraciones de RAS, se debe a que produce altos niveles de PSI en el suelo, asociado a la degradación de la estructura del suelo, esto da como resultado que no se pueda infiltrar el agua, reduciendo el crecimiento de las plantas (Balks *et al.*, 1998; Suarez *et al.*, 2006; Heidarpour *et al.*, 2007; Bhardwaj *et al.*, 2008).

En general la infiltración, disminuye con el incremento de sodio de intercambio y una baja salinidad y tiene su origen en los procesos expansivos y dispersivos sobre las arcillas (Oster, 1994; Oster y Shainberg, 2001). De esta manera el valor del RAS y la CE tienen que interpretarse conjuntamente para evaluar posibles problemas de las aguas de riego. Para entender mejor los problemas de infiltración que pueden causar las aguas analizadas, se realizaron las graficas con los tres tipos de RAS y CE, con base en el grafico citado por Ayers y Westcot (1987).

Los resultados del primer muestreo para el RAS original, se pueden ver en la Figura 40 y en el Cuadro 37, estos indican que el 47.0% no presentan reducción en la infiltración, el 42.4% presentan una reducción ligera a moderada y el 10.6% son aguas con una severa reducción en la infiltración.

Para el RAS_{aj} se tiene que el 39.4% de las muestras no presentan reducción, el 50% presentan una reducción ligera a moderada y el 10.6% con una severa reducción en la infiltración, esto se puede observar en la Figura 41.

Con el RAS^o, se tiene que el 47.0% no presentan reducción, el 42.4% presentan una reducción ligera a moderada y el 10.6% con severa reducción en la infiltración, se indica en la figura 42.

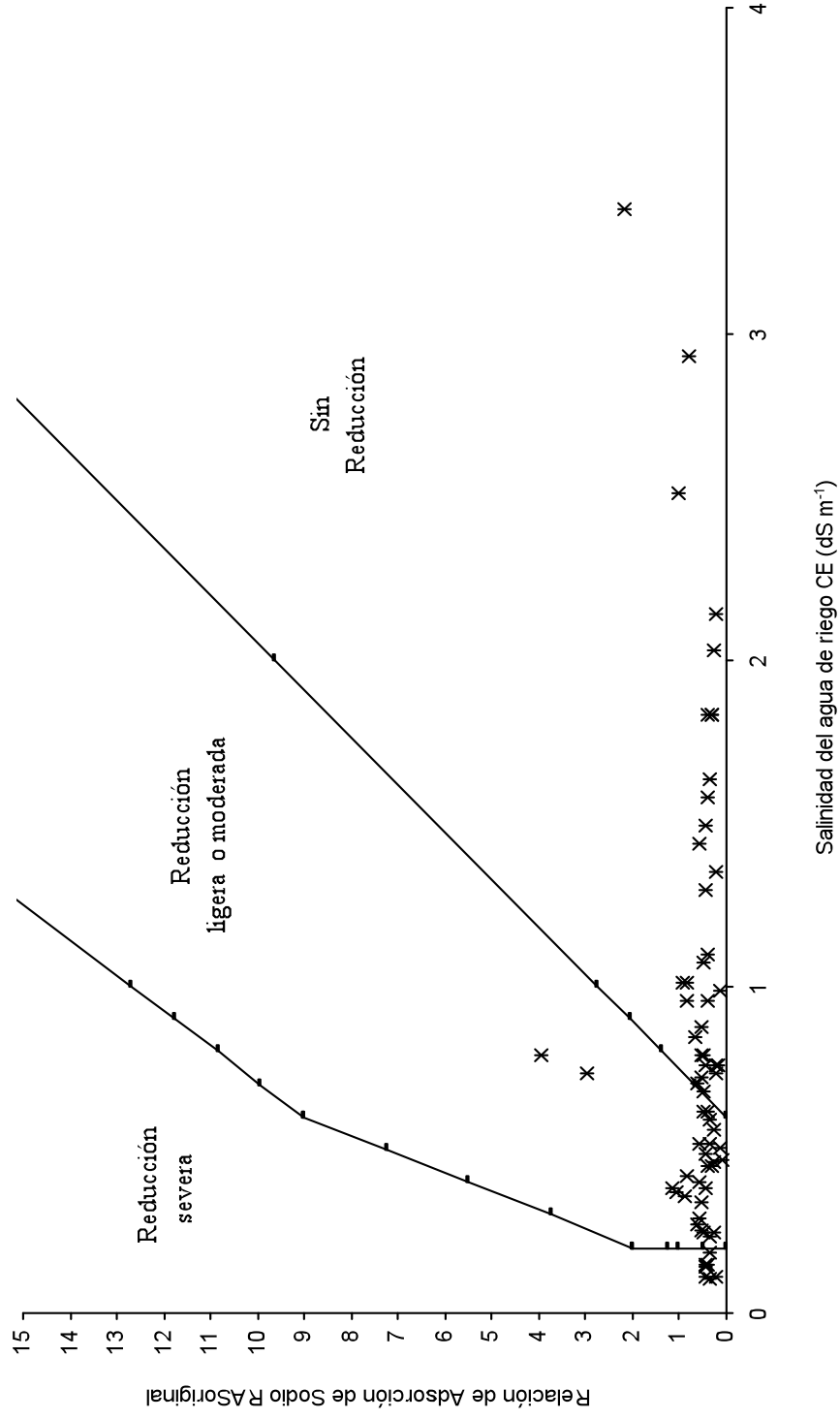


Figura 40. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio original, en las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

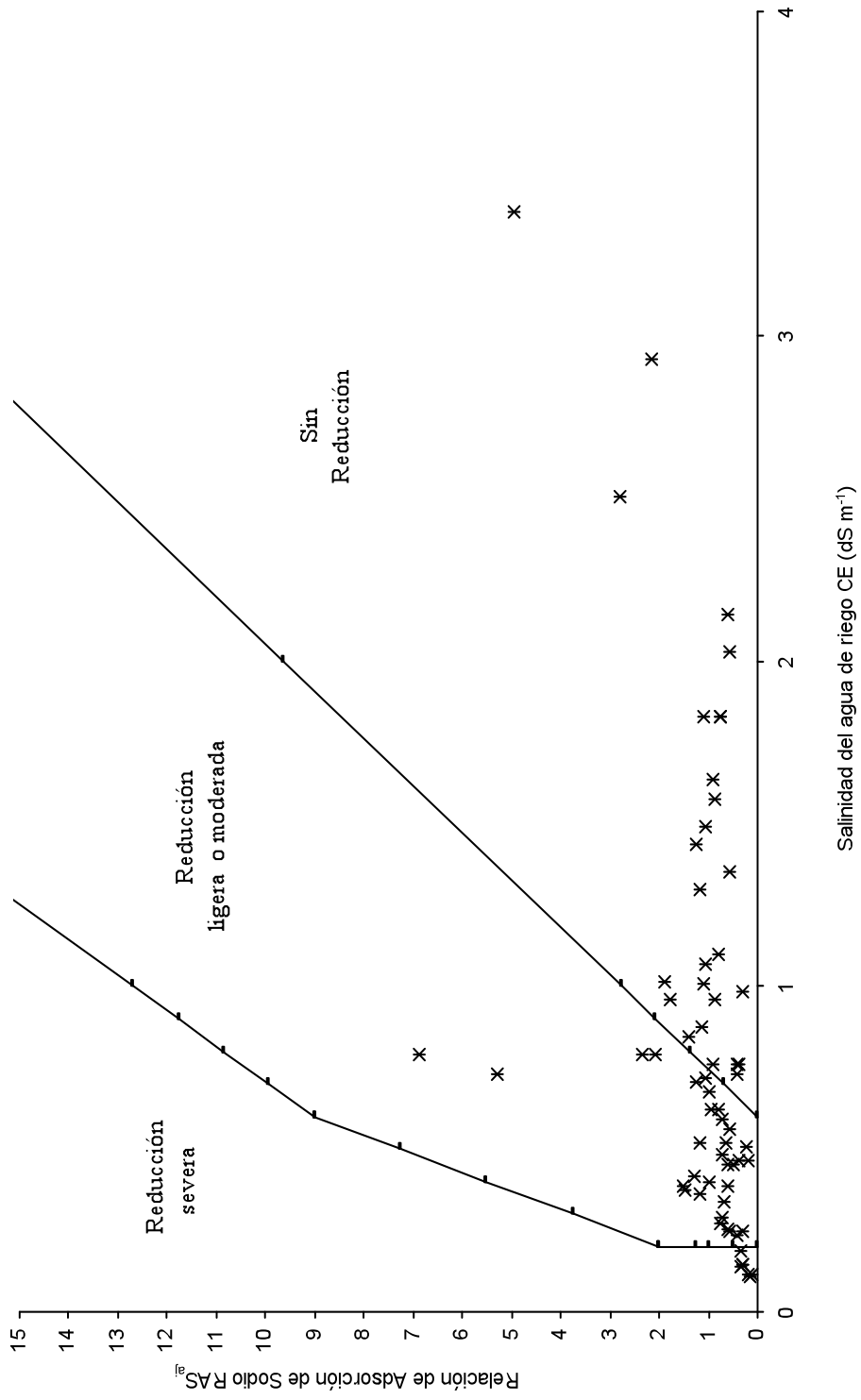


Figura 41. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio ajustado (RAS_{aj}), en las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

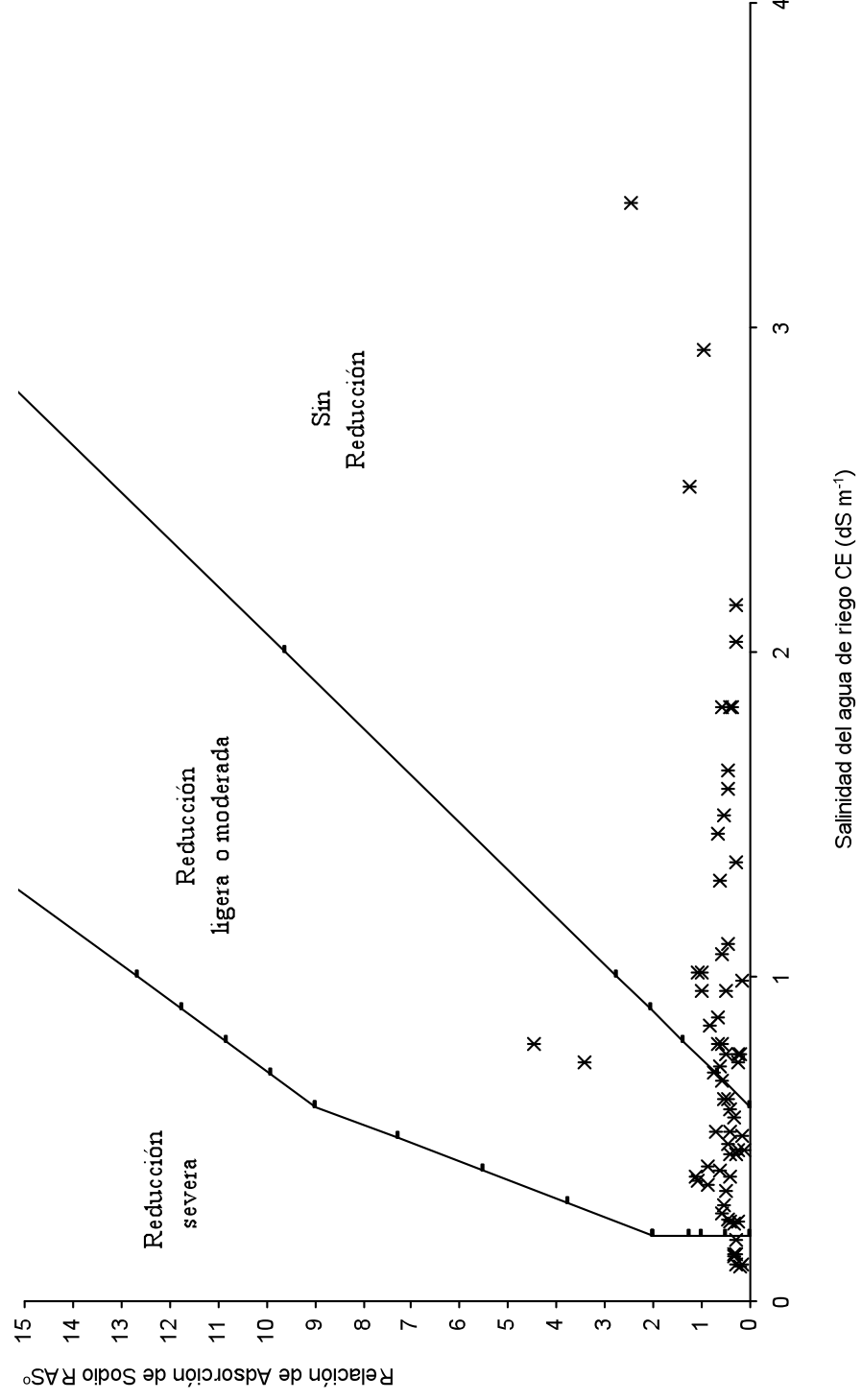


Figura 42. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio corregido (RAS°), en las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

Cuadro 37. Clasificación de las aguas en base al efecto sobre la infiltración del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	RAS original	RASaj	RAS°
1	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
2	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
3	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
4	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
5	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
6	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
7	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
8	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
9	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
10	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
11	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
12	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
13	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
14	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
15	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
16	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Sin reducción
17	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
18	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
19	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
20	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
21	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
22	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
23	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
24	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
25	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
26	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
27	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
28	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
29	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
30	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
31	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Sin reducción
32	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
33	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Sin reducción

Continuación...Clasificación de las aguas en base al efecto sobre la infiltración, del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	RAS original	RASaj	RAS°
34	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
35	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
36	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Sin reducción
37	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
38	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
39	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
40	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
41	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
42	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
43	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
44	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
45	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
46	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
47	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
48	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
49	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
50	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
51	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
52	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
53	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
54	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
55	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
56	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
57	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
58	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
59	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
60	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
61	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
62	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
63	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
64	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
65	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
66	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Sin reducción

Para el segundo muestreo se presenta el Cuadro 38 con los resultados, para el RAS original se tiene la Figura 43 y se indica que el 51.3% no presentan reducción, el 39.7% presentan una reducción ligera a moderada y el 9.0% tienen una severa reducción en la infiltración. Para el RAS_{aj} se tiene la Figura 44 y se indica que el 46.2% no presentan reducción, el 44.9% presentan una reducción ligera a moderada y el 9.0% con una severa reducción en la infiltración. Para el RAS^o se indica que el 50.0% no presentan reducción en la infiltración, el 41.0% presentan una reducción ligera a moderada y el 9.0% con una severa reducción y se presenta en la Figura 45.

Velázquez *et al.* (2002) indicaron que cuando los valores de RAS consideran las posibles precipitaciones de iones, Ca²⁺ y Mg²⁺, las aguas se disponen en el orden siguiente: sin reducción (RAS y RAS^o) y reducción moderada (RAS_{aj}), esto es corroborado por el presente estudio, pues se tienen mayor cantidad de aguas que no presentan problemas en la infiltración, en el RAS original y RAS^o.

Balks *et al.* (1998) y Mace y Amrhein (2001), señalaron que valores relativamente bajos de PSI pueden inducir a una dispersión de arcillas principalmente cuando se combinan con aguas de bajo contenido salino. Debido a que las fuerzas de repulsión entre partículas de arcilla aumentan cuando se reduce la salinidad, favoreciendo la dispersión y la formación de una costra por la obstrucción de los poros cuando las arcillas se mueven (Oster, 1994; Oster y Shainberg, 2001; Agassi *et al.*, 2003). Esto explica lo que ocurre en las aguas muestreadas en el presente estudio, que están clasificadas con una severa reducción en la infiltración, pues presentan valores de RAS < 0.5 y CE < 0.2 μS cm⁻¹).

Balks *et al.* (1998) explicaron que el mecanismo principal que controla permeabilidad del suelo cuando hay valores bajos de PSI, es la dispersión de arcillas y cuando dominan valores altos de PSI, se da la expansión o hinchamiento. Por ello en la red hidrográfica del estado de Morelos, la dispersión de arcillas es el mecanismo principal que controla la permeabilidad, debido al bajo contenido de RAS de las aguas. Sin embargo, cada suelo responde de modo diferente a la misma combinación de salinidad y RAS, debido a las diferencias en el contenido de arcilla y la mineralogía, así como el contenido de óxidos de hierro y aluminio y de materia orgánica (Oster, 1994).

Debido que en el área de estudio se cuenta con considerables concentraciones de magnesio se aumenta el riesgo de hinchamiento y dispersión de las arcillas, ya que cuanto mayor es el radio hidratado del ión, mayor es su poder dispersante (el magnesio hidratado es más grande que el calcio hidratado). Este hinchamiento que ocurre dentro de un volumen dado de suelo, y que resulta en la ruptura de agregados y el movimiento de partículas de arcilla, contribuye a la obstrucción de los poros y por lo tanto, reduce la conductividad hidráulica (Oster, 1994).

En el área de estudio se cuenta con suelos vertisoles en donde se siembra principalmente arroz y caña de azúcar, Cerana *et al.* (2006) indican que en este tipo de suelo se hincha mojado y desarrolla rajaduras cuando se seca, dañándose su estructura, por lo que se debe tener cuidado sí se utilizan aguas con elevados contenidos de RAS por que se producirá la formación de un sello en la superficie, pues el suelo seco debe pasar por un proceso de humedecimiento rápido, seguido de la dispersión de las arcillas. También, la compactación del suelo se da durante la cosecha por la utilización de maquinaria de gran peso cuando está se realiza bajo condiciones de saturación del perfil.

El riego con aguas de RAS >10 provoca la pérdida de macroporosidad del suelo, dificulta las labores agrícolas y la penetración de las raíces, a su vez, el elevado pH del suelo reduce la disponibilidad de nutrientes e incrementa las pérdidas por volatilización de fertilizantes (Cerana *et al.*, 2006; Ortega y Orellana, 2007). También, trae consigo problemas secundarios como excesos de malas hierbas, enfermedades por la excesiva humedad, trastornos nutricionales, así como la incidencia de animales dañinos (Ayers y Westcot, 1987).

Agassi *et al.* (2003) y Bhardwaj *et al.* (2008) señalan que en numerosos estudios se ha demostrado que la presencia de materia orgánica disuelta en aguas residuales, junto con alta sodicidad, desarrollan valores de floculación altos en las arcillas, aumentando la dispersión del suelo, a la vez altas cantidades de materia orgánica en las aguas de riego bloquean los poros, reduciendo así la infiltración.

La Figura 46, muestra la reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y el RAS_{aj} de la red hidrográfica del estado de Morelos.

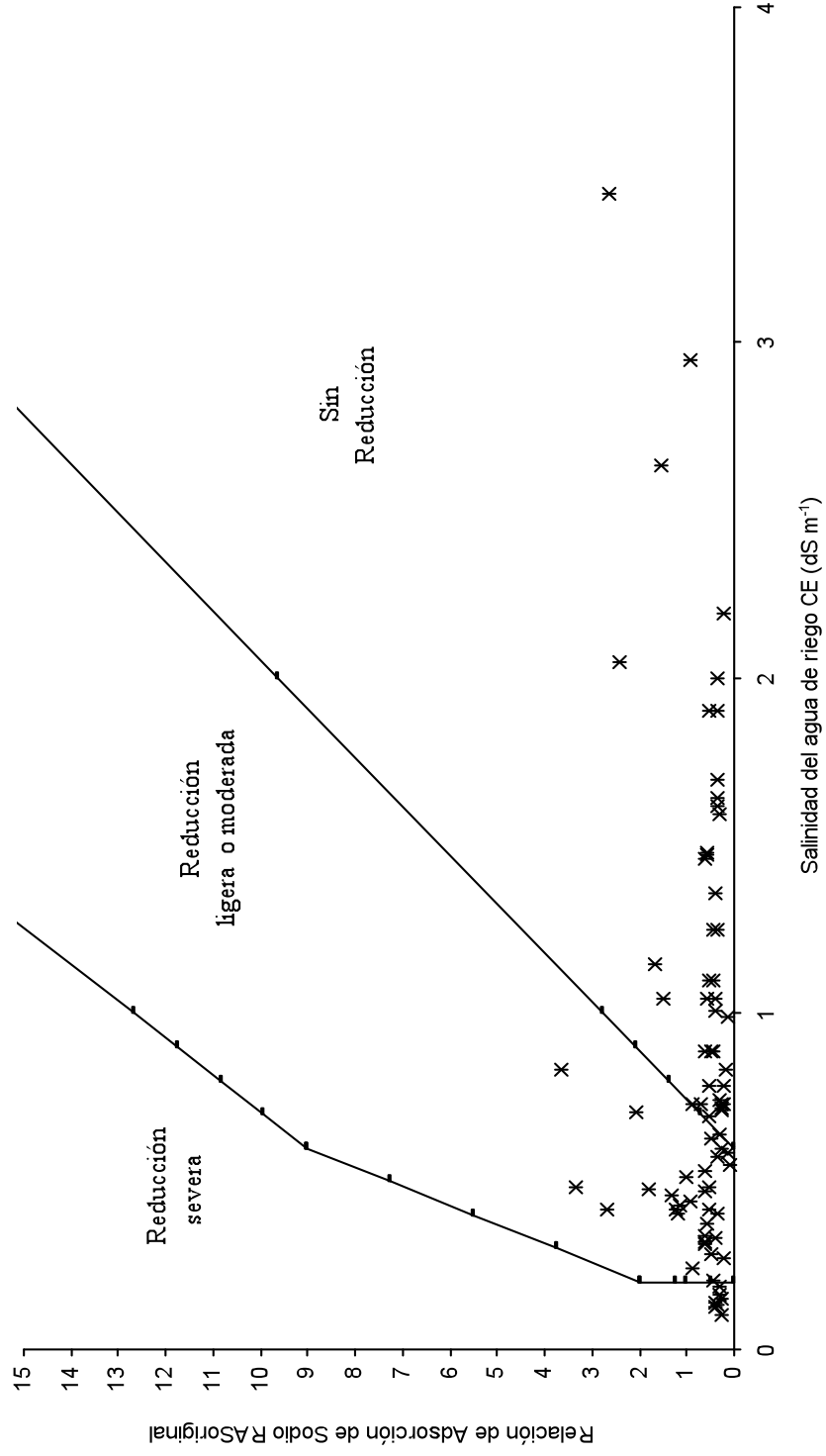


Figura 43. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio original, en las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

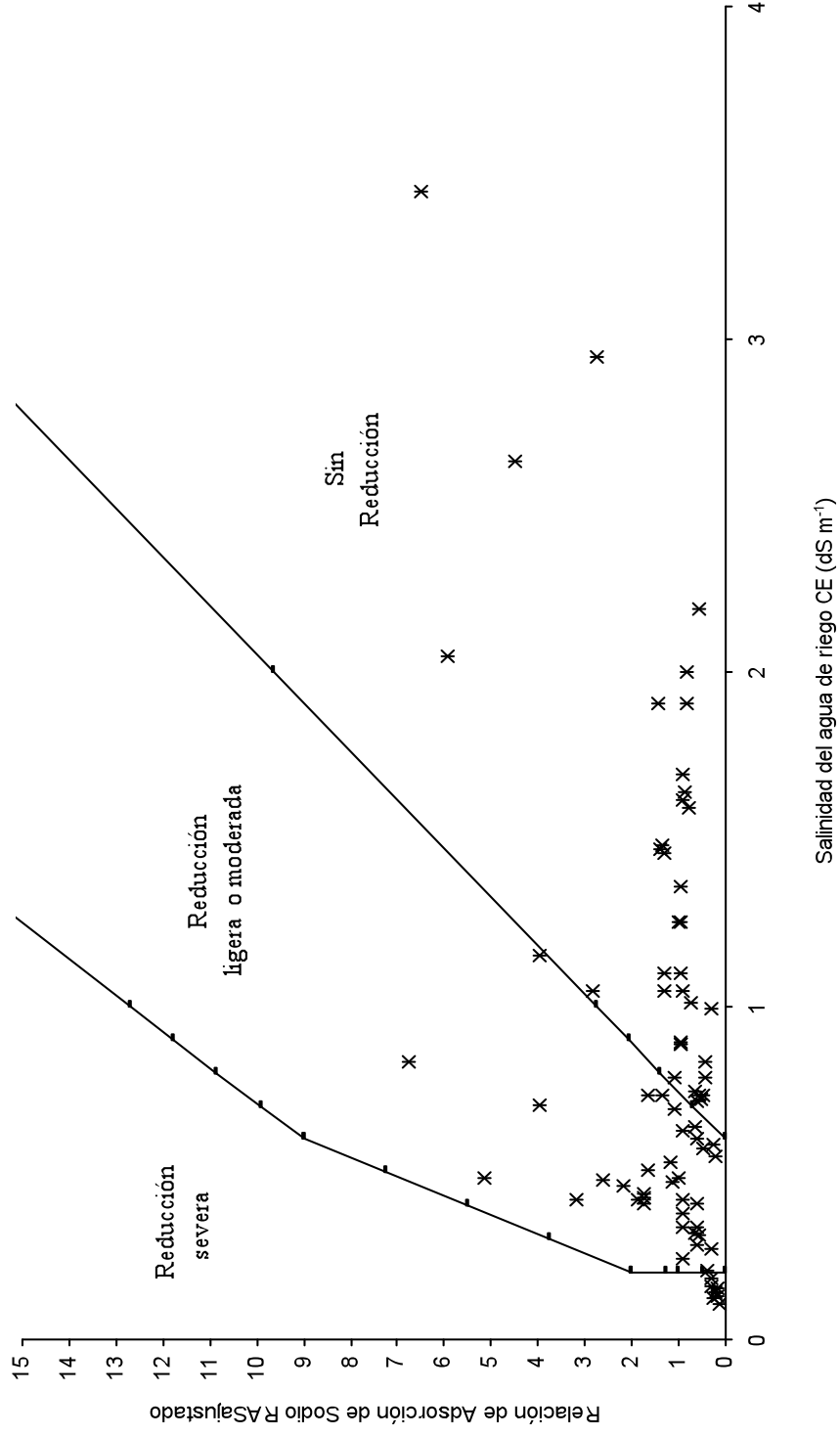


Figura 44. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio ajustado (RAS_{aj}), en las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

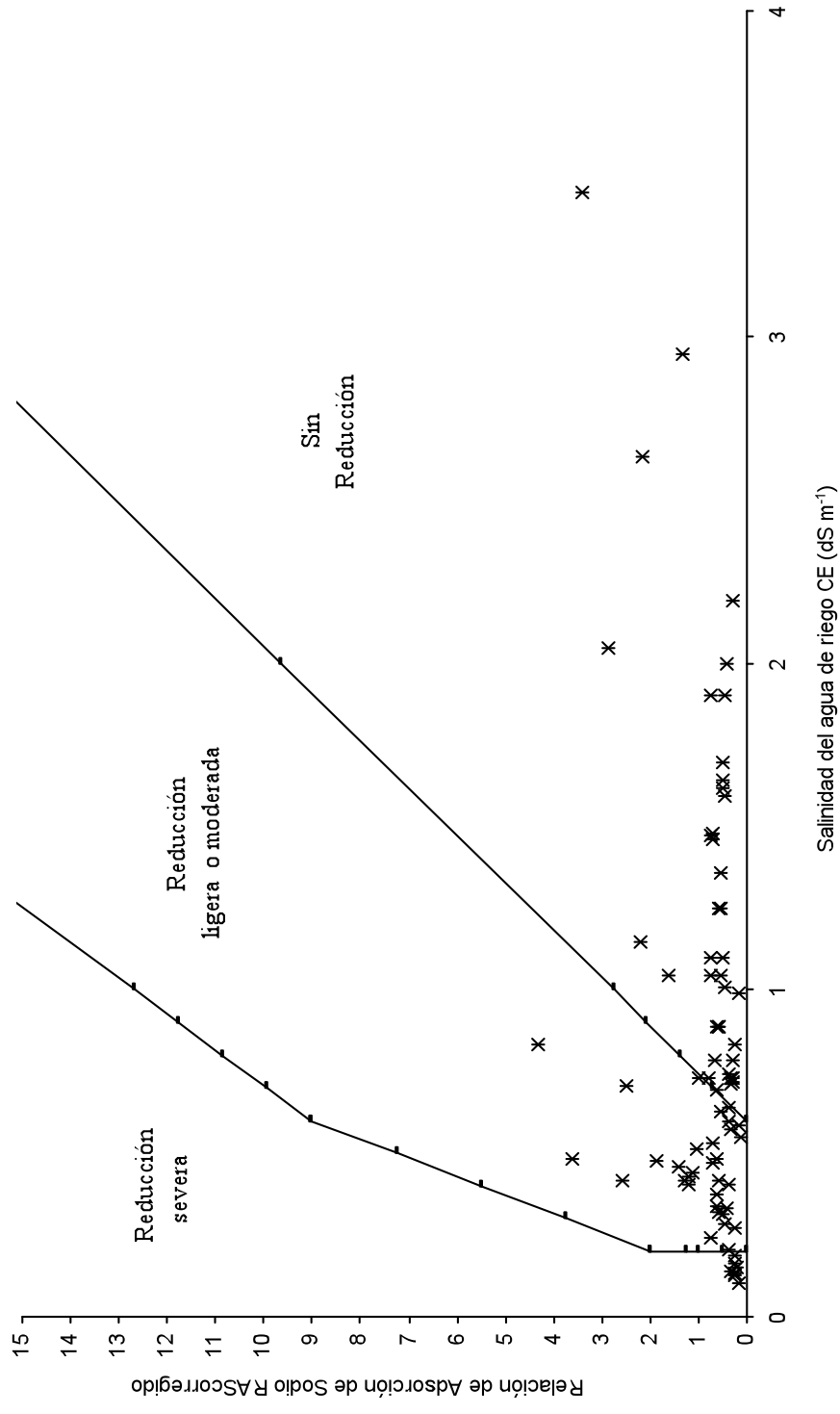


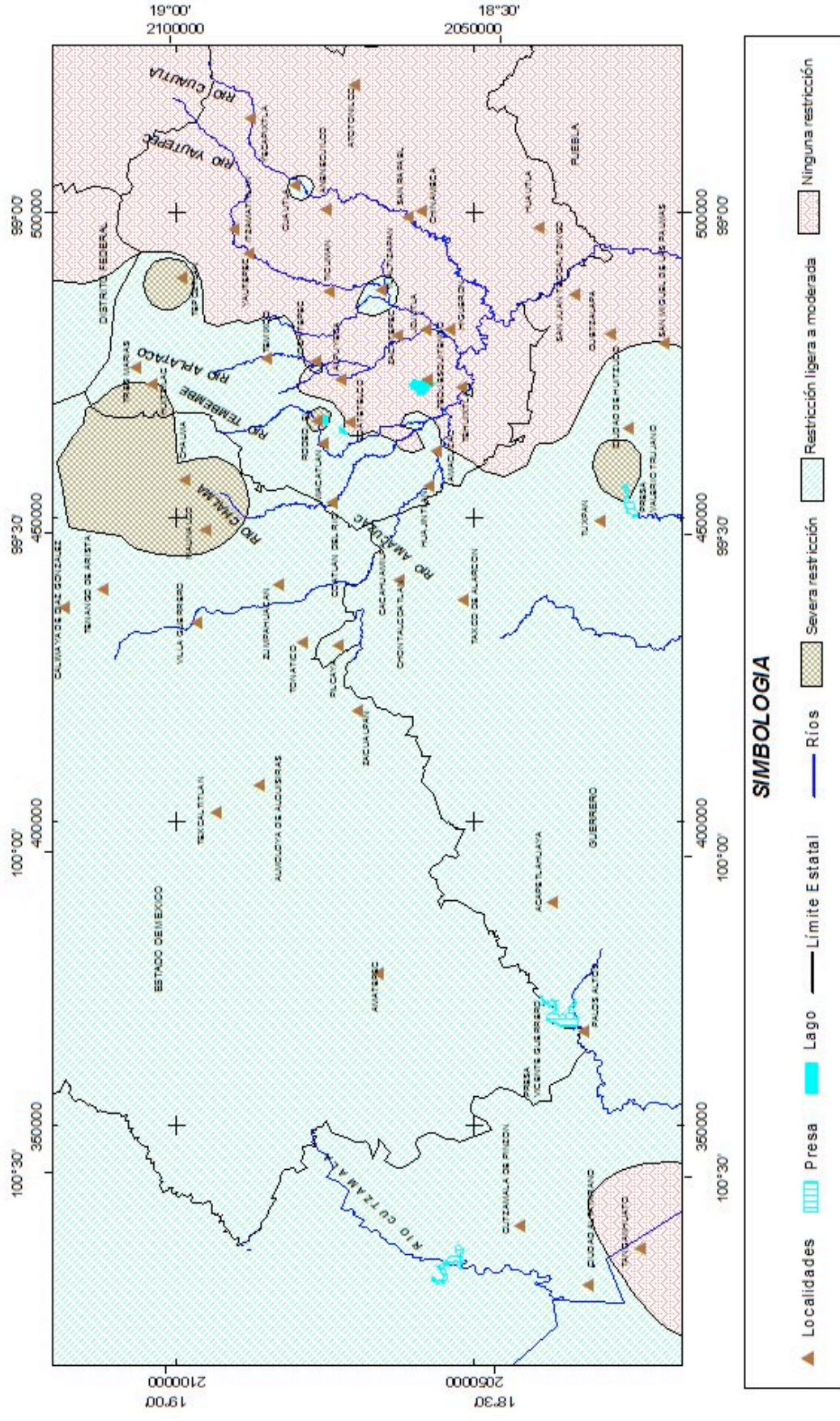
Figura 45. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio corregido (RAS°), en las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

Cuadro 38. Clasificación de las aguas en base al efecto sobre la infiltración, del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	RAS original	RASaj	RAS°
1	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
2	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
3	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
4	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
5	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
6	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
7	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
8	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
9	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
10	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
11	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
12	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
13	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
14	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
15	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
16	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
17	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
18	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
19	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
20	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
21	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
22	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
23	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
24	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Sin reducción
25	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
26	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
27	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
28	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
29	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
30	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
31	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
32	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
33	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
34	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
35	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
36	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Sin reducción
37	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
38	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
39	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción

Continuación...Clasificación de las aguas en base al efecto sobre la infiltración, del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	RAS original	RASaj	RAS°
40	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Sin reducción
41	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
42	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
43	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
44	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
45	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
46	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
47	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
48	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
49	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
50	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
51	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
52	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
53	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
54	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
55	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
56	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
57	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
58	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
59	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
60	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
61	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
62	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
63	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
64	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
65	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
66	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
67	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
68	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
69	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
70	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
71	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
72	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
73	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
74	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
75	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
76	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
77	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
78	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción



La Figura 46. Mapa de la reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y el RAS_{aj} de la red hidrográfica del estado de Morelos.

5.9 Clasificación de las aguas por toxicidad de iones específicos

Las sales pueden constituir un estrés adicional por acumulación de ciertos elementos del suelo o del agua en los tejidos de las plantas, en concentraciones lo suficientemente altas como para provocar daños, estos daños dependen del tiempo, la concentración, tolerancia de los cultivos y volumen de agua (Morales *et al.*, 2006).

La absorción y acumulación de un exceso de iones hidrofílicos osmóticamente activos en las células vegetales provoca un cambio apreciable en el metabolismo de la planta, que se manifiestan en la reducción del crecimiento, la formación de biomasa y el rendimiento (González *et al.*, 2002).

El incremento en la absorción de iones como el cloro o sodio producirá la disminución del área fotosintética por la clorosis marginal de la hoja y la fotosíntesis neta se verá afectada debido al aumento de la respiración en la zona radicular. El proceso de respiración de mantenimiento incrementa los requerimientos de carbohidratos para la producir la energía necesaria para la secreción de iones, o reparación de daños celulares (Bonilla *et al.*, 2004; Casierra y García, 2006 Rodríguez, 2006).

Los elementos de mayor importancia son el sodio, cloro y boro. A medida que las concentraciones de estos iones aumentan en el agua aplicada, los daños subsiguientes se desarrollan más rápidamente, llegando a ser progresivamente más graves.

5.9.1 Boro

Este elemento puede dañar a las plantas aun encontrándose en cantidades relativamente bajas en la solución del suelo. Es uno de los siete micronutrientes esenciales requerido para el crecimiento normal de la mayoría de las plantas (Yermiyahu *et al.*, 2001), pero la concentración necesaria es muy pequeña y si se excede puede causar daños (Goldberg *et al.*, 2005).

Los desequilibrios originados por deficiencia y toxicidad de boro son problemas existentes en muchas regiones agrícolas del mundo, siendo necesaria su identificación y corrección sólo a través de un buen conocimiento de los procesos involucrados en su absorción, movilización y distribución en la planta (Brown y Hu, 1998), razón por la cual se clasifican las aguas de acuerdo a su contenido de acuerdo a la recomendación de Coras (1999).

Para el primer muestreo se tiene que el 84.8% son aguas de buena clase ya que contienen menos de 0.3 mg L^{-1} de boro, y el 15.2% son condicionadas para su uso, esto se observa en el Cuadro 39.

Aguas condicionadas para el uso en el riego son las estaciones 8, 11, 12, 35 que provienen de manantiales y pozos, debido a que atraviesan espesores evaporíticos donde lavan este mineral y las estaciones 14, 27, 30, 45, 48, 55 son ríos y lagos donde el contenido de boro se relaciona con el aporte de aguas residuales industriales, detergentes y fertilizantes.

El Cuadro 40, contiene los resultados del segundo muestreo, se tiene que el 84.6% son aguas buenas para el riego y el 15.4% son condicionadas para su uso por su contenido de boro.

Las estaciones 10, 13, 14, 63 provienen de manantiales y pozos, son aguas condicionadas para su uso en el riego debido a que atraviesan espesores evaporíticos. Las estaciones 18, 20, 26, 36, 39, 40, 53, 70 son ríos y lagos el contenido de boro se relaciona con el aporte de aguas residuales urbano-industriales y agrícolas.

Ayers y Westcot (1989), señalaron que el tomate y el sorgo son especies tolerantes al boro desarrollándose bien en concentraciones entre 4.0 y 6.0 mg L^{-1} , el cultivo del maíz es moderadamente tolerante, resiste concentraciones de 2.0 a 4.0 mg L^{-1} , los cultivos de cebolla y frijol son especies sensible desarrollándose sin pérdidas de rendimiento a concentraciones menores de 1.0 mg L^{-1} . Las concentraciones máximas toleradas fueron medidas en el agua del suelo, sin embargo, las concentraciones en el riego son aproximadamente igual a las indicadas o ligeramente inferiores.

Todas las aguas del primer muestreo se pueden utilizar para el riego de tomate, sorgo y maíz. Las estaciones 8, 11, 12 presentan riesgo de toxicidad por boro para los cultivos de cebolla y frijol.

Las estaciones 10, 13, 14, 20 del segundo muestreo son condicionadas para su uso en el riego de cebolla y frijol. Todas las estaciones se pueden utilizar para el riego de tomate, sorgo y maíz.

Albornoz *et al.* (2007) indican que las plantas sometidas a alta concentraciones de boro presentan síntomas visuales de toxicidad, los que comienzan como una leve clorosis y quemadura de los bordes en las hojas basales de las plantas y luego continúan con quemaduras en la lámina media de las hojas, clorosis total de la hoja y finalmente necrosis.

En cultivos como almendra, manzana, albaricoque, cereza, pera, níspero y ciruela donde el boro es móvil en el floema, los síntomas de toxicidad se manifiestan con la muerte de brotes jóvenes, abundante secreción de resina en hojas y lesiones en tallos y pecíolos. En especies como el tomate, nuez y fresa en donde, el boro permanece inmóvil se presentan los síntomas como quemaduras en márgenes y puntas de hojas (Malavé y Carrero 2007).

El calcio es un elemento que contrarresta la acción nociva del boro cuando está presente en niveles altos (Albornoz *et al.*, 2007), pues el metaborato inicialmente sódico reacciona con el Ca^{2+} del agua del suelo y forma un metaborato cálcico, cuya solubilidad es considerablemente menor (Porta *et al.*, 2003), por consiguiente disminuye la cantidad de boro que se puede solubilizar, esto puede ser la explicación por la cual las aguas del sistema hidrográfico del estado de Morelos no contienen grandes cantidades de boro.

La deficiencia de Boro existe a menudo en suelos arenosos debido a que su capacidad de adsorción es pequeña. Por otro lado, el suelo con cantidades grandes de arcilla tiene el potencial de atenuar concentraciones de B fitotóxico (Goldberg *et al.*, 2005). La adición de materia orgánica puede disminuir o incrementar el consumo de B en plantas, en función de los niveles totales de B en el suelo, debido a que disminuye el boro soluble adsorbiéndolo, esta misma función hacen las arcillas y carbonatos (Yermiyahu *et al.*, 2001).

Cuadro 39. Clasificación del contenido de boro de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	B mg L ⁻¹	Clasificación	No.	B mg L ⁻¹	Clasificación
1	0.000	Buena	34	0.055	Buena
2	0.000	Buena	35	0.363	Condicionada
3	0.000	Buena	36	0.213	Buena
4	0.077	Buena	37	0.042	Buena
5	0.000	Buena	38	0.044	Buena
6	0.000	Buena	39	0.022	Buena
7	0.000	Buena	40	0.007	Buena
8	3.275	Condicionada	41	0.025	Buena
9	0.121	Buena	42	0.007	Buena
10	0.146	Buena	43	0.000	Buena
11	1.017	Condicionada	44	0.105	Buena
12	1.906	Condicionada	45	0.370	Condicionada
13	0.248	Buena	46	0.043	Buena
14	0.725	Condicionada	47	0.147	Buena
15	0.090	Buena	48	0.357	Condicionada
16	0.233	Buena	49	0.017	Buena
17	0.003	Buena	50	0.000	Buena
18	0.000	Buena	51	0.004	Buena
19	0.015	Buena	52	0.063	Buena
20	0.034	Buena	53	0.016	Buena
21	0.000	Buena	54	0.000	Buena
22	0.000	Buena	55	0.333	Condicionada
23	0.000	Buena	56	0.000	Buena
24	0.062	Buena	57	0.128	Buena
25	0.008	Buena	58	0.161	Buena
26	0.184	Buena	59	0.214	Buena
27	0.325	Condicionada	60	0.040	Buena
28	0.097	Buena	61	0.209	Buena
29	0.057	Buena	62	0.000	Buena
30	0.381	Condicionada	63	0.039	Buena
31	0.236	Buena	64	0.132	Buena
32	0.140	Buena	65	0.239	Buena
33	0.077	Buena	66	0.205	Buena

Cuadro 40. Clasificación del contenido de boro de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	B mg L ⁻¹	Clasificación	No.	B mg L ⁻¹	Clasificación
1	0.000	Buena	40	0.325	Condicionada
2	0.000	Buena	41	0.088	Buena
3	0.000	Buena	42	0.177	Buena
4	0.000	Buena	43	0.089	Buena
5	0.000	Buena	44	0.053	Buena
6	0.007	Buena	45	0.060	Buena
7	0.101	Buena	46	0.030	Buena
8	0.007	Buena	47	0.017	Buena
9	0.007	Buena	48	0.032	Buena
10	3.656	Condicionada	49	0.125	Buena
11	0.127	Buena	50	0.056	Buena
12	0.088	Buena	51	0.038	Buena
13	1.380	Condicionada	52	0.116	Buena
14	1.541	Condicionada	53	0.399	Condicionada
15	0.269	Buena	54	0.060	Buena
16	0.291	Buena	55	0.045	Buena
17	0.254	Buena	56	0.269	Buena
18	0.821	Condicionada	57	0.034	Buena
19	0.037	Buena	58	0.011	Buena
20	3.160	Condicionada	59	0.022	Buena
21	0.019	Buena	60	0.030	Buena
22	0.022	Buena	61	0.007	Buena
23	0.160	Buena	62	0.022	Buena
24	0.015	Buena	63	0.369	Condicionada
25	0.004	Buena	64	0.045	Buena
26	0.512	Condicionada	65	0.104	Buena
27	0.000	Buena	66	0.037	Buena
28	0.000	Buena	67	0.022	Buena
29	0.000	Buena	68	0.007	Buena
30	0.084	Buena	69	0.149	Buena
31	0.094	Buena	70	0.399	Condicionada
32	0.045	Buena	71	0.127	Buena
33	0.060	Buena	72	0.246	Buena
34	0.213	Buena	73	0.045	Buena
35	0.047	Buena	74	0.209	Buena
36	0.328	Condicionada	75	0.041	Buena
37	0.191	Buena	76	0.187	Buena
38	0.095	Buena	77	0.269	Buena
39	0.463	Condicionada	78	0.216	Buena

5.9.2 Cloruros

Dado que éste elemento es muy soluble y prácticamente no presenta reacciones de precipitación y/o solubilización, su patrón de distribución en el suelo está altamente correlacionado con el movimiento del agua de riego en el suelo (Osorio y Céspedes, 2000). Por lo tanto, se encuentra disponible para las plantas y aparece en todas las aguas naturales en concentraciones variadas,

Los resultados del contenido de cloruros para el primer muestreo se encuentran en el Cuadro 41, estos indican que el 51.5% de las estaciones están clasificadas como buenas para el riego y el 48.5% son aguas condicionadas para el riego.

Los resultados para el segundo muestreo se encuentran en el Cuadro 42, estos nos muestran que el 66.7% están clasificadas como buenas y el 33.3% son aguas condicionadas para el riego.

Las aguas condicionadas para el riego son en su mayoría muestras que provienen de ríos, lagunas y presas, que reciben descargas urbano-industriales, las cuales contienen este ion. Romero (1999), indicó que las aguas residuales añaden cantidades considerables de cloruros a sus afluentes receptores incrementando alrededor de 20 mg L^{-1} , por encima del contenido propio del agua, debido a que se consumen cloruros en alimentos y agua, y estos son desechados mediante la orina.

En algunas especies de frutales la absorción de cloruros es fuertemente influenciada por el catión acompañante, se ha observado que en las hojas se acumula el doble de cloruros si se aplica en forma de CaCl_2 , que si se aplica NaCl (Borquez, 1986; Steppuhn *et al.*, 2005). Los cloruros también pueden inhibir la división celular e incrementar la succulencia de algunas plantas, para reducir las concentraciones internas (Borquez, 1986; Rodríguez, 2006)

La utilización de aguas para el riego de tomate con elevadas concentraciones de cloruros puede causar clorosis y necrosis en los bordes de las hojas, disminución del área foliar y deficiencias de nutrientes debido a la competencia tanto del Na^+ como del Cl^- con nutrientes tales como K^+ , Ca^{2+} y NO_3 (Goykovic y Saavedra, 2007).

Cuadro 41. Clasificación del contenido de cloruros de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Cl ⁻ mmol _c L ⁻¹	Clasificación	No.	Cl ⁻ mmol _c L ⁻¹	Clasificación
1	0.37	Buena	34	1.20	Condicionada
2	0.60	Buena	35	0.90	Buena
3	0.48	Buena	36	0.80	Buena
4	1.90	Condicionada	37	0.90	Buena
5	1.07	Condicionada	38	0.60	Buena
6	0.38	Buena	39	0.90	Buena
7	1.05	Condicionada	40	0.80	Buena
8	2.80	Condicionada	41	0.75	Buena
9	1.02	Condicionada	42	0.82	Buena
10	0.80	Buena	43	1.04	Condicionada
11	1.30	Condicionada	44	1.50	Condicionada
12	2.20	Condicionada	45	2.80	Condicionada
13	1.12	Condicionada	46	0.60	Buena
14	1.40	Condicionada	47	1.80	Condicionada
15	0.62	Buena	48	1.70	Condicionada
16	1.07	Condicionada	49	0.90	Buena
17	0.80	Buena	50	1.10	Condicionada
18	0.48	Buena	51	0.35	Buena
19	1.30	Condicionada	52	0.98	Buena
20	0.80	Buena	53	1.01	Condicionada
21	0.60	Buena	54	1.30	Condicionada
22	0.80	Buena	55	0.70	Buena
23	0.85	Buena	56	0.90	Buena
24	1.02	Condicionada	57	1.60	Condicionada
25	0.70	Buena	58	0.60	Buena
26	1.30	Condicionada	59	0.80	Buena
27	1.40	Condicionada	60	1.03	Condicionada
28	1.04	Condicionada	61	0.96	Buena
29	0.80	Buena	62	1.60	Condicionada
30	1.40	Condicionada	63	1.20	Condicionada
31	0.90	Buena	64	0.80	Buena
32	1.30	Condicionada	65	0.90	Buena
33	1.50	Condicionada	66	1.03	Condicionada

Cuadro 42. Clasificación del contenido de cloruros de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Cl ⁻ mmol _c L ⁻¹	Clasificación	No.	Cl ⁻ mmol _c L ⁻¹	Clasificación
1	0.38	Buena	40	0.96	Buena
2	0.40	Buena	41	1.54	Condicionada
3	0.34	Buena	42	0.84	Buena
4	0.48	Buena	43	1.22	Condicionada
5	0.28	Buena	44	0.98	Buena
6	1.22	Condicionada	45	0.60	Buena
7	1.50	Condicionada	46	0.64	Buena
8	0.44	Buena	47	0.76	Buena
9	1.14	Condicionada	48	0.52	Buena
10	3.04	Condicionada	49	0.76	Buena
11	0.40	Buena	50	1.48	Condicionada
12	0.66	Buena	51	1.36	Condicionada
13	1.04	Condicionada	52	1.16	Condicionada
14	2.12	Condicionada	53	2.38	Condicionada
15	0.84	Buena	54	0.44	Buena
16	0.92	Buena	55	1.76	Condicionada
17	1.24	Condicionada	56	0.72	Buena
18	1.08	Condicionada	57	0.82	Buena
19	1.14	Condicionada	58	0.55	Buena
20	2.60	Condicionada	59	0.84	Buena
21	1.12	Condicionada	60	0.56	Buena
22	0.80	Buena	61	0.88	Buena
23	1.14	Condicionada	62	0.54	Buena
24	0.88	Buena	63	0.82	Buena
25	0.50	Buena	64	0.74	Buena
26	1.04	Condicionada	65	0.68	Buena
27	0.36	Buena	66	0.84	Buena
28	0.98	Buena	67	0.64	Buena
29	0.28	Buena	68	0.62	Buena
30	0.88	Buena	69	0.94	Buena
31	0.88	Buena	70	1.24	Condicionada
32	0.44	Buena	71	0.80	Buena
33	1.18	Condicionada	72	0.68	Buena
34	0.98	Buena	73	2.02	Condicionada
35	1.08	Condicionada	74	0.64	Buena
36	1.42	Condicionada	75	0.52	Buena
37	0.84	Buena	76	0.76	Buena
38	0.76	Buena	77	0.72	Buena
39	1.40	Condicionada	78	0.68	Buena

5.9.3 Sodio

El sodio es perjudicial para los cultivos por varios motivos: a) es tóxico para la mayor parte de las plantas; b) dificulta la penetración de otros cationes necesarios para las plantas (antagonismo iónico); c) puede alcalinizar el suelo con lo que dispersa a la fase coloidal, destruyendo la estructura y reduciendo la permeabilidad y d) por su elevada solvatación aumenta el volumen de agua no accesible por las plantas (Ortega y Orellana, 2007).

El exceso de sodio es directamente tóxico a los tejidos de las plantas y produce clorosis marginal de la hoja, disminución del área fotosintética y aumento de la respiración de la planta, con esto se incrementa los requerimientos de carbohidratos para producir la energía necesaria para el transporte, compartimentalización de iones y reparación de daños celulares (Rodríguez, 2006). Por lo que se tiene que clasificar las aguas de acuerdo al grado de restricción para su uso en el riego por aspersión y superficial, este se realizó de acuerdo a las directrices para interpretar la calidad del agua del Cuadro 4.

En la clasificación de las aguas para el riego por superficie se utilizó el RAS_{aj} por tener los valores más altos, los rangos de división entre clases son 3 y 9, cuando se tiene menos de 3 no hay restricción para su uso, de 3 a 9 la restricción es ligera a moderada y si es mayor a 9 la restricción es severa. La clasificación para el riego por aspersión es la siguiente: menor a 3 $mmol_c L^{-1}$ de Na^+ no presentan restricción para su uso y mayor a 3 $mmol_c L^{-1}$ de Na^+ la restricción es ligera a moderada.

En el primer muestreo se tiene que 95.5% de las aguas no están restringidas para su uso en el riego por superficie y el 4.5% son estaciones que tienen restricción de ligera a moderada. Para el riego por aspersión el 94% de las aguas no están restringidas y el 6% son estaciones que tienen restricción de ligera a moderada, esto se observa en el Cuadro 43.

Para el segundo muestreo se tiene que 89.7% de las aguas no están restringidas para su uso en el riego por superficie y 10.3% tienen restricción de ligera a moderada. Para el riego por

aspersión el 92.3% no presentan restricción y el 7.7% son estaciones que tienen restricción de ligera a moderada, esto se observa en el Cuadro 44.

Otros efectos de las altas concentraciones de sodio son la disminución en la síntesis de proteínas, conductancia estomática, síntesis de pared celular, división y crecimiento celular (González, 2001; Bonilla *et al.*, 2004; Maathuis, 2006; Rodríguez, 2006)

Estos efectos adversos se deben a que compete con el Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y NO_3^- , en los sitios de absorción de las raíces (Netondo *et al.*, 2004; Maathuis, 2006). Al limitar el suministro de estos elementos a las células de la raíz, el sodio ingresa a las células y se va acumulando, reduce la capacidad selectiva de la membrana celular, pues el calcio es limitado y remplazado (Leidi y Pardo, 2002; Halperin y Lynch 2003; Netondo *et al.*, 2004), produce una disminución en la síntesis de proteínas, pues remplaza al potasio, pero no hace las mismas funciones (González, 2001; Halperin y Lynch, 2003; Chinnusamy *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2008).

Varias investigaciones entre ellas; Rengel (1992), Cramer *et al.* (1987), Halperin y Lynch (2003) y Maathuis (2006) han encontrado que el efecto deletéreo del Na^+ puede ser disminuido por incrementos en la concentración de Ca^{2+} . Pues su función es regular el metabolismo celular, la absorción de potasio, proteger las membranas del daño inducido por el estrés salino e inhibir los canales de entrada del sodio a la célula (Leidi y Pardo, 2002; Maathuis, 2006).

Es importante conocer el tipo de sales que están presentes en la solución del suelo, pues la intensidad y daño es diferentes, Steppuhn *et al.* (2005) menciona que el cloruro de sodio es menos dañino que el sulfato de sodio, para el crecimiento en cereales, esto es importante, puesto que en la zona de estudio se tiene áreas irrigadas con aguas sulfáticas que pueden combinarse con el sodio y provocar pérdidas en los cultivos.

Cuadro 43. Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos de acuerdo al contenido de sodio y su grado de restricción para el riego.

No.	RAS _{aj}	Clasificación riego superficial	Na ⁺ mmol _c L ⁻¹	Clasificación riego por aspersión
1	0.144	Sin Restricción	0.21	Sin Restricción
2	0.297	Sin Restricción	0.30	Sin Restricción
3	0.193	Sin Restricción	0.27	Sin Restricción
4	5.304	Restricción ligera a moderada	3.73	Restricción ligera a moderada
5	1.187	Sin Restricción	0.96	Sin Restricción
6	0.323	Sin Restricción	0.31	Sin Restricción
7	1.507	Sin Restricción	1.25	Sin Restricción
8	2.782	Sin Restricción	3.39	Restricción ligera a moderada
9	0.969	Sin Restricción	0.74	Sin Restricción
10	0.660	Sin Restricción	0.56	Sin Restricción
11	1.110	Sin Restricción	1.19	Sin Restricción
12	2.152	Sin Restricción	2.88	Sin Restricción
13	1.236	Sin Restricción	1.48	Sin Restricción
14	1.047	Sin Restricción	1.16	Sin Restricción
15	0.738	Sin Restricción	0.61	Sin Restricción
16	1.127	Sin Restricción	1.04	Sin Restricción
17	1.473	Sin Restricción	1.14	Sin Restricción
18	0.305	Sin Restricción	0.33	Sin Restricción
19	0.995	Sin Restricción	0.85	Sin Restricción
20	0.562	Sin Restricción	0.47	Sin Restricción
21	0.353	Sin Restricción	0.31	Sin Restricción
22	0.240	Sin Restricción	0.18	Sin Restricción
23	0.186	Sin Restricción	0.15	Sin Restricción
24	1.161	Sin Restricción	0.85	Sin Restricción
25	0.432	Sin Restricción	0.36	Sin Restricción
26	0.599	Sin Restricción	0.73	Sin Restricción
27	1.093	Sin Restricción	1.87	Sin Restricción
28	0.571	Sin Restricción	0.61	Sin Restricción
29	0.727	Sin Restricción	0.61	Sin Restricción
30	1.876	Sin Restricción	1.70	Sin Restricción
31	2.348	Sin Restricción	0.97	Sin Restricción
32	0.740	Sin Restricción	0.91	Sin Restricción
33	1.236	Sin Restricción	1.07	Sin Restricción

Continuación... Clasificación de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos de acuerdo al contenido de sodio y su grado de restricción para el riego.

No.	RAS _{aj}	Clasificación riego superficial	Na ⁺ mmol _c L ⁻¹	Clasificación riego por aspersión
34	6.873	Restricción ligera a moderada	4.41	Restricción ligera a moderada
35	1.154	Sin Restricción	1.10	Sin Restricción
36	2.096	Sin Restricción	0.87	Sin Restricción
37	0.926	Sin Restricción	0.78	Sin Restricción
38	0.716	Sin Restricción	0.59	Sin Restricción
39	0.414	Sin Restricción	0.40	Sin Restricción
40	0.432	Sin Restricción	0.40	Sin Restricción
41	0.395	Sin Restricción	0.37	Sin Restricción
42	0.617	Sin Restricción	0.51	Sin Restricción
43	0.482	Sin Restricción	0.41	Sin Restricción
44	1.404	Sin Restricción	1.27	Sin Restricción
45	4.950	Restricción ligera a moderada	7.63	Restricción ligera a moderada
46	0.800	Sin Restricción	0.66	Sin Restricción
47	0.881	Sin Restricción	0.85	Sin Restricción
48	1.066	Sin Restricción	1.05	Sin Restricción
49	0.313	Sin Restricción	0.32	Sin Restricción
50	0.553	Sin Restricción	0.44	Sin Restricción
51	0.101	Sin Restricción	0.16	Sin Restricción
52	0.619	Sin Restricción	0.54	Sin Restricción
53	0.593	Sin Restricción	0.53	Sin Restricción
54	0.885	Sin Restricción	1.03	Sin Restricción
55	0.311	Sin Restricción	0.27	Sin Restricción
56	0.904	Sin Restricción	0.84	Sin Restricción
57	1.777	Sin Restricción	1.65	Sin Restricción
58	0.892	Sin Restricción	0.98	Sin Restricción
59	0.569	Sin Restricción	0.81	Sin Restricción
60	0.718	Sin Restricción	0.61	Sin Restricción
61	0.755	Sin Restricción	0.92	Sin Restricción
62	0.372	Sin Restricción	0.36	Sin Restricción
63	0.689	Sin Restricción	0.61	Sin Restricción
64	0.791	Sin Restricción	0.87	Sin Restricción
65	1.303	Sin Restricción	1.03	Sin Restricción
66	1.063	Sin Restricción	0.93	Sin Restricción

Cuadro 44. Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos de acuerdo al contenido de sodio y su grado de restricción para el riego.

No.	RAS _{aj}	Clasificación riego superficial	Na ⁺ mmol _c L ⁻¹	Clasificación riego por aspersión
1	0.25	Sin Restricción	0.27	Sin Restricción
2	0.18	Sin Restricción	0.25	Sin Restricción
3	0.14	Sin Restricción	0.18	Sin Restricción
4	0.29	Sin Restricción	0.26	Sin Restricción
5	0.22	Sin Restricción	0.28	Sin Restricción
6	3.20	Restricción ligera a moderada	2.35	Sin Restricción
7	3.96	Restricción ligera a moderada	2.85	Sin Restricción
8	0.18	Sin Restricción	0.20	Sin Restricción
9	2.63	Sin Restricción	2.02	Sin Restricción
10	4.51	Restricción ligera a moderada	5.03	Restricción ligera a moderada
11	0.92	Sin Restricción	0.69	Sin Restricción
12	0.60	Sin Restricción	0.47	Sin Restricción
13	1.45	Sin Restricción	1.60	Sin Restricción
14	2.77	Sin Restricción	3.36	Restricción ligera a moderada
15	1.39	Sin Restricción	1.46	Sin Restricción
16	1.34	Sin Restricción	1.47	Sin Restricción
17	1.29	Sin Restricción	1.51	Sin Restricción
18	0.98	Sin Restricción	1.01	Sin Restricción
19	1.74	Sin Restricción	1.34	Sin Restricción
20	5.91	Restricción ligera a moderada	6.38	Restricción ligera a moderada
21	1.66	Sin Restricción	1.33	Sin Restricción
22	1.75	Sin Restricción	1.34	Sin Restricción
23	2.18	Sin Restricción	1.51	Sin Restricción
24	1.10	Sin Restricción	0.90	Sin Restricción
25	0.92	Sin Restricción	0.78	Sin Restricción
26	0.97	Sin Restricción	1.19	Sin Restricción
27	0.31	Sin Restricción	0.27	Sin Restricción
28	0.22	Sin Restricción	0.17	Sin Restricción
29	0.27	Sin Restricción	0.20	Sin Restricción
30	1.15	Sin Restricción	0.86	Sin Restricción
31	1.19	Sin Restricción	0.88	Sin Restricción
32	0.61	Sin Restricción	0.49	Sin Restricción
33	1.88	Sin Restricción	1.39	Sin Restricción
34	0.58	Sin Restricción	0.70	Sin Restricción
35	5.16	Restricción ligera a moderada	3.00	Sin Restricción
36	3.96	Restricción ligera a moderada	3.36	Restricción ligera a moderada
37	0.80	Sin Restricción	0.84	Sin Restricción
38	0.93	Sin Restricción	0.70	Sin Restricción
39	2.82	Sin Restricción	2.86	Sin Restricción

Continuación...Clasificación de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos de acuerdo al contenido de sodio y su grado de restricción para el riego.

No.	RAS _{aj}	Clasificación riego superficial	Na ⁺ mmol _c L ⁻¹	Clasificación riego por aspersión
40	1.35	Sin Restricción	1.17	Sin Restricción
41	1.67	Sin Restricción	1.45	Sin Restricción
42	0.93	Sin Restricción	0.91	Sin Restricción
43	6.77	Restricción ligera a moderada	4.22	Restricción ligera a moderada
44	0.90	Sin Restricción	0.77	Sin Restricción
45	0.59	Sin Restricción	0.45	Sin Restricción
46	0.46	Sin Restricción	0.39	Sin Restricción
47	0.46	Sin Restricción	0.38	Sin Restricción
48	0.43	Sin Restricción	0.38	Sin Restricción
49	0.90	Sin Restricción	0.71	Sin Restricción
50	0.57	Sin Restricción	0.64	Sin Restricción
51	0.66	Sin Restricción	0.67	Sin Restricción
52	1.30	Sin Restricción	1.17	Sin Restricción
53	6.52	Restricción ligera a moderada	9.02	Restricción ligera a moderada
54	0.65	Sin Restricción	0.52	Sin Restricción
55	0.97	Sin Restricción	0.90	Sin Restricción
56	1.31	Sin Restricción	1.15	Sin Restricción
57	0.96	Sin Restricción	0.87	Sin Restricción
58	0.41	Sin Restricción	0.39	Sin Restricción
59	0.51	Sin Restricción	0.46	Sin Restricción
60	0.59	Sin Restricción	0.50	Sin Restricción
61	0.63	Sin Restricción	0.57	Sin Restricción
62	0.29	Sin Restricción	0.30	Sin Restricción
63	1.02	Sin Restricción	1.00	Sin Restricción
64	0.56	Sin Restricción	0.49	Sin Restricción
65	1.00	Sin Restricción	0.76	Sin Restricción
66	0.92	Sin Restricción	0.90	Sin Restricción
67	0.93	Sin Restricción	1.01	Sin Restricción
68	0.32	Sin Restricción	0.26	Sin Restricción
69	0.98	Sin Restricción	0.96	Sin Restricción
70	0.94	Sin Restricción	0.92	Sin Restricción
71	0.86	Sin Restricción	0.99	Sin Restricción
72	0.81	Sin Restricción	1.01	Sin Restricción
73	0.50	Sin Restricción	0.55	Sin Restricción
74	0.82	Sin Restricción	1.06	Sin Restricción
75	0.61	Sin Restricción	0.47	Sin Restricción
76	0.76	Sin Restricción	0.80	Sin Restricción
77	1.72	Sin Restricción	1.17	Sin Restricción
78	1.08	Sin Restricción	0.92	Sin Restricción

5.8.4 Fosfatos

El fósforo es un elemento esencial en el crecimiento de las plantas (Daniel *et al.*, 1998; Mulqueen *et al.*, 2004), pero se encuentra en concentraciones pequeñas, por su tendencia a formar iones complejos y compuestos de baja solubilidad con un extenso número de metales y por ser adsorbido por sedimentos hidrolizados (Fetter, 1999; Figueruelo y Dávila, 2004).

El fósforo se determinó en su forma de ortofosfato, se clasificó de acuerdo a la concentración normal de fósforo en aguas de riego propuesta por Ayers y Westcot (1987), la cual debe estar entre 0 y 2 mg L⁻¹ y al peligro de eutrofización de cuerpos de agua propuesta por Sharpley y Withers (1994), la cual indica que una concentración mayor a 0.1 mg L⁻¹ de fósforo disuelto puede causar la eutrofización acelerada de las aguas.

Para el primer muestreo se tienen los resultados en el Cuadro 45, estos indican que para la clasificación con base al riesgo de eutrofización el 36.4% de las muestras no tienen riesgo de eutrofización y 63.6% la aceleran. Para el caso de la concentración normal de fósforo, 98.5% están dentro del intervalo recomendado y solo 1.5% contiene una concentración mayor.

Los resultados del segundo muestreo se encuentran en el Cuadro 46, estos indican que en 41% de las estaciones no hay peligro de eutrofización y 59% hay peligro de acelerar la eutrofización. Para la concentración normal del fósforo el 96.2% esta dentro de intervalo normal y 3.8% contienen mayor concentración de lo indicado.

Manahan (2007), indico que cuando las aguas residuales ricas en fosfatos entra en un reservorio de agua que contiene un alto contenido de calcio, puede formarse hidroxiapatita (compuesto relativamente insoluble). Lo anterior nos indica que en muchas de las aguas que se muestrearon puede ocurrir este fenómeno por su alto contenido de calcio, como en el caso de los lagos Rodeo y Tequesquitengo.

Los aportes de fósforo son limitados en condiciones naturales, pero las actividades antropogénicas aceleran este proceso, por la utilización de grandes cantidades de detergentes y fertilizantes (Romero, 1999; Neal *et al.*, 2006). Este fenómeno ocurre en el área de estudio, ya que los puntos con mayor contenido de fósforo son los que reciben vertidos de aguas residuales urbanas, industriales y lixiviados de fertilizantes de los campos agrícolas adyacentes.

El exceso de fósforo acelera la maduración de los vegetales (Seoáñez, 2005), por ello es importante que aguas con concentraciones altas de fósforo no se utilicen para riego.

Cuando existe toxicidad por fósforo, el follaje toma un color verde oscuro con tonos morados en hojas, tallos y pecíolos, los tallos son cortos y delgados, el amacollamiento en cereales es escaso y la raíz es poco ramificada (Pellerin *et al.*, 2000; Castellanos *et al.*, 2000), mientras que si hay deficiencia de este nutriente en cultivos como el arroz, tomate y maíz, se reduce la asimilación de CO₂ principalmente en la fotosíntesis de hoja y el tamaño y el número las hojas decrece por ende, la acumulación de biomasa (Colomb *et al.*, 2000; Fujita *et al.*, 2003),

Lo que hace especialmente peligrosa la eutrofización es su carácter irreversible, este proceso se hace evidente por el cambio de color de las aguas, se vuelven turbias y hay crecimiento excesivo de algas. También hay cambios en el oxígeno disuelto, en varias épocas del año hay agotamiento, las aguas profundas se vuelven reductoras y la materia orgánica no se descompone totalmente, lo que provoca que haya emanaciones de gas carbónico, sulfuro y sales amoniacales (Pesson, 1979; Mason *et al.*, 2005).

Para controlar las cargas de fósforo en lagos se ha utilizado a gran escala el sulfato de aluminio, ya que desempeña un doble papel como adsorbente de fósforo soluble y coagulante de sólidos suspendidos (Welch y Cooke, 1999; Mason *et al.*, 2005),

Cuadro 45. Clasificación de acuerdo al contenido de fosfatos de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No	PO₄ mg L⁻¹	P mg L⁻¹	Peligro de Eutrofización	Concentración 0.00 - 2.00 mg L⁻¹
1	0.258	0.084	No hay eutrofización	Normal
2	0.180	0.059	No hay eutrofización	Normal
3	0.608	0.198	Acelera la eutrofización	Normal
4	15.337	5.000	Acelera la eutrofización	Mayor
5	2.315	0.755	Acelera la eutrofización	Normal
6	0.295	0.096	Acelera la eutrofización	Normal
7	4.037	1.316	Acelera la eutrofización	Normal
8	0.953	0.311	Acelera la eutrofización	Normal
9	0.290	0.095	Acelera la eutrofización	Normal
10	0.048	0.016	No hay eutrofización	Normal
11	0.038	0.012	No hay eutrofización	Normal
12	1.024	0.334	Acelera la eutrofización	Normal
13	0.225	0.073	No hay eutrofización	Normal
14	1.225	0.399	Acelera la eutrofización	Normal
15	0.507	0.165	Acelera la eutrofización	Normal
16	0.284	0.093	Acelera la eutrofización	Normal
17	4.453	1.452	Acelera la eutrofización	Normal
18	0.515	0.168	Acelera la eutrofización	Normal
19	0.145	0.047	No hay eutrofización	Normal
20	0.375	0.122	Acelera la eutrofización	Normal
21	0.784	0.255	Acelera la eutrofización	Normal
22	0.134	0.044	No hay eutrofización	Normal
23	0.052	0.017	No hay eutrofización	Normal
24	0.326	0.106	Acelera la eutrofización	Normal
25	0.337	0.110	Acelera la eutrofización	Normal
26	0.565	0.184	Acelera la eutrofización	Normal
27	0.545	0.178	Acelera la eutrofización	Normal
28	0.362	0.118	Acelera la eutrofización	Normal
29	0.724	0.236	Acelera la eutrofización	Normal
30	1.078	0.352	Acelera la eutrofización	Normal
31	1.324	0.432	Acelera la eutrofización	Normal
32	0.027	0.009	No hay eutrofización	Normal
33	3.101	1.011	Acelera la eutrofización	Normal

Continuación...Clasificación de acuerdo al contenido de fosfatos de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No	PO4 mg L⁻¹	P mg L⁻¹	Peligro de Eutrofización	Concentración 0.00 - 2.00 mg L⁻¹
34	0.427	0.139	Acelera la eutrofización	Normal
35	0.206	0.067	No hay eutrofización	Normal
36	1.664	0.543	Acelera la eutrofización	Normal
37	0.043	0.014	No hay eutrofización	Normal
38	0.079	0.026	No hay eutrofización	Normal
39	0.023	0.007	No hay eutrofización	Normal
40	0.028	0.009	No hay eutrofización	Normal
41	0.120	0.039	No hay eutrofización	Normal
42	0.432	0.141	Acelera la eutrofización	Normal
43	0.420	0.137	Acelera la eutrofización	Normal
44	2.806	0.915	Acelera la eutrofización	Normal
45	0.404	0.132	Acelera la eutrofización	Normal
46	1.034	0.337	Acelera la eutrofización	Normal
47	0.050	0.016	No hay eutrofización	Normal
48	0.476	0.155	Acelera la eutrofización	Normal
49	0.012	0.004	No hay eutrofización	Normal
50	1.177	0.384	Acelera la eutrofización	Normal
51	0.048	0.016	No hay eutrofización	Normal
52	0.320	0.104	Acelera la eutrofización	Normal
53	0.326	0.106	Acelera la eutrofización	Normal
54	0.109	0.036	No hay eutrofización	Normal
55	0.044	0.014	No hay eutrofización	Normal
56	0.025	0.008	No hay eutrofización	Normal
57	0.375	0.122	Acelera la eutrofización	Normal
58	0.027	0.009	No hay eutrofización	Normal
59	0.026	0.008	No hay eutrofización	Normal
60	0.868	0.283	Acelera la eutrofización	Normal
61	0.063	0.021	No hay eutrofización	Normal
62	0.141	0.046	No hay eutrofización	Normal
63	0.351	0.114	Acelera la eutrofización	Normal
64	0.775	0.253	Acelera la eutrofización	Normal
65	0.525	0.171	Acelera la eutrofización	Normal
66	0.646	0.211	Acelera la eutrofización	Normal

Cuadro 46. Clasificación de acuerdo al contenido de fosfatos de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No	PO₄ mg L⁻¹	P mg L⁻¹	Peligro de Eutrofización	Concentración 0.00 - 2.00 mg L⁻¹
1	0.207	0.067	No hay eutrofización	Normal
2	0.220	0.072	No hay eutrofización	Normal
3	0.267	0.087	No hay eutrofización	Normal
4	0.138	0.045	No hay eutrofización	Normal
5	0.474	0.154	Acelera la eutrofización	Normal
6	8.111	2.644	Acelera la eutrofización	Mayor
7	11.813	3.851	Acelera la eutrofización	Mayor
8	0.258	0.084	No hay eutrofización	Normal
9	3.341	1.089	Acelera la eutrofización	Normal
10	0.818	0.267	Acelera la eutrofización	Normal
11	0.280	0.091	Acelera la eutrofización	Normal
12	0.090	0.029	No hay eutrofización	Normal
13	0.026	0.008	No hay eutrofización	Normal
14	0.534	0.174	Acelera la eutrofización	Normal
15	0.232	0.076	No hay eutrofización	Normal
16	0.224	0.073	No hay eutrofización	Normal
17	0.215	0.070	No hay eutrofización	Normal
18	1.033	0.337	Acelera la eutrofización	Normal
19	6.406	2.088	Acelera la eutrofización	Mayor
20	0.207	0.067	No hay eutrofización	Normal
21	0.276	0.090	No hay eutrofización	Normal
22	0.258	0.084	No hay eutrofización	Normal
23	4.305	1.403	Acelera la eutrofización	Normal
24	0.241	0.079	No hay eutrofización	Normal
25	0.542	0.177	Acelera la eutrofización	Normal
26	0.581	0.189	Acelera la eutrofización	Normal
27	0.355	0.116	Acelera la eutrofización	Normal
28	0.099	0.032	No hay eutrofización	Normal
29	0.112	0.036	No hay eutrofización	Normal
30	0.590	0.192	Acelera la eutrofización	Normal
31	0.551	0.180	Acelera la eutrofización	Normal
32	0.504	0.164	Acelera la eutrofización	Normal
33	4.512	1.471	Acelera la eutrofización	Normal
34	0.306	0.100	Acelera la eutrofización	Normal
35	4.357	1.420	Acelera la eutrofización	Normal
36	0.486	0.159	Acelera la eutrofización	Normal
37	0.387	0.126	Acelera la eutrofización	Normal
38	0.293	0.095	Acelera la eutrofización	Normal
39	0.672	0.219	Acelera la eutrofización	Normal

Continuación...Clasificación de acuerdo al contenido de fosfatos de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	PO4 mg L ⁻¹	P mg L ⁻¹	Peligro de Eutrofización	Concentración 0.00 - 2.00 mg L ⁻¹
40	1.558	0.508	Acelera la eutrofización	Normal
41	3.203	1.044	Acelera la eutrofización	Normal
42	0.861	0.281	Acelera la eutrofización	Normal
43	0.474	0.154	Acelera la eutrofización	Normal
44	0.052	0.017	No hay eutrofización	Normal
45	0.052	0.017	No hay eutrofización	Normal
46	0.018	0.006	No hay eutrofización	Normal
47	0.026	0.008	No hay eutrofización	Normal
48	0.022	0.007	No hay eutrofización	Normal
49	0.198	0.065	No hay eutrofización	Normal
50	0.504	0.164	Acelera la eutrofización	Normal
51	0.542	0.177	Acelera la eutrofización	Normal
52	1.636	0.533	Acelera la eutrofización	Normal
53	0.310	0.101	Acelera la eutrofización	Normal
54	0.682	0.222	Acelera la eutrofización	Normal
55	0.052	0.017	No hay eutrofización	Normal
56	0.320	0.104	Acelera la eutrofización	Normal
57	0.224	0.073	No hay eutrofización	Normal
58	2.876	0.938	Acelera la eutrofización	Normal
59	0.194	0.063	No hay eutrofización	Normal
60	0.273	0.089	No hay eutrofización	Normal
61	0.340	0.111	Acelera la eutrofización	Normal
62	1.080	0.352	Acelera la eutrofización	Normal
63	0.220	0.072	No hay eutrofización	Normal
64	0.310	0.101	Acelera la eutrofización	Normal
65	0.301	0.098	Acelera la eutrofización	Normal
66	0.319	0.104	Acelera la eutrofización	Normal
67	0.164	0.053	No hay eutrofización	Normal
68	0.396	0.129	Acelera la eutrofización	Normal
69	0.310	0.101	Acelera la eutrofización	Normal
70	0.108	0.035	No hay eutrofización	Normal
71	0.040	0.013	No hay eutrofización	Normal
72	0.030	0.010	No hay eutrofización	Normal
73	1.033	0.337	Acelera la eutrofización	Normal
74	0.095	0.031	No hay eutrofización	Normal
75	0.370	0.121	Acelera la eutrofización	Normal
76	0.690	0.225	Acelera la eutrofización	Normal
77	0.310	0.101	Acelera la eutrofización	Normal
78	0.582	0.190	Acelera la eutrofización	Normal

5.9 Clasificación de las aguas por su dureza

El término dureza se usa frecuentemente como un parámetro indicador de la calidad de las aguas. La dureza de las aguas está regida por el contenido de sales de calcio y de magnesio, combinados principalmente con bicarbonato y carbonato (Wetzel, 1981).

La dureza se expresa en mg L^{-1} de carbonato de calcio (CaCO_3) y se clasifican en aguas blanda (0-75), moderadamente duras (75-150), duras (150-300) y muy duras (más de 300). Como en las determinaciones se tiene la concentración de calcio esta se convierte a carbonato de calcio de la siguiente forma:

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

X , en este caso es el calcio como CaCO_3 y peq es el peso equivalente.

Para el primer muestreo se tiene que el 27.3% son aguas blandas, el 22.7% son aguas moderadamente duras, el 30.3% son duras y el 19.7% son aguas muy duras, esto se observa en el Cuadro 47.

En el Cuadro 48, se tienen los resultados del segundo muestreo, estos indican que el 23.1% son aguas blandas, el 21.8% son moderadamente dura, el 28.2% son duras y el 26.9% son muy duras.

Desde el punto de vista sanitario, las aguas duras son tan satisfactorias para el consumo humano como las aguas blandas, sin embargo, un agua dura requiere demasiado jabón para la formación de espuma y crea un problema de lavado, además deposita lodo e incrustaciones sobre las superficies con las cuales entra en contacto al ser calentada. Por lo tanto, el valor de la dureza determina su conveniencia para uso y la necesidad de un proceso de ablandamiento (Romero, 1999).

También se debe tener cuidado en el uso de el agua dura en el control químico de las malezas, ya que esta puede ser causante de la inhibición del agente activo de los herbicidas, por que se degrada o se combina, formando sales menos efectivas para el combate de las malas hierbas. Cuando las concentraciones de bicarbonatos excedan 2 mmolc L^{-1} y el pH exceda de 7.5 puede haber precipitaciones de carbonato de calcio, es necesario entonces inyectar continuamente ácido al sistema (Hassan, 1998; Ocampo, 1999).

El riego por aspersión puede obstruir o dañar los aspersores si contiene una elevada proporción de bicarbonatos de calcio, ya que pueden formar incrustaciones de carbonatos, reduciendo con ello el flujo de agua. La inyección de fertilizante fosfatados o amoniacales en esta agua, puede conducir a la formación de precipitados de calcio o magnesio, que pueden obstruir los orificios de los equipos de poco diámetro (Booher, 1974).

Cuadro 47. Clasificación de las aguas por su dureza del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Ca mg L ⁻¹	CaCO ₃ mg L ⁻¹	Clasificación	No.	Ca mg L ⁻¹	CaCO ₃ mg L ⁻¹	Clasificación
1	9.02	22.52	Blanda	34	25.65	64.06	Blanda
2	14.03	35.03	Blanda	35	167.53	418.38	Muy dura
3	9.62	24.02	Blanda	36	84.17	210.19	Dura
4	39.88	99.59	Moderadamente dura	37	53.31	133.12	Moderadamente dura
5	27.05	67.56	Blanda	38	51.70	129.12	Moderadamente dura
6	12.22	30.53	Blanda	39	74.55	186.17	Dura
7	24.25	60.55	Blanda	40	72.34	180.66	Dura
8	166.33	415.37	Muy dura	41	74.55	186.17	Dura
9	42.08	105.09	Moderadamente dura	42	25.45	63.56	Blanda
10	46.09	115.10	Moderadamente dura	43	36.07	90.08	Moderadamente dura
11	234.67	586.03	Muy dura	44	78.16	195.18	Dura
12	224.45	560.50	Muy dura	45	218.04	544.49	Muy dura
13	106.21	265.24	Dura	46	55.71	139.13	Moderadamente dura
14	144.09	359.82	Muy dura	47	94.79	236.71	Dura
15	21.24	53.05	Blanda	48	113.83	284.26	Dura
16	91.18	227.70	Dura	49	91.78	229.21	Dura
17	24.85	62.06	Blanda	50	69.94	174.66	Dura
18	11.02	27.52	Blanda	51	10.02	25.02	Blanda
19	60.12	150.14	Dura	52	34.87	87.08	Moderadamente dura
20	24.45	61.05	Blanda	53	36.07	90.08	Moderadamente dura
21	17.23	43.04	Blanda	54	169.34	422.88	Muy dura
22	73.95	184.67	Dura	55	23.25	58.05	Blanda
23	48.50	121.11	Moderadamente dura	56	59.32	148.13	Moderadamente dura
24	59.92	149.63	Moderadamente dura	57	74.35	185.67	Dura
25	23.25	58.05	Blanda	58	203.21	507.46	Muy dura
26	237.67	593.53	Muy dura	59	257.71	643.58	Muy dura
27	68.54	171.15	Dura	60	37.68	94.08	Moderadamente dura
28	139.68	348.81	Muy dura	61	159.52	398.36	Muy dura
29	23.05	57.55	Blanda	62	38.48	96.09	Moderadamente dura
30	85.37	213.19	Dura	63	28.06	70.06	Blanda
31	82.36	205.68	Dura	64	113.23	282.75	Dura
32	219.64	548.49	Muy dura	65	32.46	81.07	Moderadamente dura
33	74.35	185.67	Dura	66	80.16	200.18	Dura

Cuadro 48. Clasificación de las aguas por su dureza del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Ca mg L ⁻¹	CaCO ₃ mg L ⁻¹	Clasificación	No.	Ca mg L ⁻¹	CaCO ₃ mg L ⁻¹	Clasificación
1	12.42	31.03	Blanda	40	58.32	145.63	Moderadamente dura
2	13.23	33.03	Blanda	41	62.52	156.14	Dura
3	10.42	26.02	Blanda	42	213.83	533.98	Muy dura
4	15.03	37.53	Blanda	43	33.07	82.57	Moderadamente dura
5	7.21	18.02	Blanda	44	53.71	134.12	Moderadamente dura
6	14.83	37.03	Blanda	45	79.76	199.18	Dura
7	50.10	125.11	Moderadamente dura	46	102.20	255.23	Dura
8	11.22	28.03	Blanda	47	115.83	289.26	Dura
9	23.25	58.05	Blanda	48	105.01	262.24	Dura
10	245.69	613.55	Muy dura	49	28.86	72.06	Blanda
11	38.68	96.59	Moderadamente dura	50	20.04	50.05	Blanda
12	42.89	107.10	Moderadamente dura	51	19.44	48.54	Blanda
13	221.24	552.50	Muy dura	52	121.84	304.27	Muy dura
14	327.25	817.23	Muy dura	53	323.04	806.73	Muy dura
15	175.75	438.89	Muy dura	54	74.35	185.67	Dura
16	153.91	384.35	Muy dura	55	100.00	249.72	Dura
17	154.31	385.35	Muy dura	56	129.06	322.29	Muy dura
18	153.31	382.84	Muy dura	57	164.13	409.87	Muy dura
19	30.66	76.57	Moderadamente dura	58	14.63	36.53	Blanda
20	101.00	252.23	Dura	59	77.55	193.67	Dura
21	37.68	94.08	Moderadamente dura	60	80.36	200.68	Dura
22	30.46	76.07	Moderadamente dura	61	73.35	183.16	Dura
23	36.87	92.08	Moderadamente dura	62	83.17	207.69	Dura
24	72.14	180.16	Dura	63	160.12	399.86	Muy dura
25	15.23	38.03	Blanda	64	73.75	184.17	Dura
26	75.35	188.17	Dura	65	46.89	117.11	Moderadamente dura
27	19.24	48.04	Blanda	66	143.69	358.82	Muy dura
28	66.33	165.65	Dura	67	189.58	473.43	Muy dura
29	85.37	213.19	Dura	68	27.66	69.06	Blanda
30	47.29	118.11	Moderadamente dura	69	81.56	203.68	Dura
31	58.32	145.63	Moderadamente dura	70	107.82	269.24	Dura
32	21.64	54.05	Blanda	71	221.64	553.50	Muy dura
33	33.07	82.57	Moderadamente dura	72	210.42	525.47	Muy dura
34	268.94	671.60	Muy dura	73	60.52	151.14	Dura
35	26.45	66.06	Blanda	74	232.46	580.52	Muy dura
36	101.40	253.23	Dura	75	29.86	74.57	Blanda
37	230.26	575.02	Muy dura	76	126.05	314.78	Muy dura
38	31.86	79.57	Moderadamente dura	77	53.11	132.62	Moderadamente dura
39	48.30	120.61	Moderadamente dura	78	94.59	236.21	Dura

5.10 Clasificación hidrogeoquímica

La geoquímica de las aguas es de interés básico debido, sobre todo a que se debe considerar siempre la obtención de aguas de una calidad apropiada a la demanda. Diferentes estudios coinciden en que para demostrar la relación que existe entre la composición química y el origen de los yacimientos de las aguas subterráneas, se debe tomar en cuenta el clima, la evaporación, los fenómenos modificantes de la dilución de materiales, la velocidad de circulación, el tiempo de contacto, entre otras, ya que las características químicas están directamente relacionadas con los terrenos en que transitan (Del Arenal, 1985; Huízar, *et al*, 2001; Güler y Thyne, 2004; Diop y Tijani, 2008).

La clasificación de las aguas del primer muestreo se puede observar en la Figura 48 y el Cuadro 49. En el caso de los cationes se tiene que 34.8% de las estaciones son del tipo calcio, 4.6% son del tipo magnesio, 3.0% son del tipo sodio y 57.6% son mixtas, de estas 36.4% son cálcico-magnésica, 16.6% son del tipo magnésico-cálcicas y 4.6% son del tipo sódico-cálcica.

Para los aniones se tiene que 63.6% son de tipo bicarbonatados, 18.2% del tipo sulfatado y 18.2% del tipo mixto, de estas 4.6% es bicarbonatada-clorada, 12.1% bicarbonatada-sulfatada y 1.5% sulfatada-bicarbonatada.

En cuanto a la clasificación hidrogeoquímica total se tiene que 15.2% son aguas Bicarbonatada-cálcicas, 30.3% Bicarbonatada Cálcico-magnésica, 10.6% Bicarbonatadas Magnésico-cálcica, 3.0% Bicarbonatada Sódica, 4.6% Bicarbonatada Sódico-cálcica, 3.0% Bicarbonatada-clorada Cálcico-magnésica, 1.5% bicarbonatada-clorada Magnésico-cálcica, 7.5% Bicarbonatada-sulfatada Cálcica, 1.5% Bicarbonatada-sulfatada Cálcico-magnésica, 1.5% Bicarbonatada-sulfatada Magnésica, 1.5% Bicarbonatada-sulfatada Magnésico-cálcica, 10.6% Sulfatada Cálcica, 1.5% Sulfatada Cálcico-magnésica, 3.0% Sulfatada Magnésica, 3.0% Sulfatada Magnésico-cálcica, 1.5% Sulfatada-bicarbonatada Cálcica

Cuadro 49. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Catión dominante	Anión dominante	Clasificación
1	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
2	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
3	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
4	Tipo de sodio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódica
5	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
6	Mixta: Sódico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódico-cálcica
7	Mixta: Sódico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódico-cálcica
8	Tipo de magnesio	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Magnésica
9	Tipo de calcio: Cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
10	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
11	Tipo de calcio	Mixta: Sulfatada-bicarbonatada	Sulfatada-bicarbonatada Cálcica
12	Tipo de magnesio	Tipo de sulfato	Sulfatada Magnésica
13	Tipo de magnesio	Tipo de sulfato	Sulfatada Magnésica
14	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de sulfato	Sulfatada Cálcico-magnésica
15	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
16	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
17	Mixta: Sódico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódico-cálcica
18	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
19	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
20	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
21	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
22	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
23	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
24	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
25	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
26	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatada Cálcica
27	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-cálcica
28	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatada Cálcica
29	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
30	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
31	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
32	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatada Cálcica
33	Tipo de calcio	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Cálcica

Continuación...Clasificación hidrogeoquímica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Catión dominante	Anión dominante	Clasificación
34	Tipo de sodio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódica
35	Tipo de calcio	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Cálcica
36	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
37	Mixta: Cálculo-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálculo-magnésica
38	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-cálcica
39	Mixta: Cálculo-magnésica	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Cálculo-magnésica
40	Mixta: Cálculo-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálculo-magnésica
41	Mixta: Cálculo-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálculo-magnésica
42	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
43	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-cálcica
44	Mixta: Cálculo-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálculo-magnésica
45	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de sulfato	Sulfatada Magnésico-cálcica
46	Mixta: Cálculo-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálculo-magnésica
47	Tipo de calcio	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Cálcica
48	Tipo de calcio	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Cálcica
49	Mixta: Magnésico-cálcica	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Magnésico-cálcica
50	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
51	Mixta: Cálculo-magnésica	Mixta: Bicarbonatada-clorada	bicarbonatada-clorada Cálculo-magnésica
52	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-cálcica
53	Mixta: Cálculo-magnésica	Mixta: Bicarbonatada-clorada	bicarbonatada-clorada Cálculo-magnésica
54	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatada Cálcica
55	Mixta: Cálculo-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálculo-magnésica
56	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-cálcica
57	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-cálcica
58	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatada Cálcica
59	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatada Cálcica
60	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-cálcica
61	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de sulfato	Sulfatada Magnésico-cálcica
62	Mixta: Magnésico-cálcica	Mixta: Bicarbonatada-clorada	Bicarbonatada-clorada Magnésico-cálcica
63	Mixta: Cálculo-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálculo-magnésica
64	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatada Cálcica
65	Mixta: Cálculo-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálculo-magnésica
66	Tipo de calcio	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Cálcica

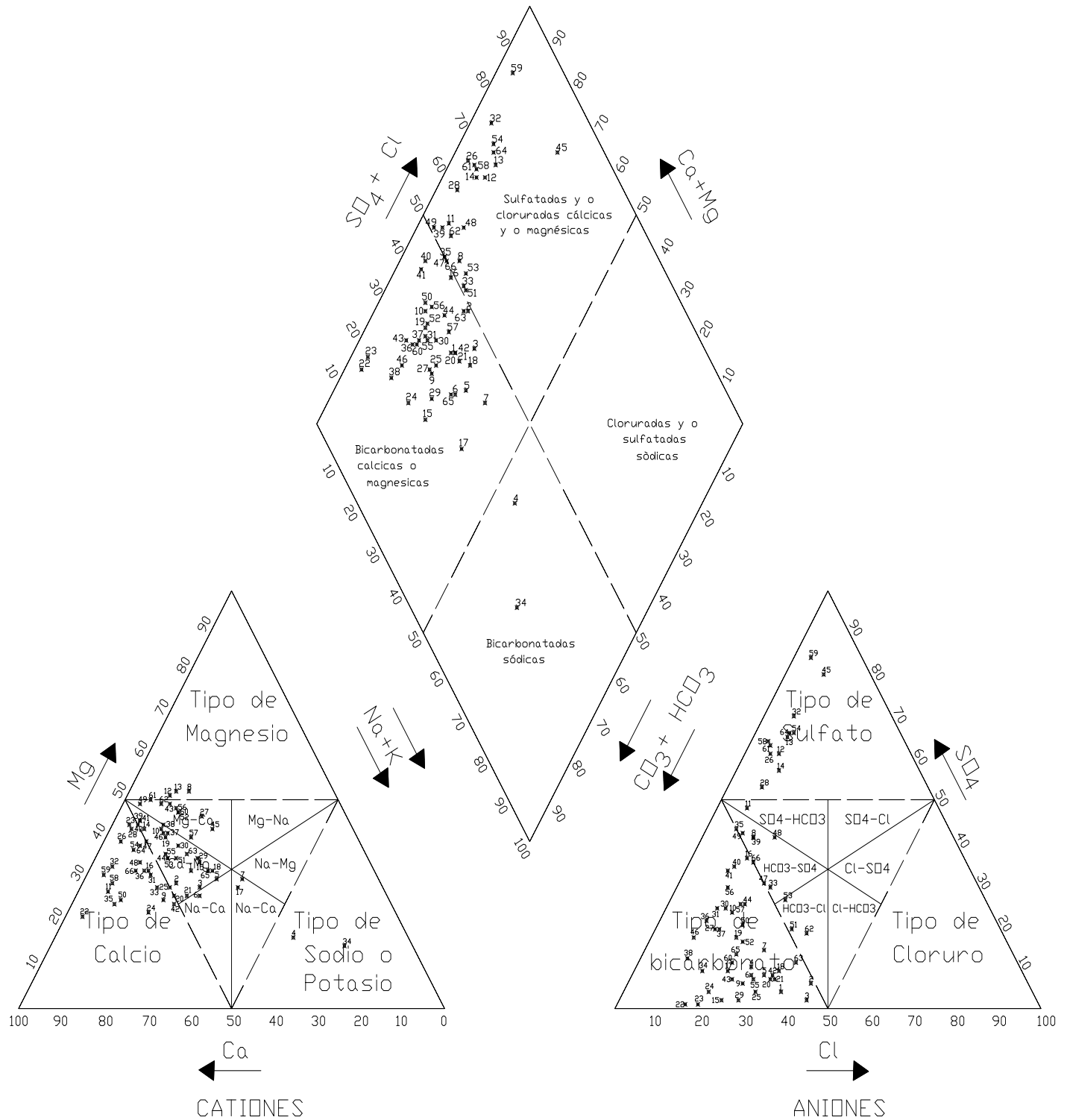


Figura 48. Clasificación hidrogequímica de las aguas del primer muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

La clasificación de las aguas del segundo muestreo se observa en la Figura 49 y el Cuadro 50. En el caso de los cationes se tiene que 55.1% de las estaciones son del tipo calcio, 2.6% son del tipo magnesio, 3.8% son del tipo sodio y 38.5% son mixtas, de estas 17.9% son cálcico-magnésica, 6.4% magnésico-cálcicas y 2.6% magnésico- sódico, 9% sódico-cálcica, 2.6% sódico-magnésica.

Para los aniones se tiene que 65.3% son de tipo bicarbonatados, 21.8% del tipo sulfatado y 12.9% del tipo mixto, de estas 7.6% bicarbonatada-sulfatada, 1.3% Clorada-bicarbonatada, 2.6% sulfatada-bicarbonatada, 1.3% sulfatada-clorada.

En cuanto a la clasificación hidrogeoquímica total se tiene que 30.8% son aguas Bicarbonatada Cálcica, 12.8% Bicarbonatada Cálcico-magnésica, 1.3% Bicarbonatada Magnésica, 5.1% Bicarbonatada Magnésico-cálcica, 1.3% Bicarbonatada Magnésico-sódica, 3.8% Bicarbonatada Sódica, 7.7% Bicarbonatada Sódico-cálcica, 2.6% Bicarbonatada Sódico-magnésica, 2.6% Bicarbonatada-sulfatada Cálcica, 2.6% Bicarbonatada-sulfatada Cálcico-magnésica, 1.3% Bicarbonatada-sulfatada Magnésica, 1.3% Bicarbonatada-sulfatada Magnésico-sódica, 1.3% Bicarbonatada-sulfatada Magnésico-cálcica, 1.3% Sulfatada-bicarbonatada Cálcica, 1.3% Clorada-bicarbonatada Magnésico-cálcica, 1.3% Sulfatada-bicarbonatada Cálcico-magnésica, 19.2% Sulfatada Cálcica, 1.3% Sulfatada Cálcico-magnésica, 1.3% Sulfatada Sódico-cálcica.

En general se puede decir que las aguas de terrenos cálcicos son bicarbonatadas cálcicas o cálcicas magnésicas, las de terrenos yesosos son sulfatadas cálcicas, las de terrenos formados por granitos son bicarbonatadas sódicas y cálcicas, las de terrenos de origen sedimentario marino algo arcillosos son cloradas sódicas con escaso calcio y magnesio, las de terrenos sedimentarios de origen continental algo arcillosos son bicarbonatadas cálcicas (Custodio y Lllamas, 1996), las aguas del área de estudio transitan por terrenos cálcicos y yesosos, con lo cual se corrobora lo antes mencionado.

Las zonas de recarga se caracterizan por ser de tipo bicarbonatadas, pues el predominio de este ión confirma que se trata de agua de reciente infiltración, ya que este elemento procede de la disolución de CO₂, contenido en la atmósfera o en el suelo (CNA, 2002a; Cerón *et al.*, 2000;

Grasby y Betcher, 2002; Diop y Tijani, 2008). Las aguas son predominantemente bicarbonatadas en virtud de que se infiltran en rocas cálcicas las cuales lixivian iones bicarbonato a las mismas (Pérez *et al.*, 2003).

Prol y Cortes (2003) indican que la concentración del ion sulfato en las aguas se relaciona con la distancia y el tiempo de recorrido de la zona de recarga a su afloramiento, además señalan que en los valles de Cuautla y Cuernavaca, la interacción agua-roca es más intensa en los estratos sedimentarios (formaciones Mezcala, Cuautla y Morelos), lo que da como resultado el predominio de aguas bicarbonatadas y sulfatadas, esto se corrobora con los resultados obtenidos en este estudio. La oxidación de pirita es también una fuente potencial de azufre en las muestras de agua (Güler y Thyne, 2004).

El no predominio de ningún ion, indica que en esta zona hay mezcla de recarga y aguas provienen de flujos locales y/o regionales (Prol y Cortes, 2003).

En cuanto a la composición química predomina el agua bicarbonatada en todas sus gamas como bicarbonatada sódica, bicarbonatada magnésica, bicarbonatada cálcica y bicarbonatada mixta. En general, la evolución hidrogeoquímica del agua proveniente de la lluvia inicia como familia bicarbonatada y evoluciona hasta llegar a la familia sulfatada, conforme el agua circula en el subsuelo (Ortega *et al.*, 2003).

Cuadro 50. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Catión dominante	Anión dominante	Clasificación
1	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
2	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
3	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
4	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
5	Tipo de magnesio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésica
6	Tipo de sodio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódicas
7	Mixta: Sódico-cálcicas	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódico-cálcicas
8	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-cálcica
9	Mixta: Sódico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódico-magnésica
10	Mixta: Cálcico-magnésica	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Cálcico-magnésica
11	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
12	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
13	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
14	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
15	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
16	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
17	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
18	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
19	Mixta: Sódico-cálcicas	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódico-cálcicas
20	Mixta: Magnésico-sódica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-sódica
21	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
22	Mixta: Sódico-cálcicas	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódico-cálcicas
23	Mixta: Sódico-cálcicas	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódico-cálcicas
24	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
25	Mixta: Sódico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódico-magnésica
26	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcico-magnésica
27	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
28	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
29	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
30	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
31	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
32	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
33	Mixta: Sódico-cálcicas	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódico-cálcicas
34	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
35	Tipo de sodio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódicas
36	Mixta: Sódico-cálcicas	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódico-cálcicas
37	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
38	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
39	Mixta: Magnésico-sódica	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Magnésico-sódica

Continuación...Clasificación hidrogeoquímica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Catión dominante	Anión dominante	Clasificación
40	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
41	Mixta: Cálcico-magnésica	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Cálcico-magnésica
42	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
43	Tipo de sodio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Sódicas
44	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
45	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
46	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
47	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
48	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
49	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-cálcica
50	Mixta: Magnésico-cálcica	Mixta: Clorada-bicarbonatada	Clorada-bicarbonatada Magnésico-cálcica
51	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-cálcica
52	Tipo de calcio	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Cálcica
53	Mixta: Sódico-cálcicas	Tipo de sulfato	Sulfatadas Sódico-cálcicas
54	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
55	Tipo de calcio	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Cálcica
56	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
57	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
58	Mixta: Magnésico-cálcica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Magnésico-cálcica
59	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
60	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
61	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
62	Tipo de magnesio	Mixta: Bicarbonatada-sulfatada	Bicarbonatada-sulfatada Magnésica
63	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
64	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
65	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
66	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
67	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
68	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
69	Mixta: Cálcico-magnésica	Mixta: Sulfatada-bicarbonatada	Sulfatada-bicarbonatada Cálcico-magnésica
70	Tipo de calcio	Mixta: Sulfatada-bicarbonatada	Sulfatada-bicarbonatada Cálcica
71	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
72	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
73	Tipo de calcio	Mixta: Sulfatada-clorada	Sulfatada-clorada Cálcica
74	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
75	Mixta: Cálcico-magnésica	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcico-magnésica
76	Tipo de calcio	Tipo de sulfato	Sulfatadas Cálcica
77	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica
78	Tipo de calcio	Tipo de bicarbonato	Bicarbonatada Cálcica

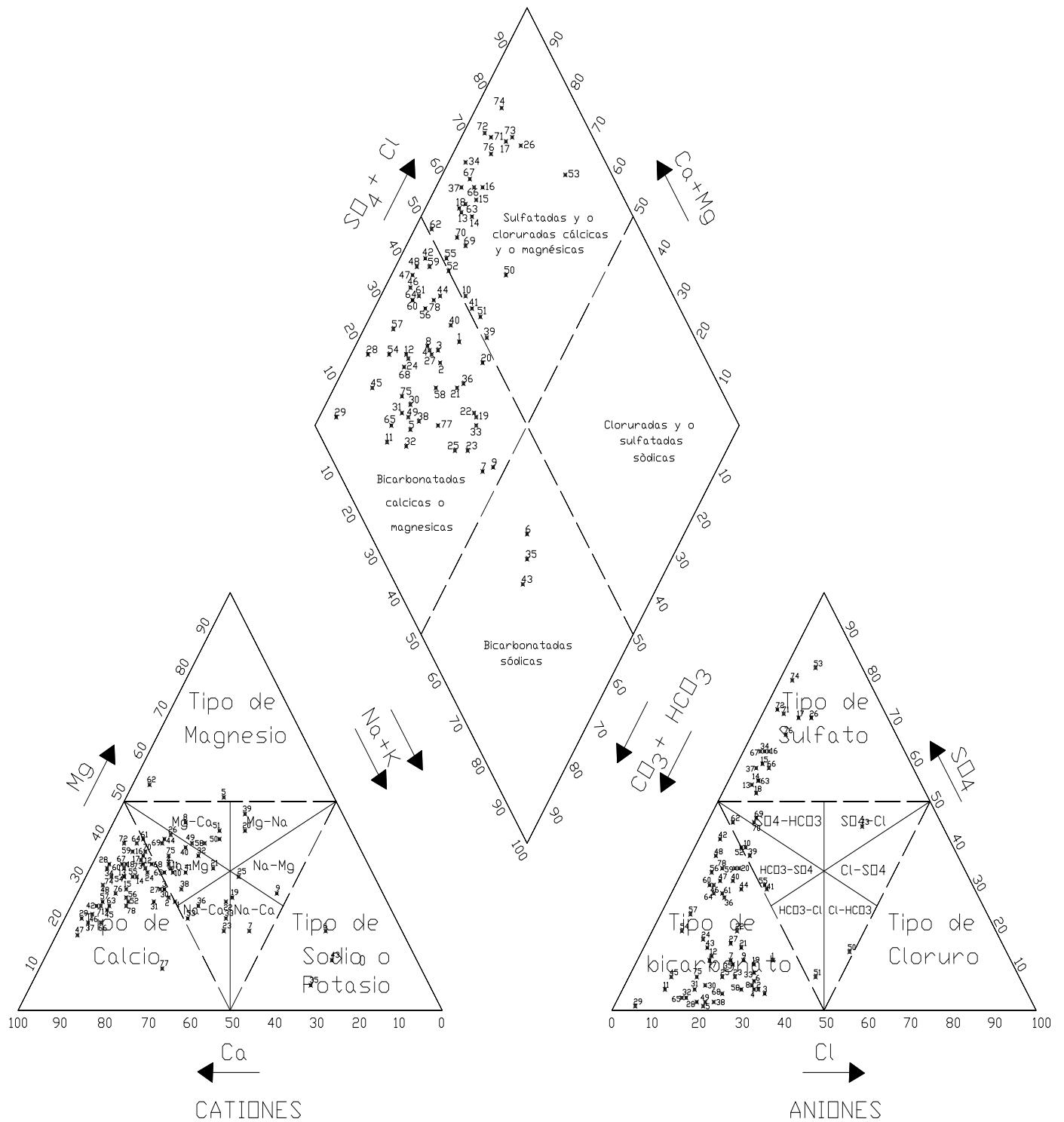


Figura 49. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas del segundo muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

6.- CONCLUSIONES

Las fuentes principales de abastecimiento de agua para uso agrícola en la zona de estudio son manantiales, pozos, corrientes superficiales, lagos y presas, por lo cual su composición química es muy importante para evitar daños a los cultivos y suelos en donde se aplica el riego.

La composición química de las aguas naturales es regulada por factores climáticos tales como precipitación, evaporación, sedimentación, procesos de erosión, naturaleza geológica de las rocas, procesos de cristalización de las sales y también de la influencia de componentes biológicos. En la red hidrográfica de Morelos, las aguas reflejan en su composición química que transitan por rocas volcánicas en la zona de recarga y conforme avanzan a las zonas de descarga las aguas circulan por rocas cálcicas aumentando su concentración de iones calcio, magnesio, bicarbonato y sulfato.

Un indicador de la calidad de las aguas para riego es la cantidad de sales disueltas, en las zonas de recarga su contenido es menor y a medida que fluyen en el subsuelo se enriquecen con sales, al ponerse en contacto con distintas unidades de roca por las que circulan. En los orígenes del sistema hidrográfico las aguas tienen bajas concentraciones electrolíticas de 100 a 200 $\mu\text{S cm}^{-1}$, sin embargo, cuando a estos cauces se vierten aguas urbano-industriales y están en contacto por más tiempo con rocas calcáreas, éstas alcanzan valores desde 300 hasta 3447 $\mu\text{S cm}^{-1}$, siendo aguas de salinidad media a muy altamente salinas.

En la parte norte del estado de Morelos los valores de sólidos disueltos son alrededor de 100 mg L^{-1} , conforme se dirigen a la porción intermedia el contenido varía entre 200 y 400 mg L^{-1} , al sur el contenido se incrementa desde 400 hasta más de 1000 mg L^{-1} , la diferencia se debe en gran medida a que recibe aguas de manantiales cuya concentración es de 300 a 1800 mg L^{-1} , pero también al aporte de aguas residuales urbano-industriales.

En el Lago de Tequesquitengo el agua presenta una alta concentración de sólidos disueltos de 2357 mg L^{-1} y una conductividad eléctrica de 3447 $\mu\text{S cm}^{-1}$, lo cual es una condición natural debido a que se alimenta principalmente de manantiales resurgentes en el fondo del lago y de

escurrimientos subterráneos que van en camino de la depresión del lago y han atravesado espesores yesíferos-carbonatados sedimentarios además de depósitos evaporíticos antiguos.

En cuanto a la calidad del agua para riego, se debe considerar no sólo su contenido de sales sino también el tipo de sales presentes y los problemas de salinidad, sodicidad, infiltración, u otros efectos sobre el suelo. Las aguas al circular por la red hidrográfica incrementan sus concentraciones de Na^+ de 0.15 a 9.02 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, pero también se encuentra concentraciones altas de Ca^{2+} y Mg^{2+} , de 0.36 a 16.33 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ y 0.28 a 14.22 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, respectivamente, limitando la posibilidad de que el sodio se adsorba en el complejo de intercambio catiónico en los suelos y afecte la estructura de estos.

Los procesos de formación, redistribución y acumulación de carbonatos están muy conectados con el régimen de humedad del suelo y también con los bicarbonatos contenidos en el agua de riego, ya que al precipitar el carbonato de calcio de dichas aguas, disminuye la concentración del calcio disuelto y aumentan la RAS y el nivel de sodio intercambiable del suelo. Los CO_3^{2-} no se encuentran presentes en aguas del primer muestreo, en el segundo su concentración es de 0.03 a 0.4 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ y los HCO_3^- varían de 0.58 a 12.55 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$.

La presencia de altos contenidos de SO_4^{2-} de 0.02 a 28.04 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ en las aguas se relacionan a que estas atraviesan horizontes evaporíticos.

Los problemas ocasionados por el uso de aguas con altas concentraciones de RAS, se debe a que produce altos niveles PSI en el suelo, asociado a la degradación de la estructura del suelo. La variación del RAS original es de 0.10 a 3.96, RAS_{aj} de 0.19 a 6.87 y RAS^o de 0.15 a 4.46, indicando que son aguas de bajo contenido de sodio.

Una disminución en la infiltración es consecuencia de los efectos de la concentración salina y el sodio de intercambio, aunque aguas con CE inferior a 200 $\mu\text{S cm}^{-1}$, causan siempre problemas de infiltración. El índice RAS considera los problemas de infiltración como resultado de un contenido excesivo de sodio en el suelo con respecto a calcio y magnesio.

Los resultados de la presión osmótica indican una variación de 0.042 a 1.05 atm, se recomienda usarse aguas con presión osmótica entre 0.25 y 1.00 atm, sin embargo pueden utilizarse cualquiera, siempre y cuando se mantenga la salinidad de los suelos dentro del rango de tolerancia de los cultivos.

En cuanto a la clasificación hidrogeoquímica, predomina el agua bicarbonatada en todas sus gamas como bicarbonatada cálcica, bicarbonatada magnésica, bicarbonatada sódica y bicarbonatada mixta.

Es posible el empleo en el riego de prácticamente cualquier tipo de agua pese a las características negativas que esta pudiera tener, siempre que se tomen en cuenta en la planificación de las normas de riego, el diseño de sistemas de riego, drenaje, tratamiento del agua y forma de siembra

La salinidad de la red hidrográfica aguas abajo se debe a la dilución de rocas calcáreas y aportaciones antropogénicas.

7.- RECOMENDACIONES

De acuerdo con los datos analíticos de la composición de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos, estas son ricas en iones de calcio. Para evitar problemas de compactación o de adsorción de sodio en pequeñas cantidades, se requiere de labores culturales como labranza profunda seguido de rastreo bianual, sobre todo en suelos ricos en arcillas expandibles como los vertisoles localizados en los municipios de Amacuzac, Cuautla, Miacatlan, Puente de Ixtla, Xochitepec y Zacatepec.

Las Aguas del lago de Tequesquitengo de alta concentración pueden ser usadas en cultivos muy tolerantes y en suelos con excelente drenaje.

La importancia de la dureza del agua de riego radica en que si es utilizada como vehiculo para los herbicidas, puede degradar el ingrediente activo si esta es dura, ya que los carbonatos, bicarbonatos y cationes metálicos, en especial el calcio se combina con los herbicidas formando sales menos efectivas, además puede obstruir o dañar los equipos y sistemas de riego, ya que pueden formar incrustaciones. Más de 70% de las aguas muestreadas son moderadamente duras a muy duras, dicha dureza se debe eliminar ya sea por ebullición del agua y posterior separación de los precipitados por filtración (dureza temporal) o por el método de intercambio iónico que consiste en reemplazar los iones indeseables por iones sodio (dureza permanente).

En los principales polos de desarrollo industrial y poblacionales de la red hidrográfica del estado de Morelos se ha desarrollado una competencia sobre el uso del suelo y agua, sobre todo se ha provocando el cambio en el volumen de agua destinado al riego agrícola. A la vez que dichos desarrollos urbano-industriales generan cantidades importante de aguas residuales, estas son vertidas sin previo tratamiento en ríos y arroyos. Dadas las características del sustrato geológico, los acuíferos se califican de vulnerables a muy vulnerables, en virtud del fracturamiento que presentan los basaltos y de la alta permeabilidad de los materiales granulares, corriendo el riesgo de contaminarlos. Además también la colocación interestratificada de calizas y evaporitas condiciona la vulnerabilidad de los acuíferos.

8.- BIBLIOGRAFÍA

Agassi, M., J. Tarchitzky, R. Keren, Y. Chen, D. Goldstein, and E. Fizik. 2003. Effects of prolonged irrigation with treated municipal effluent on runoff rate. *Journal Environmental Quality*. 32(3):1053-1057.

Aguilar, B. S. 2000. Naturaleza, formas y estructuras de un paisaje contrastante. En *Contribuciones a la investigación regional del estado de Morelos*. Javier Delgadillo Macías, coord. UNAM, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias del estado de Morelos (CRIM), Cuernavaca, México. p. 470.

Albornoz, F., A. Torres, M. Tapia, y E. Acevedo. 2007. Cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* mill.) hidropónico con agua desalinizada y desborificada en el Valle de Lluta. *IDESIA (Chile)*. 25(2):73-80.

Aldama, R. A. y F. Arreguín C. 2003. Desarrollo sustentable, el agua y la tecnología en el estado de Morelos. En *El Recurso Agua en el Alto Balsas*, Oswald S., U. Editor. UNAM, Cuernavaca, Morelos, México.

Al-Nabulsi, Y. A. 2001. Saline drainage water, irrigation frequency and crop species effects on some physical properties of soils. *Journal Agronomy & Crop Science*. 186:15-20.

Alonso, M. 1998. Las lagunas de la España peninsular. *Lirnetica*. 15:1-176

APHA. American Public Health Association. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater 19th 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.

Arriaga, L., V. Aguilar, y J. Alcocer. 2000. Aguas continentales y diversidad biológica de México. Escala 1:4 000 000. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, México.

Ávalos, G. C. 2003. Organización social y problemática del agua en la cuenca del río Cuautla, Morelos. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

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.

Baccaro, K., M. Degorgue M., M. Lucca M., L. Picone, E. Zamuner y Y. Andreoli. 2006. Calidad del agua para consumo humano y riego en muestras del cinturón hortícola de Mar del Plata. *Revista de Investigación Agropecuaria (RIA)*. 35 (3): 95-110. INTA, Argentina.

Balks, M. R., W. J. Bond, and C. J. Smith. 1998. Effects of sodium accumulation on soil physical properties under an effluent-irrigated plantation. *Australian Journal of Soil Research*. 36: 821-830.

- Ben-Hur, M., F.H. Li, R. Keren, I. Ravina, and G. Shalit. 2001. Water and salt distribution in a field irrigated with marginal water under high water table conditions. *Soil Science Society American Journal*. 65:191-198.
- Bhardwaj, A. K., U. K. Mandal, A. Bar-Tal, A. Gilboa and G. J. Levy. 2008. Replacing saline-sodic irrigation water with treated wastewater: effects on saturated hydraulic conductivity, slaking, and swelling. *Irrigation Science*. 26:139–146.
- Bogoslavsky, L. and P. M. Neumann. 1998. Rapid regulation by acid pH of cell wall adjustment and leaf growth in maize plants responding to reversal of water stress. *Plant Physiology*. 118(2):701 - 709.
- Bonh, H. L., B. L. McNeal and G. A. and O'Connor. 1993. *Química del Suelo*. 1 Ed. México. Limusa. p. 370.
- Bonilla, I., A. El-Hamdaoui and L. Bolaños. 2004. Boron and calcium increase *Pisum sativum* seed germination and seedling development under salt stress. *Plant and Soil*. 267: 97–107.
- Booher, L. J. 1974. El riego superficial. Colección FAO. Fomento de tierras y aguas, No. 3. Cuaderno de Fomento agropecuario. Italia. p. 162.
- Borquez, O. R. 1986. Efecto de las sales solubles. Colegio de Posgraduados. Tesis de maestría en ciencias. Edafología. Montecillo, Estado de México.
- Braatz, S. y A. Kandiah 1996. Utilización de aguas residuales urbanas para el riego de árboles y bosques. *Rev. Int. Silvicult. Ind. Forest*. 47: 45-50.
- Brinkmann, R. 1964. Compendio de geología general. Editorial Labor, S. A. Barcelona. España. p. 351.
- Brown, P. H. and H. Hu. 1998. Boron mobility and consequent management in different crops. *Better Crops*. 82 (2): 28-31.
- Brown, P. H., N. Bellaloui, M. A. Wimmer, E. S. Bassil, J. Ruiz, H. Hu, H. Pfeffer, F. Dannel and V. Römheld. 2002. Boron in plant biology. *Plant Biology*. 4: 211-229.
- Buckman, H. y I. Brady. 1966. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Muntaner y Simon. S. A. Barcelona, España. p. 590.
- Buol, S., F. Hole, y R. Mc Cracken. 1981. Génesis y clasificación de suelos. Editorial Trillas México, D. F. p.417.
- Cabalceta, G. y A. Cordero. 1991, Efectos de salinidad en arroz bajo riego en Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 15(2): 167-172.

Cabrera, S. A., J. Pacheco. A., E. Cuevas S., J. Ramírez, M. Comas y A. Cámara. 2002. Hidrogeoquímica del agua que subyace a la Japayi, en Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería* 6(3) 29-40.

Carabias, J. 2005 Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. Universidad Autónoma de México, Colegio de México y Fundación Gonzalo Río Arronte. México. p. 219.

Carrera, V. D. 2007. Calidad de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. Tesis de maestría en ciencias. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Casierra, P. F. y N. García R. 2006. Producción y calidad de fruta en cultivares de fresa (*Fragaria* sp.) afectados por estrés salino. *Revista Facción Nacional Agricultura Medellín*. 59(2):3527-3542.

Castellanos, J. Z. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y agua. Instituto de Capacitación para la productividad agrícola. México. p. 226.

Cepeda, D. J. M. 1991. Química de suelos. Editorial Trillas. S. A. México. p. 153.

Cerana, J., M. Wilson, J. de Battista, J. Noir, y C. Quintero. 2006. Estabilidad estructural de los vertisoles de Entre Ríos en un sistema arrocerero regado con agua subterránea. Argentina. *Revista de Investigación Agropecuaria (RIA)*. 35 (1): 87-106.

Cerón, J. C., M. Martín-Vallejo and L. García-Rossell. 2000. CO₂-rich thermomineral groundwater in the Betic Cordilleras, southeastern Spain: Genesis and tectonic implications. *Journal Hydrology*. 8: 209-217.

Chinnusamy, V., A. Jagendorf and J-K Zhu. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science*. 45: 437-448.

Chirinos, I. J. y M. E. Mattiazzo 2004. Variación de la conductividad hidráulica en suelos saturados, en función de la concentración de sodio presente en residuo agroindustrial. *Revista Facción Agronómica. (LUZ)*. 21:1-11.

Choudhary, O. P., B. S. Ghuman, A. S. Josan and M. S. Bajwa. 2006. Effect of alternating irrigation with sodic and non-sodic waters on soil properties and sunflower yield. *Agricultural Water Management*. 85: 151-156.

CNA, 1996. Clasificación del Río Apatlaco. Documento de estudio para determinar capacidad y características de uso y calidad en las descargas de aguas residuales que se vierten a la corriente superficial a fin de preservar este recurso hídrico. Cuernavaca, Morelos, México.

CNA. 2002a. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuernavaca. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. México.

- CNA. 2002b. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuautla-Yautepec. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. México.
- CNA. 2002c. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Tepalcingo-Axochiapan Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. México.
- CNA. 2002d. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Zacatepec Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. México.
- CNA. 2004. Estadísticas del Agua en México, edición 2004. Comisión Nacional del Agua, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- CNA. 2007. Estadísticas del Agua en México, edición 2007. Comisión Nacional del Agua, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Colomb, B., J. Kiniry and P. Debaeke. 2000. Effect of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamics of field-grown Maize. *Journal Agronomy*. 92(3): 428 – 435.
- Coras Merino, P. 1996. Calidad química del agua para riego. Universidad Autónoma Chapingo, México: UACH. Departamento de Fitotecnia.
- Corwin, D. L. and S. M. Lesch. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. *Journal Agronomy*. 95(3): 455 - 471.
- Costa, J. L. 1999. Effect of irrigation water quality under supplementary irrigation on soil chemical and physical properties in the “southern humid pampas” of Argentina. *Journal of Crop Production*. 2:85-99.
- Cramer, G., J. Lynch, A. Läuchli and E. Epstein. 1987. Influx of Na⁺, K⁺, and Ca²⁺ into roots of salt-stressed cotton seedlings. Effects of supplemental Ca²⁺. *Plant Physiol*. 83: 510–516.
- Crescimanno, G. and P. Garofalo. 2006. Management of irrigation with saline water in cracking clay Soils. *Soil Science Society American Journal*. 70: 1774-1787.
- Cuenca, A., D. Riestra, D. J. M. Pérez, M. y A. Echegaray, A. 2001. Uso de aguas residuales y control de organismos patógenos en la producción de cebolla. *Agrociencia*. 35(3): 255-265.
- Custodio E. y R. Llamas. 1996. Hidrología Subterránea. 2 tomos. Ed. Omega S.A., Barcelona España. p. 2350.
- Daniel, T. C., N. Sharpley, and L. Lemunyon, J. 1998. Agricultural phosphorus and eutrophication: a symposium overview. *Journal Environmental Quality*. 27: 251–257

Del Arenal, A. 1985. Estudio Hidrogeoquímico de la porción Centro-Oriental del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 6(1):86-97.

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.

Delgado, R. G. 2006. Agua: Usos y abusos: la hidroelectricidad en Mesoamérica. Publicado por UNAM, México. p. 201.

Diop, S. and M. Tijani. 2008. Assessing the basement aquifers of Eastern Senegal. *Hydrogeology Journal*. 16: 1349–1369.

Domènech, X. y J. Peral. 2006. Química ambiental de sistemas terrestres. Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España. p. 239.

Dontsova, K., L. D. Norton, C. T. Johnston, and J. Bigham. 2004. Influence of exchangeable cations on water adsorption by soil clays. *Soil Science Society American Journal*. 68: 1218-1227

Escamilla, S. G., E. Solleiro, S. Sedov y J. Gama, 2003. Tepetates del glacis de Buenavista, Morelos: interacción de procesos geomorfológicos y pedogenéticos. Boletín 48, Instituto de Geografía, UNAM, México. p. 76-89.

Feng, G. L., A. Meiri, and J. Letey. 2003. Evaluation of a model for irrigation. Management under saline conditions: I. Effects on plant growth. *Soil Science Society American Journal*. 67: 71-76.

Fereres, E. and M. A. Soriano. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*. 58 (2):147–159.

Fersman, A. 1971. *Geoquímica Recreativa*. Ediciones Martínez Roca. p. 343.

Fessbender, H. y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos: con énfasis en suelos de América Latina (2ª ed.): Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura San José Costa Rica. p. 420.

Fetter, C. W. 1999. *Contaminant hydrogeology*. Prentice Hall. p. 500.

Figueruelo, A. J. y M. M. Dávila, 2004. Química Física del ambiente y de los Procesos Medio Ambientales. Editorial Reverté, S. A. España. p. 570.

Flores, J., A. Becerril R., V. Gonzales H., L. Tijerina C., y T. Vásquez R. 2005. Crecimiento vegetativo y floral del crisantemo [*Dendranthema x grandiflorum* (Ramat) Kitamura] en respuesta a la presión osmótica de la solución nutritiva. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 11(2): 241-249.

Fries, C. 1960. Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México; Instituto de Geología, UNAM, Boletín 60. p. 236.

Fujita, K., M. Okada, K. Lei, J. Ito, K. Ohkura, J. J. Adu-Gyamfi, and P. K. Mohapatra. 2003. Effect of P-deficiency on photoassimilate partitioning and rhythmic changes in fruit and stem diameter of tomato (*Lycopersicon esculentum*) during fruit growth. *Journal of Experimental Botany*. 54(392): 2519-2528.

García, J. 1991. Evaluación de la calidad de agua de los ríos Apatlaco, Yautepec y Cuautla, estado de Morelos, utilizando indicadores biológicos de contaminación. Tesis de maestría. UNAM. México.

García, M y E. Medina. 2003. Crecimiento y acumulación de prolina en dos genotipos de caña de azúcar sometidos a salinización con cloruro de sodio. *Revista Facultad Agronomica. (LUZ)*. 20: 168-179.

García, M. y J. López. 2005. Caracterización de las unidades ambientales biofísicas del Glacis de Buenavista, Morelos, mediante la aplicación del enfoque geomorfológico morfogenético. *Boletín Núm. 58. Instituto de Geografía, UNAM.* p. 34-53

Gardner, W. K. 2004. Changes in soils irrigated with saline groundwater containing excess bicarbonate. *Australian Journal of Soil Research*. 42: 825–831.

Gil, R. M. 2005, *Procesos de descontaminación de Aguas*. Editorial Trompson. Madrid España.

Gili, S. P., G. Marando I., J. Irisarri E. y M. Sagardoy R. 2004. Efecto de las técnicas de lavado y fertilización sobre la salinidad en suelos del alto Valle de Río Negro y Neuquén, Argentina *Agricultura Técnica (Chile)* 64(3):295-304.

Goldberg, S., S. Lesch, and D. Suarez. 2000. Predicting boron adsorption by soils using soil chemical parameters in the constant capacitance model. *Soil Science Society American Journal*. 64: 1356-1363.

Goldberg, S., D. L. Corwin, P.J. Shouse, and D. L. Suarez. 2005. Prediction of boron adsorption by field samples of diverse textures. *Soil Science Society American Journal*. 69: 1379-1388.

González, L. M. 2001. Apuntes sobre la fisiología de las plantas cultivadas bajo estrés de salinidad. *Cultivos Tropicales*, 23(4): 47-57.

González, L. M., M. C. González, y R. Ramírez. 2002 Aspectos generales sobre la tolerancia a la salinidad en las plantas cultivadas. *Cultivos Tropicales*, 23(2): 27-37.

Goykovic, C. V., y G. Saavedra R. 2007. Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del Tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *IDESIA (Chile)* 25(3): 47-58.

Grasby, S. y R. Betcher. 2002. Regional hydrogeochemistry of the carbonate rock aquifer, southern Manitoba. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 39(7):1053-1063.

Guerrero, H. C. 2001. Rocas calizas: Formación, ciclo del carbonato, propiedades, aplicaciones, distribución y perspectivas en la Mixteca Oaxaqueña. *Temas de ciencia y tecnología*. 5(14):3-14.

Guerrero, M. 1991. El agua. Fondo de cultura Económica. México. p.178.

Güler, C. and G. D. Thyne. 2004. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *Journal of Hydrology*. 285:177-198

Halperin S. J. and J. P. Lynch. 2003. Effects of salinity on cytosolic Na⁺ and K⁺ in root hairs of *Arabidopsis thaliana*: in vivo measurements using the fluorescent dyes SBF1 and PBF1. *Journal of Experimental Botany* 54: 2035 – 2043.

Halliwell, D. J., Barlow, K. M., Nash, D. M. 2001. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. *Aust. J. Soil Res.* 39, 1259–1267.

Hassan, F. 1998. Microirrigation management and maintenance. *Agro Industrial Management*. Fresno, CA. p. 233.

Heidarpour, M., B. Mostafazadeh-Fard, J. Abedi Koupai, and R. Malekian. 2007. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. *Agricultural Water Management*. 90: 87-94.

Herrera L. A. 1990. Contaminación en aire, agua y suelo en al ciudad de México, en Medio ambiente y desarrollo en México. V.2, México: CIIH-UNAM-Porrúa.

Hinrichsen, D., Robey, B., and Upadhyay, U.D. 1998. Soluciones para un mundo con escasez de agua. *Population Reports, Serie M, No. 14*. Baltimore, Johns Hopkins School of Public Health, Population Information Program.

Holmes A. y D. Holmes. 1987. *Geología física*. Ediciones Omega, S. A. Barcelona España. p. 812.

Huízar, A. R., O. Campos E., L. Mitre S., D. Alatríste V., T. Méndez G. y F. Juárez S. 2001, Evaluación hidrogeológica de la subcuenca de Tecocomulco, estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 18(1):55-73.

Huízar, A, R. T. Méndez G., y R. Madrid R. 1999, Hidrogeoquímica de la subcuenca de Apan-Tochac, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 16(1):89-96.

Hussein, A. H. and M. C. Rabenhorst. 2001. Tidal inundation of transgressive coastal areas: pedogenesis of palinization and alkalization. *Soil Science Society American Journal*. 65(2): 536 – 544.

Jalali, M., H. Merikhpour, M.J. Kaledhonkar, S.E.A.T.M. Van Der Zee. 2008. Effects of wastewater irrigation on soil sodicity and nutrient leaching in calcareous soils. *Agricultural Water Management*. 95:143-153.

Jiménez B., C. Siebe, y E. Cifuentes. 2004. El Reúso intencional y no intencional del Agua en el Valle de Tula. En *El Agua en México, Vista desde la Academia*, Academia Mexicana de Ciencias, México. p. 33-55.

Juárez, B. E. 2004. *Mecánica de suelos* (3ª ed.). Limusa. México, D. F

Katerji, N., J. W. van Hoorn, A. Hamdy, F. Karam, M. Mastrorilli. 1994. Effect of salinity on emergence and on water stress and early seedling growth of sunflower and maize. *Agricultural Water Management*. 26:81-91

Keith, T. D. 1967. *Ground water hidrology*. Sixth printing by John Wiley and sons. Printed in USA. p. 336.

Kiely, G. 1999. *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. McGraw - Hill. Madrid. p. 1331.

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

Larqué, S. A. 1980. *El Agua en las Plantas*. Colegio de Postgraduados, México.

Larqué, S. A. y C. Trejo L. 1990. *El Agua en las Plantas*. Editorial Trillas. México. p. 88.

Lau, Q. A., S. Lhermitte, S. Gilliams, M. E. Ruiz P. 2003. Relación de la salinidad del suelo con la reflectancia multiespectral de la caña de azúcar cultivada en condiciones extremas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 12(3): 19-29.

Läuchli, A., and E. Epstein, 1990. In K. K. Tanji (ed.) *Agricultural salinity assessment and management*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice no. 71. Am. Soc. Civil Engineers, New York, NY.

Leidi, E. y Pardo J. 2002. Tolerancia de los cultivos al estrés salino: que hay de nuevo. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 2(2):69-90.

Lesser, J. M. 1987. *Geohidrología*. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, México.

Levy, G. J., D. Goldstein, and A. I. Mamedov. 2005. Saturated hydraulic conductivity of semiarid soils: Combined effects of salinity, sodicity, and rate of wetting. *Soil Science Society American Journal*. 69(3): 653-662.

Lira, S. R. 2003. *Fisiología Vegetal*. Trillas. p. 237.

Maathuis, F. J. 2006. The role of monovalent cation transporters in plant responses to salinity. *Journal of Experimental Botany*. 57: 1137 - 1147

Mace, J. E. and C. Amrhein. 2001. Leaching and Reclamation of a Soil Irrigated with Moderate SAR Waters. *Soil Science Society American Journal*. 65: 199-204

Maderey, R. L. E. y J. Carrillo. 2005. El recurso agua en México; un análisis geográfico. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F. p. 128.

Malavé A. A. y P. Carrero M. 2007. Desempeño funcional del boro en las plantas. *Revista de Agricultura tropical de la Universidad de Oriente (UDO)*. Venezuela. 7(1): 1-14.

Manahan, S. 2007. *Introducción a la Química ambiental de sistemas terrestres*. Editorial Reverté, S. A. España. p.725.

Martínez R. S., P. Zalba, M. Villamil, N. Peinemann. 2001. Efecto de cationes sobre propiedades hidrofísicas de suelos con diferentes minerales de arcilla. *Ciencia del Suelo* 19 (2): 85-91.

Martínez, A. P., P. Martínez, y C. Castaño. 2006. *Fundamentos de hidrogeología*. Ediciones Mundi-Prensa. España. p. 279.

Martinez, B. M. C., F. Cabanero, E. Olmos, P. M. Periago, C. Maurel, and M. Carvajal, 2008. Two different effects of calcium on aquaporins in salinity-stressed pepper plants. *Planta*. 228:15–25.

Mason, L. B., C. Amrhein, C. Goodson, M. Matsumoto, and M. Anderson. 2005. Reducing sediment and phosphorus in tributary waters with Alum and polyacrylamide. *Journal Environmental Quality*. 34(6):1998-2004.

Maas, E. V. 1986. Salt tolerance of plants. *Applied agricultural research*.1:12-26

Morales, D., P. Rodríguez, J. M. Dell'Amico, M. J. Sánchez-Blanco, y A. Torrecillas, 2003. Efecto de la salinidad en la conductividad hidráulica de las raíces y las relaciones hídricas en hojas de dos especies de tomate (*L. Esculentum* y *L. Chessmanii*). *Cultivos Tropicales*, 24(1):41-45.

Morales, D., M. C. Bolarín, E. Cayuela. 2006. Respuesta de las plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) a la aplicación de diferentes niveles de NaCl. *Cultivos Tropicales*. 27(4):27-32.

Morán, Z. D., R. Monter. A., G. Centeno. E., A. Alva. L. y J. Solé. 2007. Stratigraphy of the Balsas in the Amacuzac area, southern México: Relationship with Eocene volcanism and deformation of the Tizapotla-Taxco sector. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 24(1):68-80.

Moutier, M., I. Shainberg, and G. J. Levy. 2000. Hydraulic gradient and wetting rate effects on the hydraulic conductivity of two calcium Vertisols. *Soil Science Society American Journal*. 64:1211-1219.

Muneeer, M. y J. M. Oades. 1989. The role of Ca-Organic interactions in soil aggregate stability. I. Laboratory studies with ^{14}C -glucose, CaCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Australian Journal of Soil Research*. 27:389-99.

Navarro, G. G. y S. Navarro B. 2003. *Química Agrícola*. Mundi-Prensa. Madrid. p. 487.

Neal, C., W. House. A., H. Jarvie. P., M. Neal., L. Hill. and H. Wickham. 2006. The water quality of the River Dunn and the Kennet and Avon Canal. *Journal of Hydrology*. 330:155-170.

Netondo, G. W., J. C. Onyango, and E. Beck. 2004. Sorghum and salinity: I. Response of growth, water relations, and ion accumulation to NaCl salinity. *Crop Science*. 44(3): 797-805.

Ocampo, R. R. 2000. Calidad del agua para aspersión de herbicidas. *Revista Mexicana de la ciencia de la maleza*. Universidad Autónoma Chapingo. Numero especial. p. 57-60.

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

Ortega, L. V., A. García, S. y R. Pelayo, B. 2003. Aspectos geohidrológicos de los acuíferos del estado de Morelos. En: *El Recurso Agua en el Alto Balsas*, Oswald S., U. Editor. UNAM, Cuernavaca, Morelos, México.

Ortega, S. F. y Orellana G. R. 2007. El riego con aguas de mala calidad en la agricultura urbana. Aspectos a considerar. I. Aguas salinas o alcalinas *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 16 (1):41-44.

Osorio, U. A. y R. Céspedes R. 2000. Efecto de métodos de riego localizado en la salinidad del perfil de suelo en vid de mesa. I. Conductividad eléctrica, sodio, cloro y boro en distintos puntos del perfil. *Agricultura Técnica (Chile)*, 60 (2):178-194.

Oster, J. D. 1994. Irrigation with poor quality water. *Agricultural Water Management*. 25: 271-297.

Oster, J. D. and I. Shainberg, 2001. Soil responses to sodicity and salinity: challenges and opportunities. *Australian Journal of Soil Research*. 39:1219–1224.

Parker, F., and D. Suarez. Irrigation water quality assesment. In agricultural salinity assessment and management. ASCE. NY, USA. 1990.

Pellerin, S., A. Mollier, and D. Plénet. 2000. Phosphorus deficiency affects the rate of emergence and number of Maize adventitious nodal roots. *Agronomy Journal*. 92(4): 690-697.

Peña, F. 2006. Riego agrícola con aguas negras. El caso del Valle del Mezquital, México, en *Apropiación y usos del agua, nuevas líneas investigación*. Roberto Melville y Francisco Peña. (comp.) Universidad Autónoma Chapingo. p. 93-107.

Pereira, R., U. Herpin, A. Ferreira, L. Pittol, C. Montes, and A. Melfi. 2008. Sodicity and salinity in a Brazilian Oxisol cultivated with sugarcane irrigated with wastewater. *Agricultural Water Management*. 96:307-316.

Pérez Z., O. 2002. Efecto de la aplicación de aguas residuales industriales en las propiedades físicas y químicas del suelo. *Agrociencia* 36: 279-290.

Pérez, M. F., F. Prieto, G., A. Rojas, H., C. Galán, V., Y. Marmolejo, S., C. Romo G., A. Castañeda O., J. Rodríguez A. y E. Barrado, E. 2003. Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México. *Hidrobiológica*. 13(2): 95-102.

Pesson, P. 1979. Contaminación de las aguas continentales: Incidencias sobre las biocenosis acuáticas. Madrid: Mundi-Prensa. 335 p

Phillips, W. y I. Phillips. 1986. Fundamentos de mineralogía para geólogos. Limusa. México, D. F. p. 371.

PNUMA. 2004. Perspectivas del Medio Ambiente en México. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). p. 232.

Polón, R., R. I. Castro, M. A. Ramírez, A. Miranda y N. Pérez. 2004. Estudio comparativo del manejo de agua en dos sistemas de riego y su efecto en la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo y el rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa L.*). *Cultivos Tropicales*. 25(2):91-93.

Porta, C. J., M. López, M. y C. Ronquero. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. México: Mundi-Prensa. p. 959.

Poulsen, D. L., C. T. Simmons, C. Le Galle La Salle and J. W. Cox. 2006. Assessing catchment-scale spatial and temporal patterns of groundwater and stream salinity. *Hydrogeology Journal*. 14(7): 1339-1359.

Prol, L. R. y A. Cortés. 2003. Caracterización Geoquímica de la Barrera hidrogeológica de Cañón de Lobos entre los Valles de Cuernavaca y Cuautla, Morelos. En: El Recurso Agua en el Alto Balsas, Oswald S., U. Editor. UNAM, Cuernavaca, Morelos, México.

Ramírez, B. 2007. Reportan insalubre agua del Río Apatlaco. Excélsior, Cuernavaca Morelos. Sitio Web http://www.nuevoexcelsior.com.mx/27_1949.htm

Ramos, L. J., A. Cortés S., A. Ramírez G. y L. Barrón R. 2003. Relaciones Hidrogeoquímicas y sistemas de flujo entre las cuencas de México y Amacuzac. En El recurso agua en el Alto Balsas, Oswald S., U. Editor. UNAM, Cuernavaca, Morelos, México.

Ramos, O. R., R. Sepúlveda y F. Villalobos. 2003. El agua en el medio ambiente: Muestreo y análisis. Plaza y Valdes Editores. Mexicali, Baja California. p. 210.

Ramos, L. J., J. Durazo, T. González, F. Juárez, A. Cortés y K. Johannesson. 2007. Evidencias hidrogeoquímicas de mezcla de flujos regionales en el acuífero de La Muralla, Guanajuato. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 24(3):293-305.

Rengasarny, P. 1982. Dispersion of Calcium Clay. Australian Journal of Soil Research. 20:153-157.

Rengasamy, P. 2006. World salinization with emphasis on Australia. Journal of Experimental Botany. 57: 1017-1023.

Rengel, Z. 1992. The role of calcium in salt toxicity. Plant, Cell and Environment. 15: 625-632

Ribeiro, T., R. Airoidi, J. Paterniani, y M. da Silva. 2005. Variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água em um sistema de irrigação localizada. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 9(3): 295-301.

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

Rodier, J. 1990. Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar. Omega. España. 1059 p

Rodríguez, P. L. 2006. Implicaciones fisiológicas de la osmorregulación en plantas. Agronomía Colombiana. 24 (1): 28-37.

Romero, R. J. 1999. Calidad del agua. Alfaomega. México, p. 270.

Ruda, E., A. Mongiello, A. Acosta, E. Ocampo, y L. Contini. 2005. Calidad del agua subterránea con fines de riego suplementario en argiudoles del centro de Santa Fé, Argentina. Agricultura Técnica (CHILE). 65(4):411-420.

Ruiz, V., y L. Wu. 2006. Influence of Sodicity, Clay Mineralogy, Prewetting Rate, and Their Interaction on Aggregate Stability. *Soil Science Society American Journal*. 70: 1825-1833.

Salinas, P. J. C. 2007. Análisis de la deformación dúctil en la Región Norte del estado de Morelos. *geoCiencias*. 5-23.

Sánchez, F. J. (2004).- Conceptos Básicos. Hidroquímica. Universidad de Salamanca. 11 pp. (En: <http://web.usal.es/javisan/hidro>)

Seoáñez, C. M. 2005. Depuración de las aguas Residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo. Ediciones Mundi Prensa. España. p. 464.

Shainberg, I., G. Levy, J. Levin, and D. Goldstein. 1997. Aggregate size and real properties. *Soil Science*. 162: 470-478.

Shani, U. and L. Dudley. 2001. Field Studies of Crop Response to Water and Salt Stress. *Soil Science Society American Journal*. 65: 1522-1528.

Sharpley, A., and P. Withers. 1994. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus. Netherlands. *Fertilizer Research*. 39:133-146.

Steppuhn, H., M. Th. van Genuchten, and C. M. Grieve. 2005. Root-Zone Salinity: I. Selecting a Product-Yield Index and Response Function for Crop Tolerance. *Crop Science*. 45(1): 209-220.

Suarez, D., J. Wood, and S. Lesch. 2006. Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system. *Agricultural Water Management*. 86:150-164

Surapaneni, A., K. A. Olsson. 2002. Sodification under conjunctive water use in the shepparton irrigation region of northern Victoria: a review. *Australia Journal Experimental Agricultural*. 42:24-263.

Toledo, A. 2003. Ríos, costas, mares. Hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). p. 117.

Tortolero, V. A. 2000. El agua y su historia, México y sus desafíos hacia el siglo XXI. Editores Siglo XXI. Madrid, España. p. 167.

UNICEDES, 1999, Perspectivas para el Desarrollo Social de la Microcuenca del Río Apatlaco. Universidad Autónoma del Estado de Morelos-Unidad Central de Estudios para el Desarrollo Social.

Vázquez, M., G. Millán y P. Gelati. 2006. Efecto del riego complementario sobre la salinidad y sodicidad de diferentes suelos del NO y Centro-E de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, la Plata*. 106 (1): 57-67.

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

Vidal, A. R., R. Gómez y M. L. Suárez. 2004. Los ríos de las regiones semiáridas. *Ecosistemas*. 13(1):16-28.

Welch, E. B., and G. D. Cooke. 1999. Effectiveness and longevity of phosphorus inactivation with alum. *Lake Reservoir Manage.* 15: 5–27.

Wetzel, R. 1981. *Limnología*. Ediciones Omega. Barcelona España. pp. 666.

Wilson, C.E., T.C. Keisling, D.M. Miller, C.R. Dillon, A.D. Pearce, D.L. Frizzell, and P.A. Counce. 2000. Tillage influence on soluble salt movement in silt loam soils cropped to Paddy Rice. *Soil Science Society American Journal*. 64: 1771-1776.

Yermiyahu, U., R. Keren, and Y. Chen. 2001. Effect of Composted Organic Matter on Boron Uptake by Plants. *Soil Science Society American Journal*. 65(5):1436 – 1441.

Zeng, L. y M. C. Shannon, 2000. Effects of salinity on grain yield and yield components of rice at different seeding densities. *Agronomy Journal*. 92:418–423.